



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ**  
**ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ**  
**ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ**  
**ΣΗΜΑΣΙΑΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΜΑΡΙΛΙΑΣ Ι. ΣΑΒΒΑ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων:

**Μάριος Ι. Αναγνωστάκης**

**Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2017**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ**  
**ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ**  
**ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ**  
**ΣΗΜΑΣΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΜΑΡΙΛΙΑΣ Ι. ΣΑΒΒΑ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ**  
**ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. **Μ.Ι. Αναγνωστάκης,**  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
2. **Ε.Π. Χίνης,**  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. **Ν.Π. Πετρόπουλος,**  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ**  
**ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. **Μ.Ι. Αναγνωστάκης,**  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
2. **Ε.Π. Χίνης,**  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. **Ν.Π. Πετρόπουλος,**  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
4. **Α. Κλούβας,**  
Καθηγητής Α.Π.Θ.
5. **Ι.Ε. Σταματελάτος,**  
Ερευνητής Α', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.  
«Δημόκριτος»
6. **Κ. Ελευθεριάδης,**  
Ερευνητής Α', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.  
«Δημόκριτος»
7. **Χ. Τσαμπάρης,**  
Ερευνητής Α', ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

**ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2017**

*«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)»*

# Πρόλογος

---

Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους προσδιορισμού φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον, αποτελεί η μέθοδος της γ-φασματοσκοπίας, μία μη καταστροφική μέθοδος που επιτρέπει την ανίχνευση και τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό μεγάλου πλήθους ισοτόπων. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, ανάλογα με το είδος των αναλυόμενων δειγμάτων, τα ισότοπα των οποίων ενδιαφέρει η ανίχνευση, αλλά και τον τύπο των διατιθέμενων ανιχνευτικών διατάξεων.

Στόχος της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ήταν η αναβάθμιση μίας από τις διατάξεις γ-φασματοσκοπίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., μέσω της εγκατάστασης συστήματος μείωσης του συνεχούς υποστρώματος (Compton Suppression), με στόχο τη βελτίωση των ανιχνευτικών δυνατοτήτων της διάταξης. Το σύστημα αποτελείται από έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή, το καταγραφόμενο σήμα του οποίου συνδυάζεται με το σήμα του πρωτεύοντος ανιχνευτή στον οποίο εγκαθίσταται το σύστημα, με στόχο την μείωση των γεγονότων που οδηγούν στην παραγωγή του συνεχούς υποστρώματος.

Η Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας κατά το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2010 – Σεπτέμβριος 2017. Στο σημείο αυτό, κατ' αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής κ.κ. Μ. Αναγνωστάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., Ε. Χίνη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., και Ν. Πετρόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά την ανάθεση του θέματος, την υποστήριξη και καθοδήγηση κατά την εκτέλεση της εργασίας, καθώς και για την εξασφάλιση της απαραίτητης υλικοτεχνικής υποδομής. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σ. Σιμόπουλο, Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την επιστημονική του συνδρομή σε όλα τα στάδια της Διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τους κ.κ. Α. Κλούβα, Καθηγητή Α.Π.Θ., Ι.Ε. Σταματελάτο, Ερευνητή Α' Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», Κ. Ελευθεριάδη, Ερευνητή Α' Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.

«Δημόκριτος», Χ. Τσαμπάρη, Ερευνητή Α' ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή της Διατριβής.

Ακόμα, ευχαριστώ ιδιαίτερω τον Διδάκτορα Κ. Καρφόπουλο και την Υποψήφια Διδάκτορα Ν. Λυμπερέα για τη διαρκή υποστήριξη τους, καθώς επίσης και τους υπόλοιπους συναδέλφους μου στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας, Διδάκτορες Π. Ρούνη, Λέκτορα Ε.Μ.Π., Δ. Καράγγελο και Α. Νικόγλου για την άψογη συνεργασία.

Για την εκπόνηση της παρούσας Δ.Δ., έλαβα οικονομική ενίσχυση από τον Ε.Λ.Κ.Ε. Ε.Μ.Π. για τέσσερα έτη, υπό μορφή υποτροφίας. Ευχαριστώ τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας και τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών που εισηγήθηκαν θετικά και που γενικά παρείχαν τις απαιτούμενες υποδομές για τις ανάγκες της παρούσας Διατριβής.

Τέλος, η αλήθεια είναι ότι δεν θα είχα ολοκληρώσει αυτή τη Διδακτορική Διατριβή, αν δεν είχα την αμέριστη συμπαράσταση της οικογένειάς μου. Γι' αυτό, τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου, Γιάννη, και την μητέρα μου, Νένα, για την υπομονή τους και την αμέριστη στήριξη στις επιλογές μου.

Αθήνα, Νοέμβριος 2017

Μαρίλια Ι. Σάββα

# Περιεχόμενα

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή.....	1
---------------	---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Συστήματα Compton Suppression για τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος

2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Η μέθοδος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.....	8
2.2.1 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.....	9
2.2.2 Οι γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	10
2.3 Συστήματα μείωσης συνεχούς υποστρώματος Compton Suppression .....	14
2.3.1 Αρχή λειτουργίας συστημάτων Compton Suppression .....	18
2.3.1.1 Κυρίως ή πρωτεύων ανιχνευτής .....	20
2.3.1.2 Δευτερεύων ανιχνευτής ή ενεργητική θωράκιση.....	22
2.3.1.3 Λειτουργία συστήματος Compton Suppression .....	23
2.3.1.3.1 Λειτουργία αντί-σύμπτωσης (anti-coincidence) .....	24
2.3.1.3.2 Λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode).....	26
2.3.1.3.3 Παράλληλη λειτουργία συστήματος Compton Suppression.....	26
2.3.2 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων Compton Suppression.....	28
2.3.3 Συστήματα Compton Suppression για μετρήσεις χαμηλής ραδιενέργειας .....	34
2.4 Το σύστημα Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	44
2.4.1 Τροποποιήσεις υπάρχουσας ανιχνευτικής διάταξης για την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression .....	45
2.4.2 Ηλεκτρονική συγκρότηση του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	48
2.4.3 Το σύστημα μείωσης της συγκέντρωσης του ραδονίου .....	52
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2 .....</b>	<b>57</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.**

3.1	Εισαγωγή.....	61
3.2	Μελέτη γ-ανιχνευτικής διάταξης και διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression.....	62
3.2.1	Μεγέθη για τη μελέτη της απόκρισης γ-ανιχνευτικής διάταξης.....	62
3.2.2	Μεγέθη για τη μελέτη της απόκρισης γ-ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression.....	65
3.3	Μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (anti-coincidence ή suppressed mode) .....	69
3.3.1	Μελέτη υποστρωμάτων.....	69
3.3.1.1	Μελέτη σε επίπεδο συνεχούς υποστρώματος .....	71
3.3.1.2	Μελέτη σε επίπεδο διακριτού υποστρώματος.....	73
3.3.2	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών .....	76
3.3.2.1	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση σημειακών πηγών .....	81
3.3.2.2	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση επιφανειακής πηγής χαμηλής ραδιενέργειας .....	87
3.3.2.3	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών όγκου.....	90
3.3.2.3.1	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών όγκου χαμηλής ραδιενέργειας.....	91
3.3.2.3.2	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών όγκου υψηλής ραδιενέργειας.....	96
3.4	Μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode) .....	98
3.4.1	Μελέτη υποστρωμάτων σε λειτουργία σύμπτωσης .....	100
3.4.1.1	Μελέτη σε επίπεδο συνεχούς υποστρώματος .....	100
3.4.2	Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών .....	102

3.4.2.1 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση σημειακών πηγών .....	102
3.4.2.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση επιφανειακής πηγής χαμηλής ραδιενέργειας .....	105
3.4.2.3 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών όγκου.....	106
3.4.2.3.1 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών όγκου χαμηλής ραδιενέργειας .....	107
3.4.2.3.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών όγκου υψηλής ραδιενέργειας .....	110
3.5 Συμπεράσματα από τη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.....	111

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### ***Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.***

4.1 Εισαγωγή.....	119
4.2 Βαθμονόμηση απόδοσης διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression. ....	119
4.2.1 Πηγές που χρησιμοποιούνται για βαθμονόμηση απόδοσης διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression.....	120
4.3 Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης .....	123
4.3.1 Βαθμονόμηση με δείγμα στερεού KCl.....	124
4.3.2 Βαθμονόμηση με πρότυπο χρώμα ΙΑΕΑ327 πιστοποιημένο από το Δ.Ο.Α.Ε. .	125
4.3.3 Βαθμονόμηση με τα δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03.....	127



4.3.4 Βαθμονόμηση με τα δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης IAEA-TEL-2012-04.....	131
4.3.5 Βαθμονόμηση με τα δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης IAEA-TEL-2013-04.....	133
4.3.6 Συγκεντρωτικές τιμές απόδοσης για τις τυπικές γεωμετρίες του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	134
4.4 Καμπύλες βαθμονόμησης διάταξης XtRa - CSS.....	140
4.5 Κατώτερα όρια ανίχνευσης .....	144

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Προσομοίωση του συστήματος Compton Suppression με τη μέθοδο Monte Carlo**

5.1 Εισαγωγή.....	147
5.2 Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo .....	148
5.2.1 Η χρησιμότητα της προσομοίωσης Monte Carlo σε εφαρμογές γ-φασματοσκοπίας .....	149
5.3 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE .....	150
5.3.1 Αρχεία εισόδου του κώδικα χρήστη <i>penmain</i> .....	152
5.3.2 Εικονικοί ανιχνευτές του κώδικα χρήστη <i>penmain</i> .....	154
5.3.3 Αρχεία εξόδου του κώδικα χρήστη <i>penmain</i> .....	155
5.3.4 Υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης.....	156
5.4 Εκτίμηση γεωμετρικού μοντέλου για προσομοίωση γ-ανιχνευτικής διάταξης. ....	157
5.5 Τροποποίηση του κώδικα χρήστη <i>penmain</i> .....	161
5.5.1 Τροποποίηση του κώδικα χρήστη <i>penmain</i> ώστε να περιλαμβάνει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.....	162
5.5.1.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με τον τροποποιημένο για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης κώδικα <i>penmain</i> .....	163
5.5.1.2 Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης με τον τροποποιημένο κώδικα <i>penmain</i> .....	164
5.5.1.3 Αξιολόγηση του τροποποιημένου για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης κώδικα <i>penmain</i> .....	165

5.5.2	Εισαγωγή στον κώδικα χρήστη <i>renmain</i> της δυνατότητας προσομοίωσης του συστήματος Compton Suppression .....	168
5.5.2.1	Αλλαγές στο αρχείο εισόδου τύπου <i>.in</i> .....	169
5.5.2.2	Αλλαγές στο τμήμα βοηθητικών σχολίων .....	170
5.5.2.3	Αλλαγές στο τμήμα δήλωσης μεταβλητών .....	171
5.5.2.4	Αλλαγές στο τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης.....	173
5.5.2.5	Αλλαγές στο τμήμα τελικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.....	174
5.6	Αξιολόγηση του τροποποιημένου κώδικα χρήστη <i>renmain_css</i> .....	176
5.6.1	Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη <i>renmain_css</i> για λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα).....	179
5.6.1.1	Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη <i>renmain_css</i> για πηγές γεωμετρίας «2» .....	182
5.6.1.2	Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη <i>renmain_css</i> για πηγές γεωμετρίας «8» .....	183
5.6.2	Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη <i>renmain_css</i> για λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode).....	183
5.6.2.1	Αξιολόγηση κώδικα χρήστη <i>renmain_css</i> για πηγές γεωμετρίας «2» σε λειτουργία σύμπτωσης .....	185
5.7	Βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS μέσω προσομοίωσης.....	186
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5</b> .....		193

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **Προσδιορισμός πολύ χαμηλών επιπέδων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα**

6.1	Εισαγωγή.....	201
6.2	Ανάλυση δειγμάτων που έχουν ρυπανθεί από το ατύχημα του Chernobyl.....	202
6.2.1	Ραδιενεργός ρύπανση του Ελλαδικού χώρου από το ατύχημα στο Chernobyl .....	204
6.2.2	Ανάλυση δειγμάτων χώματος με το σύστημα Compton Suppression .....	206

6.3 Ανάλυση δειγμάτων που έχουν ρυπανθεί από το ατύχημα της Fukushima .....	213
6.3.1 Δειγματοληψίες και αναλύσεις ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	214
6.3.2 Δειγματοληψίες και αναλύσεις νερού βροχής στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	222
6.4 Ανίχνευση $^{137}\text{Cs}$ κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο της Αττικής .....	226
6.5 Συμπεράσματα από τη χρήση του συστήματος Compton Suppression για τον προσδιορισμό πολύ χαμηλών επιπέδων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα.....	229
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6</b> .....	233

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **Προσδιορισμός φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και στις υγρές κατακρημνίσεις**

7.1 Εισαγωγή.....	235
7.2 Ισότοπα κοσμικής προέλευσης .....	236
7.2.1 Το ισότοπο κοσμικής προέλευσης $^7\text{Be}$ .....	240
7.2.2 Το ισότοπο κοσμικής προέλευσης $^{22}\text{Na}$ .....	241
7.3 Ισότοπα γήινης προέλευσης.....	243
7.4 Ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ .....	244
7.4.1 Μετρήσεις ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	247
7.4.1.1 Ειδική ραδιενέργεια του $^7\text{Be}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.....	250
7.4.1.2 Ειδική ραδιενέργεια του $^{22}\text{Na}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.....	252
7.4.1.2.1 Ειδική ραδιενέργεια του $^{22}\text{Na}$ για τρίμηνες περιόδους.....	257
7.4.1.3 Ειδική ραδιενέργεια του $^{210}\text{Pb}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.....	259
7.4.1.4 Ειδική ραδιενέργεια του $^{40}\text{K}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ .....	261
7.5 Προσδιορισμός φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό της βροχής.....	262
7.5.1 Μεθοδολογία προσδιορισμού φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό της βροχής.....	264
7.5.1.1 Ειδική ραδιενέργεια του $^7\text{Be}$ στο νερό της βροχής.....	270
7.5.1.2 Ειδική ραδιενέργεια του $^{22}\text{Na}$ στο νερό της βροχής.....	272

7.5.1.3 Ειδική ραδιενέργεια του $^{210}\text{Pb}$ στο νερό της βροχής.....	273
7.5.1.4 Ειδική ραδιενέργεια του $^{40}\text{K}$ στο νερό της βροχής .....	275
7.6 Ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ και νερού της βροχής στη διάταξη XtRa - CSS σε λειτουργία σύμπτωσης.....	276
7.7 Συμπεράσματα από τη χρήση της διάταξης XtRa - CSS για τον προσδιορισμό φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και το νερό της βροχής.....	278

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

### **Εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS**

8.1 Εισαγωγή.....	283
8.2 Η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης .....	283
8.2.1 Η νετρονική ενεργοποίηση στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	286
8.2.2 Βαθμονόμηση της διάταξης νετρονικής ενεργοποίησης στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π..	288
8.2.3 Ακτινοβόληση δειγμάτων στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ....	289
8.3 Συστήματα Compton Suppression για εφαρμογές Νετρονικής Ενεργοποίησης .....	293
8.4 Εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. ....	297
8.4.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2710 .....	299
8.4.1.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2710 για 1 h.....	299
8.4.1.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2710 για 110.5 h.....	301
8.4.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2711 .....	303
8.4.2.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2711 για 1 h.....	303
8.4.2.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2711 για 110.5 h.....	304

8.4.3	Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Fly ash 1633b.....	306
8.4.3.1	Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Fly ash 1633b για 1 h.....	306
8.4.3.2	Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Fly ash 1633b για 110.5 h.....	307
8.4.4	Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Industrial Sludge 2782.....	309
8.4.4.1	Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Industrial Sludge 2782 για 1 h.....	309
8.4.4.2	Ενεργοποίηση πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Industrial Sludge 2782 για 110.5 h.....	310
8.4.5	Ενεργοποίηση του υλικού αναφοράς I.A.E.A. Lake Sediment SL-1.....	312
8.4.5.1	Ενεργοποίηση του υλικού αναφοράς I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 για 1 h.....	312
8.4.5.2	Ενεργοποίηση του υλικού αναφοράς I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 για 110.5 h.....	313
8.5	Συντελεστές βαθμονόμησης.....	314
8.6	Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση.....	322
8.7	Συμπεράσματα από τις εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS.....	324

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9**

9.1	Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Δ.Δ. ....	333
9.2	Επιτεύγματα και σημεία πρωτοτυπίας της Δ.Δ. ....	344
9.3	Δυνατότητες μελλοντικής έρευνας .....	346
9.4	Δημοσιεύσεις – Ανακοινώσεις σε συνέδρια .....	348

<b>Βιβλιογραφία</b> .....	351
---------------------------	-----

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

### **Παράρτημα Α: Λίστα φασμάτων Δ.Δ.**

**Παράρτημα Β:** Διαγράμματα διάσπασης

**Παράρτημα Γ:** Στατιστικά μεγέθη και έλεγχοι

**Παράρτημα Δ:** Πιστοποιητικά πηγών

**Παράρτημα Ε:** Δομή του κώδικα PENELOPE

**Παράρτημα ΣΤ:** Βαθμονομήσεις απόδοσης με μεθόδους προσομοίωσης Monte Carlo

**Παράρτημα Ζ:** Στοιχεία δειγματοληψιών ατμοσφαιρικού αεροζόλ

**Παράρτημα Η:** Δεδομένα νετρονικής ενεργοποίησης

**Παράρτημα Θ:** Αναλύσεις δειγμάτων νετρονικής ενεργοποίησης με το πρόγραμμα

ANGES

# Περίληψη

---

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή (Δ.Δ.) είχε ως αντικείμενο τον προσδιορισμό πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα, με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας. Όπως είναι γνωστό, φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, με χαμηλή ή υψηλότερη ειδική ραδιενέργεια περιέχονται και είναι δυνατό να ανιχνεύονται σε πάσης φύσεως περιβαλλοντικά δείγματα. Ακόμα και στην περίπτωση όπου, λόγω της χαμηλής ειδικής ραδιενέργειας των δειγμάτων, η ραδιοβιολογική σημασία των ισοτόπων είναι αμελητέα, η ανίχνευσή τους μπορεί να έχει ενδιαφέρον σε διάφορες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα κατά τη χρήση τους ως ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών. Επιπλέον, η βελτίωση των επιπέδων ανίχνευσης ενός ισοτόπου από μία γ-φασματοσκοπική διάταξη, μπορεί να επιτρέψει την ανίχνευση του ισοτόπου σε δείγματα μικρότερου όγκου, χωρίς σημαντικό συμβιβασμό στην ακρίβεια της μέτρησης, κάτι που έχει προφανείς συνέπειες κατά το σχεδιασμό της δειγματοληψίας. Καθώς το υπόστρωμα μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης είναι ένας παράγοντας που καθορίζει την ικανότητα ανίχνευσης χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας σε ένα δείγμα, η μείωσή του είναι πάντα άκρως επιθυμητή.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. έγινε η εγκατάσταση, μελέτη και αξιοποίηση του νέου συστήματος Compton Suppression (CSS), το οποίο εγκαταστάθηκε στον ανιχνευτή XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., με στόχο τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος του ανιχνευτή και τη βελτίωση των ανιχνευτικών δυνατοτήτων του ανιχνευτικού συστήματος XtRa - CSS. Η συγκρότηση της διάταξης επιτρέπει την ταυτόχρονη συλλογή δύο φασμάτων με μειωμένο (suppressed) ή όχι (unsuppressed) το συνεχές υπόστρωμα. Στο πλαίσιο της μελέτης που έγινε, χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά από δείκτες, οι οποίοι αναφέρονται στη βιβλιογραφία, μέσω των οποίων διαπιστώθηκε η επίδραση των διαφόρων φαινομένων τα οποία παρατηρούνται κατά την ανίχνευση των γ-φωτονίων από το σύστημα, και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης της διάταξης, όσο και κατά τη διάρκεια αναλύσεων ρουτίνας. Ως αποτέλεσμα της μελέτης αυτής γίνεται πρόταση για τις βέλτιστες συνθήκες ανίχνευσης καθενός ισοτόπου ξεχωριστά. Στη συνέχεια, η διάταξη βαθμονομήθηκε πειραματικά αλλά και με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για μία σειρά από γεωμετρικές πηγής-ανιχνευτή. Για το σκοπό

αυτό χρειάστηκε να τροποποιηθεί ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE που χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., ώστε να λαμβάνει υπόψη τόσο το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης φωτονίων (true coincidence) κατά τη διάρκεια συλλογής του φάσματος, όσο και για να προσομοιώνει ένα σύστημα Compton Suppression, που αποτελείται από δύο ανεξάρτητους ανιχνευτές (πρωτεύων ανιχνευτής και δευτερεύων ανιχνευτής ή ενεργητική θωράκιση) οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους.

Από τους βασικούς στόχους της Δ.Δ. ήταν η ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις σε περιβαλλοντικά δείγματα. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν κατάλληλες τεχνικές δειγματοληψίας ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και προετοιμασίας δείγματος και αναλύθηκε μεγάλο πλήθος δειγμάτων, κυρίως (α) δείγματα που έχουν ρυπανθεί από τα πυρηνικά ατυχήματα στο Chernobyl και στη Fukushima, (β) δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων. Από τις αναλύσεις αυτές κατέστη δυνατή η ανίχνευση στο έδαφος  $^{241}\text{Am}$  από την εποχή του Chernobyl και η συσχέτισή του με τη συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$ . Επίσης, κατέστη δυνατή η ανίχνευση στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και στις υγρές κατακρημνίσεις ισοτόπων εξαιτίας του ατυχήματος στη Fukushima σε επίπεδα λίγων δεκάδων  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ , αλλά και φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων γήινης και κοσμικής προέλευσης, όπως το  $^{210}\text{Pb}$ , το  $^7\text{Be}$  αλλά και το  $^{22}\text{Na}$  – το οποίο ανιχνεύεται με εξαιρετική δυσκολία, λόγω της χαμηλής ραδιενέργειάς του, της τάξης του  $1\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  – ισότοπα τα οποία χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία ως ιχνηλάτες ατμοσφαιρικών διεργασιών.

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια και η τεχνική της νετρονικής ενεργοποίησης για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό μίας σειράς μη ραδιενεργών ιχνοστοιχείων. Η ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS αξιοποιήθηκε, με στόχο την ανίχνευση περισσότερων στοιχείων και τη βελτίωση των επιπέδων ανίχνευσής τους. Στο πλαίσιο της Δ.Δ., η εφαρμογή μίας σειράς σεναρίων ακτινοβόλησης – γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, σε συνδυασμό με τη χρήση του συστήματος XtRa - CSS, οδήγησε στην ανίχνευση 15 στοιχείων και ιχνοστοιχείων (Al, As, Au, Cu, Eu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Na, Sb, Sc, Zn) και βελτίωσε τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης έως και 7 φορές σε σχέση με το παρελθόν. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης που επιτρέπουν τον ποσοτικό προσδιορισμό των παραπάνω στοιχείων σε περιβαλλοντικά δείγματα όπως: χώμα, ιπτάμενη τέφρα, θαλάσσιο ίζημα και βιομηχανική σκωρία.



# ***Extended Abstract***

---

The aim of this PhD Thesis was the determination of very low concentrations of natural and artificial radioactive isotopes in environmental samples by means of gamma-spectroscopy techniques. Natural and artificial radioactive isotopes of low or higher specific activity are contained and can be detected in any environmental sample. Even when their specific activity is low, leading to negligible radiobiological significance, their detection is of interest in various applications, such as their use as tracers for environmental processes. In addition, improving the levels of detection of an isotope using a  $\gamma$ -spectroscopic apparatus, may allow the detection of the isotope in smaller volume samples without significant compromise on the accuracy of the measurement, which has obvious consequences in the design of the sampling. Since the background of a  $\gamma$ -spectroscopic apparatus is a factor determining the ability to detect low levels of radioactivity in a sample, its reduction is always highly desirable.

In the framework of the Thesis the installation, study and use of the new Compton Suppression system (CSS), which was installed on the XtRa detector of the N.E.D. - N.T.U.A was carried out, aiming the reduction the continuous background of the detector and the improvement of the detection limits of the XtRa - CSS apparatus. The electronic set-up of the apparatus allows for the simultaneous collection of two spectra with a suppressed or not (unsuppressed) continuous background. In the framework of the study, a series of response factors were used, as referred in literature, through which the effect of various phenomena observed in the detection of photons by the Compton Suppression system was identified, and should be taken into account both during the calibration of the device, and during routine analyzes. As a result of this study, the optimal conditions for the detection of each isotope are proposed. The device was then calibrated experimentally but also using Monte Carlo simulation techniques for a series of source-to-detector geometries. For this purpose, it was necessary to modify the PENELOPE simulation code used in the N.E.D. - N.T.U.A in order to take into account both the true coincidence phenomenon during spectrum collection and to simulate a Compton

Suppression system consisting of two independent detectors (primary detector and secondary detector or active shield) that communicate with each other.

One of the main objectives of the Thesis was the detection of radioactive isotopes found at very low concentrations in environmental samples. For this purpose appropriate sampling techniques for atmospheric aerosols and liquid atmospheric precipitations and sample preparation were developed and a large number of samples were analyzed, mainly (a) contaminated samples due to the nuclear accidents in Chernobyl and Fukushima, (b) atmospheric aerosol and precipitation samples. From these analyzes it was possible to detect  $^{241}\text{Am}$  from the Chernobyl accident and a strong correlation with the  $^{137}\text{Cs}$  concentration was found. In addition, the use of the Compton Suppression System allowed for the detection of artificial radioactive isotopes due to the Fukushima accident in atmospheric aerosol and precipitation samples, in concentration of the order of a few tens of  $\text{mBq/m}^3$ , as well as the detection of natural radioactive isotopes of earth and cosmic origin such as  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  and  $^{22}\text{Na}$  – which is extremely difficult to detect because of its very low radioactivity, of  $1 \mu\text{Bq/m}^3$  – isotopes that are used in the literature as tracers for atmospheric processes.

At N.E.D. - N.T.U.A the technique of neutron activation for the detection and quantification of a series of non-radioactive trace elements has been applied for many years. The XtRa - CSS apparatus was also used to detect more elements and to improve the detection limits of the method. In the framework of the Thesis, a series of irradiation- $\gamma$ -spectroscopic analysis scenarios were examined, which, combined to the use of the XtRa - CSS apparatus, allowed for the detection of 15 elements and trace elements (Al, As, Au, Cu, Eu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Na, Sb, Sc, Zn) and improved the lower limits of detection up to 7 times compared to the past. In addition, the appropriate calibration coefficients were determined to allow the quantification of the above elements in environmental samples such as soil, fly ash, marine sediment and industrial slag.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

---

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή (Δ.Δ.) εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. (Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.), με αντικείμενο τον προσδιορισμό πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα, με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας. Όπως είναι γνωστό, φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, με χαμηλή ή υψηλότερη ειδική ραδιενέργεια, περιέχονται και είναι δυνατό να ανιχνεύονται σε πάσης φύσεως περιβαλλοντικά δείγματα. Ακόμα και στην περίπτωση όπου, λόγω της χαμηλής ειδικής ραδιενέργειας των δειγμάτων, η ραδιοβιολογική σημασία των ισοτόπων είναι αμελητέα, η ανίχνευσή τους μπορεί να έχει ενδιαφέρον σε διάφορες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα κατά τη χρήση τους ως ιχνηλάτες περιβαλλοντικών διεργασιών. Καθώς το υπόστρωμα μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης είναι ένας παράγοντας που καθορίζει την ικανότητα ανίχνευσης χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας σε ένα δείγμα, η μείωσή του είναι πάντα άκρως επιθυμητή. Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι, εκτός των άλλων, η βελτίωση των επιπέδων ανίχνευσης ενός ισοτόπου από μία γ-φασματοσκοπική διάταξη, μπορεί να επιτρέψει την ανίχνευση του ισοτόπου σε δείγματα μικρότερου όγκου, χωρίς σημαντικό συμβιβασμό στην ακρίβεια της μέτρησης, κάτι που μπορεί να έχει προφανείς συνέπειες κατά το σχεδιασμό της δειγματοληψίας.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. μελετήθηκε και αξιοποιήθηκε το νέο σύστημα Compton Suppression (C.S.S.), το οποίο εγκαταστάθηκε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., με στόχο τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa του Εργαστηρίου και τη βελτίωση των ανιχνευτικών δυνατοτήτων του. Επισημαίνεται ότι τέτοιου είδους συστήματα δεν παρέχονται με τυποποιημένες γεωμετρικές διαστάσεις και σε κάθε

περίπτωση το σύστημα σχεδιάζεται από το χρήστη, προκειμένου να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του. Το σύστημα Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. αποτελείται από ανιχνευτή NaI (δευτερεύων ανιχνευτής ή ενεργητική θωράκιση) σε συνδυασμό με τον ανιχνευτή XtRa (πρωτεύων ανιχνευτής). Η αρχή λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression είναι η εξής: όταν ο δευτερεύων ανιχνευτής ανιχνεύσει ένα γεγονός αλληλεπίδρασης φωτονίου συγχρόνως με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή, δίνει κατάλληλο ηλεκτρονικό σήμα ώστε να μην καταγραφεί η αντίστοιχη αλληλεπίδραση στον πρωτεύοντα ανιχνευτή, καθώς πρόκειται για φωτόνιο που προέρχεται από σκέδαση Compton, το οποίο συνεισφέρει στη δημιουργία του συνεχούς υποστρώματος της διάταξης. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε μείωση του συνεχούς υποστρώματος και βελτιώνει τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης του πρωτεύοντα ανιχνευτή.

Στο **Κεφάλαιο 2** της Δ.Δ. δίνονται εισαγωγικά στοιχεία για τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και ειδικότερα για την εφαρμογή τεχνικών τέτοιας ανάλυσης στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος Compton Suppression, περιγράφονται οι βασικές συνιστώσες του και πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, με στόχο την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των συστημάτων αυτών. Συστήματα Compton Suppression δεν απαντώνται ευρέως σε διεθνές επίπεδο, κυρίως λόγω πολυπλοκότητας και κόστους, ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο σύστημα Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., καθώς και στις τροποποιήσεις που ήταν απαραίτητο να γίνουν στην υπάρχουσα διάταξη του ανιχνευτή XtRa, ώστε να είναι δυνατή η εγκατάστασή του. Η σύνδεση των ηλεκτρονικών μονάδων της διάταξης επιλέχθηκε να γίνει με τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη συλλογή δύο φασμάτων: ενός συμβατικού (unsuppressed) και ενός με μειωμένο υπόστρωμα (suppressed), όταν η διάταξη είναι ρυθμισμένη σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (anti-coincidence mode). Εναλλακτικά, η διάταξη μπορεί να ρυθμιστεί σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode), οπότε λαμβάνονται πάλι δύο φάσματα: συμβατικό (unsuppressed) και σύμπτωσης (coincidence).

Η μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression που εγκαταστάθηκε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. παρουσιάζεται στο **Κεφάλαιο 3**. Πραγματοποιείται μία εκτεταμένη σειρά από συγκριτικά πειράματα της απόκρισης του συστήματος, τόσο πριν και μετά την εγκατάσταση, όσο και με και χωρίς τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης (suppressed και unsuppressed φάσματα, coincidence και unsuppressed φάσματα). Μελετώνται φάσματα υποστρώματος – σε όρους συνεχούς και διακριτού υποστρώματος – και φάσματα που ελήφθησαν με ραδιενεργές πηγές σε διάφορες γεωμετρίες, οι οποίες ήταν διαθέσιμες στο Εργαστήριο κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ. Σημειώνεται ότι η μελέτη είναι συγκριτική, ανάμεσα στη λειτουργία χωρίς και με το σύστημα Compton Suppression, και για το λόγο αυτό είναι ήσσονος σημασίας η χρήση πιστοποιημένων πηγών.

Στο **Κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται η πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της νέας ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Η απόκριση και η απόδοση ενός συστήματος Compton Suppression εξαρτώνται σημαντικά από το εξεταζόμενο κάθε φορά ισότοπο και την ένταση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence). Ως εκ τούτου, υπολογίζονται αποδόσεις για διάφορα ισότοπα, τεχνητά και φυσικά, τόσο μονοενεργειακά – όπως  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$  – όσο και ισότοπα που υπόκεινται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης – όπως  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  – για τις τυπικές γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Επίσης, υπολογίζονται τα κατώτερα όρια ανίχνευσης για τυπικές περιπτώσεις δειγμάτων που αναλύονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., με σκοπό τη διερεύνηση της βελτίωσης που εισάγει η χρήση συστήματος Compton Suppression.

Καθώς η βαθμονόμηση απόδοσης ενός συστήματος Compton Suppression με τις συμβατικές μεθοδολογίες δεν είναι πάντοτε εύκολη, στο πλαίσιο της Δ.Δ. εφαρμόστηκαν και τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo. Προς την κατεύθυνση της βαθμονόμησης με προσομοίωση, χρησιμοποιείται ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE ο οποίος τροποποιείται κατάλληλα ώστε να μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία ενός συστήματος Compton Suppression. Στόχος της συγκεκριμένης τροποποίησης είναι η εισαγωγή της δυνατότητας προσομοίωσης δύο ανιχνευτών, οι οποίοι να «επικοινωνούν» μεταξύ τους, ώστε να προσομοιώνεται ένα φωτόνιο το

οποίο αλληλεπιδρά με δύο διαφορετικούς ανιχνευτές. Στο **Κεφάλαιο 5** δίνονται αρχικά βασικές πληροφορίες για τον κώδικα PENELOPE και περιγράφονται συνοπτικά οι τροποποιήσεις που έγιναν για την εισαγωγή, αρχικά του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και στη συνέχεια της δυνατότητας προσομοίωσης της ενεργητικής θωράκισης. Ο τροποποιημένος κώδικας συγκρίνεται με πειραματικά δεδομένα για δύο τυπικές γεωμετρίες όγκου, αξιολογείται και τελικά χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση απόδοσης του νέου ανιχνευτικού συστήματος για τις τρεις γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται ευρέως στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Έχοντας μελετήσει την απόκριση του νέου συστήματος και εκτιμήσει την απόδοσή του είναι δυνατή η χρήση του για την ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων χαμηλών συγκεντρώσεων σε τεχνητά και φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται αναλύσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων με σκοπό την ανίχνευση τεχνητών ραδιενεργών ισωτόπων. Πιο συγκεκριμένα, η ανιχνευτική διάταξη ΧtRa - CSS χρησιμοποιείται για την ανάλυση τριών τύπων δειγμάτων:

- (α) Δείγματα χώματος τα οποία είχαν συλλεχθεί από όλη την Ελλάδα αμέσως μετά από το ατύχημα στο Chernobyl. Στα δείγματα αυτά δεν είχε αρχικά ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$  (με εξαίρεση δύο περιπτώσεις), παρόλο που αποδεδειγμένα είχε φτάσει στην Ελλάδα. Στο πλαίσιο της Δ.Δ. αναλύθηκαν πάλι στην ανιχνευτική διάταξη ΧtRa - CSS σειρά δειγμάτων χώματος από τις πλέον επιβαρυσμένες σε  $^{137}\text{Cs}$  περιοχές με σκοπό την ανίχνευση του  $^{241}\text{Am}$ .
- (β) Δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων αμέσως μετά από το ατύχημα στη Fukushima. Η ανιχνευτική διάταξη ΧtRa - CSS χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση των τεχνητών ισωτόπων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{137}\text{Cs}$  σε συγκεντρώσεις της τάξεως των λίγων δεκάδων  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .
- (γ) Δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ για την ανίχνευση  $^{137}\text{Cs}$  από την καύση βιομάζας στην περιοχή των Αθηνών.

Η χρήση του συστήματος Compton Suppression για τη μελέτη περιβαλλοντικών δειγμάτων χαμηλών συγκεντρώσεων σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα παρουσιάζεται στο **Κεφάλαιο 7**. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι συστηματικές δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ., με σκοπό την ανίχνευση

ισοτόπων κοσμικής ( $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ) και γήινης ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) προέλευσης. Οι βάσεις της μεθοδολογίας δειγματοληψίας και ανάλυσης τέτοιων δειγμάτων είχαν τεθεί σε άλλες εργασίες οι οποίες εστίασαν στο  $^7\text{Be}$ : Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012), Δ.Ε. (Σάββα, 2009), Δ.Ε. (Μπασιάς, 2013). Στην παρούσα Δ.Δ. η μεθοδολογία επεκτάθηκε και σε άλλα ισότοπα και βελτιώθηκε όσον αφορά στις αναλύσεις δειγμάτων υγρών κατακρημνίσεων. Στα ισότοπα που μελετώνται προστέθηκε το κοσμικής προέλευσης  $^{22}\text{Na}$ , το οποίο συμπεριφέρεται όπως και το  $^7\text{Be}$ , αλλά ανιχνεύεται σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις (τάξη μεγέθους λίγων  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ) – απαιτώντας δειγματοληψίες μεγάλου όγκου και αναλύσεις μεγάλης διάρκειας – και το γήινης προέλευσης φυσικό ραδιενεργό ισότοπο  $^{210}\text{Pb}$ , το οποίο είναι θυγατρικό ισότοπο του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ). Όσον αφορά στις αναλύσεις βρόχινου νερού, μετά από ενδελεχή βιβλιογραφική ανασκόπηση, προτείνεται νέα μέθοδος επεξεργασίας των συλλεγομένων υγρών ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ρητίνης ανταλλαγής ιόντων (ρητίνη κατιόντων).

Μια από τις βασικές μεθόδους πυρηνικής τεχνολογίας στην οποία χρησιμοποιούνται ευρέως συστήματα Compton Suppression είναι η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης (Neutron Activation Analysis – NAA). Η μέθοδος βασίζεται στην ακτινοβολήση ενός δείγματος με νετρόνια, με σκοπό ορισμένα μη ραδιενεργά ισότοπα των περιεχόμενων στο δείγμα στοιχείων να γίνουν ραδιενεργά. Τα ενεργοποιημένα δείγματα στη συνέχεια αναλύονται με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας, με σκοπό τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των περιεχόμενων στο δείγμα ισοτόπων. Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή των συστημάτων Compton Suppression που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την εν λόγω μέθοδο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειράματα νετρονικής ενεργοποίησης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. με χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS και σκοπό έχουν τη βελτίωση των ανιχνευτικών δυνατοτήτων του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Μελετώνται πιστοποιημένα δείγματα χώματος, ιπτάμενης τέφρας, βιομηχανικής ιλύος και ιζήματος λίμνης, ενώ εξετάζονται δύο σενάρια ενεργοποίησης. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει ενεργοποίηση για 1 h και στη συνέχεια άμεση ανάλυση στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για 15 min και αποσκοπεί στην ανίχνευση πιο βραχύβιων ισοτόπων. Το

δεύτερο σενάριο στοχεύει στην ανίχνευση πιο μακρόβιων ισοτόπων και περιλαμβάνει ενεργοποίηση για 110.5 h και στη συνέχεια γ-φασματοσκοπική ανάλυση για διάφορα χρονικά διαστήματα. Στόχος των διαφόρων σεναρίων ακτινοβολήσης - ανάλυσης είναι η εύρεση του βέλτιστου σεναρίου για κάθε ανιχνευόμενο στοιχείο, σε όρους επιπέδου ανίχνευσης και αβεβαιότητας προσδιορισμού. Για το βέλτιστο σενάριο, υπολογίζονται κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης για κάθε ανιχνευόμενο στοιχείο, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ποσοτικό προσδιορισμό του σε άγνωστο δείγμα.

Το **Κεφάλαιο 9** αποτελεί τον επίλογο της Δ.Δ. όπου συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα, παρουσιάζονται τα επιτεύγματα και τα στοιχεία πρωτοτυπίας της και προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας. Τέλος, παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις που προέκυψαν στο πλαίσιο της έρευνας που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Δ.Δ.

Η Διατριβή ολοκληρώνεται με 9 Παραρτήματα (Α - Θ), τα οποία συμπληρώνουν το κυρίως κείμενο της.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ***Συστήματα Compton Suppression για τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος***

---

### **2.1 Εισαγωγή**

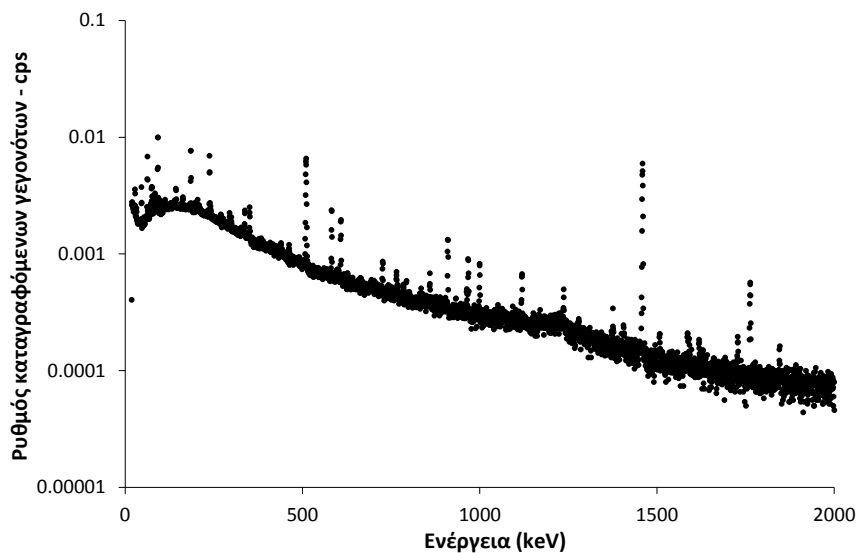
Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία παρουσίαση των συστημάτων Compton Suppression που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης, με έμφαση στο σύστημα που έχει εγκατασταθεί στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. (Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.). Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στη μέθοδο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και ειδικότερα στην εφαρμογή τεχνικών γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Περιγράφονται εν συντομία οι γ-ανιχνευτικές διατάξεις που είναι διαθέσιμες στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αναβάθμιση μιας εξ' αυτών, μέσω της εγκατάστασης συστήματος μείωσης του συνεχούς υποστρώματος (Compton Suppression), η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Διδακτορικής Διατριβής (Δ.Δ.). Η χρήση τέτοιων συστημάτων σε συνδυασμό με γ-ανιχνευτικές διατάξεις είναι γνωστή ήδη από τις δεκαετίες 1940 και 1950 και αναφέρεται από πολλούς ερευνητές. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος Compton Suppression, περιγράφονται οι βασικές συνιστώσες του και πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή της χρήσης τέτοιων συστημάτων, τόσο γενικά όσο και ειδικότερα σε μετρήσεις χαμηλής ραδιενέργειας, που αποτελούν και το αντικείμενο της Δ.Δ. Πρέπει να αναφερθεί ότι τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης, ανασκόπηση των οποίων γίνεται σε επόμενο Κεφάλαιο. Τέλος, στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται με λεπτομέρεια το

σύστημα Compton Suppression (Compton Suppression System, CSS) που εγκαταστάθηκε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., καθώς και όλες οι τροποποιήσεις που ήταν απαραίτητο να γίνουν σε ήδη λειτουργούσα ανιχνευτική διάταξη για την εγκατάστασή του.

## 2.2 Η μέθοδος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους προσδιορισμού φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, καθώς πρόκειται για μια μη καταστροφική μέθοδο, η οποία επιτρέπει την ανίχνευση και τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό μεγάλου πλήθους ισοτόπων.

Η μέθοδος στηρίζεται στην ανίχνευση των φωτονίων, τα οποία εκπέμπονται από τους πυρήνες των εξεταζόμενων ραδιενεργών ισοτόπων κατά τη διάσπασή τους. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια αλληλεπιδρούν με κατάλληλο ανιχνευτή, παράγοντας ηλεκτρικούς παλμούς, οι οποίοι καταγράφονται υπό τη μορφή ενεργειακού φάσματος, το οποίο ονομάζεται γ-φάσμα. Ένα τυπικό ενεργειακό γ-φάσμα φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Τυπικό γ-φάσμα.

Στο γ-φάσμα εμφανίζονται κορυφές οι οποίες αντιστοιχούν σε φωτόνια που αποθέτουν πλήρως την ενέργειά τους στον ανιχνευτή. Οι κορυφές αυτές ονομάζονται φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης ή πλήρους απόθεσης ενέργειας και χρησιμοποιούνται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των αντίστοιχων ισοτόπων.

Η θέση των φωτοκορυφών στο γ-φάσμα αντιστοιχεί στην ενέργεια των φωτονίων που ανιχνεύθηκαν και επομένως μπορεί να οδηγήσει στον προσδιορισμό του πυρήνα από τον οποίο προέρχονται (ποιοτικός προσδιορισμός). Επιπλέον, η επιφάνειά τους είναι ανάλογη του πλήθους των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμφθηκαν από τη διάσπαση των πυρήνων και συνεπώς αποτελεί μέτρο της ραδιενέργειας του συγκεκριμένου ισότοπου στο δείγμα που αναλύεται (ποσοτικός προσδιορισμός).

### 2.2.1 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. η μέθοδος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης εφαρμόζεται ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Πραγματοποιούνται συστηματικά μετρήσεις της συγκέντρωσης φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισότοπων σε ποικιλία δειγμάτων, όπως: χώμα, νερό, τρόφιμα, οικοδομικά υλικά, υλικά NORM<sup>1</sup>, όπως ιπτάμενη τέφρα κλπ. Επίσης, μέσω δειγματοληψίας ατμοσφαιρικού αέρα σε κατάλληλα φίλτρα προσδιορίζεται συστηματικά και η συγκέντρωση ραδιενεργών ισότοπων στα ατμοσφαιρικά αερολύματα.

Με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας προσδιορίζονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ισότοπα των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών: <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>235</sup>U, το φυσικό ισότοπο <sup>40</sup>K, πλήθος από τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα (π.χ. ισότοπα που αποτέθηκαν στο έδαφος εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl, όπως: <sup>95</sup>Zn, <sup>95</sup>Nb, <sup>90</sup>Mo, <sup>103</sup>Ru, <sup>131</sup>I, <sup>132</sup>Te, <sup>132</sup>I, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>140</sup>Ba, <sup>140</sup>La, <sup>141</sup>Ce, <sup>152</sup>Eu, <sup>241</sup>Am, ισότοπα προϊόντα νετρονικής ενεργοποίησης), καθώς και το κοσμογενές ισότοπο <sup>7</sup>Be.

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. συνεχώς βελτιώνονται, σε όρους κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης και ακρίβειας, ενώ συγχρόνως καταβάλλεται προσπάθεια για την ανίχνευση και νέων ισότοπων. Τμήμα της σχετικής έρευνας που πραγματοποιείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. έχει δημοσιευτεί και μπορεί να αναζητηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία (Simopoulos, et al., 1987), (Simopoulos, 1989), (Anagnostakis, et al., 1995), (Anagnostakis, et al., 1996), (Petropoulos, et al., 1996), (Anagnostakis, et al., 2001), (Petropoulos, et al., 2002), (Anagnostakis, et al., 2004), (Karangelos, et al., 2004), (Anagnostakis, et al., 2005), (Karangelos, et al., 2005), (Papandreou, et al., 2011) κλπ.

<sup>1</sup> Naturally Occurring Radioactive Materials

### 2.2.2 Οι γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. είναι εγκατεστημένες και χρησιμοποιούνται για γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις πέντε ανιχνευτικές διατάξεις με ημιαγωγούς ανιχνευτές υπέρ-καθαρού Γερμανίου (HPGe). Οι τέσσερις από αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιούνται για μετρήσεις στο εργαστήριο (in vitro), ενώ η πέμπτη ενδείκνυται για μετρήσεις στο πεδίο (in situ). Στη συνέχεια, δίνονται περισσότερες πληροφορίες για τις διατάξεις αυτές:

- Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (**High Purity Germanium, HPGe**). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1983. Οι επιμέρους συνιστώσες της είναι:
  - Ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe), της Canberra Industries (CI)
  - Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D της CI
  - Προενισχυτής τύπου 2001 της CI
  - Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI
  - Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8701 της CI
  - Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-550 της CI
  - Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN<sub>2</sub>), τύπου 1786 της CI



Εικόνα 2.2: Ο ανιχνευτής HPGe σχετικής απόδοσης 33.8% του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διάταξη βασίζεται σε ομοαξονικό ανιχνευτή HPGe διαμέτρου 55.3 mm, ύψους 65 mm και σχετικής απόδοσης 33.8%. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε κρουστάτη από ΑΙ και επομένως η απόδοσή του για φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι χαμηλή. Η διακριτική του ικανότητα, όπως εκφράζεται από το FWHM:

- για φωτόνια ενέργειας 122.06 keV είναι 0.85 keV
- για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 1.78 keV

Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 66.5:1.

- Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή γερμανίου χαμηλών ενεργειών (**Low Energy Germanium, LEGe**). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1988 και είναι κατάλληλα βαθμονομημένη ώστε να χρησιμοποιείται για την ανίχνευση φωτονίων εναλλακτικά στις ενεργειακές περιοχές 20 – 200 keV ή 20 – 2000 keV. Οι επιμέρους συνιστώσες της διάταξης είναι:

- Επίπεδος ανιχνευτής γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe), της CI
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3105 της CI
- Προενισχυτής τύπου 2001CP της CI, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη
- Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI
- Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8075 της CI
- Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-550 της CI
- Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN<sub>2</sub>), τύπου 1786A της CI

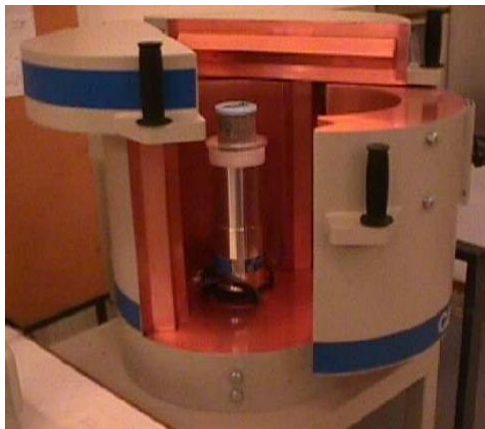


Εικόνα 2.3: Ο ανιχνευτής LEGe του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διάταξη βασίζεται σε επίπεδο ανιχνευτή από υπερκάθαρο γερμάνιο τύπου η, κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 50.5 mm, επιφάνειας 2000 mm<sup>2</sup> και ύψους 20 mm. Το παράθυρο του κρυοστάτη είναι κατασκευασμένο από Be πάχους 0.5 mm, με συνέπεια η εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών να είναι πολύ μικρή. Λόγω του μικρού πάχους του, το παράθυρο του Be είναι εξαιρετικά ευαίσθητο. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε όρους FWHM είναι:

- για φωτόνια ενέργειας 5.9 keV είναι 341 eV
- για φωτόνια ενέργειας 122 keV είναι 530 eV

- Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή γερμανίου εκτεταμένου εύρους (**Extended Range, XtRa**). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1999 και οι επιμέρους συνιστώσες της είναι:
  - Ομοαξονικός ανιχνευτής γερμανίου εκτεταμένου εύρους (XtRa), της CI
  - Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D της CI
  - Προενισχυτής τύπου 2002CSL της CI, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη
  - Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2026 της CI
  - Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8701 της CI
  - Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-556A της CI
  - Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου (LN<sub>2</sub>), τύπου 1786A της CI
  - Θωράκιση, τύπου 767 της CI



Εικόνα 2.4: Ο ανιχνευτής XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διάταξη βασίζεται σε ομοαξονικό ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου διαμέτρου 80 mm, ύψους 78 mm και σχετικής απόδοσης 104.5%. Η απόσταση του κρυστάλλου από τον κρυοστάτη είναι 5 mm και το παράθυρο του κρυοστάτη είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα πάχους 0.5 mm, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Λόγω των διαστάσεων του κρυστάλλου και των χαρακτηριστικών του παραθύρου του κρυοστάτη, ο ανιχνευτής εμφανίζει υψηλή απόδοση σε μεγάλο ενεργειακό εύρος. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, σε όρους εύρους ημίσειας ύψους (FWHM), είναι:

- για ενέργεια φωτονίων 122.06 keV είναι 1.03 keV
- για ενέργεια φωτονίων 1332.5 keV είναι 2.043 keV

Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 82.2:1.

- Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή γερμανίου ευρείας ενεργειακής περιοχής (**Broad Energy Germanium, BEGe**). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 2003 και οι συνιστώσες της είναι:
  - Ανιχνευτής BEGe τύπου BE3825 της CI
  - Προενισχυτής τύπου 7935-SL7, ενσωματωμένος στον κρυοστάτη
  - Μονάδα Inspector 2000 της CI στην οποία είναι ενσωματωμένες όλες οι ηλεκτρονικές μονάδες παροχής υψηλής τάσης, λήψης και επεξεργασίας ηλεκτρικού σήματος που απαιτούνται για την λειτουργία του ανιχνευτή.

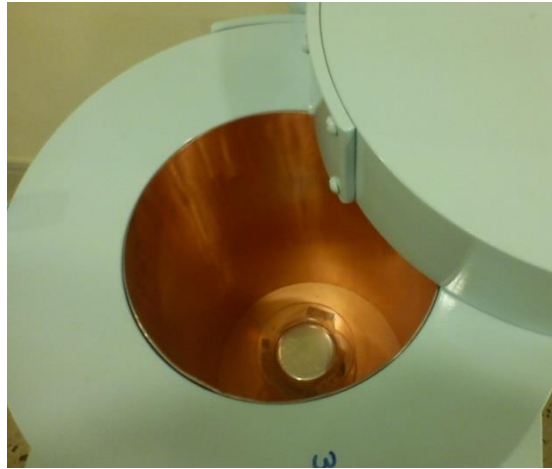


Εικόνα 2.5: Η in-situ διάταξη BEGe του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διάταξη βασίζεται σε ανιχνευτή διαμέτρου 70 mm, πάχους 25 mm (επιφάνεια  $3800 \text{ mm}^2$ ), ο οποίος χρησιμοποιείται για την επιτόπια (in situ) λήψη φάσματος και σε σύγκριση με τους συνηθισμένους in situ ανιχνευτές γερμανίου παρουσιάζει ιδιαίτερα καλές επιδόσεις, σε όρους απόδοσης και διακριτικής ικανότητας, σε όλο το ενεργειακό εύρος λειτουργίας του. Ο ανιχνευτής διαθέτει παράθυρο από ανθρακονήματα που επιτρέπει την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Η διακριτική του ικανότητα σε όρους εύρους ημίσεως ύψους (FWHM) είναι:

- για ενέργεια φωτονίων 5.9 keV είναι 0.440 keV
  - για ενέργεια φωτονίων 122 keV είναι 0.658 keV
  - για ενέργεια φωτονίων 1332.5 keV είναι 1.780 keV
- Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (**High Purity Germanium, HPGe**). Αποτελεί τη νεότερη ανιχνευτική διάταξη του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., καθώς τέθηκε σε λειτουργία το 2012. Οι επιμέρους συνιστώσες της διάταξης είναι:
    - Ομοαξονικός ανιχνευτής γερμανίου (HPGe) της CI

- Μονάδα LYNX<sup>®</sup> της CI στην οποία είναι ενσωματωμένες όλες οι ηλεκτρονικές μονάδες παροχής υψηλής τάσης, λήψης και επεξεργασίας ηλεκτρικού σήματος που απαιτούνται για την λειτουργία του ανιχνευτή.



Εικόνα 2.6: Ο ανιχνευτής HPGe σχετικής απόδοσης 40.9% του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διάταξη βασίζεται σε ομοαξονικό ανιχνευτή διαμέτρου 59.5 mm, ύψους 61 mm και σχετικής απόδοσης 40.9%. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε κρουοστάτη από Al και για το λόγο αυτό η απόδοσή του για φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι χαμηλή, αν και αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη απόδοση του άλλου ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, όπως εκφράζεται από το FWHM:

- για ενέργεια φωτονίων 122.06 keV είναι 0.875 keV
- για ενέργεια φωτονίων 1332.50 keV είναι 1.8 keV

Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 63:1.

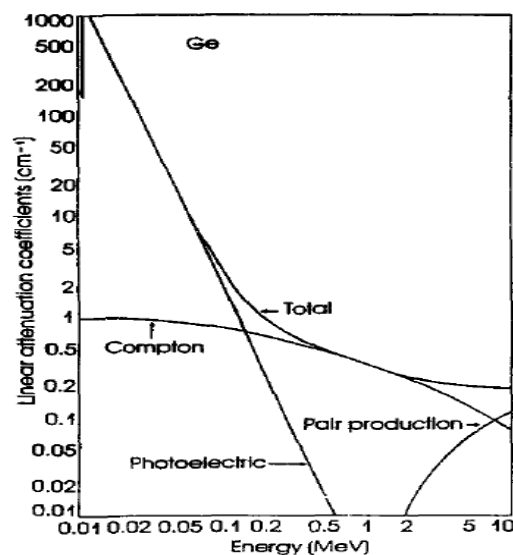
## 2.3 Συστήματα μείωσης συνεχούς υποστρώματος Compton Suppression

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, τα φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπονται από το υπό ανάλυση δείγμα μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τον ανιχνευτή, αποθέτοντας σε αυτόν το σύνολο της ενέργειάς τους (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο)<sup>2</sup> ή μέρος αυτής (σκέδαση Compton ή δίδυμη γένεση). Στην πρώτη περίπτωση η καταγραφή των φωτονίων γίνεται στην αιχμή πλήρους απορρόφησης,

<sup>2</sup> Στην πραγματικότητα, ακόμα και στην περίπτωση που το φωτόνιο αλληλεπιδράσει με τον ανιχνευτή με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, υπάρχει πιθανότητα διαφυγής από τον ανιχνευτή χαρακτηριστικής ακτίνας-X και κατά συνέπεια μη απόθεσης όλης της ενέργειας του αρχικού φωτονίου σε αυτόν.

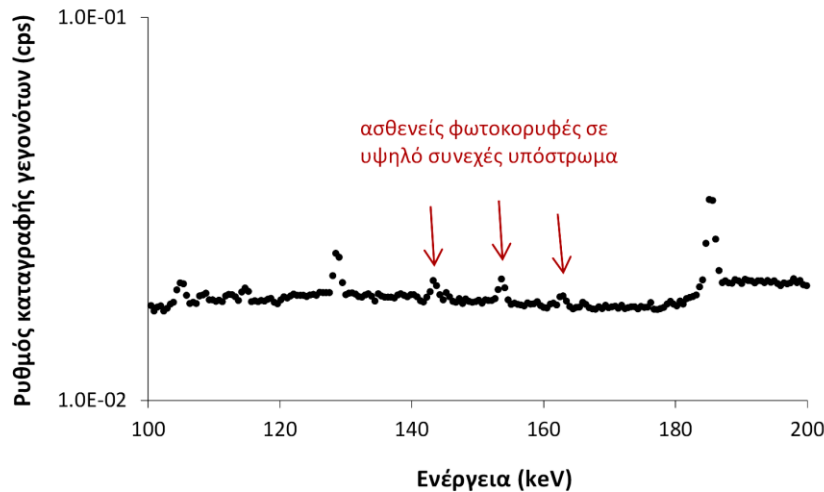


η οποία και αξιοποιείται στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, καθώς αντιστοιχεί στην ενέργεια των φωτονίων. Στη δεύτερη περίπτωση, η ενέργεια που καταγράφεται στον ανιχνευτή είναι τυχαία – οπωσδήποτε χαμηλότερη της αρχικής ενέργειας των φωτονίων – και για το λόγο αυτό καταγράφεται στο συνεχές υπόστρωμα. Από την Εικόνα 2.7 προκύπτει ότι για το υλικό γερμάνιο στην ενεργειακή περιοχή άνω των 150 keV η πιθανότητα φωτοηλεκτρικού φαινομένου και κατά συνέπεια της πλήρους απόθεσης της ενέργειας του φωτονίου στον ανιχνευτή υστερεί έναντι της πιθανότητας σκέδασης Compton. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες διαστάσεις του ανιχνευτή αλλά και η ύπαρξη της θωράκισής του, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλά επίπεδα συνεχούς υποστρώματος, το οποίο χαρακτηρίζεται ως συνεχές υπόστρωμα Compton. Επισημαίνεται ότι φωτόνιο μειωμένης ενέργειας είναι δυνατό να καταγραφεί στον ανιχνευτή, είτε μετά από αλληλεπίδραση Compton με τον ανιχνευτή ενός φωτονίου που εκπέμπεται απευθείας από την πηγή, είτε μετά από αλληλεπίδραση με τον ανιχνευτή ενός φωτονίου της πηγής το οποίο έχει προηγουμένως υποστεί αλληλεπίδραση με τη θωράκιση ή μέσα στην ίδια την πηγή.



Εικόνα 2.7: Γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης φωτονίων για το γερμάνιο.

Σε κάθε περίπτωση, το συνεχές υπόστρωμα Compton οδηγεί σε «αλλοίωση» του λαμβανομένου φάσματος και σε δυσκολία ανίχνευσης ασθενών φωτοκορυφών οι οποίες σχηματίζονται σε περιοχές του φάσματος με υψηλό συνεχές υπόστρωμα, κάτι που συχνά συμβαίνει για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, με αποτέλεσμα η ανάλυσή τους να καθίσταται δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη (Εικόνα 2.8).

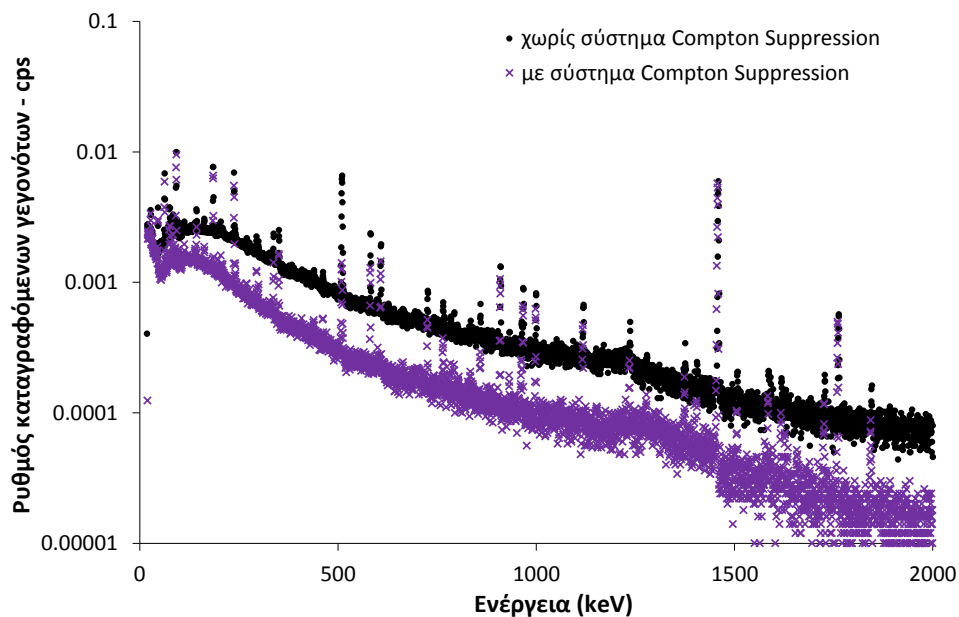


Εικόνα 2.8: Ασθενείς φωτοκορυφές σε υψηλό συνεχές υπόστρωμα κατά την ανάλυση δείγματος χώματος.

Ιδανικά, είναι επιθυμητή η εξάλειψη ή η μείωση της επίδρασης του υποστρώματος Compton, ώστε να διευκολυνθεί η ανίχνευση ασθενών φωτοκορυφών ή φωτοκορυφών που έχουν κακή στατιστική. Ένας τρόπος μείωσης αυτού του υποστρώματος είναι η χρήση συστήματος μείωσης του υποστρώματος Compton, ή αλλιώς συστήματος Compton Suppression. Σε ένα τέτοιο σύστημα, το φωτόνιο που προκύπτει από αλληλεπίδραση Compton στον ανιχνευτή και διαφεύγει από αυτόν με μειωμένη ενέργεια είναι δυνατό να ανιχνευθεί από δεύτερο ανιχνευτή. Συνήθως αυτό γίνεται χρήση ενός μεγαλύτερου ανιχνευτή από υλικό χαμηλότερου κόστους, όπως ένας ανιχνευτής NaI ή ένας πλαστικός σπινθηριστής. Ο πρώτος ανιχνευτής, ο οποίος ονομάζεται πρωτεύων ή κυρίως ανιχνευτής, περιβάλλεται από το δεύτερο ο οποίος είναι γνωστός ως ενεργητική θωράκιση, δευτερεύων ανιχνευτής ή ανιχνευτής «φύλακας» (guard detector). Η μέθοδος μείωσης του υποστρώματος στηρίζεται στη συσχέτιση των σημάτων των δύο ανιχνευτών. Σήματα που καταγράφονται και στους δύο ανιχνευτές «συγχρόνως» οφείλονται σε φωτόνια που έχουν αποδώσει στον πρωτεύοντα ανιχνευτή μόνο ένα κλάσμα της ενέργειάς του και συνεπώς δεν είναι αξιοποιήσιμα<sup>3</sup>. Επομένως, με χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών συστημάτων τα σήματα του δευτερεύοντος ανιχνευτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόρριψη των «μη χρήσιμων» σημάτων του πρωτεύοντος ανιχνευτή. Το σύστημα των δύο ανιχνευτών

<sup>3</sup> Όπως θα φανεί σε επόμενα Κεφάλαια, είναι δυνατόν, στην περίπτωση που κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα εκπέμπονται παραπάνω από ένα φωτόνια συγχρόνως, η πλήρης απορρόφηση της ενέργειας ενός φωτονίου στον πρωτεύοντα ανιχνευτή να συνοδεύεται και από σήμα στο δευτερεύοντα ανιχνευτή.

λειτουργεί κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο και στην περίπτωση που το φωτόνιο σκεδαστεί αρχικά στον δευτερεύοντα ανιχνευτή και στη συνέχεια αλληλεπιδράσει με τον πρωτεύοντα. Το συνεχές υπόστρωμα Compton με τον τρόπο αυτό μειώνεται και κατά συνέπεια βελτιώνεται η ανιχνευτική ικανότητα του συστήματος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της λειτουργίας του συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 2.9, όπου παρουσιάζεται τόσο το αρχικό φάσμα, πριν τη χρήση συστήματος Compton Suppression, όσο και το φάσμα με το μειωμένο συνεχές υπόστρωμα.



Εικόνα 2.9: Τυπικό φάσμα ανιχνευτικής διάταξης χωρίς και με τη χρήση συστήματος Compton Suppression.

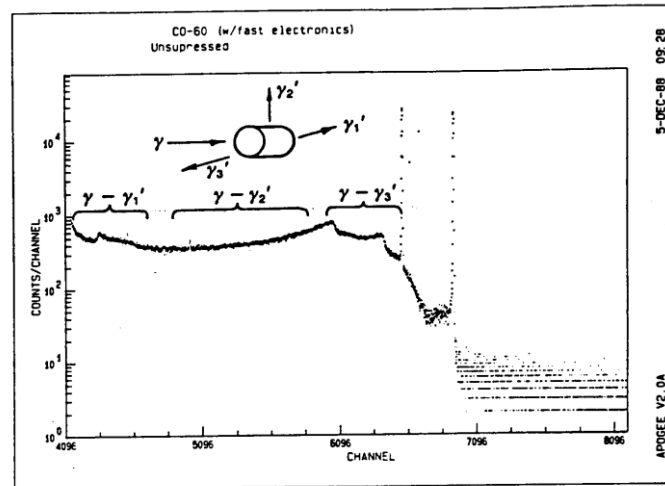
Η χρήση ενός συστήματος Compton Suppression παρέχει ένα επιπλέον πλεονέκτημα. Δεδομένου του πάχους της ενεργητικής θωράκισης, εκτός από τη μείωση του υποστρώματος που οφείλεται στις σκεδάσεις των φωτονίων που εκπέμπονται από το δείγμα, συνεισφέρει και στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος που οφείλεται στον περιβάλλοντα χώρο και του υποστρώματος κοσμικής προέλευσης. Για να φθάσουν φωτόνια είτε από τον περιβάλλοντα χώρο είτε φωτόνια κοσμικής προέλευσης στον ανιχνευτή, πρέπει να διασχίσουν – πέραν από την παθητική θωράκιση – και τον δευτερεύοντα ανιχνευτή, με πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν με αυτόν. Στην περίπτωση αυτή θα παραχθεί κατάλληλο σήμα και η αλληλεπίδραση του σκεδασμένου φωτονίου στον πρωτεύοντα ανιχνευτή δεν θα καταγραφεί. Ως εκ τούτου, τα συστήματα Compton Suppression οδηγούν σε σημαντική μείωση του συνεχούς υποστρώματος που προέρχεται από τον

περιβάλλοντα χώρο και επομένως είναι κατάλληλα για μετρήσεις φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων χαμηλών συγκεντρώσεων (Landsberger, 1994), (Harbottle, et al., 1994). Παρόλα αυτά δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το ενδεχόμενο μικρής αύξησης του φυσικού υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης εξαιτίας τη φυσικής ραδιενέργειας του υλικού του δευτερεύοντα ανιχνευτή.

### 2.3.1 Αρχή λειτουργίας συστημάτων Compton Suppression

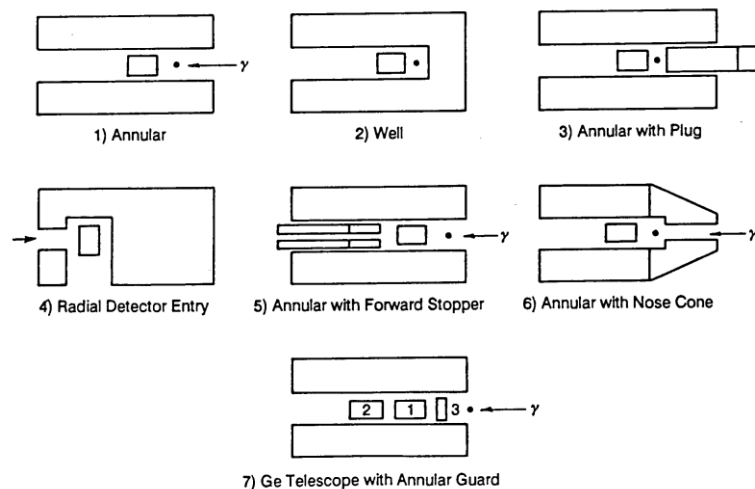
Η μείωση (suppression) του υποστρώματος Compton χρησιμοποιείται ήδη αρκετές δεκαετίες και πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη συμπεριφορά συστημάτων Compton Suppression. Η μείωση των γεγονότων σκέδασης Compton εξαρτάται από την ικανότητα του δευτερεύοντα ανιχνευτή να ανιχνεύσει τα σκεδαζόμενα φωτόνια. Για το λόγο αυτό, ενώ συνήθως οι πρωτεύοντες ανιχνευτές πρέπει να έχουν καλή διακριτική ικανότητα, οι δευτερεύοντες ανιχνευτές απαιτείται να έχουν μεγαλύτερη απόδοση (Cetiner, 2008). Η αποτελεσματικότητα του δευτερεύοντος ανιχνευτή εξαρτάται από το μέγεθος του, το σχήμα του και το υλικό κατασκευής του (Canberra, 2001). Όπως είναι γνωστό, η γωνία υπό την οποία σκεδάζεται ένα φωτόνιο συνδέεται με την ενέργεια του φωτονίου μετά τη σκέδαση και επομένως οδηγεί σε αύξηση του συνεχούς υποστρώματος σε μία συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή. Κατά συνέπεια, αστοχία του δευτερεύοντα ανιχνευτή να ανιχνεύσει φωτόνια που σκεδάστηκαν προς μία κατεύθυνση, επηρεάζει αρνητικά τη μείωση του υποστρώματος Compton σε συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή.

Για ένα φωτόνιο που εισέρχεται σε έναν ανιχνευτή κατά τον άξονά του, αλληλεπιδρά με το υλικό του και σκεδάζεται, η κατεύθυνση του σκεδαζόμενου φωτονίου μπορεί να είναι πρόσθια ( $\gamma_1'$ ), οπίσθια ( $\gamma_3'$ ) ή κάθετη στην αρχική ( $\gamma_2'$ ), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10. Σημειώνεται ότι τα φωτόνια  $\gamma_1'$  έχουν αποθέσει μικρό τμήμα της ενέργειάς τους στον ανιχνευτή και συνεχίζουν με υψηλή ενέργεια. Αντίθετα, τα φωτόνια  $\gamma_3'$  έχουν χάσει το μεγαλύτερο τμήμα της ενέργειάς τους στον ανιχνευτή. Εάν ο ανιχνευτής αυτός είναι ο πρωτεύων ανιχνευτής ενός συστήματος Compton Suppression, γίνεται κατανοητό ότι η ενεργητική θωράκιση πρέπει να έχει υψηλότερη απόδοση ανίχνευσης φωτονίων στην πρόσθια κατεύθυνση (Canberra, 2001).



Εικόνα 2.10: Γωνίες σκέδασης φωτονίων και ενέργειες που αποτίθενται στο συνεχές υπόστρωμα (Canberra, 2001).

Τυπικές διατάξεις συστημάτων Compton Suppression φαίνονται στην Εικόνα 2.11. Οι παραδοσιακοί τρόποι διάταξης των δύο ανιχνευτών περιλαμβάνουν ενεργητική θωράκιση δακτυλιοειδούς σχήματος με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή τοποθετημένο στο κέντρο, χωρίς ή με χρήση «plug detector»<sup>4</sup> (διάταξη 1 και διάταξη 3 της Εικόνας 2.11, αντίστοιχα).



Εικόνα 2.11: Διάφοροι συνδυασμοί πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή. Με το σύμβολο • ορίζεται η θέση του προς ανάλυση δείγματος, ενώ με το βέλος → σημειώνεται η διεύθυνση εξωτερικής δέσμης φωτονίων στην περίπτωση που δεν πρόκειται για ανάλυση δείγματος.

Ωστόσο, στη βιβλιογραφία απαντώνται διατάξεις, όπως η διάταξη 2, στις οποίες ο πρωτεύων ανιχνευτής τοποθετείται στο εσωτερικό ενεργητικής θωράκισης τύπου φρέατος (well type) (Ishikawa, et al., 2000) και άλλες όπως η διάταξη 6, όπου εκτός

<sup>4</sup> Πρόκειται για κινητό ανιχνευτή ο οποίος αποτελεί συνιστώσα του δευτερεύοντα ανιχνευτή και ο οποίος τοποθετείται σε θέση κατάλληλη ώστε να ανιχνεύει τα φωτόνια που προέρχονται από την οπισθοσκέδαση των φωτονίων στον ανιχνευτή.

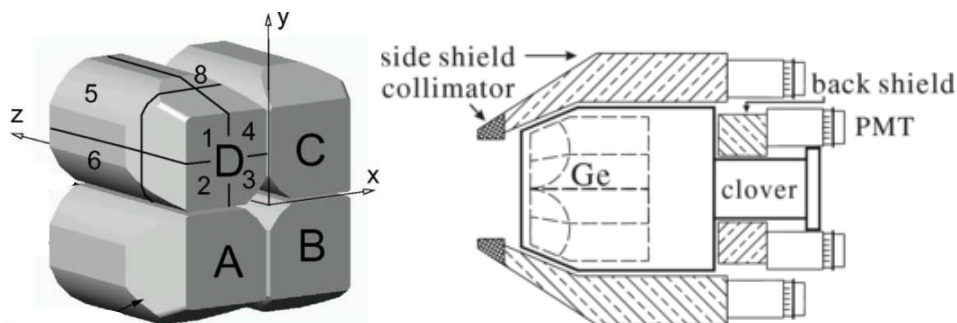
της δακτυλιοειδούς ενεργητικής θωράκισης υπάρχει και πρόσθετο κωνικό τμήμα στην κατεύθυνση της πηγής που λειτουργεί ως κατευθυντής δέσμης (Moszynski, et al., 1989), (de Voigt, et al., 1995), ή η διάταξη 7, όπου δακτυλιοειδής δευτερεύων ανιχνευτής περιβάλλει τρεις πρωτεύοντες ανιχνευτές (Mauerhofer, 1996), (Britton, 2012).

### 2.3.1.1 Κυρίως ή πρωτεύων ανιχνευτής

Στα συστήματα Compton Suppression σήμερα, ως πρωτεύοντες ανιχνευτές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe), εξαιτίας της εξαιρετικής διακριτικής ικανότητας που διαθέτουν και του σχετικά υψηλού ατομικού αριθμού ( $Z = 32$ ) του γερμανίου. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα, εκτός από το υψηλό κόστος, είναι η ανάγκη για συνεχή ψύξη τους με υγρό άζωτο. Η ανάγκη αυτή μπορεί να περιορίσει τη γεωμετρία της ενεργητικής θωράκισης και κατ' επέκταση την αποτελεσματικότητά της. Ωστόσο, ειδικά σχεδιασμένα συστήματα ψύξης μπορούν να μετριάσουν το πρόβλημα, ενώ ήδη υπάρχουν ευρέως διαθέσιμοι ανιχνευτές HPGe με μηχανική ψύξη (Britton, 2012).

Ενώ λίγα υλικά μπορούν να φθάσουν τη διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών HPGe (της τάξης του 0.2%), οι ανιχνευτές LaBr(Ce) μπορούν να προσεγγίσουν διακριτική ικανότητα της τάξης του 3%, μέγεθος που αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με τους ανιχνευτές NaI(Tl) που έχουν διακριτική ικανότητα 6 – 7% και τους ανιχνευτές BGO που έχουν διακριτική ικανότητα 16% (Knoll, 2010). Επιπρόσθετα, οι ανιχνευτές LaBr(Ce) λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, γεγονός που δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό και επιτρέπει την πιο αποτελεσματική ενεργητική θωράκιση, σε σχέση με τους ανιχνευτές HPGe. Επιπλέον, οι ανιχνευτές LaBr(Ce), εκτός από ικανοποιητική διακριτική ικανότητα, διαθέτουν εξαιρετική απόδοση φωτός (light yield) και ιδιότητες χρονισμού. Οι (Kulisek et al., 2007) εκτίμησαν με χρήση τεχνικών προσομοίωσης, ότι για ένα σύστημα με πρωτεύοντα ανιχνευτή LaBr(Ce) και ενεργητική θωράκιση NaI(Tl) επιτυγχάνεται βελτίωση κατά 6.6 φορές στο κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης του  $^{239}\text{Pu}$  παρουσία υποστρώματος λόγω  $^{137}\text{Cs}$ , τιμή που είναι συγκρίσιμη με τη βελτίωση που εισάγουν συστήματα με πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe.

Στην αρχή της δεκαετίας του 1990, οι ανιχνευτές HPGe έφθασαν να έχουν όγκους της τάξεως των  $300 \text{ cm}^3$ , αλλά η κατασκευή ανιχνευτών με μεγαλύτερες διαστάσεις, και επομένως με μεγαλύτερη απόδοση, ήταν περιορισμένη<sup>5</sup>. Ο περιορισμός αυτός στις διαστάσεις οδήγησε στην ανάπτυξη ενός νέου τύπου ανιχνευτών HPGe (Clover HPGe detectors) με βελτιωμένη, τόσο την απόδοση όσο και τη διακριτική ικανότητα σε σχέση με διατάξεις μεγάλων ανιχνευτών HPGe (Duchene, et al., 1999), (Elekes, et al., 2003), (Sarkar, et al., 2006). Οι ανιχνευτές HPGe Clover χρησιμοποιούν περισσότερους του ενός μικρότερους κρυστάλλους συνδεδεμένους στον ίδιο κρυστάτη (Εικόνα 2.12). Ο διαχωρισμός αυτός βελτιώνει τόσο το χρονοισμό όσο και τη διακριτική ικανότητα. Επιπλέον, επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών αθροιστικής σύμπτωσης (sum-coincidence) για τη βελτίωση του λόγου peak-to-Compton, καθώς επίσης και τεχνικών αντι-σύμπτωσης χρήσει ενεργητικών θωρακίσεων BGO για περαιτέρω μείωση του υποστρώματος. Προσομοιώσεις πολλών τέτοιων διατάξεων για ποικιλία γεωμετριών και ενεργειών έχουν καταδείξει την ευελιξία που παρουσιάζουν, καθώς για κάθε διαφορετικό πείραμα απαιτείται μόνο τροποποίηση στον αλγόριθμο επεξεργασίας των σημάτων των επιμέρους ανιχνευτών (Schumaker, et al., 2007).



Εικόνα 2.12: Ανιχνευτής Clover HPGe (αριστερά) και η αντίστοιχη διάταξη (δεξιά).

Εναλλακτικά υλικά για την κατασκευή του πρωτεύοντα ανιχνευτή αποτελούν τα CdZnTe και Si(Li). Οι ανιχνευτές CdZnTe έχουν υψηλό ατομικό αριθμό και δυνατότητα λειτουργίας σε θερμοκρασία δωματίου. Συγκριτικά με τους ανιχνευτές HPGe έχουν 4–5 φορές μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση των φωτοηλεκτρονίων (Britton, 2012). Το μειονέκτημα των ανιχνευτών αυτού του

<sup>5</sup> Για μεγάλους όγκους ανιχνευτών παρουσιάζονται τεχνικές δυσκολίες αλλά και προβλήματα κατά τη διάρκεια της συλλογής του σήματος (ballistic deficit, Doppler broadening) καθώς και radiation damage λόγω νετρονίων.

είδους σχετίζεται με τη συλλογή του φορτίου όταν οι διαστάσεις τους μεγαλώνουν. Για το λόγο αυτό, οι ανιχνευτές CdZnTe συνήθως έχουν μικρές διαστάσεις. Όσον αφορά στη διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών αυτών, με κατάλληλα ηλεκτρονικά έχει επιτευχθεί διακριτική ικανότητα της τάξης του 0.76% για φωτόνια ενέργειας 662 keV (Zhang, et al., 2005), ενώ προκαταρκτικές έρευνες έχουν δείξει ότι οι ανιχνευτές CdZnTe μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα Compton Suppression, καθιστώντας τα τόσο αποδοτικά όσο οι «συμβατικές» διατάξεις (Moss, et al., 2001).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί μία εφαρμογή συστήματος Compton Suppression με ανιχνευτή Si(Li). Οι ανιχνευτές Si(Li) χρησιμοποιούνται κυρίως στην ενεργειακή περιοχή 5 – 50 keV, καθώς ο χαμηλός ατομικός αριθμός του Si ( $Z = 14$ ), σε σχέση με αυτόν του Ge ( $Z = 32$ ), μειώνει την πιθανότητα φωτοηλεκτρικής απορρόφησης κατά 50 φορές. Επιπλέον, το μέγεθος του κρυστάλλου είναι περιορισμένο λόγω της μεθοδολογίας κατασκευής τους (Lithium drift process) (Knoll, 2010). Οι (Prussin, et al., 1986) χρησιμοποίησαν συστήματος Compton Suppression με πρωτεύοντα ανιχνευτή Si(Li) διαπίστωσαν μείωση του συνεχούς υποστρώματος μέχρι και 31 φορές για την ενεργειακή περιοχή 5 – 50 keV και μέχρι 10 φορές στην ενεργειακή περιοχή 90 – 300 keV.

### 2.3.1.2 Δευτερεύων ανιχνευτής ή ενεργητική θωράκιση

Παρόλο που κάθε διάταξη έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, ο βασικός σχεδιασμός σχεδόν όλων των συστημάτων είναι ουσιαστικά ο ίδιος. Ο κύριος ή πρωτεύων ανιχνευτής περιβάλλεται από τον δευτερεύοντα ανιχνευτή (guard detector) που αποτελεί την ενεργητική θωράκιση. Συνήθως, ως υλικό για τον δευτερεύοντα ανιχνευτή χρησιμοποιείται ιωδιούχο νάτριο NaI(Tl), ή BGO (bismuth germanate –  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ). Οι ανιχνευτές NaI(Tl) αποτελούν μία αποτελεσματική ενεργητική θωράκιση χαμηλού κόστους, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει περιορισμός χώρου. Μία εναλλακτική λύση αποτελούν οι ανιχνευτές BGO (Moszynski, et al., 1989), (deVoigt, et al., 1995), (Mauerhofer, 1996), (Jung, et al., 2007) οι οποίοι, έχοντας μεγαλύτερη πυκνότητα ( $\sim 7 \text{ gr/cm}^3$ ) και 3 φορές υψηλότερο γραμμικό συντελεστή εξασθένησης φωτονίων για την ενέργεια των 500 keV από τους ανιχνευτές NaI(Tl) (Canberra, 2001), οδηγούν σε μείωση του απαιτούμενου όγκου



της ενεργητικής θωράκισης κατά ~8 φορές (de Voigt, et al., 1995), με ταυτόχρονη βέβαια αύξηση του κόστους. Από την άλλη πλευρά, οι ανιχνευτές NaI(Tl) έχουν υψηλότερη διακριτική ικανότητα και απόδοση φωτός (light yield) (Knoll, 2010), στοιχεία τα οποία μπορεί να είναι μεγάλης σημασίας για ανιχνευτικά συστήματα τα οποία πραγματοποιούν ελέγχους σύμπτωσης ακτίνων  $\gamma$  ( $\gamma$ - $\gamma$  coincidence).

Πέραν των δύο τύπων ενεργητικής θωράκισης που αναφέρθηκαν παραπάνω έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και υγρό Αργό (Liquid Argon – LAr), καθώς μπορεί να βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον κρύσταλλο Γερμανίου και να παρέχει παράλληλα την απαραίτητη ψύξη του κρυοστάτη (di Marco, et al., 2007), (Orrell, et al., 2007), (Janicsko Csathy, et al., 2011). Σε τέτοιες πειραματικές διατάξεις για τη συλλογή του φωτός σπινθηρισμού συνήθως χρησιμοποιούνται συνήθεις φωτοπολλαπλασιαστές (Orrell, et al., 2007), ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί και φωτοπολλαπλασιαστές σιλικόνης (Silicon photomultiplier) (Janicsko Csathy, et al., 2011). Με τέτοιες διατάξεις έχει επιτευχθεί μείωση του συνεχούς υποστρώματος Compton μέχρι και 17 φορές στην ενεργειακή περιοχή περί τα 2 MeV, ωστόσο η απόδοση ανίχνευσης και η απόδοση φωτός (light yield) του συστήματος ήταν πολύ χαμηλά (Britton, 2012).

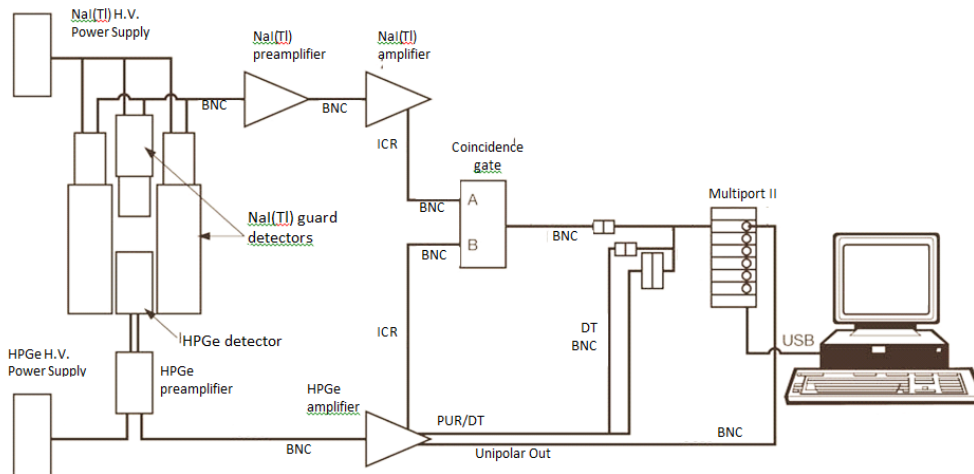
### 2.3.1.3 Λειτουργία συστήματος Compton Suppression

Ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη διάταξη η αρχή λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression είναι σχεδόν πάντα η ίδια: τα αναλογικά σήματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ανιχνευτή χρησιμοποιούνται με σκοπό την εύρεση της χρονικής συσχέτισής τους. Εάν τα δύο σήματα παραχθούν εντός συγκεκριμένου «στενού» χρονικού παραθύρου, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ταυτόχρονα και κατά συνέπεια προέρχονται από την αλληλεπίδραση του ίδιου φωτονίου με τους δύο ανιχνευτές. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται ένα σήμα σύμπτωσης (coincidence event ή σήμα veto). Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται το σύστημα, η παραγωγή αυτού του σήματος σύμπτωσης μπορεί να οδηγήσει στην απόρριψη (λειτουργία αντί-σύμπτωσης – anti-coincidence) ή στην καταγραφή (λειτουργία σύμπτωσης – coincidence) του σήματος του πρωτεύοντος ανιχνευτή.

### 2.3.1.3.1 Λειτουργία αντί-σύμπτωσης (anti-coincidence)

Σκοπός της λειτουργίας ενός συστήματος Compton Suppression σε αντί-σύμπτωση (anti-coincidence) είναι η καταγραφή γεγονότων αλληλεπίδρασης των φωτονίων μόνο με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή. Γεγονότα που καταγράφονται ταυτόχρονα και στους δύο ανιχνευτές απορρίπτονται. Αποτέλεσμα είναι η συλλογή φάσματος με μειωμένο συνεχές υπόστρωμα, ονομαζόμενο *suppressed φάσμα*. Για να είναι δυνατό αυτό, όταν παράγονται σήματα και από τους δύο ανιχνευτές εντός του χρονικού παραθύρου που έχει ορίσει ο χρήστης, παράγεται ένα λογικό σήμα το οποίο αποτρέπει την καταγραφή του σήματος του πρωτεύοντος ανιχνευτή. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας του συστήματος αποτελεί τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στη βιβλιογραφία και έχει μελετηθεί εκτενώς, όπως θα παρουσιασθεί και σε επόμενη Παράγραφο (2.3.2).

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος απόρριψης γεγονότων σύμπτωσης παρουσιάζεται με περισσότερη λεπτομέρεια η διαδρομή που ακολουθούν τα σήματα των δύο ανιχνευτών (Εικόνα 2.13). Οι έξοδοι και από τους δύο ανιχνευτές, μετά από την επεξεργασία τους από τους αντίστοιχους ενισχυτές, τροφοδοτούνται στη μονάδα σύμπτωσης (Coincidence Gate) η οποία αναλαμβάνει να κάνει τον έλεγχο της σύμπτωσης των καταγραφόμενων στους δύο ανιχνευτές συμβάντων. Στην περίπτωση που ένα φωτόνιο απορροφηθεί πλήρως στον πρωτεύοντα ανιχνευτή, οπότε δεν υπάρχει σήμα από το δευτερεύοντα ανιχνευτή, τότε επιτρέπεται η καταγραφή του σήματος του πρωτεύοντος ανιχνευτή στον πολυκαναλικό αναλυτή (multichannel analyzer MCA, ή Multiport). Ωστόσο, εάν το φωτόνιο λόγω σκεδάσεως Compton αλληλεπιδράσει και με τον πρωτεύοντα και με τον δευτερεύοντα ανιχνευτή, παράγονται συγχρόνως δύο σήματα τα οποία τροφοδοτούνται στη μονάδα σύμπτωσης, η οποία στην περίπτωση αυτή δεν επιτρέπει την καταγραφή του σήματος του πρωτεύοντα ανιχνευτή στον πολυκαναλικό αναλυτή. Το φάσμα το οποίο συλλέγεται με τον τρόπο αυτό καλείται *suppressed* καθώς μειώνεται το συνεχές υπόστρωμα λόγω της μη καταγραφής των φωτονίων που προέρχονται από σκέδαση Compton. Το χρονικό περιθώριο ανάμεσα στην καταγραφή των δύο σημάτων ποικίλλει, ενώ συνήθως επιλέγεται να είναι της τάξης των 1000 nsec (Bikit, et al., 1999).



Εικόνα 2.13: Τυπικό κύκλωμα ηλεκτρονικών συστήματος Compton Suppression (Pearsall, 2005).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανιχνευτική διάταξη δεν μπορεί να διακρίνει τα σήματα που προέρχονται από σκεδάσεις Compton από τα σήματα που οφείλονται σε άλλη ακτινοβολία (π.χ. φωτόνια από άλλο ισότοπο). Είναι δηλαδή δυνατόν να καταγραφούν στους δύο ανιχνευτές τυχαία γεγονότα, τα οποία να μην έχουν προκύψει από μερική απόθεση ενέργειας του ίδιου φωτονίου στους δύο ανιχνευτές, αλλά να προέρχονται από δύο διαφορετικά φωτόνια τα οποία για τυχαίους λόγους καταγράφηκαν εντός του χρονικού περιθωρίου σύμπτωσης.

Λόγω του τρόπου λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression, ιδιαίτερης προσοχής χρήζει η περίπτωση ανάλυσης ισοτόπων τα οποία εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά (cascade emitters) όπως τα:  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ . Στην περίπτωση ανάλυσης ενός τέτοιου ισοτόπου χρήσει συστήματος Compton Suppression, υπάρχει πιθανότητα ανίχνευσης του ενός φωτονίου στον πρωτεύοντα ανιχνευτή και του άλλου φωτονίου στην ενεργητική θωράκιση. Ο χρόνος διαδοχικής εκπομπής των φωτονίων αυτών είναι τάξεις μεγέθους μικρότερος από το χρονικό παράθυρο που επιλέγεται για anti-coincidence λειτουργία και επομένως το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να διακρίνει αυτά τα συμβάντα σύμπτωσης, από την περίπτωση μοναδικού φωτονίου το οποίο αλληλεπιδρά και με τους δύο ανιχνευτές. Το σύστημα με τον τρόπο αυτό απορρίπτει ωφέλιμα σήματα και οι αντίστοιχες φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης υφίστανται μείωση, με αποτέλεσμα να ακυρώνεται το πλεονέκτημα της μείωσης του συνεχούς υποστρώματος που προσφέρει (Masse, et al., 1991).

Με αντίστοιχο τρόπο, η υψηλή ενεργότητα των υπό ανάλυση δειγμάτων μπορεί να επηρεάσει την απόκριση ενός συστήματος Compton Suppression, καθώς η υψηλή ροή φωτονίων αυξάνουν την πιθανότητα φωτόνια από αποδιεγέρσεις διαφορετικών πυρήνων να ανιχνευθούν ταυτόχρονα στους δύο ανιχνευτές και επομένως να δώσουν σήματα σύμπτωσης, τα οποία όμως προκύπτουν για τυχαίους λόγους (random summing ή chance coincidence) (Landsberger, et al., 1995), (Westphal, 1998), (Nicholson, et al., 2008). Ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού είναι η ανάλυση δειγμάτων που παρουσιάζουν χαμηλό ρυθμό εκπομπής φωτονίων. Στην περίπτωση αυτή, όπου και ο νεκρός χρόνος (dead time) της ανιχνευτικής διάταξης είναι χαμηλός, έχει διαπιστωθεί ότι η πιθανότητα καταγραφής τυχαίων γεγονότων είναι αμελητέα (Landsberger, 1994). Αυτή εξάλλου είναι και η περίπτωση των περιβαλλοντικών δειγμάτων, που αποτελούν την πλειονότητα των δειγμάτων που αναλύθηκαν στην παρούσα Δ.Δ.

#### **2.3.1.3.2 Λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode)**

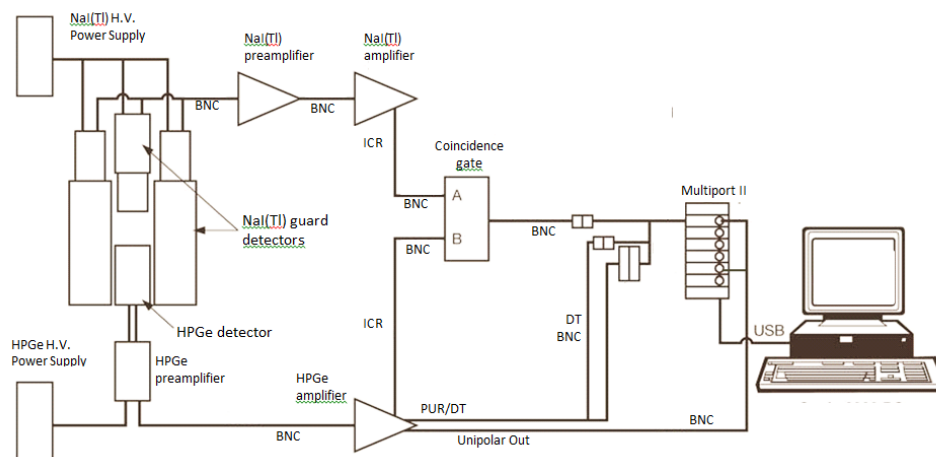
Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος σε σύμπτωση (coincidence mode), τα σήματα που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση φωτονίων με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή, καταγράφονται μόνο εάν παραχθεί σήμα αλληλεπίδρασης και από την ενεργητική θωράκιση εντός του χρονικού παραθύρου που έχει ορίσει ο χρήστης. Γίνεται κατανοητό ότι πρόκειται για λειτουργία του συστήματος με ακριβώς αντίθετο τρόπο από εκείνον που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη Παράγραφο 2.3.1.3.1. Η λειτουργία αυτή του συστήματος είναι χρήσιμη στην περίπτωση μελέτης ισοτόπων που εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά (cascade emitters) (Britton, et al., 2013).

#### **2.3.1.3.3 Παράλληλη λειτουργία συστήματος Compton Suppression**

Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνεται το πλεονέκτημα του συστήματος Compton Suppression στην ανάλυση μονοενεργειακών ισοτόπων και η αδυναμία του στην ανάλυση ισοτόπων που εκπέμπουν περισσότερα από ένα φωτόνια σε σειρά. Ως εκ τούτου, κρίνεται πολύ σημαντικό η ανιχνευτική διάταξη να επιτρέπει τη

συλλογή φάσματος, τόσο με χρήση, όσο και χωρίς τη χρήση του συστήματος Compton Suppression.

Μία ευρέως διαδεδομένη πρακτική είναι η χρήση δύο κυκλωμάτων ηλεκτρονικών, ώστε να λαμβάνονται ταυτόχρονα δύο φάσματα (Εικόνα 2.14) (Cooper, et al., 1972), (Camp, et al., 1974), (Mauerhofer, 1996), (Peerani, et al., 2002), (Parus, et al., 2003), (Cetiner, et al., 2008), (de Vismes, et al., 2009). Στο ένα κύκλωμα η συλλογή και επεξεργασία του σήματος από τον πρωτεύοντα ανιχνευτή πραγματοποιείται με τις συμβατικές μεθόδους χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία. Το φάσμα που προκύπτει ονομάζεται συμβατικό ή *unsuppressed φάσμα* και δεν παρουσιάζει μειωμένο το συνεχές υπόστρωμα Compton. Στο άλλο κύκλωμα συλλέγονται σήματα και από τους δύο ανιχνευτές – πρωτεύων και ενεργητική θωράκιση – και πραγματοποιείται έλεγχος σύμπτωσης των σημάτων. Δημιουργείται, επομένως, το *suppressed φάσμα* στο οποίο το υπόστρωμα Compton εμφανίζεται μειωμένο.



Εικόνα 2.14: Τυπικό διπλό κύκλωμα ηλεκτρονικών για την παράλληλη λήψη δύο φασμάτων.

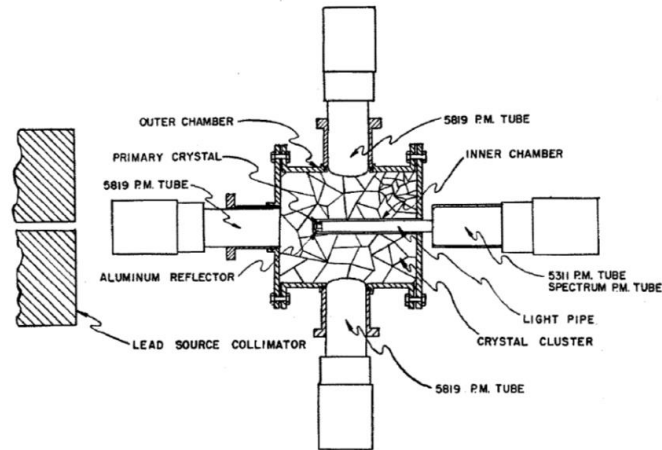
Η ταυτόχρονη λήψη δύο φασμάτων μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο ανάλυσης στο μισό, καθώς διαφορετικά τα δείγματα που περιέχουν τόσο μονοενεργειακά ισότοπα όσο και ισότοπα που εκπέμπουν περισσότερα φωτόνια σε σειρά θα έπρεπε να αναλύονται δύο φορές, μία για κάθε τρόπο λειτουργίας, κάτι το οποίο δεν είναι πρακτικό ή και δυνατό, όπως για παράδειγμα κατά την ανάλυση βραχύβιων ισωτόπων. Επιπρόσθετα, η ταυτόχρονη συλλογή δύο φασμάτων δίνει τη δυνατότητα της άμεσης σύγκρισης της επίδρασης του συστήματος στα κατώτερα όρια ανίχνευσης της διάταξης (Peerani, et al., 2002).

### 2.3.2 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων Compton Suppression

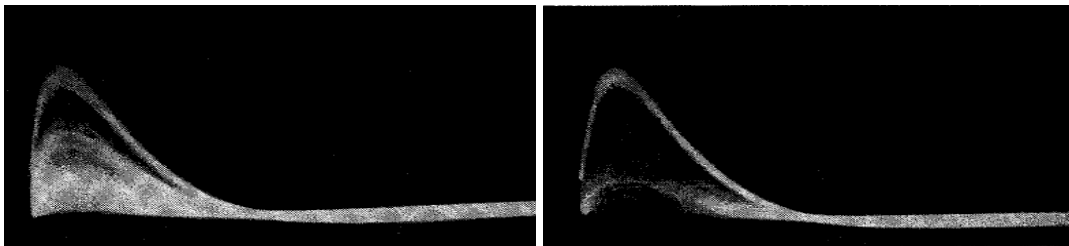
Η ιδέα της χρήσης ενός επιπλέον ανιχνευτή με στόχο την παρακολούθηση των ακτίνων-γ που σκεδάζονται κατά Compton, χρονολογείται στα τέλη των δεκαετιών του 1940 και 1950, όταν και η χρήση ανιχνευτών σπινθηρισμού έδωσε ώθηση στη μελέτη του φάσματος των ακτινοβολιών που προέρχονταν από ραδιενεργές διεργασίες (Landsberger, et al., 1996). Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζεται χρονολογικά η εξέλιξη των συστημάτων Compton Suppression, μέσω της οποίας διαφαίνονται τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, αλλά και τις νέες λύσεις και προοπτικές που είχε να προτείνει αυτή η ανάπτυξη.

Οι (Metzger, et al., 1950) κατασκεύασαν ένα πολωσίμετρο χρησιμοποιώντας τρία ανιχνευτικά συστήματα για να μελετήσουν τη συσχέτιση της διεύθυνσης πόλωσης διαδοχικά εκπεμπόμενων ακτίνων-γ. Χρησιμοποίησαν τρεις ανιχνευτές σπινθηρισμού σε συγκεκριμένες γεωμετρικές διατάξεις, ώστε να χρησιμοποιείται στη διαδικασία ανάλυσης η σκέδαση Compton σε έναν από τους ανιχνευτές. Χρησιμοποιώντας αυτή τη διάταξη, διερεύνησαν τα σχήματα διάσπασης των ισότοπων  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{106}\text{Rh}$  και  $^{134}\text{Cs}$ .

Λίγο αργότερα ο (Albert, 1953) πρότεινε και κατασκεύασε έναν φασματογράφο που χρησιμοποιούσε ενεργητική θωράκιση για τον κυρίως ανιχνευτή σε γεωμετρία σχεδόν 4π. Ο πρωτεύων ανιχνευτής ήταν ένας κυβικός σπινθηριστής NaI(Tl) ακμής 1.25 cm (primary crystal στην Εικόνα 2.15). Λόγω της έλλειψης εκείνη την εποχή μεγάλων κρυστάλλων NaI(Tl) για ενεργητική θωράκιση, χρησιμοποιήθηκε ένα σύμπλεγμα από μικρούς κρυστάλλους NaI(Tl) εμβαπτισμένο σε παραφίνη σε μεγάλο δοχείο αλουμινίου (outer chamber στην Εικόνα 2.15). Για το χαρακτηρισμό της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν πηγές  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{22}\text{Na}$ . Λόγω της απουσίας πολυκαναλικών αναλυτών εκείνη την εποχή, χρησιμοποίησαν φωτογραφίες της εξόδου του παλμογράφου για μεγάλη διάρκεια έκθεσης και επομένως φωτογράφισαν μεγάλο πλήθος παλμών. Με χρήση του συστήματος, παρατηρήθηκε μία σαφής μείωση (suppression) του υποστρώματος Compton και για τα δύο ισότοπα (Εικόνα 2.16).



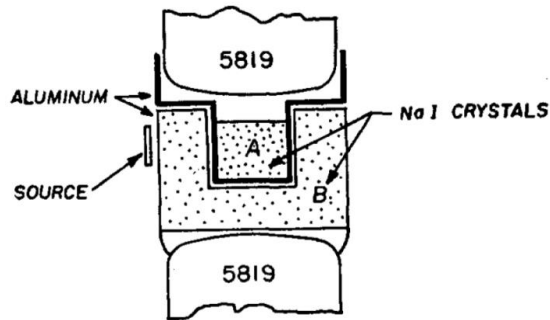
Εικόνα 2.15: Σχηματική παράσταση της διάταξης του (Albert, 1953).



Εικόνα 2.16: Εικόνα φασματογράφου χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης (Albert, 1953).

Τον ίδιο χρόνο ο (Connally, 1953) κατασκεύασε έναν φασματογράφο Compton Suppression, χρησιμοποιώντας για δευτερεύοντα ανιχνευτή έναν κυλινδρικό μονοκρυσταλλικό ανιχνευτή διαμέτρου 4.1 cm, ο οποίος έφερε μία οπή διαμέτρου 3.8 cm και βάθους 1.6 cm. Ο κύριος ανιχνευτής ήταν ένας κυλινδρικός ανιχνευτής NaI(Tl) διαμέτρου 1.4 cm και μήκους 2.5 cm, τοποθετημένος στην οπή του δευτερεύοντα ανιχνευτή (Εικόνα 2.17). Χρησιμοποιήθηκαν δύο φωτοπολλαπλασιαστές, ένας για κάθε ανιχνευτή, τοποθετημένοι αντιδιαμετρικά. Η ραδιενεργός πηγή τοποθετήθηκε εξωτερικά του συστήματος, ώστε οι ακτίνες-γ που θα ανιχνεύονταν στον κυρίως ανιχνευτή να διέρχονται προηγουμένως από τον δευτερεύοντα ανιχνευτή. Λόγω ακριβώς αυτής της θέσης της πηγής, η απόδοση ανίχνευσης της διάταξης ήταν χαμηλή.

Για την αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν πηγές τριών ισοτόπων:  $^{114}\text{In}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$ . Σημειώνεται ότι η μεγαλύτερη μείωση του συνεχούς υποστρώματος παρατηρήθηκε για ενέργειες λίγο μικρότερες της αρχικής ενέργειας των φωτονίων της κάθε πηγής και εκτιμήθηκε σε ~60% για τα φωτόνια 662 keV του  $^{137}\text{Cs}$ .



Εικόνα 2.17: Σχηματική παράσταση της διάταξης του (Connally, 1953).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1950, δεν ήταν ευρέως διαδεδομένοι οι μεγάλοι κρύσταλλοι NaI. Για το λόγο αυτό, ο (Bell, 1954) χρησιμοποίησε ως δευτερεύοντα ανιχνευτή μία δεξαμενή γεμάτη με υγρό σπινθηριστή (Εικόνα 2.18), στην οποία ήταν τοποθετημένος και ο πρωτεύων κυλινδρικός ανιχνευτής NaI(Tl). Κατά τη λήψη ενός φάσματος με πηγή  $^{60}\text{Co}$ , τοποθετημένη ακριβώς δίπλα στον κυρίως ανιχνευτή παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του υποστρώματος Compton, αλλά και των ίδιων των φωτοκορυφών πλήρους απορρόφησης, δεδομένου ότι τα φωτόνια του  $^{60}\text{Co}$  εκπέμπονται σε σειρά (cascade). Ταυτόχρονα, η αθροιστική κορυφή των φωτονίων του  $^{60}\text{Co}$  δεν επηρεάστηκε. Φάσματα που ελήφθησαν με πηγή του μονοενεργειακού ισότοπου  $^{65}\text{Zn}$  παρουσίαζαν – όπως αναμενόταν – μείωση μόνο στο συνεχές υπόστρωμα Compton.

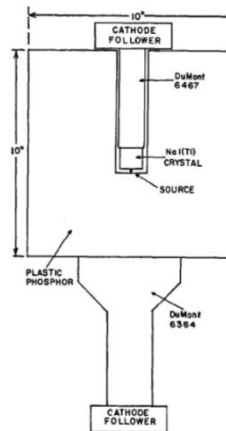


Εικόνα 2.18: Η διάταξη των (Bell, 1954).

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της απουσίας μεγάλων κρυστάλλων NaI(Tl) προτάθηκε από τους (Roulston, et al., 1956), οι οποίοι χρησιμοποίησαν έναν μεγάλο πλαστικό κυλινδρικό σπινθηριστή  $25 \times 25$  cm. Ο κυρίως ανιχνευτής, ένας κύλινδρος NaI(Tl)  $2.5 \times 2.5$  cm, τοποθετήθηκε μαζί με τον φωτοπολλαπλασιαστή σε οπή διαμέτρου 3.8 cm κατά μήκος του άξονα του πλαστικού σπινθηριστή. Η πηγή τοποθετήθηκε εσωτερικά, όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κυρίως ανιχνευτή

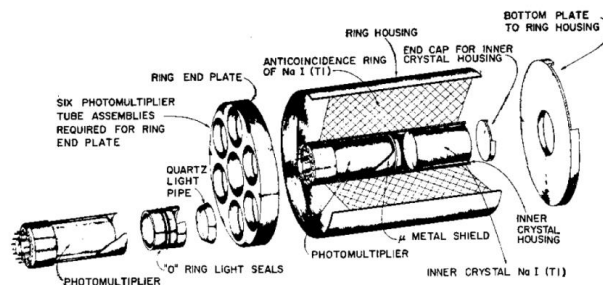


(Εικόνα 2.19). Από πειράματα με πηγές  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  και  $^{131}\text{I}$  διαπιστώθηκε μείωση του υποστρώματος Compton κατά 65% στην ενεργειακή περιοχή 200 – 500 keV, ενώ σε άλλες ενεργειακές περιοχές η μείωση ήταν μικρότερη.



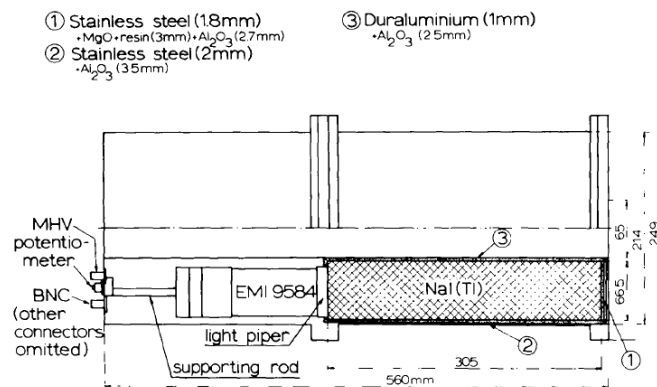
Εικόνα 2.19: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Roulston, et al., 1956).

Οι (Trail, et al., 1959) ανέπτυξαν περαιτέρω αυτού του είδους την τεχνική γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, κατασκευάζοντας μία θωράκιση από τρία κοίλα κυλινδρικά κομμάτια NaI(Tl) σε επαφή, ώστε να σχηματίζουν έναν μεγάλο κύλινδρο ύψους 30.5 cm και διαμέτρου 20.3 cm με μία αξονική οπή διαμέτρου 6.4 cm. Ο κυρίως ανιχνευτής ήταν ένας κύλινδρος NaI(Tl) διαμέτρου 6.1 cm και μήκους 6.4 cm, τοποθετημένος μέσα στην οπή. Ο δευτερεύων ανιχνευτής ήταν συνδεδεμένος με έξι φωτοπολλαπλασιαστές, τοποθετημένους συμμετρικά στο ένα άκρο του (Εικόνα 2.20). Η διάταξη προοριζόταν για χρήση σε πυρηνικό αντιδραστήρα και για το λόγο αυτό περιβαλλόταν από παραφίνη, καρβίδιο του βορίου και θωράκιση από μόλυβδο. Η συμπεριφορά της διάταξης μελετήθηκε στην ενεργειακή περιοχή έως 7.1 MeV και παρουσίασε μείωση του υποστρώματος όχι μόνο στην ενεργειακή περιοχή όπου κυριαρχεί η σκέδαση Compton αλλά και για υψηλότερες ενέργειες όπου κυριαρχεί το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης.



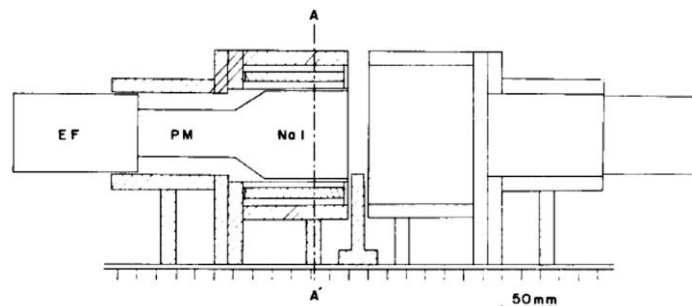
Εικόνα 2.20: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Trail, et al., 1959).

Η περαιτέρω ανάπτυξη της φασματοσκοπίας των πυρηνικών ακτινοβολιών την εποχή εκείνη οδήγησε στη χρήση φασματοσκοπίας αθροιστικών φωτοκορυφών (sum-peak spectroscopy) με στόχο τη μελέτη πολύπλοκων σχημάτων διάσπασης με φωτόνια σε σειρά, μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως από τους (Kantele, et al., 1961), (Kantele, et al., 1962). Την εποχή εκείνη διαπιστώθηκε για πρώτη φορά ότι οι σκεδάσεις Compton, οι αθροιστικές φωτοκορυφές και οι αιχμές διαφυγής αποτελούσαν πρόβλημα στη γ-φασματοσκοπία. Οι (Kantele, et al., 1964) πρότειναν την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού με τη χρήση συστήματος Compton Suppression και στη συνέχεια μελέτησαν (Kantele, et al., 1966) την απόκριση ενός «anti-Compton» κυλίνδρου NaI(Tl) με εξωτερική διάμετρο 20.3 cm, εσωτερική διάμετρο 7.2 cm και μήκος 30.5 cm (Εικόνα 2.21) σε συνδυασμό με διάφορους τύπους ανιχνευτών σπινθηρισμού ως πρωτεύοντες ανιχνευτές.



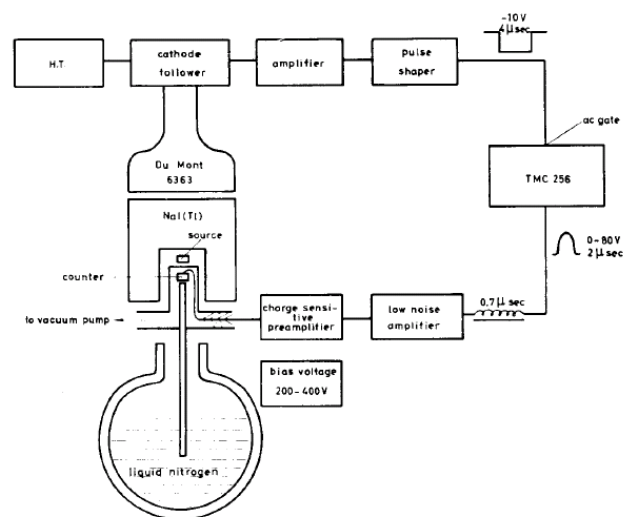
Εικόνα 2.21: Σχηματική παράσταση της διάταξης anti-Compton των (Kantele, et al., 1966).

Οι (Tanaka, et al., 1967) κατασκεύασαν μία διάταξη αθροιστικής σύμπτωσης με ενεργητική θωράκιση, με σκοπό τη χρήση της σε μετρήσεις δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας. Η διάταξη αποτελείτο από ένα ζεύγος κρυστάλλων NaI(Tl) διαμέτρου 7.6 cm και μήκους 7.6 cm τοποθετημένη δίπλα σε έναν πλαστικό σπινθηριστή διαστάσεων 10 cm × 90 cm ως ενεργή θωράκιση (Εικόνα 2.22).



Εικόνα 2.22: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Tanaka, et al., 1967).

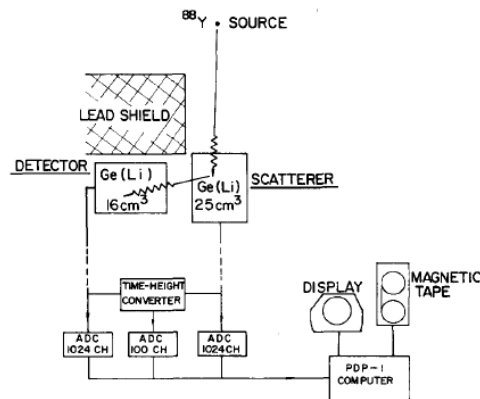
Παρόλο που πολλοί ερευνητές την εποχή εκείνη πρότειναν διάφορες λύσεις και διατάξεις για σύστημα Compton Suppression, όπως για παράδειγμα τη δημιουργία ανοίγματος στη θωράκιση για εφαρμογές με δέσμη φωτονίων ή την παθητική θωράκιση ολόκληρου του συστήματος για εφαρμογές χαμηλών ραδιενεργειών, δεν ήταν παρά στα τέλη της δεκαετίας του 1960 που η ανάπτυξη και κατασκευή συστημάτων Compton Suppression άρχισε να βασίζεται στις ανάγκες συγκεκριμένων τομέων έρευνας. Από το χρονικό αυτό σημείο άρχισαν να εμφανίζονται σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε συστήματα για μετρήσεις χαμηλής ραδιενέργειας – τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε μελέτες περιβαλλοντικής σημασίας – και σε συστήματα για μελέτες με δέσμες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές πυρηνικής φυσικής. Την εποχή εκείνη η εμφάνιση των ημιαγωγών ανιχνευτών Ge(Li) οδήγησε στη μείωση του όγκου του πρωτεύοντος ανιχνευτή. Ως εκ τούτου, άρχισαν να απαιτούνται μικρότερες κοιλότητες στο εσωτερικό του δευτερεύοντος ανιχνευτή και επομένως η περιβάλλουσα ενεργητική θωράκιση μπορούσε να έχει μεγαλύτερο πάχος. Οι (Sever, et al., 1965), χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή Ge(Li)  $1\text{ cm}^2 \times 7\text{ mm}$  (Εικόνα 2.23), κατάφεραν να μειώσουν την αιχμή Compton μίας ραδιενεργού πηγής  $^{137}\text{Cs}$  κατά 9 φορές. Το μειονέκτημα του παραπάνω συστήματος ήταν ότι δεν κατάφερε να μειώσει πλήρως την αιχμή οπισθοσκέδασης, λόγω του σχεδιασμού του πρωτεύοντος ανιχνευτή.



Εικόνα 2.23: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Sever, et al., 1965).

Οι (Broude, et al., 1969) χρησιμοποίησαν έναν ανιχνευτή Ge(Li)  $25\text{ cm}^3$  ως πρωτεύοντα ανιχνευτή και ένα δεύτερο ανιχνευτή Ge(Li)  $16\text{ cm}^3$  ως ενεργητική θωράκιση, διατεταγμένους όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.24. Μία θωράκιση από

μόλυβδος πάχους 10 cm εμπόδιζε την άμεση έκθεση του δευτερεύοντα ανιχνευτή στην ακτινοβολία της πηγής. Με τη διάταξη αυτή βελτιώθηκε ο λόγος της επιφάνειας της φωτοκορυφής προς την επιφάνεια υποστρώματος (peak-to-background) για μία ραδιενεργό πηγή  $^{88}\text{Y}$ , καθώς παρατηρήθηκε μείωση του υποστρώματος Compton κατά 2.5 – 3 φορές.



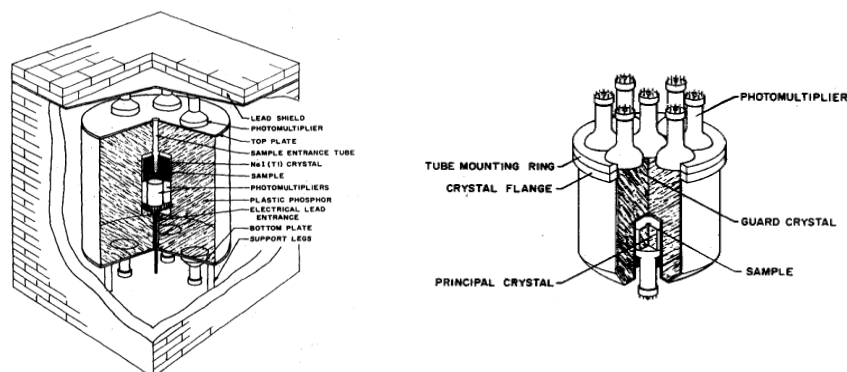
Εικόνα 2.24: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Broude, et al., 1969).

### 2.3.3 Συστήματα Compton Suppression για μετρήσεις χαμηλής ραδιενέργειας

Με την άνθηση της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής και των πυρηνικών όπλων στις δεκαετίες του 1950 και 1960, δημιουργήθηκε ανησυχία σχετικά με την περιβαλλοντική μετανάστευση και κατανομή των τεχνητών ισοτόπων που απελευθερώνονται από τις πυρηνικές δοκιμές και τις διάφορες πυρηνικές εγκαταστάσεις. Ως εκ τούτου, ήταν αναγκαίες πιο ευαίσθητες και ακριβείς μέθοδοι για την ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα. Τα συστήματα Compton Suppression, δεδομένης και της ανάπτυξης των ανιχνευτών σπινθηρισμού, ήταν κατάλληλα για εφαρμογή σε τέτοιες μετρήσεις. Η φύση της παρακολούθησης των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον απαιτεί την ελαχιστοποίηση του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης, καθώς τα επίπεδα ραδιενέργειας που φυσιολογικά απαντώνται στο περιβάλλον είναι συνήθως πολύ χαμηλά. Αυτό απαιτεί τη χρήση θωρακίσεων για την κοσμική ακτινοβολία, ενώ πρέπει να δίνεται προσοχή και στα επίπεδα ραδιενέργειας των ίδιων των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τέτοιων συστημάτων, για τα οποία είναι επιθυμητό να γίνονται μετρήσεις της ραδιενέργειάς τους πριν τη χρήση τους στην κατασκευή των μετρητικών συστημάτων (Wogman, 1980a). Οι

χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισotόπων στα περιβαλλοντικά δείγματα οδηγούν σε αυξημένες απαιτήσεις από την ανιχνευτική διάταξη, όσον αφορά στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος και στην αύξηση της ανιχνευσιμότητας των φωτοκορυφών στο φάσμα. Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία ιστορική αναδρομή διατάξεων, τα χαρακτηριστικά των οποίων τις καθιστούν κατάλληλες για μετρήσεις χαμηλών συγκεντρώσεων.

Με στόχο τη μελέτη των συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισotόπων στο περιβάλλον οι (Perkins, et al., 1960) κατασκεύασαν δύο ανιχνευτικά συστήματα. Το πρώτο σύστημα είχε ως ενεργητική θωράκιση έναν μεγάλο πλαστικό σπινθηριστή, διαμέτρου 66 cm και πάχους 76 cm συνδεδεμένο με οκτώ φωτοπολλαπλασιαστές. Ο κυρίως ανιχνευτής ήταν ένας ανιχνευτής NaI(Tl) τύπου φρέατος (well type) διαστάσεων 12.7 × 12.7 cm συνδεδεμένος με τέσσερις φωτοπολλαπλασιαστές και τοποθετημένος στο κέντρο της ενεργητικής θωράκισης. Ολόκληρη η διάταξη ήταν τοποθετημένη στο εσωτερικό θωράκισης μολύβδου πάχους 10.1 cm. Το πρωτοποριακό χαρακτηριστικό του εν λόγω συστήματος ήταν οι διαστάσεις του ανιχνευτή NaI(Tl), καθώς τέτοιοι ανιχνευτές δεν ήταν εύκολα διαθέσιμοι εκείνη την εποχή. Το δεύτερο ανιχνευτικό σύστημα είχε ως ενεργητική θωράκιση έναν κυλινδρικό ανιχνευτή NaI(Tl), διαμέτρου 23.8 cm και πάχους 21.6 cm συνδεδεμένο με έξι φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ ο κυρίως ανιχνευτής ήταν ένας κυλινδρικός ανιχνευτής NaI(Tl) διαστάσεων 7.6 × 7.6 cm συνδεδεμένος σε έναν φωτοπολλαπλασιαστή και τοποθετημένος σε μία αξονική κοιλότητα της ενεργητικής θωράκισης, διαμέτρου 8.6 cm (Εικόνα 2.25).

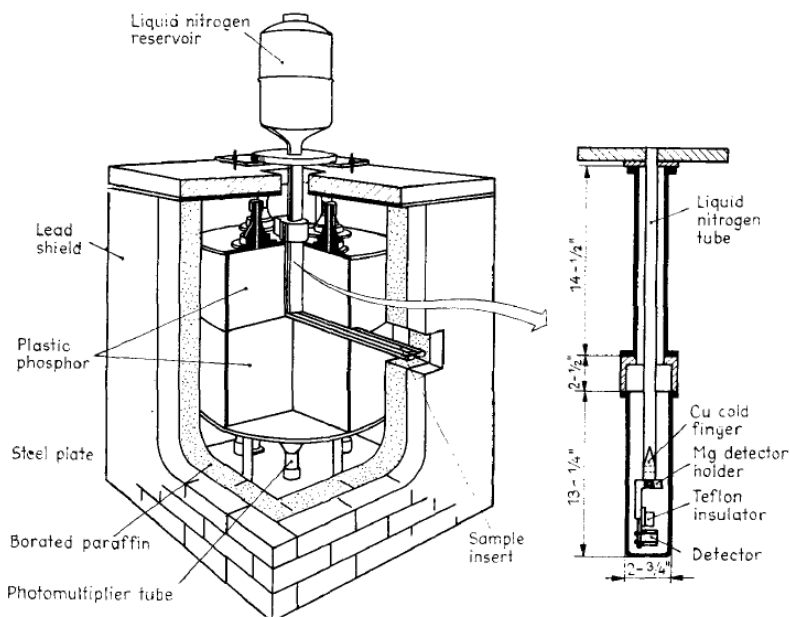


Εικόνα 2.25: Σχηματική παράσταση των διατάξεων των (Perkins, et al., 1960)

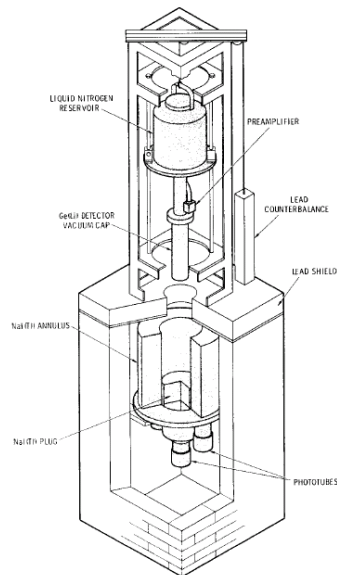
(αριστερά: διάταξη με ανιχνευτή well type 12.7 × 12.7 cm, δεξιά: διάταξη με ανιχνευτή NaI(Tl) 7.6 × 7.6 cm).

Η ανάπτυξη των ημιαγωγών ανιχνευτών Ge(Li) που ακολούθησε, καθώς και η διαθεσιμότητα μεγαλύτερων ανιχνευτών σπινθηρισμού NaI(Tl) έδωσε επιπλέον ώθηση στη χρήση βελτιωμένων συστημάτων Compton Suppression για περιβαλλοντικούς σκοπούς. Οι (Cooper, et al., 1970) χρησιμοποίησαν ως πρωτεύοντα ανιχνευτή έναν κυλινδρικό ανιχνευτή Ge(Li) και ως ενεργητική θωράκιση έναν πλαστικό σπινθηριστή διαμέτρου 66 cm και μήκους 61 cm. Η θωράκιση του συστήματος αποτελείτο από 10.2 cm παραφίνης και 10.2 cm μολύβδου (Εικόνα 2.26). Με το σύστημα αυτό παρατηρήθηκε μείωση της αιχμής Compton μίας πηγής  $^{137}\text{Cs}$  της τάξης του 10, ενώ ο λόγος κορυφής-αιχμής Compton (peak-to-Compton) ήταν 245:1. Με το σύστημα αυτό σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode) πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων με ισότοπα τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά (cascade emitters), όπως  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{88}\text{Y}$ .

Αργότερα, οι (Cooper, et al., 1972) ανέπτυξαν ένα σύστημα πολλαπλών χρήσεων με πρωτεύοντα ανιχνευτή έναν κυλινδρικό ανιχνευτή Ge(Li) όγκου  $65\text{ cm}^3$ , σε συνδυασμό με έναν δακτυλιοειδή ανιχνευτή NaI(Tl), διαμέτρου 29 cm και μήκους 38 cm, ως ενεργητική θωράκιση (Εικόνα 2.27). Η εν λόγω εργασία αποτέλεσε ακρογωνιαίο λίθο για μετέπειτα μελέτες στην κατεύθυνση αυτή. Η χρήση του συστήματος οδήγησε σε μείωση της αιχμής Compton πηγής  $^{137}\text{Cs}$  κατά 18 φορές και αύξησε το λόγο peak-to-Compton σε 780:1.

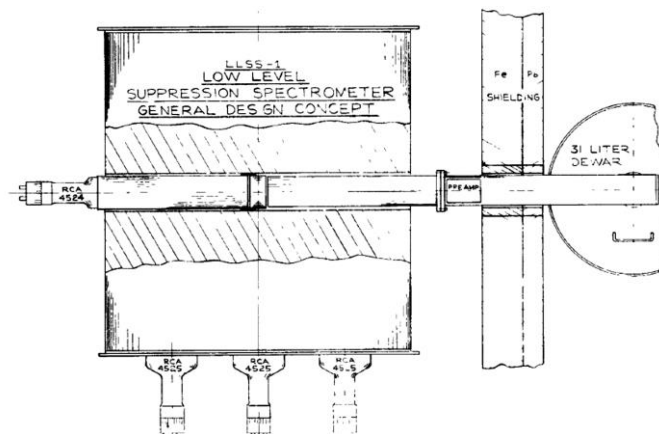


Εικόνα 2.26: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Cooper, et al., 1970).



Εικόνα 2.27: Σχηματική παράσταση της διάταξης πολλών χρήσεων των (Cooper, et al., 1972).

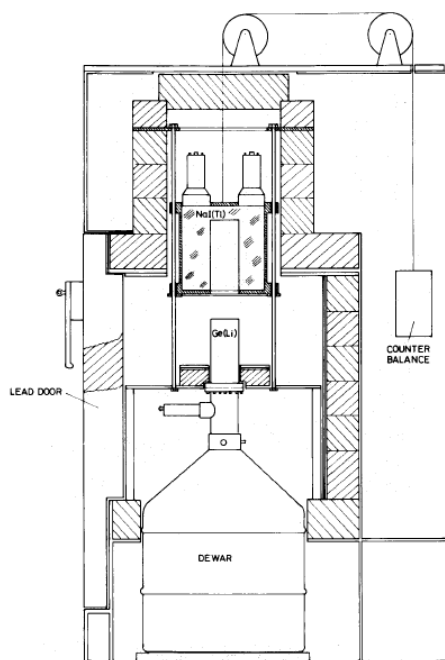
Οι (Camp, et al., 1974) σχεδίασαν και κατασκεύασαν σύστημα για μελέτες της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος το οποίο απαρτιζόταν από έναν ανιχνευτή Ge(Li) σχετικής απόδοσης 15%, τοποθετημένο στο εσωτερικό ενός μεγάλου πλαστικού σπινθηριστή, διαμέτρου 76.2 cm και πάχους 76.2 cm, που αποτελείτο από δύο ίδια τμήματα (Εικόνα 2.28). Μεγάλη προσοχή δόθηκε στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συστημάτων, ώστε να έχουν τα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα ραδιενέργειας. Με χρήση του συστήματος αυτού επετεύχθη για πηγή  $^{137}\text{Cs}$  μείωση κατά 7.5 φορές της αιχμής Compton και κατά 8 φορές στην ενεργειακή περιοχή < 400 keV. Ο λόγος peak-to-Compton ήταν 440:1.



Εικόνα 2.28: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Camp, et al., 1974).

Ένα άλλο σύστημα που παρουσιάστηκε από τους (Hötzi, et al., 1981) περιελάμβανε έναν ανιχνευτή Ge(Li) σχετικής απόδοσης 27.5% και έναν κρύσταλλο NaI(Tl) διαμέτρου 23 cm και μήκους 23 cm, με αξονική οπή διαμέτρου 7.8 cm και μήκους 18 cm, για την υποδοχή του κυρίως ανιχνευτή (Εικόνα 2.29). Το σύστημα

περιβαλλόταν από θωράκιση μολύβδου πάχους 10 cm με επένδυση από χαλκό και κάδμιο. Με το εν λόγω σύστημα παρατηρήθηκε μείωση της αιχμής Compton μίας πηγής  $^{137}\text{Cs}$  κατά 7.7 φορές, ενώ ο λόγος peak-to-Compton ήταν 480:1. Με ένα άλλο σύστημα (Wogman, 1980b), επετεύχθη λόγος peak-to-Compton μεγαλύτερος από 1000:1 και αντίστοιχη μείωση της αιχμής Compton κατά 9 φορές. Το σύστημα αυτό απαρτιζόταν από έναν ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 25% τοποθετημένο στο κέντρο συστοιχίας που αποτελείτο από πέντε ενωμένους κρυστάλλους  $\text{NaI}(\text{TI})$  με διάμετρο 30 cm και ύψος 50 cm. Η θωράκιση του συστήματος ήταν από παραφίνη εμπλουτισμένη με βόριο (borated paraffin), ατσάλι και μόλυβδο.

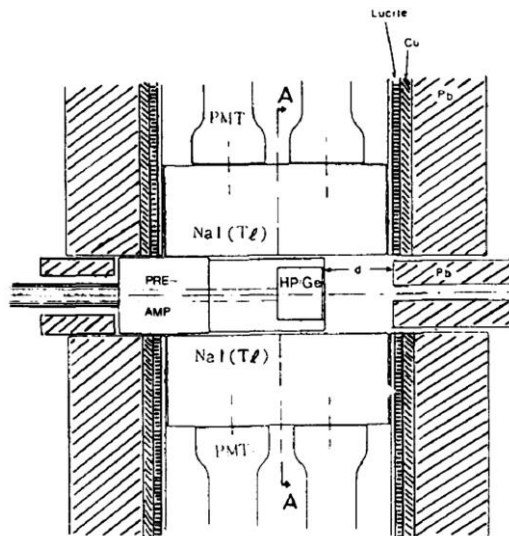


Εικόνα 2.29: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Hötzel, et al., 1981).

Οι (Chung, et al., 1986) χρησιμοποίησαν ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 25%, συνολικού όγκου  $113\text{ cm}^3$  και δακτυλιοειδή ανιχνευτή  $\text{NaI}(\text{TI})$  ως ενεργό θωράκιση, διαμέτρου 22.9 cm και ύψους 25.4 cm, τοποθετημένους στο εσωτερικό θωράκισης από μόλυβδο με φύλλα χαλκού και λουσίτη. Για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος αυτού τοποθετήθηκε πηγή  $^{137}\text{Cs}$  εξωτερικά της θωράκισης. Φωτόνια της πηγής έφταναν στον κυρίως ανιχνευτή μέσω οπής διαμέτρου 1 cm που διέθετε η θωράκιση, η οποία λειτουργούσε ως κατευθυντής δέσμης (Εικόνα 2.30). Για την παραπάνω γεωμετρία παρατηρήθηκε μείωση κατά 5.2 φορές του συνεχούς υποστρώματος στην ενεργειακή περιοχή κάτω από την αιχμή Compton του  $^{137}\text{Cs}$ . Σε ακόλουθη εργασία τους, οι (Chung, et al., 1988)



χρησιμοποίησαν το εν λόγω σύστημα για την ανάλυση δειγμάτων βρόχινου νερού μετά το ατύχημα του Chernobyl, αποδεικνύοντας ότι το σύστημα αυτό ήταν κατάλληλο για την ανάλυση δειγμάτων περιβαλλοντικής σημασίας.

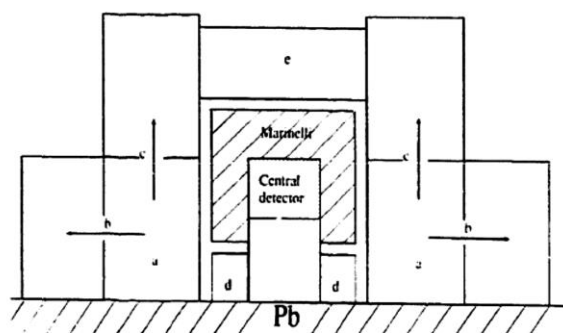


Εικόνα 2.30: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Chung, et al., 1986).

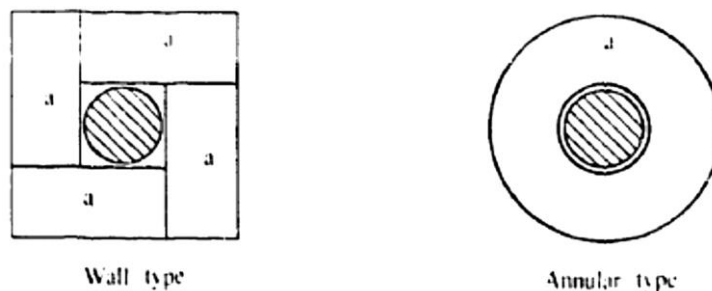
Για την παρακολούθηση των αέριων εκροών από νερό ψύξης ενός πειραματικού πυρηνικού αντιδραστήρα, οι (Yuan, et al., 1989) χρησιμοποίησαν ένα σύστημα Compton Suppression το οποίο αποτελείται από έναν ανιχνευτή HPGe και έναν κρύσταλλο NaI(Tl) ως ενεργητική θωράκιση. Με το σύστημα αυτό και για μία πηγή  $^{137}\text{Cs}$  ο λόγος peak-to-Compton βελτιώθηκε κατά 7.2 φορές, ενώ διαπιστώθηκε ότι η χρήση του συστήματος βελτίωσε τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης και για τα ισότοπα  $^{131}\text{I}$  και  $^{241}\text{Am}$ .

Μεταγενέστερα, οι (Sanchez, et al., 1992) μελέτησαν μέσω προσομοίωσης Monte Carlo τη μείωση της αιχμής Compton που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων σε δισκία petri και μεγάλου όγκου σε δοχεία Marinelli. Για την προσομοίωση θεωρήθηκαν τρεις τύποι ανιχνευτών σπινθηρισμού: πλαστικός, NaI(Tl) και BGO, σε συνδυασμό με πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe (Εικόνα 2.31). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στην κυλινδρική και την ορθογωνική γεωμετρία της ενεργητικής θωράκισης (Εικόνα 2.32). Επιπλέον μείωση του συνεχούς υποστρώματος Compton – της τάξης του 20% – σε ολόκληρη την ενεργειακή περιοχή του φάσματος παρατηρήθηκε όταν πάνω από το δείγμα (περιοχή e στην Εικόνα 2.31) τοποθετήθηκε επιπλέον ανιχνευτής σπινθηρισμού (plug detector), ενώ τοποθέτηση ανιχνευτή σπινθηρισμού

που περιβάλλει τον πρωτεύοντα ανιχνευτή κάτω από το δείγμα Marinelli επέφερε περαιτέρω μείωση 5% στο συνεχές υπόστρωμα (περιοχή d στην Εικόνα 2.31). Τέλος, η προσομοίωση έδειξε ότι αύξηση του πάχους του σπινθηριστή περιμετρικά του κυρίως ανιχνευτή (περιοχή b στην Εικόνα 2.31) πέραν κάποιου ορίου, δεν οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του υποστρώματος Compton. Με άλλα λόγια, διαπιστώθηκε πάχος κορεσμού, το οποίο για την περίπτωση του πλαστικού σπινθηριστή εκτιμήθηκε σε 20 cm. Η μέση συνολική μείωση του υποστρώματος για υλικά του δευτερεύοντα ανιχνευτή: πλαστικό σπινθηριστή, NaI(Tl) και BGO ήταν 2.46, 3.54 και 3.94, αντίστοιχα.



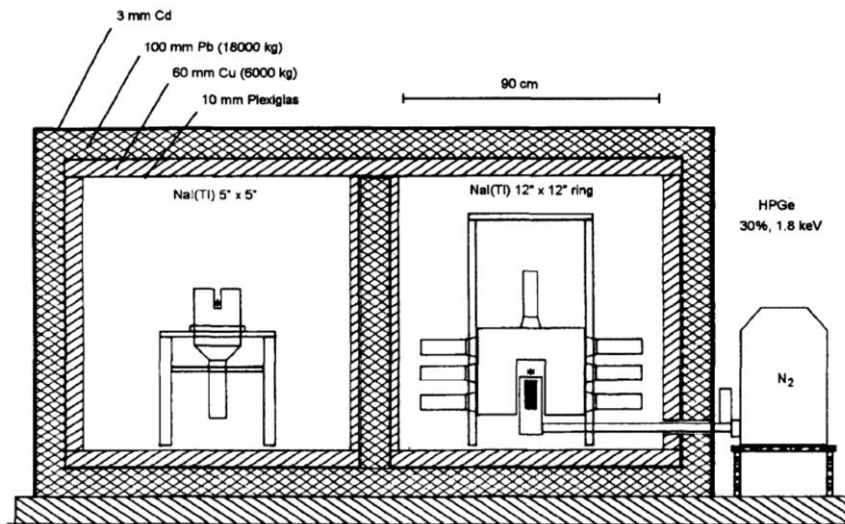
Εικόνα 2.31: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Sanchez, et al., 1992).



Εικόνα 2.32: Οι δύο γεωμετρίες της ενεργητικής θωράκισης των (Sanchez, et al., 1992).

Αριστερά: ορθογωνική, Δεξιά: κυλινδρική.

Με στόχο την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικής ραδιενέργειας σε ποικιλία περιβαλλοντικών δειγμάτων, οι (Sudarti, et al., 1997) σχεδίασαν ένα σύστημα με πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 30%, συνδεδεμένο σε οριζόντιο κρουστάτη, και ενεργητική θωράκιση αποτελούμενη από: δακτυλιοειδή ανιχνευτή NaI(Tl) 12" × 12" και plug ανιχνευτή NaI(Tl) διαστάσεων 3" × 3". Η ανιχνευτική διάταξη τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του ενός από τα δύο τμήματα θωράκισης από μόλυβδο αξιόλογων διαστάσεων (Εικόνα 2.33). Στο άλλο τμήμα της θωράκισης τοποθετήθηκε ένας ανιχνευτής NaI(Tl) τύπου φρέατος, διαστάσεων 5" × 5" με οπή στο κέντρο, για μετρήσεις αναφοράς.



Εικόνα 2.33: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Sudarti, et al., 1997).

Ο έλεγχος του συστήματος πραγματοποιήθηκε τόσο με πηγές  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$ , όσο και με τη χρήση πιστοποιημένων υλικών αναφοράς<sup>6</sup>. Για την περίπτωση της πηγής  $^{137}\text{Cs}$  διαπιστώθηκε μείωση της αιχμής Compton κατά 8.38 φορές, ενώ για την περίπτωση του  $^{60}\text{Co}$ , το οποίο εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, παρατηρήθηκε μείωση της φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης κατά 80% και 90% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV και 1332 keV, αντίστοιχα. Κατά τις μετρήσεις χρήσει υλικών αναφοράς (θαλάσσια ιζήματα, χερσαία και θαλάσσια χλωρίδα, ηφαιστειακή τέφρα) το σύστημα έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ανάλυση φυσικών και τεχνητών ισοτόπων, όπως ισότοπα του θορίου, του μολύβδου,  $^{40}\text{K}$  και  $^{137}\text{Cs}$ .

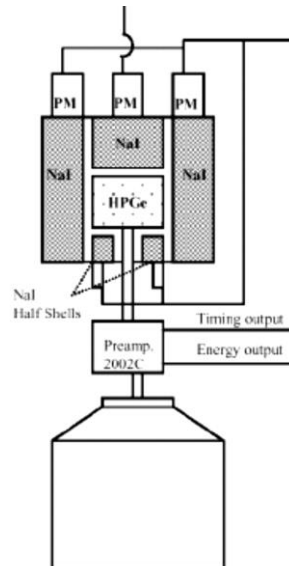
Οι (Iskander, et al., 2000) χρησιμοποίησαν ένα σύστημα Compton Suppression για την ανάλυση  $^{137}\text{Cs}$  σε δείγματα χώματος. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος είναι ιδανική για χαμηλές συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$ , περί τα 1 – 3 Bq/kg, ενώ για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις η μείωση του υποστρώματος ελάχιστα βοηθά στην ανίχνευση του εν λόγω ισοτόπου, καθώς η φωτοκορυφή είναι εύκολα ανιχνεύσιμη.

Το 2002 οι (Peerani, et al., 2002) μελέτησαν ανιχνευτική διάταξη με πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 52% και ενεργητική θωράκιση NaI(Tl) πάχους 2" και ύψους 10". Εξετάστηκε η απόκρισή της στην ανάλυση τόσο μονοενεργειακών ισοτόπων όσο και ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά (cascade) σε περιβαλλοντικά δείγματα όπως χώμα, ιζημα και βλάστηση. Στη διάταξη αυτή χρησιμοποίησαν δύο κυκλώματα λήψης σήματος ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη λήψη φασμάτων, unsuppressed και suppressed. Παρατήρησαν

<sup>6</sup> Certified Reference Materials (CRM)

βελτίωση του κατώτερου επιπέδου ανίχνευσης κατά 1.2 φορές για το  $^{241}\text{Am}$  και 2.6 φορές για το  $^{137}\text{Cs}$ , ενώ διαπίστωσαν ότι με χρήση της ενεργητικής θωράκισης είναι δυνατόν να ανιχνευθούν ισότοπα με συγκεντρώσεις μικρότερες από 1 Bq με ικανοποιητική ακρίβεια, ακόμα και σε δείγμα σχετικά υψηλής συνολικής ενεργότητας ( $\sim 1$  kBq). Όσον αφορά στα ισότοπα που υπόκεινται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, όπως  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ , διαπίστωσαν μείωση των φωτοκορυφών πλήρους απορρόφησης στο suppressed φάσμα, και κατ' επέκταση υποεκτίμηση της συγκέντρωσής τους, κατά 3 – 5 φορές.

Οι (Parus, et al., 2003) χρησιμοποιώντας κατάλληλη συνδεσμολογία εκμεταλλεύτηκαν τα σήματα από τον πρωτεύοντα ανιχνευτή και την ενεργητική θωράκιση ώστε να παράγονται ταυτόχρονα τρία φάσματα: ένα συμβατικό (unsuppressed), ένα αντί-σύμπτωσης (suppressed) και ένα σύμπτωσης (coincidence). Από μετρήσεις με πηγές  $^{137}\text{Cs}$  διαπίστωσαν ότι υψηλή ενεργότητα  $\sim 45$  kBq, στο suppressed φάσμα η επιφάνεια της φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης του  $^{137}\text{Cs}$  εμφανίζεται μειωμένη έως και 25% έναντι του unsuppressed λόγω του φαινομένου της τυχαίας σύμπτωσης (chance coincidence).



Εικόνα 2.34: Σχηματική παράσταση της διάταξης των (Parus, et al., 2003).

Μετά το 2000 με την ανάπτυξη των τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo επήλθε και άνθιση της χρήσης τέτοιων κωδίκων για τη μελέτη συστημάτων Compton Suppression. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν το νέο αυτό εργαλείο για να προβλέψουν την απόκριση τέτοιων συστημάτων. Με τη χρήση της προσομοίωσης ήταν δυνατός ο έλεγχος διαφορετικών συνδυασμών πρωτεύοντα ανιχνευτή και

ενεργητικής θωράκισης με στόχο την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας σε όρους μείωσης υποστρώματος, μείωσης αιχμών Compton, κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης αλλά και μείωσης των φωτοκορυφών πλήρους απορρόφησης, φαινόμενο που θα εξηγηθεί παρακάτω. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τόσο αλγόριθμοι κατασκευασμένοι από τους ίδιους τους ερευνητές (in-house developed) (Schmid, et al., 1999), (Jung, et al., 2007), όσο και εμπορικά διαθέσιμοι κώδικες, όπως MCNP (Scates, et al., 2006), (Kulisek, et al., 2007), GEANT (Aglietta, et al., 1992) (Schumaker, et al., 2007), (Duchene, et al., 1999), (Fechner, et al., 2011), (Britton, et al., 2013) ή FLUKA (Orrell, et al., 2007).

Εν κατακλείδι, με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας οι δυνατότητες ανίχνευσης με γ-φασματοσκοπική ανάλυση έχουν διευρυνθεί λόγω της ανάπτυξης των συστημάτων μείωσης του υποστρώματος Compton Suppression. Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι εργασίες της βιβλιογραφίας όπου χρησιμοποιούνται τέτοια συστήματα με ανιχνευτές HPGe για μετρήσεις χαμηλής ραδιενέργειας, δίνοντας για κάθε εργασία τα χαρακτηριστικά πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή και την επιτευχθείσα βελτίωση στην ανιχνευτική διάταξη.

Εργασία	Πρωτεύων ανιχνευτής	Δευτερεύων ανιχνευτής	Επιτευχθείσα μείωση
(Sever, et al., 1965)	Ge(Li) 1 cm <sup>2</sup> × 7 mm	Nal(Tl): well type Ø108 mm	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 9 φορές
(Broude, et al., 1969)	Ge(Li) 25 cm <sup>3</sup>	Ge(Li) 16 cm <sup>3</sup>	P/C <sup>88</sup> Y: 2.5 – 3 φορές
(Cooper, et al., 1970)	Ge(Li)	πλαστικός σπινθηριστής: Ø66 cm, μήκος 61 cm	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 10 φορές
(Cooper, et al., 1972)	Ge(Li) 65 cm <sup>3</sup>	Nal(Tl): Ø66 cm, μήκος 61 cm	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 18 φορές
(Camp, et al., 1974)	Ge(Li) 15%	πλαστικός σπινθηριστής: Ø76.2 cm, πάχος 76.2 cm	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 7.5 φορές
(Wogman, 1980b)	HPGe25%	Nal(Tl): δακτύλιος Ø30 cm × 50 cm	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 9 φορές
(Hötzel, et al., 1981)	Ge(Li) 27.5%	Nal(Tl): well type Ø7.8 cm	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 7.7 φορές
(Chung, et al., 1986)	HPGe25%	Nal(Tl): δακτύλιος Ø22.9 cm × 25.4 cm	αιχμή <sup>137</sup> Cs 662 keV: 5.2 φορές
(Masse, et al., 1991)	HPGe 11%	Nal(Tl): δακτύλιος 10" × 12" plug Ø2.5"	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 12.6 φορές
(Landsberger, 1994)	HPGe 18%	Nal(Tl): δακτύλιος 12" × 12" plug 3 × 3"	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 7.9 φορές
(Sudarti, et al., 1997)	HPGe 30%	Nal(Tl): δακτύλιος 12" × 12" plug 3" × 3"	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 8.4 φορές
(Peerani, et al., 2002)	HPGe 52%	Nal(Tl): πάχος 2", ύψος 10"	MDA: <sup>241</sup> Am 1.2 φορές <sup>137</sup> Cs 2.6 φορές
(Parus, et al., 2003)	HPGe 42.4%	Nal(Tl): δακτύλιος 10" × 10" plug 3" × 3"	αιχμή Compton <sup>137</sup> Cs: 11.9 φορές

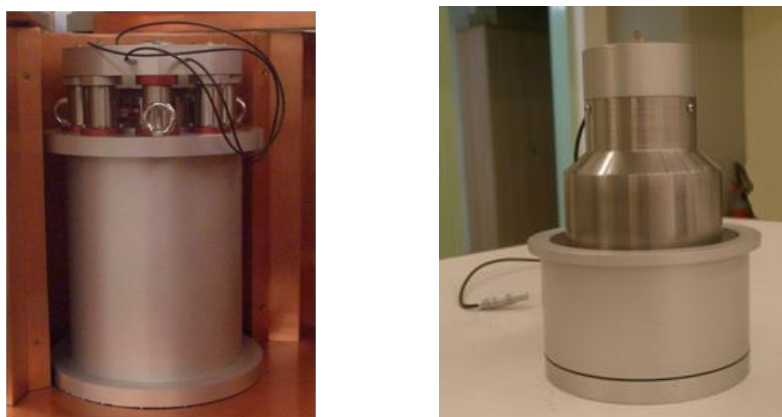
**Πίνακας 2.1: Συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση συστημάτων Compton Suppression με ανιχνευτές HPGe και επιτευχθείσα βελτίωση.**

## 2.4 Το σύστημα Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Το 2011 η ανιχνευτική διάταξη XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. αναβαθμίστηκε με την εγκατάσταση σε αυτήν συστήματος Compton Suppression (C.S.S.). Η εγκατάσταση του νέου συστήματος, η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ., είχε ως στόχο να βελτιώσει τις ικανότητες ανίχνευσης χαμηλών συγκεντρώσεων ραδιοϊσοτόπων, τόσο σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας, όπως φίλτρα αέρα, δείγματα χώματος ρυπασμένα λόγω του ατυχήματος του Chernobyl κλπ, όσο και σε δείγματα νετρονικής ενεργοποίησης. Παράλληλα, αναμένεται να επιτρέψει την υιοθέτηση γεωμετριών μικρότερου όγκου για αναλύσεις ρουτίνας, καθώς και τον ταχύτερο προσδιορισμό της συγκέντρωσης ισοτόπων όπως  $^{210}\text{Pb}$  και  $^7\text{Be}$ . Αυτό, εκτός των άλλων, θα επιτρέψει την καλύτερη εφαρμογή ήδη χρησιμοποιούμενων μεθόδων, όπως για παράδειγμα για την παρακολούθηση της κύμανσης της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα του κοσμογενούς ισοτόπου  $^7\text{Be}$  σε μικρή κλίμακα χρόνου (Parandreu, et al., 2011) και την εφαρμογή νέων μεθόδων για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών διεργασιών χρήσει ραδιενεργών ισοτόπων ως ιχνηλάτες (Mabit, et al., 2008).

Για τη μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα του συστήματος, το πάχος του δευτερεύοντα ανιχνευτή θα πρέπει να είναι αρκετά εκατοστά, κάτι που, με δεδομένες τις εσωτερικές διαστάσεις της θωράκισης έχει ως συνέπεια να ελαχιστοποιείται ο διαθέσιμος χώρος μεταξύ πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή (Camp, et al., 1974), (Canberra, 2001). Το πλεονέκτημα μίας τέτοιας γεωμετρίας είναι ότι μειώνεται και ο όγκος του αέρα μέσα τη θωράκιση, με προφανείς επιπτώσεις στη μείωση του υποστρώματος λόγω των θυγατρικών του ραδονίου τα οποία περιέχει. Το σύστημα Compton Suppression για την ανιχνευτική διάταξη XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σχεδιάσθηκε ώστε η ενεργητική θωράκιση να αποτελείται από δύο τμήματα: ένα δακτυλιοειδές (annulus) και ένα ανιχνευτή plug, ο οποίος αφαιρείται για την τοποθέτηση του προς ανάλυση δείγματος (Εικόνα 2.35). Ο δευτερεύων ανιχνευτής επιλέχθηκε να είναι κατασκευασμένος από NaI(Tl), καθώς οι ανιχνευτές NaI(Tl) έχουν χαμηλότερο κόστος, σε σχέση με τους ανιχνευτές BGO, ενώ παράλληλα έχουν υψηλότερη απόδοση φωτός (light yield) (Masse, et al., 1991). Οι διαστάσεις του δακτυλιοειδούς τμήματος (annulus)

επιλέχθηκαν ώστε να περιβάλλει πλήρως τον πρωτεύοντα ανιχνευτή και είναι: εσωτερική διάμετρος  $\varnothing 111$  mm, εξωτερική διάμετρος  $\varnothing 195$  mm και ύψος 267 mm. Ο αφαιρούμενος κυλινδρικός ανιχνευτής (plug), διαμέτρου κρυστάλλου  $\varnothing 103$  mm και ύψους κρυστάλλου 51 mm, τοποθετείται στο άνω μέρος του συστήματος ώστε να ανιχνεύονται και τα φωτόνια που οπισθοσκεδάζονται στον ανιχνευτή, προσφέροντας έτσι δυνατότητα ανίχνευσης σε γεωμετρία σχεδόν 4π. Το δακτυλιοειδές τμήμα του ανιχνευτή συνδέεται με οκτώ φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ ο αφαιρούμενος κυλινδρικός ανιχνευτής με έναν επιπλέον φωτοπολλαπλασιαστή. Όλοι οι φωτοπολλαπλασιαστές – εννέα στο σύνολο – τροφοδοτούνται από την ίδια μονάδα υψηλής τάσης και παράγουν ένα σήμα εξόδου. Το σχέδιο του ανιχνευτή NaI(Tl) φαίνεται στο Σχήμα 2.1 στο τέλος του Κεφαλαίου.



Εικόνα 2.35: Οι συνιστώσες του συστήματος Compton Suppression που εγκαταστάθηκε στη διάταξη του ανιχνευτή XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π (αριστερά: δακτυλιοειδής ανιχνευτής, δεξιά: ανιχνευτής plug).

#### 2.4.1 Τροποποιήσεις υπάρχουσας ανιχνευτικής διάταξης για την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression

Προ της εγκατάστασης του συστήματος Compton Suppression ο ανιχνευτής XtRa ήταν τοποθετημένος εντός παθητικής θωράκισης μολύβδου, κατακόρυφου προσανατολισμού τύπου front-open/split-top, μοντέλο 767 της Canberra (Σχήμα 2.2 στο τέλος του Κεφαλαίου). Για να είναι δυνατή η τοποθέτηση της ενεργητικής θωράκισης στο εσωτερικό της παθητικής, ο ανιχνευτής XtRa έπρεπε να μετακινηθεί σε χαμηλότερη θέση (Εικόνα 2.36). Η ακριβής θέση υπολογίστηκε ώστε να διατίθεται επαρκής χώρος μεταξύ της ενεργητικής θωράκισης και του ανιχνευτή XtRa για την τοποθέτηση τυπικού δοχείου δείγματος το οποίο χρησιμοποιείται κατά

τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Σημειώνεται ότι το κάλυμμα από πολυπροπυλένιο του ανιχνευτή που φαίνεται στην Εικόνα 2.36, μετά την εγκατάσταση της ενεργητικής θωράκισης, έπρεπε να τοποθετηθεί ανάποδα ώστε να είναι δυνατή η ενδεχόμενη μελλοντική αφαίρεση του.

Καθώς δεν ήταν δυνατή η περαιτέρω μετακίνηση του ανιχνευτή προς τα κάτω λόγω του περιορισμού που θέτει το δοχείο Dewar, ήταν απαραίτητη η μετακίνηση της παθητικής θωράκισης μολύβδου προς τα πάνω. Για την ανύψωση της θωράκισης, στο πλαίσιο της Δ.Δ., σχεδιάστηκε και κατασκευάσθηκε διάταξη αποτελούμενη από κοιλοδοκούς συνολικού ύψους ίσου με την επιθυμητή ανύψωση (Εικόνα 2.37). Το σχέδιο της διάταξης καθώς και τομές της παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3 στο τέλος του Κεφαλαίου.



**Εικόνα 2.36:** Η θέση του ανιχνευτή ΧtRa εντός της παθητικής θωράκισης (αριστερά: πριν την εγκατάσταση του C.S.S., δεξιά: μετά την μετατόπισή του σε χαμηλότερη θέση).

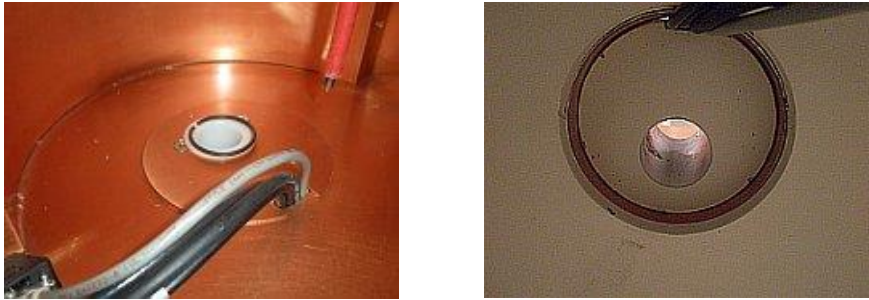


**Εικόνα 2.37:** Η διάταξη κοιλοδοκών για την ανύψωση του ανιχνευτικού συστήματος.

Κατά την ανύψωση της θωράκισης τμήμα της βάσης της θωράκισης έπρεπε να αφαιρεθεί (Εικόνα 2.38), ώστε ο κρυστάτης του ανιχνευτή να ολισθήσει εν μέρει



έξω από τη θωράκιση. Στην τελική θέση του ανιχνευτή, τμήμα του κρουστάτη του ανιχνευτή, ύψους ~ 1 cm, παραμένει εκτός της θωράκισης. Ωστόσο, δεν θεωρήθηκε αναγκαία η περαιτέρω τροποποίηση του συστήματος.



**Εικόνα 2.38:** Το τμήμα της θωράκισης που αφαιρέθηκε  
(αριστερά: άποψη εσωτερικά της θωράκισης, δεξιά: άποψη εξωτερικά της θωράκισης).

Για την κάλυψη του τμήματος του κρουστάτη που βρίσκεται εκτός θωράκισης τοποθετήθηκε ειδικό κάλυμμα το οποίο επιπλέον απομονώνει το σύστημα από τον εξωτερικό αέρα. Το κάλυμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε και για την τροφοδοσία του χώρου μεταξύ του ανιχνευτή XtRa και της ενεργητικής θωράκισης με αέριο άζωτο από την εκτόνωση του δοχείου Dewar (Εικόνα 2.39).



**Εικόνα 2.39:** Βάση κάλυψης του τμήματος του ανιχνευτή που βρίσκεται εκτός θωράκισης.

Για την είσοδο των καλωδίων σήματος και τροφοδοσίας του ανιχνευτή NaI(Tl) στο εσωτερικό της παθητικής θωράκισης μολύβδου, ήταν απαραίτητη η διάτρηση οπής στο άνω μέρος του πλαϊνού τμήματος της θωράκισης (Εικόνα 2.40, αριστερά).

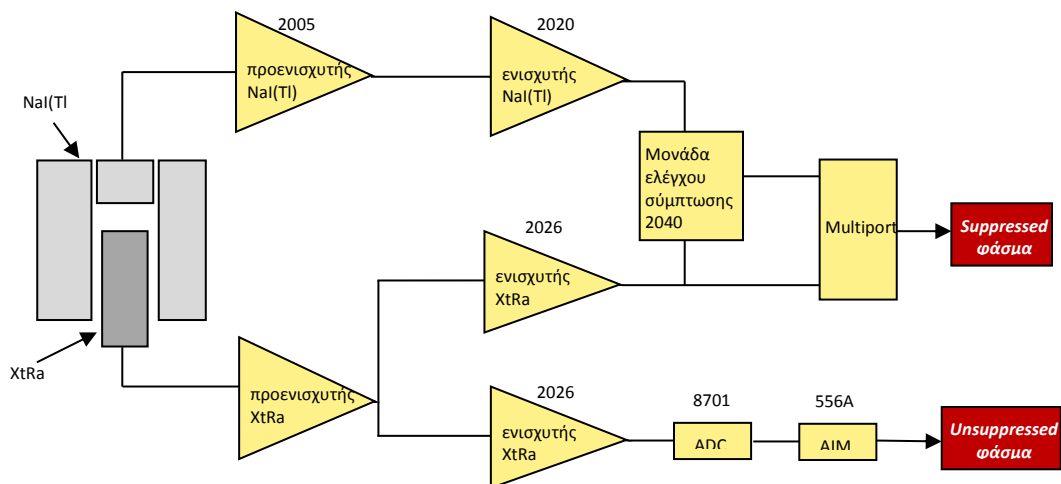
Τέλος, κατασκευάστηκε ειδική λαβή δακτυλιοειδούς σχήματος με σκοπό την ευκολότερη και ασφαλέστερη αφαίρεση και τοποθέτηση του ανιχνευτή plug. Η λαβή αυτή σχεδιάστηκε ώστε να εφαρμόζει στο άνω τμήμα του ανιχνευτή plug, επί του φωτοπολλαπλασιαστή (Εικόνα 2.40, δεξιά).



Εικόνα 2.40: Οπή στη θωράκιση της ανιχνευτικής διάταξης για τη σύνδεση των καλωδίων του ανιχνευτή NaI(Tl) (αριστερά) και δακτύλιος ασφαλούς αφαίρεσης plug ανιχνευτή (δεξιά) .

## 2.4.2 Ηλεκτρονική συγκρότηση του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η συγκρότηση της ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS δίνεται στην Εικόνα 2.41. Η όλη διάταξη διαιρείται σε δύο κλάδους, ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη λήψη ενός συμβατικού σήματος και ενός σήματος επεξεργασμένου στη μονάδα σύμπτωσης. Ως αποτέλεσμα μπορούν να ληφθούν συγχρόνως δύο φάσματα: συμβατικό (unsuppressed) και φάσμα με μειωμένο υπόστρωμα (suppressed), όταν η διάταξη είναι ρυθμισμένη σε λειτουργία anti-coincidence. Εναλλακτικά, η διάταξη μπορεί να ρυθμιστεί σε λειτουργία coincidence, οπότε λαμβάνονται πάλι δύο φάσματα: συμβατικό (unsuppressed) και φάσμα σύμπτωσης (coincidence).



Εικόνα 2.41: Σχεδιάγραμμα της ηλεκτρονικής σύνδεσης του CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

### Συμβατικός κλάδος:

Το σήμα από την έξοδο του προενισχυτή οδηγείται στον ενισχυτή, τύπου 2026 της CI. Για τις ανάγκες του συμβατικού φάσματος (unsuppressed), το ενισχυμένο

σήμα του πρωτεύοντα ανιχνευτή οδηγείται σε αναλογοψηφιακό μετατροπέα, τύπου 8701 της CI, και στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω μονάδας συλλογής σήματος (Acquisition Interface Module – AIM), τύπου 556A της εταιρείας CI, σε προσωπικό υπολογιστή όπου και συλλέγεται το unsuppressed φάσμα. Ο κλάδος αυτός στην ουσία δεν διαφέρει σε τίποτα από μία κλασική συνδεσμολογία διάταξης γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.

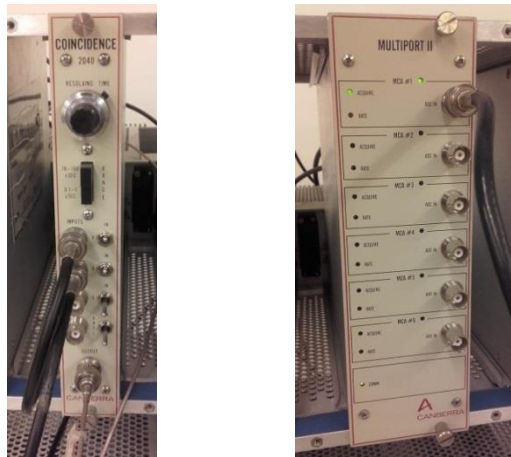
#### Compton suppression κλάδος:

Ο κλάδος αυτός περιλαμβάνει την ενεργητική θωράκιση από NaI(Tl). Για την τροφοδοσία της ενεργητικής θωράκισης χρησιμοποιείται μονάδα παροχής υψηλής τάσης, τύπου 3002D της εταιρείας CI, η οποία παρέχει διαφορά δυναμικού 950 V στους εννέα συνολικά φωτοπολλαπλασιαστές της ενεργητικής θωράκισης. Το παραγόμενο από την ενεργητική θωράκιση σήμα προενισχύεται στον προενισχυτή, τύπου 2005 της CI, και ενισχύεται στον ενισχυτή, τύπου 2020 της CI. Το σήμα του ενισχυτή, μαζί με το σήμα από τον ενισχυτή του ανιχνευτή XtRa εισάγονται στη μονάδα ελέγχου σύμπτωσης (coincidence gate), τύπου 2040 της CI (Εικόνα 2.42). Το σήμα από τον πρωτεύοντα ανιχνευτή εισάγεται στην υποδοχή A και ο αντίστοιχος διακόπτης τοποθετείται στη θέση IN. Ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία, το σήμα από την ενεργητική θωράκιση συνδέεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Λειτουργία σε *αντί-σύμπτωση*: το σήμα από την ενεργητική θωράκιση μπορεί να εισαχθεί σε οποιαδήποτε από τις υποδοχές B και C, τοποθετώντας τον αντίστοιχο διακόπτη στη θέση IN.
- Λειτουργία σε *σύμπτωση*: το σήμα από την ενεργητική θωράκιση πρέπει να εισάγεται στη θέση ANTI και μόνο σε αυτή, καθώς η μονάδα λειτουργεί σε σύμπτωση μόνο ανάμεσα σε μία από τις θέσεις A, B ή C (ή και όλες) και τη θέση ANTI.

Το σήμα του ανιχνευτή τροφοδοτείται και στη μονάδα τύπου Multiport II της CI, στην οποία έχει ενσωματωμένο τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC) και τον πολυκαναλικό αναλυτή (MCA) του κλάδου Compton Suppression. Τέτοιες μονάδες μπορεί να περιέχουν μέχρι και 6 ζεύγη ADC - MCA. Σημειώνεται ότι η εν λόγω μονάδα που χρησιμοποιείται στον Compton suppressed κλάδο διαθέτει μόνο ένα ζεύγος ADC - MCA. Το κατά πόσον καταγράφεται το σήμα του πρωτεύοντα

ανιχνευτή στο Multiport καθορίζεται από τη λήψη ή όχι κατάλληλου σήματος από την μονάδα ελέγχου σύμπτωσης (Coincidence gate). Με άλλα λόγια, το Multiport καταγράφει τα σήματα από τον ενισχυτή του πρωτεύοντος ανιχνευτή, εκτός και εάν λάβει σήμα από τη μονάδα ελέγχου σύμπτωσης να μην γίνει καταγραφή. Εάν το σύστημα λειτουργεί σε «αντί-σύμπτωση», τότε σήμα μη-καταγραφής παράγεται μόνο όταν παραχθούν σήματα και στους δύο ανιχνευτές (πρωτεύων και δευτερεύων). Εάν το σύστημα λειτουργεί σε «σύμπτωση», σήμα μη-καταγραφής παράγεται όταν έχει παραχθεί σήμα μόνο στον πρωτεύοντα ανιχνευτή. Συνοπτικά, η καταγραφή ή όχι των σημάτων από το Multiport δίνεται στον Πίνακα 2.2, όπου με ✓ σημειώνεται η καταγραφή σήματος και με x η μη καταγραφή.



Εικόνα 2.42: Μονάδα ελέγχου σύμπτωσης (αριστερά) και μονάδα τύπου Multiport (δεξιά).

	Πρωτεύων ανιχνευτής	Δευτερεύων ανιχνευτής	Multiport
αντι-σύμπτωση suppressed	✓	x	✓
	✓	✓	x
	x	✓	x
σύμπτωση coincidence	✓	x	x
	✓	✓	✓
	x	✓	x

Πίνακας 2.2: Περιπτώσεις καταγραφής (✓) ή όχι (x) σήματος στο Multiport για κάθε λειτουργία του συστήματος Compton Suppression.

Σημαντική παράμετρος για τον έλεγχο σύμπτωσης των σημάτων είναι το χρονικό παράθυρο που επιλέγεται ως χρόνος σύμπτωσης, ώστε δύο σήματα να θεωρηθούν ότι λαμβάνονται ταυτόχρονα. Εάν το παράθυρο είναι πολύ μικρό, τότε είναι δυνατό να χάνονται συμβάντα όπου ένα φωτόνιο αποθέτει μερικώς την ενέργειά του και

στους δύο ανιχνευτές. Από την άλλη, εάν είναι πολύ μεγάλο, καταγράφονται εντός του χρονικού παραθύρου και περιπτώσεις ανίχνευσης φωτονίων που προέρχονται από διασπάσεις διαφορετικών πυρήνων. Ως εκ τούτου, συνήθως επιλέγεται μία μέση λύση, ώστε να αποφεύγεται – κατά το δυνατόν – η μη καταγραφή πραγματικών συμβάντων σύμπτωσης, αλλά να μην καταγράφονται και συμβάντα τυχαίας σύμπτωσης φωτονίων από διαφορετικές διασπάσεις (Al-Azmi, 2008). Στη βιβλιογραφία, για συστήματα Compton Suppression με πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe και δευτερεύοντα NaI(Tl), συνήθως επιλέγονται χρονικά παράθυρα της τάξεως των 1000 nsec (Bikit, et al., 1999). Σε παρόμοια συστήματα έχουν επιλεχθεί και μικρότεροι χρόνοι της τάξεως των 900 nsec (Parus, et al., 2003), 500 nsec (Sudarti, et al., 1997), 100 nsec (Landsberger, et al., 2013), ενώ έχουν αναφερθεί και αρκετά υψηλότεροι χρόνοι περί τα 2500 nsec (Kantele, et al., 1966). Στο σύστημα του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. επιλέχθηκε χρονικό παράθυρο σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή ίσο με 1000 nsec (Pearsall, 2005).

Στην Εικόνα 2.43 φαίνεται συνολικά η διάταξη του ανιχνευτή XtRa μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression και τα ηλεκτρονικά και των δύο κλάδων της ανιχνευτικής διάταξης (συμβατικός και Compton Suppression), ενώ οι ρυθμίσεις τους δίνονται στον Πίνακα 2.3.



Εικόνα 2.43: Η ανιχνευτική διάταξη XtRa μετά την εγκατάσταση του C.S.S.

Σημειώνεται ότι η διάταξη του ανιχνευτή XtRa ήδη από πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression είχε την κωδική ονομασία «ανιχνευτής 4 – XtRa». Μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression και τη δημιουργία των δύο κλάδων, χρειάστηκε η εισαγωγή δύο «εικονικών ανιχνευτών» οι οποίοι αντιστοιχούν στα δύο φάσματα που συλλέγονται. Έτσι ο «ανιχνευτής 4 – XtRa» είναι πλέον αυτός που συλλέγει το unsuppressed φάσμα, ενώ εισάγεται και η κωδική ονομασία «ανιχνευτής 14 – XtCSS<sup>7</sup>» που αντιστοιχεί στον νέο κλάδο που περιλαμβάνει την ενεργητική θωράκιση (XtRa - CSS) και συλλέγει το suppressed φάσμα, και η κωδική ονομασία «ανιχνευτής 16 – XtCOIN» που αντιστοιχεί στον νέο κλάδο και συλλέγει το coincidence φάσμα.

	Μονάδα ηλεκτρονικών	Ρυθμίσεις
Συμβατικός κλάδος	H.V. Power supply (XtRa) 3106D	4.5kV, positive
	Amplifier 2026	coarse gain: 20, fine gain: 5.81, shaping time: 6 $\mu$ s
	ADC 8701	gain: 4k, range: 4k, peak detect: auto
Compton Suppression κλάδος	H.V. power supply (NaI) 3002D	0.95kV, positive
	Preamplifier (NaI) 2005	
	Amplifier (NaI) 2020	coarse gain:30, fine gain: 3.94, polarity: +, shaping time: 0.25 $\mu$ s, restorer: auto, asym, threshold: auto, PUR: on
	Amplifier (XtRa) 2026	coarse gain: 20, fine gain: 4.78, shaping time: 6 $\mu$ s
	Coincidence gate 2040	resolving time: 10, range: 0.1-1.0 $\mu$ s
	Multiport II	

Πίνακας 2.3: Ρυθμίσεις ηλεκτρονικών μονάδων διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

### 2.4.3 Το σύστημα μείωσης της συγκέντρωσης του ραδονίου

Οι ανιχνευτές γερμανίου χρησιμοποιούνται ευρέως στη  $\gamma$ -φασματοσκοπία για την ανάλυση δειγμάτων περιβαλλοντικής σημασίας, στα οποία μπορεί να περιέχονται φυσικά ραδιενεργά ισότοπα σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Σε αυτά τα δείγματα η μείωση του υποστρώματος αποτελεί σημαντική παράμετρο για την επιτυχή ανάλυση και την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας.

Κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση με στόχο την ανίχνευση φυσικών ραδιενεργών ισωτόπων σημαντική επίδραση έχει το διακριτό υπόστρωμα, το οποίο οφείλεται εκτός των άλλων και σε φωτόνια τα οποία εκπέμπονται από τα θυγατρικά

<sup>7</sup> Η κωδική ονομασία XtCSS αντιστοιχεί στον ανιχνευτή XtRa με το σύστημα Compton Suppression.

ισότοπα του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) και του θορονίου ( $^{220}\text{Rn}$ ), δύο βραχύβιων αερίων θυγατρικών της σειράς του  $^{238}\text{U}$  και της σειράς του  $^{232}\text{Th}$ , αντίστοιχα. Οι εν λόγω ραδιενεργές σειρές παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.4 και 2.5, αντίστοιχα, στο τέλος του Κεφαλαίου. Δεδομένου ότι οι πατρικοί πυρήνες βρίσκονται στο φλοιό της Γης και στα οικοδομικά υλικά, ο αέρας του χώρου στον οποίο είναι εγκαταστημένη μία ανιχνευτική διάταξη γ-φασματοσκοπίας εμπλουτίζεται με τα παραπάνω αέρια. Μάλιστα, καθώς η συγκέντρωσή τους στον αέρα δεν είναι σταθερή αλλά επηρεάζεται από διάφορες αιτίες, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες και ο εξαερισμός του χώρου, το διακριτό υπόστρωμα επηρεάζεται αναλόγως και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερό.

Τόσο τα επίπεδα, όσο και η κύμανση του διακριτού υποστρώματος εξαιτίας των θυγατρικών του ραδονίου μπορεί να περιοριστεί με την απομάκρυνση του αέρα από το εσωτερικό της θωράκισης, δηλαδή από το χώρο ανάμεσα στο δείγμα και τον ανιχνευτή (Gilmore, et al., 1995). Η απομάκρυνση αυτή βέβαια θα πρέπει να συνοδεύεται από ταυτόχρονη εισαγωγή στο χώρο αερίου απαλλαγμένο από ραδόνιο. Η απλούστερη και συνήθως εφαρμοζόμενη πρακτική περιλαμβάνει τη χρήση αερίου αζώτου, είτε από δοχείο αερίου αζώτου – μέθοδος που συνεπάγεται σημαντικό κόστος – είτε από την εξάτμιση του δοχείου υγρού αζώτου (Dewar) που χρησιμοποιείται για την ψύξη του ανιχνευτή (Parus, et al., 2003). Περισσότερες πληροφορίες για το αέριο ραδόνιο, καθώς και για τη δυνατότητα μείωσης της συγκέντρωσής του σε μία γ-φασματοσκοπική διάταξη μπορούν να αναζητηθούν στη Διδακτορική Διατριβή (Καράγγελος, 2008).

Αντίστοιχα με τις άλλες ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., για τη διάταξη του ανιχνευτή XtRa επιλέχθηκε η λύση της συνεχούς τροφοδοσίας του χώρου μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς ανιχνευτή με αέριο άζωτο από την εξάτμιση του δοχείου Dewar του ανιχνευτή.

Για τον έλεγχο της επίδρασης του αερίου αζώτου στο υπόστρωμα λόγω των θυγατρικών του ραδονίου λήφθηκαν φάσματα πριν και μετά την τοποθέτηση του συστήματος τροφοδοσίας αερίου αζώτου<sup>8</sup>. Για να καταδειχθεί η επίδραση του αζώτου στις φωτοκορυφές των θυγατρικών του ραδονίου, εξετάσθηκαν επίσης και

---

<sup>8</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.1, φάσματα με 1 – 9.

φωτοκορυφές που δεν αναμένεται να επηρεαστούν από την τροφοδοσία αέριου αζώτου, όπως οι φωτοκορυφές του  $^{234}\text{Th}$ , στα 63.29 keV και 92.70 keV, και η φωτοκορυφή του  $^{40}\text{K}$ , στα 1460.75 keV. Τα διαγράμματα διάσπασης των εν λόγω ισωτόπων παρουσιάζονται στο Παράστημα Β.

Για τη σύγκριση του ρυθμού καταγραφομένων γεγονότων (cps) των φασμάτων που ελήφθησαν χωρίς και με τροφοδοσία αέριου  $\text{N}_2$ , υπολογίζονται οι λόγοι τους και πραγματοποιείται ο στατιστικός έλεγχος U-test<sup>9</sup>, προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι συγκρινόμενες τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 2.4.

Ενέργεια (keV)	Ισότοπο	unsuppressed φάσμα		suppressed φάσμα	
		cps <sub>χωρίς</sub> /cps <sub>με</sub>	U	cps <sub>χωρίς</sub> /cps <sub>με</sub>	U
46.52	$^{210}\text{Pb}$	0.956	0.36	0.968	0.35
63.29	$^{234}\text{Th}$	1.020	0.40	1.025	0.52
87.20	$^{212}\text{Pb}$	--	--	--	--
92.70	$^{234}\text{Th}$	1.014	0.52	1.012	0.35
185.70	$^{235}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$	1.022	0.56	0.999	0.05
238.63	$^{212}\text{Pb}$	1.062	0.39	0.996	0.05
270.30	$^{228}\text{Ac}$	--	--	--	--
295.22	$^{214}\text{Pb}$	1.593	1.26	1.928	1.54
300.00	$^{212}\text{Pb}$	0.892	0.31	0.948	0.18
328.00	$^{228}\text{Ac}$	--	--	--	--
338.40	$^{228}\text{Ac}$	0.841	0.95	0.905	0.76
351.99	$^{214}\text{Pb}$	1.121	0.94	1.089	1.11
583.14	$^{208}\text{Tl}$	1.022	0.08	0.986	0.06
609.32	$^{214}\text{Bi}$	1.048	0.59	0.993	0.10
860.47	$^{208}\text{Tl}$	1.020	0.07	0.884	0.62
911.07	$^{228}\text{Ac}$	1.095	1.00	1.022	0.15
968.90	$^{228}\text{Ac}$	1.035	0.22	1.006	0.04
1120.28	$^{214}\text{Bi}$	1.080	0.50	1.056	0.54
1238.10	$^{214}\text{Bi}$	0.991	0.02	0.895	0.49
1377.65	$^{214}\text{Bi}$	--	--	0.963	0.15
1460.75	$^{40}\text{K}$	1.014	1.16	1.007	0.75
1764.51	$^{214}\text{Bi}$	0.957	0.53	0.974	0.57

Πίνακας 2.4: Σύγκριση του ρυθμού καταγραφόμενων γεγονότων χωρίς και με παροχή αέριου αζώτου.

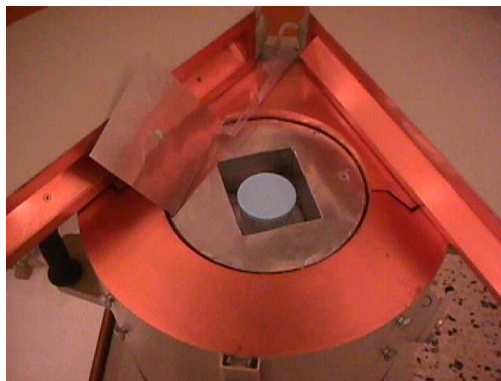
Όπως διαπιστώνεται, τόσο για το suppressed όσο και για το unsuppressed φάσμα, δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές των επιπέδων του υποστρώματος με και χωρίς την παροχή αερίου αζώτου, ( $U < 1.96$  για όλες τις φωτοκορυφές) κάτι που δείχνει ότι η επίδραση του αερίου αζώτου στην μείωση του υποστρώματος ραδονίου δεν φαίνεται να είναι σημαντική για τη διάταξη. Πρέπει

<sup>9</sup> Λεπτομέρειες για το U-test δίνονται στο Παράρτημα Γ.



πάντως να επισημανθεί ότι, όπως παρατηρήθηκε κατά τις αναλύσεις, στο un-suppressed φάσμα η συνεχής τροφοδοσία αέριου αζώτου οδηγεί εν γένει σε μείωση της αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό της επιφάνειας των φωτοκορυφών υποστρώματος. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η παραπάνω σύγκριση πραγματοποιήθηκε χωρίς δύο φασμάτων χωρίς τροφοδοσία αζώτου και δύο φασμάτων με τροφοδοσία, με σκοπό να καταδειχθεί η τάση που παρατηρείται και όχι να γίνει εκτενής μελέτη της κύμανσης της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου χωρίς και με τροφοδοσία αέριου αζώτου.

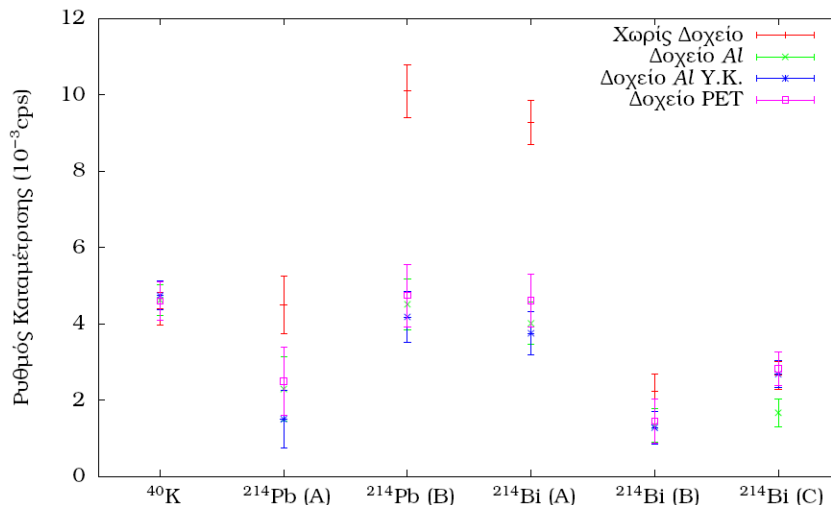
Συγκριτικά και για λόγους πληρότητας, δίνονται στοιχεία από την αντίστοιχη προσπάθεια μείωσης της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στη διάταξη του ανιχνευτή XtRa, πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression, από τη Διδακτορική Διατριβή (Καράγγελος, 2008). Με σκοπό την απομάκρυνση του ατμοσφαιρικού αέρα από το εσωτερικό της θωράκισης του ανιχνευτή XtRa, πέραν της συνεχούς τροφοδοσίας με αέριο  $N_2$  από την εξάτμιση του δοχείου Dewar, είχαν τότε μελετηθεί κι άλλες λύσεις, καθώς – δεδομένων των γεωμετριών δείγματος που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. και της θωράκισης του ανιχνευτή XtRa (Εικόνα 2.36) – ο όγκος μέσα στη θωράκιση του ανιχνευτή ο οποίος πληρωνόταν με αέρα ήταν αξιόλογος  $\sim 20\,000\text{ cm}^3$ . Με βάση την παρατήρηση αυτή είχε κατασκευασθεί ένα δοχείο, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.44 και το οποίο είχε πληρωθεί με «παλιό αέρα<sup>10</sup>» και τοποθετηθεί στο εσωτερικό της θωράκισης ώστε να εκτοπίσει τον αέρα από το εσωτερικό της.



<sup>10</sup> Στην πραγματικότητα, το δοχείο είχε αφηθεί περί τις 30 ημέρες πριν τοποθετηθεί μέσα στη θωράκιση, προκειμένου να έχουν απομειωθεί πλήρως τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου τα οποία συνεισφέρουν στο υπόστρωμα της διάταξης.

**Εικόνα 2.44: Δοχείο από αλουμίνιο για τη μείωση του υποστρώματος ραδονίου.**

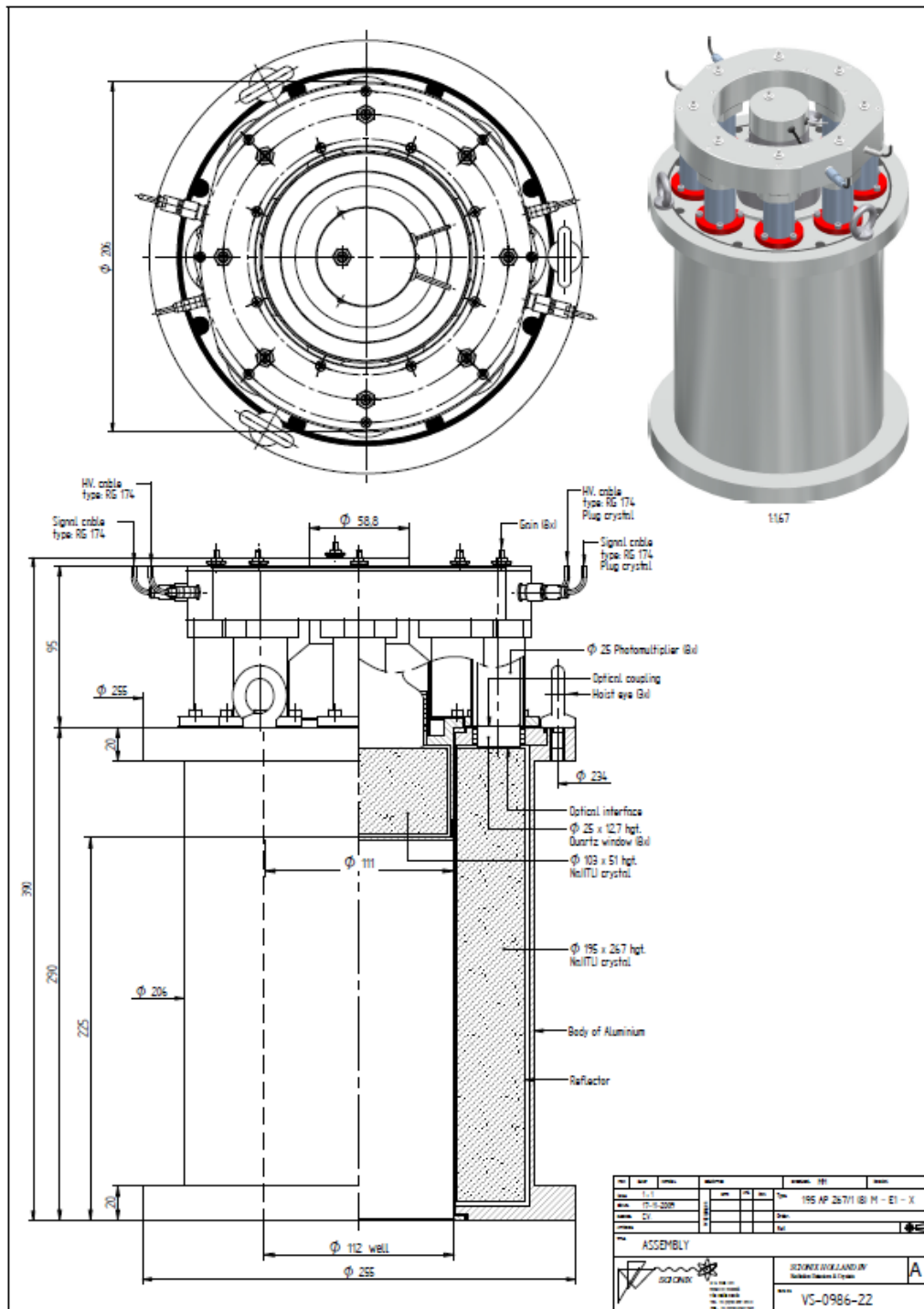
Για την κατασκευή του δοχείου αυτού είχαν χρησιμοποιηθεί τα παρακάτω υλικά: Al από την αγορά, Al υψηλής καθαρότητας (Υ.Κ.) και PET (Polyethylene terephthalate). Η σχετική επίδραση των τριών δοχείων στο υπόστρωμα λόγω θυγατρικών του  $^{222}\text{Rn}$  παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.45. Όπως παρατηρείται, η αποτελεσματικότητα των τριών δοχείων ως προς τη μείωση του υποβάθρου των  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$  είναι συγκρίσιμη. Επιπλέον, η χρήση του δοχείου είχε τότε ως συνέπεια σημαντική μείωση του υποβάθρου λόγω των θυγατρικών του ραδονίου.



**Εικόνα 2.45: Επίδραση των διαφόρων δοχείων στο υπόστρωμα του ανιχνευτή XtRa (Καράγγελος, 2008).**

Το γεγονός ότι στη νέα διάταξη δεν διαπιστώνεται σημαντική επίδραση του αερίου αζώτου εντός της θωράκισης στο υπόστρωμα, πρέπει να οφείλεται εις το ότι ο όγκος του αέρα εντός της θωράκισης έχει μειωθεί σημαντικά (σε περίπου  $\sim 750 \text{ cm}^3$ ) λόγω της τοποθέτησης του συστήματος Compton Suppression, σε σχέση με τον όγκο του αέρα προ της εγκατάστασης του συστήματος. Επιπλέον, το  $\sim 40\%$  του όγκου ( $\sim 300 \text{ cm}^3$ ) καταλαμβάνεται από το αναλυόμενο δείγμα. Ως αποτέλεσμα, μικρότερος όγκος αέρα σημαίνει μικρότερη παραγωγή θυγατρικών του ραδονίου εντός της θωράκισης του ανιχνευτή και μικρότερη συνεισφορά του εντός της θωράκισης ραδονίου στο υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης. Επισημαίνεται πάντως ότι, παρά τη διαπίστωση αυτή, η θωράκιση της ανιχνευτικής διάταξης τροφοδοτείται αδιαλείπτως με αέριο άζωτο από την εξάτμιση του δοχείου του υγρού αζώτου.

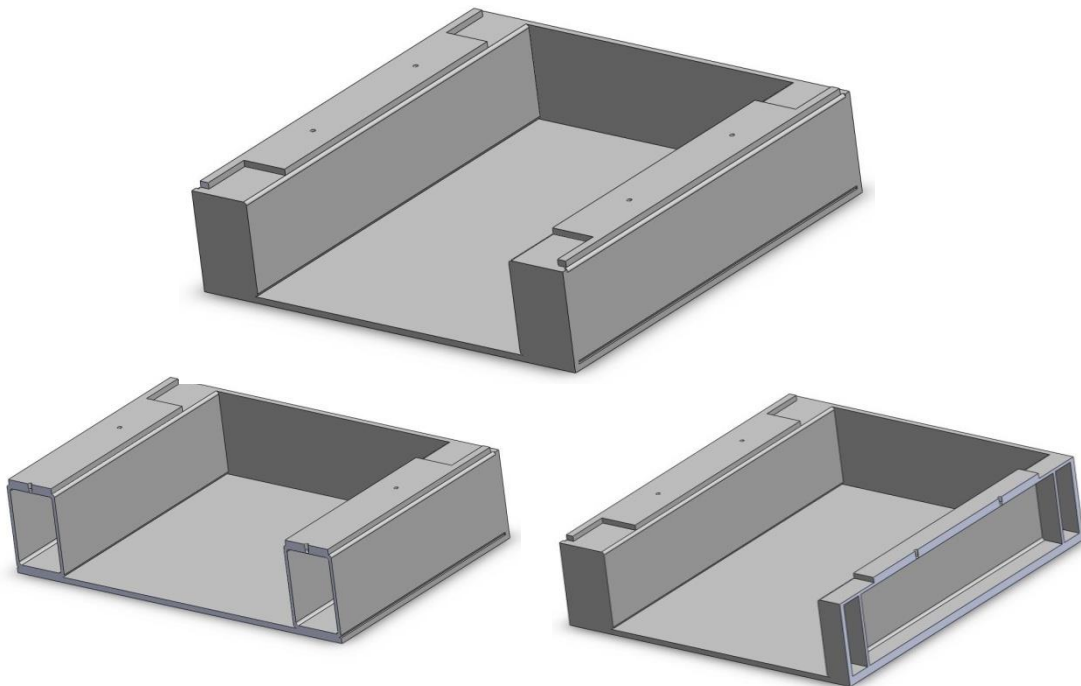
## ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2



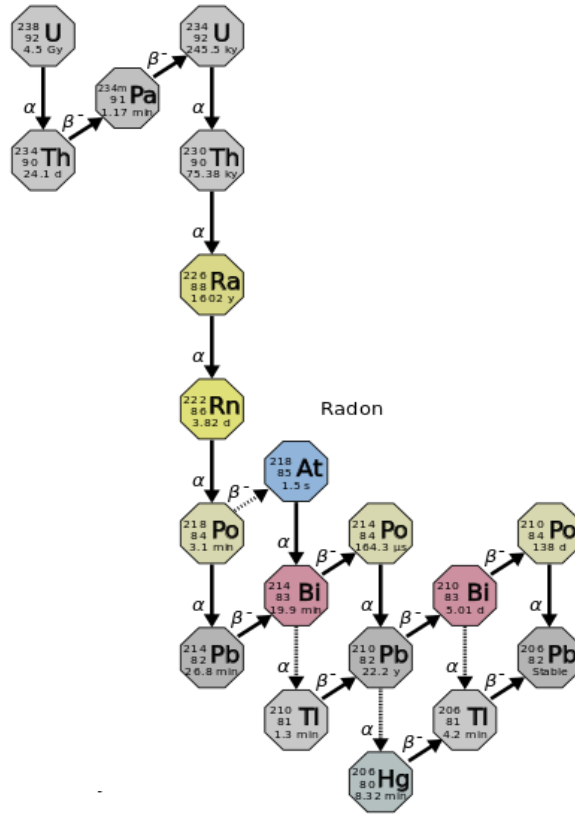
Σχήμα 2.1: Σχέδιο του ανιχνευτή NaI(Tl) του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.



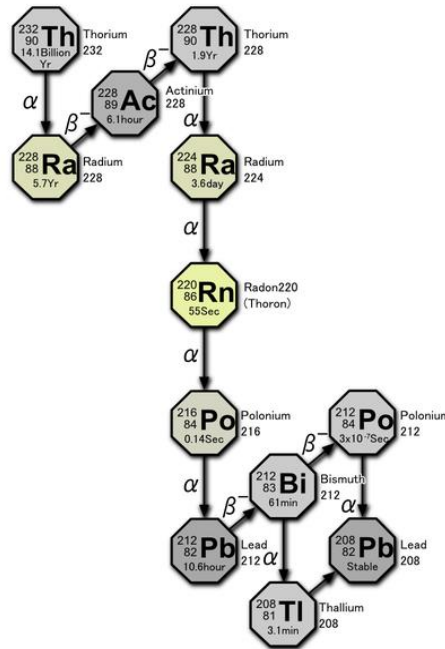
Σχήμα 2.2: Η θωράκιση του ανιχνευτή XtRa μοντέλο 767 της Canberra Industries.



Σχήμα 2.3: Σχέδιο της διάταξης κοιλοδοκών για την ανύψωση της θωράκισης Pb του ανιχνευτή XtRa. (πάνω: σχέδιο ολόκληρης της διάταξης, κάτω: εγκάρσια (αριστερά) και διαμήκης (δεξιά) τομή της διάταξης)



Σχήμα 2.4: Ραδιενεργός σειρά <sup>238</sup>U.



Σχήμα 2.5: Ραδιενεργός σειρά <sup>232</sup>Th.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Μελέτη της απόκρισης του συστήματος *Compton Suppression* του *E.P.T. - E.M.P.*

---

### 3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ., σχετικά με την απόκριση του συστήματος *Compton Suppression* που εγκαταστάθηκε στο *E.P.T. - E.M.P.* Αρχικά, παρουσιάζονται τα μεγέθη που συνήθως απαντώνται στη βιβλιογραφία, για τη μελέτη της απόκρισης μίας ανιχνευτικής διάταξης γ-φασματοσκοπίας και στη συνέχεια τα μεγέθη και οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της απόκρισης μίας ανιχνευτικής διάταξης, η οποία διαθέτει σύστημα μείωσης του υποστρώματος *Compton Suppression*. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος *Compton Suppression* του *E.P.T. - E.M.P.*, με και χωρίς τη χρήση πηγών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πιστοποιημένες και μη πηγές (σημειακές, επιφανειακές και όγκου) που ήταν διαθέσιμες στο Εργαστήριο κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ. Η μελέτη είναι συγκριτική, ανάμεσα στη λειτουργία χωρίς και με το σύστημα *Compton Suppression*, και για το λόγο αυτό είναι ήσσονος σημασίας το κατά πόσον οι πηγές είναι πιστοποιημένες. Τέλος, σημειώνεται ότι το νέο σύστημα μελετάται και για τους δύο τρόπους λειτουργίας: σε αντί-σύμπτωση (*anti-coincidence mode*) και σε σύμπτωση (*coincidence mode*).

### 3.2 Μελέτη γ-ανιχνευτικής διάταξης και διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται εν συντομία, τα κυριότερα μεγέθη που απαντώνται στη βιβλιογραφία για την ποσοτικοποίηση της απόκρισης γ-ανιχνευτικών διατάξεων, την πιστοποίηση και τη σύγκρισή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου μεγέθους είναι ο λόγος της επιφάνειας φωτοκορυφής προς την επιφάνεια της αιχμής Compton (peak-to-Compton). Μία προσπάθεια τυποποίησης των μεγεθών αυτών μπορεί να αναζητηθεί στο (ANSI/IEEE, 1997). Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται σε μεγέθη που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό διατάξεων που χρησιμοποιούν σύστημα Compton Suppression.

#### 3.2.1 Μεγέθη για τη μελέτη της απόκρισης γ-ανιχνευτικής διάταξης

Σε ό,τι αφορά στο χαρακτηρισμό και τη σύγκριση της απόκρισης γ-ανιχνευτικών διατάξεων εν γένει, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μεγέθη<sup>11</sup>:

- Λόγος *Peak Height-to-Compton*, (P/C), (ANSI/IEEE, 1997):

Ο λόγος Peak Height-to-Compton για μία συγκεκριμένη φωτοκορυφή ορίζεται ως ο λόγος του ύψους της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης, δηλαδή του πλήθους των κρούσεων στο κανάλι με τις περισσότερες κρούσεις, προς τη μέση τιμή του πλήθους των κρούσεων που καταγράφονται σε μία σχετικά επίπεδη περιοχή κοντά στην αιχμή Compton, που αντιστοιχεί στην εν λόγω ενέργεια φωτονίων, η οποία όμως δεν περιλαμβάνει την ίδια την αιχμή Compton.

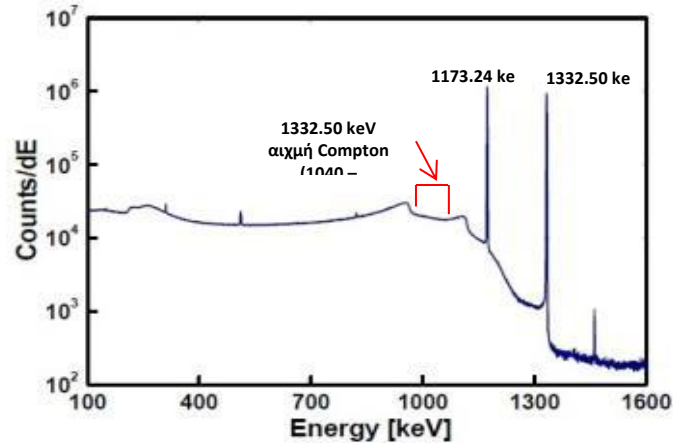
Έστω  $C_p$  το πλήθος των κρούσεων στο κανάλι όπου η υπό εξέταση φωτοκορυφή έχει το μέγιστο ύψος,  $i$  και  $j$  τα κανάλια στην αρχή και στο τέλος της επίπεδης περιοχής, αντίστοιχα, και  $C_k$  οι κρούσεις στο κανάλι  $k$ . Τότε, ο λόγος Peak Height-to-Compton υπολογίζεται από τη Σχέση:

$$(P/C) = \frac{C_p}{\frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^j C_k} \quad \text{Σχέση (3.1)}$$

<sup>11</sup> Μία σειρά από μεγέθη, όπως η απόδοση φωτοκορυφής και η ολική απόδοση, είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικά για τη μελέτη της απόκρισης μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης. Τα μεγέθη αυτά δεν παρουσιάζονται στο σημείο αυτό για λόγους οικονομίας, καθώς δεν θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση που ακολουθεί στο Κεφάλαιο αυτό. Αναλυτικά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.



Ενδεικτικά, για τα φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV του  $^{60}\text{Co}$ , για τον υπολογισμό των κρούσεων στην επίπεδη περιοχή κοντά στην περιοχή της αιχμής Compton, προτείνεται να χρησιμοποιούνται τα κανάλια στην ενεργειακή περιοχή 1040 – 1096 keV (Εικόνα 3.1), ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 661.62 keV του  $^{137}\text{Cs}$ , τα κανάλια στην ενεργειακή περιοχή 358 – 382 keV (ANSI/IEEE, 1997).



Εικόνα 3.1: Τυπικό ενεργειακό φάσμα πηγής  $^{60}\text{Co}$ .

- Λόγος *Peak Area-to-Compton*,  $A(P/C)$ , (Landsberger, et al., 1996):

Ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής επιφάνειας της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, προς την επιφάνεια που σχηματίζεται σε επίπεδη περιοχή κοντά στην αιχμή Compton, η οποία όμως έχει ίσο πλάτος με τη φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης:

$$A(P/C) = \frac{\sum_{k=p_i}^{p_j} C_k - B}{\sum_{k=i}^j C_k} \quad \text{Σχέση (3.2)}$$

όπου  $C_k$  είναι το πλήθος των κρούσεων στο κανάλι  $k$ ,  $p_i$  και  $p_j$  αντιστοιχούν στα κανάλια στην αρχή και στο τέλος, αντίστοιχα, της φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης,  $i$  και  $j$  είναι τα κανάλια στην αρχή και στο τέλος, αντίστοιχα, στην επίπεδη περιοχή κοντά στην αιχμή Compton, και  $B$  είναι η επιφάνεια του υποστρώματος κάτω από τη φωτοκορυφή.

Για τον υπολογισμό των κρούσεων στην επίπεδη περιοχή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες ενεργειακές περιοχές με το λόγο  $(P/C)$ .

- Λόγος *Peak area-to-Total area*,  $A(P/T)$  (Landsberger, et al., 1996):

Ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής επιφάνειας της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, προς τη συνολική επιφάνεια στο φάσμα συμπεριλαμβανομένων της αιχμής Compton και της ίδιας της φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης:

$$A(P/T) = \frac{\sum_{k=p_i}^{p_j} C_k - B}{\sum_{k=1}^M C_k} \quad \text{Σχέση (3.3)}$$

όπου  $M$  είναι το συνολικό πλήθος καναλιών του φάσματος.

- Κατώτερο όριο ανίχνευσης, *Low Limit of Detection*,  $L_D$ , και ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια, *Minimum Detectable Activity*, M.D.A. (Gilmore, et al., 1995):

Το κατώτερο όριο ανίχνευσης  $L_D$  παρέχει την κατώτερη τιμή καθαρής επιφάνειας, σε συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης (συνήθως 95%), που πρέπει να έχει μία φωτοκορυφή, προκειμένου να είναι ανιχνεύσιμη και δίνεται από τη Σχέση (Aurelian, 2009):

$$L_D = 2 \cdot k_a \sqrt{B_s \cdot \left(1 + \frac{n_s}{2 \cdot m_s}\right) + A_b \cdot \left(1 + \frac{t_s}{t_b}\right) + B_b \cdot \left(1 + \frac{n_b}{2 \cdot m_b}\right)} \quad \text{Σχέση (3.4)}$$

όπου  $k_a$  είναι συντελεστής, ο οποίος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισούται με 1.645,  $B_s$  και  $B_b$  είναι η επιφάνεια του συνεχούς υποστρώματος κάτω από την φωτοκορυφή στα φάσματα του δείγματος και του υποστρώματος, αντίστοιχα,  $A_b$  είναι η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής στο φάσμα του υποστρώματος,  $t_s$  και  $t_b$  είναι ο χρόνος συλλογής των φασμάτων δείγματος και υποστρώματος, αντίστοιχα,  $n_s$  και  $n_b$  είναι το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή στα φάσματα δείγματος και υποστρώματος, αντίστοιχα, και  $m_s$  και  $m_b$  είναι το πλήθος καναλιών αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής στα φάσματα δείγματος και υποστρώματος, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της επιφάνειας του συνεχούς υποστρώματος που της αντιστοιχεί. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί η κύμανση – κυρίως εποχιακή – που παρουσιάζουν ορισμένες από τις φωτοκορυφές υποστρώματος, όπως αυτές που οφείλονται στα θυγατρικά του  $^{222}\text{Rn}$  και  $^{220}\text{Rn}$ .

Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια, M.D.A., είναι έννοια που συνδέεται άμεσα με το  $L_D$  και εκφράζει την ελάχιστη ποσότητα ραδιενέργειας ενός ισότοπου που πρέπει να περιέχεται σε ένα δείγμα ώστε να υπάρχει συγκεκριμένη πιθανότητα (π.χ. 95%) για την ανίχνευσή του. Πρόκειται δηλαδή για την ραδιενέργεια που αντιστοιχεί σε επιφάνεια φωτοκορυφής ίση με  $L_D$ . Το M.D.A. δίνεται από τη Σχέση:

$$\text{M.D.A.} = \frac{L_D}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{efficiency}} \quad \text{Σχέση (3.5)}$$

όπου  $L_D$  είναι το κατώτερο όριο ανίχνευσης, time ο χρόνος συλλογής του φάσματος, yield το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου και efficiency είναι η απόδοση πλήρους απορρόφησης (Παράγραφος 4.3). Το M.D.A. αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο σύγκρισης, τόσο διαφορετικών ανιχνευτικών συστημάτων, όσο και διαφορετικών τεχνικών μέτρησης. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα κατώτερα όρια ανίχνευσης μπορούν να αναζητηθούν σε άλλη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012).

### 3.2.2 Μεγέθη για τη μελέτη της απόκρισης γ-ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression

Σε όλες τις μεθόδους που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, η απόκριση μίας ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει ενεργητική θωράκιση – όπως είναι το σύστημα Compton Suppression – ποσοτικοποιείται με χρήση συντελεστών «μείωσης» (suppression). Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για να καταδείξουν τη βελτίωση που μπορεί να επιφέρει η χρήση ενός συστήματος Compton Suppression σε μία διάταξη γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, αποτελούν, δηλαδή, μία εκτίμηση του πλεονεκτήματος που εισάγεται από το νέο σύστημα. Ωστόσο, για τους συντελεστές αυτούς δεν υπάρχει μία τυποποίηση. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι κυριότεροι συντελεστές που απαντώνται στη βιβλιογραφία και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στην παρούσα Δ.Δ. για τη μελέτη της απόκρισης της διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

- Συντελεστής *Suppression Factor*, S.F., (Landsberger, et al., 1996), (Peerani, et al., 2002), (Parus, et al., 2003):

Ορίζεται ως το πηλίκο του λόγου (P/C) στο suppressed φάσμα προς τον αντίστοιχο λόγο (P/C) στο unsuppressed φάσμα:

$$S.F. = \frac{(P/C)_{sup}}{(P/C)_{unsup}} \quad \text{Σχέση (3.6)}$$

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος, όσο και τη μείωση που ενδέχεται να υποστεί η φωτοκορυφή. Σύμφωνα με τους (Landsberger, et al., 1996), κατά την ανάλυση φωτοκορυφής μονοενεργειακού ισοτόπου, η οποία βρίσκεται ενεργειακά στην περιοχή του συνεχούς υποστρώματος, η ικανότητα ανίχνευσής της βελτιώνεται με τη χρήση του συστήματος Compton Suppression κατά παράγοντα ίσο περίπου με την τετραγωνική

ρίζα του παραπάνω λόγου S.F., όπως αυτός υπολογίζεται για τη συγκεκριμένη ενέργεια. Ο παράγοντας αυτός δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση στην ανιχνευσιμότητα φωτοκορυφών που έχει η επιπρόσθετη θωράκιση από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος που προσφέρει η διάταξη της ενεργητικής θωράκισης.

- Τοπικός *Compton Suppression Factor*<sup>12</sup>, C.S.F., (Mauerhofer, 1996):

Ο τοπικός C.S.F. αποτελεί ένδειξη της μείωσης του υποστρώματος και υπολογίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του συνεχούς υποστρώματος που βρίσκεται κάτω από τη φωτοκορυφή ενδιαφέροντος στο unsuppressed φάσμα προς την αντίστοιχη στο suppressed φάσμα:

$$\text{C.S.F.} = \frac{B_{\text{unsup}}}{B_{\text{sup}}} \quad \text{Σχέση (3.7)}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής αυτός δεν απαντάται τόσο συχνά στη βιβλιογραφία, ενώ αντί για αυτόν συνήθως χρησιμοποιείται ο επόμενος συντελεστής μείωσης (Reduction Factor).

- Συντελεστής μείωσης, *Reduction Factor*, R.F. (Parus, et al., 2003), (Cetiner, 2008):

Ο συντελεστής αυτός δείχνει τη μείωση στο υπόστρωμα σε μία συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος. Η διαφορά του συντελεστή R.F. από το συντελεστή C.S.F. είναι ότι ο C.S.F. αναφέρεται στο υπόστρωμα κάτω από μία φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης, ενώ ο R.F. αναφέρεται σε οποιαδήποτε ενεργειακή περιοχή του φάσματος. Υπολογίζεται ως ο λόγος της μέσης τιμής του ύψους των κρούσεων σε μία ενεργειακή περιοχή του υποστρώματος στο unsuppressed φάσμα προς τη μέση τιμή του ύψους των κρούσεων στην ίδια περιοχή στο suppressed φάσμα. Δεδομένου ότι στα δύο φάσματα λαμβάνεται η ίδια ενεργειακή περιοχή, ο συντελεστής R.F. υπολογίζεται από την εξής Σχέση:

$$\text{R.F.} = \frac{(\sum_{k=i}^j C_k)_{\text{unsup}}}{(\sum_{k=i}^j C_k)_{\text{sup}}} \quad \text{Σχέση (3.8)}$$

όπου i και j είναι το πρώτο και τελευταίο, αντίστοιχα, κανάλι της ενεργειακής περιοχής ενδιαφέροντος.

<sup>12</sup> Ακριβής μετάφραση του όρου «Local Compton Suppression Factor» των (Mauerhofer, 1996)

- Συντελεστής *Area Suppression Factor*, A.S.F. (Landsberger, et al., 1996), (Cetiner, 2008):

Ο συντελεστής A.S.F. δείχνει την επίδραση που έχει η χρήση ενός συστήματος Compton Suppression στην ίδια τη φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης. Στη βιβλιογραφία, με τον όρο συντελεστής A.S.F. αναφέρονται διάφοροι λόγοι, κάθε ένας από τους οποίους περιγράφει κάτι διαφορετικό – με βάση τον τρόπο υπολογισμού του. Στο πλαίσιο της Δ.Δ., προκειμένου οι συντελεστές αυτοί να διακρίνονται μεταξύ τους, αποδίδεται διαφορετικό όνομα σε κάθε έναν.

Έτσι, σύμφωνα με τους (Landsberger, et al., 1996), ορίζεται συντελεστής A.S.F. που λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση της φωτοκορυφής με ολόκληρο το ενεργειακό φάσμα. Στο πλαίσιο της Δ.Δ. ο συντελεστής αυτός ονομάζεται Total Area Suppression Factor (T.A.S.F.) και υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση:

$$T.A.S.F. = \frac{A(P/T)_{sup}}{A(P/T)_{unsup}} \quad \text{Σχέση (3.9)}$$

Επίσης, σύμφωνα με τους (Landsberger, et al., 1996), (Cetiner, 2008), ορίζεται συντελεστής A.S.F. που λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση της φωτοκορυφής, με το υπόστρωμα κοντά στην περιοχή της αιχμής Compton. Στο πλαίσιο της Δ.Δ. ο συντελεστής αυτός ονομάζεται Compton Area Suppression Factor (C.A.S.F.) και υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση:

$$C.A.S.F. = \frac{A(P/C)_{sup}}{A(P/C)_{unsup}} \quad \text{Σχέση (3.10)}$$

- Συντελεστής *Peak Reduction Factor*,  $R_p^{13}$ , (Mauerhofer, 1996), (Parus, et al., 2003):

Πρόκειται για συντελεστή που συνήθως χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση ισοτόπου που εκπέμπει περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη του τη μείωση που υφίσταται η φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης ενός φωτονίου, λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης στην ενεργητική θωράκιση ενός από τα υπόλοιπα σε σειρά εκπεμπόμενα φωτόνια.

Ο συντελεστής αυτός, αν και έχουν αναπτυχθεί και θεωρητικές σχέσεις (Mauerhofer, 1996), υπολογίζεται ευκολότερα πειραματικά, χρήσει του λόγου της

<sup>13</sup> Στη δημοσίευση (Savva, et al., 2014), μετά από σχόλιο των κριτών, οι συντελεστές  $R_p$  παρουσιάζονται με την ονομασία A.S.F.

καθαρής επιφάνειας της φωτοκορυφής (peak area) στα δύο φάσματα, δηλαδή μετά την αφαίρεση του συνεχούς υποστρώματος κάτω από την κορυφή (Mauerhofer, 1996), (Parus, et al., 2003):

$$R_p = \frac{(\text{peak area})_{\text{sup}}}{(\text{peak area})_{\text{unsup}}} \quad \text{Σχέση (3.11)}$$

Επισημαίνεται ότι ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται και για τη μελέτη της επίδρασης των τυχαίων γεγονότων απόρριψης (chance coincidence), στην περίπτωση φωτονίων που δεν εκπέμπονται σε σειρά.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια συγκριτική αναφορά στους παραπάνω συντελεστές, καθώς κάθε συντελεστής παρέχει πληροφορίες για κάτι διαφορετικό. Ο συντελεστής T.A.S.F. λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό καταγραφής γεγονότων σε όλο το ενεργειακό φάσμα. Ως εκ τούτου, παρέχει πληροφορίες για τη μείωση του υποστρώματος σε ολόκληρο το φάσμα στο οποίο ανιχνεύεται η φωτοκορυφή ενδιαφέροντος. Ωστόσο, όπως θα φανεί και από τη συγκριτική μελέτη των υποστρωμάτων στο unsuppressed και suppressed φάσμα (Παράγραφος 3.3.1.1), στις υψηλές ενέργειες παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση του συνεχούς υποστρώματος με το σύστημα Compton Suppression. Γίνεται κατανοητό, επομένως, ότι εκτίμηση της βελτίωσης των επιπέδων ανίχνευσης μέσω του συντελεστή T.A.S.F. μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση για τις χαμηλές ενέργειες και υποεκτίμηση για τις υψηλές.

Αντίθετα, ο συντελεστής C.A.S.F. εκφράζει τη βελτίωση του λόγου του ύψους της φωτοκορυφής προς το αντίστοιχο ύψος σε τυπική περιοχή συνεχούς υποστρώματος πριν την αιχμή Compton. Ως εκ τούτου, λαμβάνει υπόψη μόνο την ίδια τη φωτοκορυφή και την αντίστοιχη αιχμή Compton, χωρίς να λαμβάνει καθόλου υπόψη το επίπεδο του συνεχούς υποστρώματος το οποίο οφείλεται σε άλλους λόγους (π.χ. άλλες φωτοκορυφές, κοσμική ακτινοβολία). Με άλλα λόγια, αποτελεί έναν δείκτη της μείωσης του υποστρώματος Compton εξαιτίας μίας φωτοκορυφής.

Τέλος, ο συντελεστής  $R_p$  λαμβάνει υπόψη του μόνο τις επιφάνειες της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed). Ως εκ τούτου, παρέχει πληροφορίες για την επίδραση που έχουν πάνω στη

φωτοκορυφή φαινόμενα όπως η πραγματική σύμπτωση ή η τυχαία άθροιση, κάτι που δεν κάνουν οι άλλοι συντελεστές.

Εν κατακλείδι, οι τρεις παραπάνω συντελεστές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται παράλληλα και να συνυπολογίζονται κατά τη μελέτη της απόκρισης ενός συστήματος Compton Suppression. Βέβαια, τις περισσότερες φορές ο συντελεστής C.A.S.F. δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί για διάφορους λόγους, όπως η χαμηλή ενέργεια της φωτοκορυφής ή η εκπομπή και κατ' επέκταση ανίχνευση περισσότερων του ενός φωτονίων στο ίδιο φάσμα.

### **3.3 Μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (anti-coincidence ή suppressed mode)**

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα πειράματα που έγιναν με στόχο τη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης του XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και υπολογίζονται και σχολιάζονται οι απαραίτητοι συντελεστές. Η μελέτη της ανιχνευτικής διάταξης σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (anti-coincidence mode) έγινε σε δύο επίπεδα:

- σύγκριση φασμάτων υποστρώματος:
  - πριν και μετά την εγκατάσταση του νέου συστήματος
  - με ενεργή και ανενεργή την ενεργητική θωράκιση
- συγκριτικές μετρήσεις ραδιενεργών πηγών:
  - σημειακών
  - επιφανειακών
  - όγκου σε τυπικές γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

#### **3.3.1 Μελέτη υποστρωμάτων**

Τα συστήματα Compton Suppression, εκτός από μείωση του υποστρώματος που οφείλεται σε σκεδάσεις Compton φωτονίων που προέρχονται από το υπό ανάλυση δείγμα, λειτουργούν και ως επιπλέον παθητική θωράκιση από εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της κοσμικής ακτινοβολίας (Harbottle, et al., 1994). Ένα σωματίδιο ή φωτόνιο που προέρχεται έξω από τη θωράκιση,

προκειμένου να φθάσει στον πρωτεύοντα ανιχνευτή και να ανιχνευθεί, πρέπει πρώτα να διασχίσει τον ανιχνευτή NaI(Tl). Δεδομένου του υψηλού Ατομικού Αριθμού του NaI, η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με αυτό είναι υψηλή, οδηγώντας έτσι στην παραγωγή σήματος σύμπτωσης και κατ' επέκταση στην απόρριψη του γεγονότος που ενδεχομένως καταγράφεται στον πρωτεύοντα ανιχνευτή. Το γεγονός αυτό μειώνει σημαντικά το συνεχές υπόστρωμα που οφείλεται στην ακτινοβολία από τον περιβάλλοντα χώρο, καθιστώντας τα συστήματα αυτού του τύπου κατάλληλα για μετρήσεις χαμηλών συγκεντρώσεων φυσικής ραδιενέργειας (Landsberger, 1994).

Με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του συστήματος Compton Suppression στο υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης XtRa λήφθηκαν τρία είδη φασμάτων υποστρώματος. Αρχικά, λήφθηκαν φάσματα υποστρώματος πριν την εγκατάσταση του συστήματος, διάρκειας 500 000 sec. Μετά την εγκατάσταση του νέου συστήματος, πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικές μετρήσεις υποστρώματος και συγκεκριμένα ελήφθησαν δύο τύπων φάσματα διάρκειας 500 000 sec:

- unsuppressed φάσματα υποστρώματος, όπου ο ανιχνευτής NaI(Tl) λειτουργεί μόνο ως παθητική θωράκιση,
- suppressed φάσματα υποστρώματος, με τον ανιχνευτή NaI(Tl) να λειτουργεί ως ενεργητική και παθητική θωράκιση.

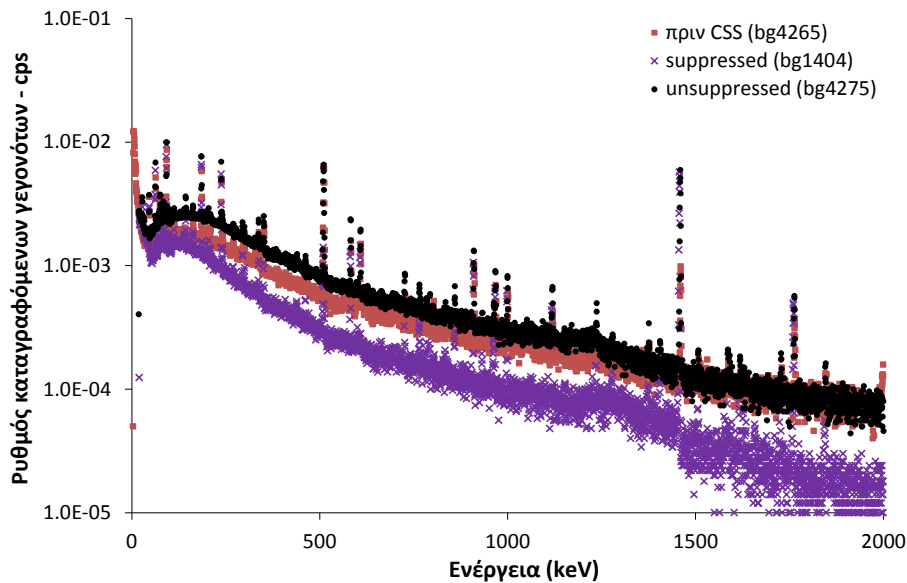
Στην Εικόνα 3.2 φαίνονται τα τυπικά φάσματα υποστρώματος<sup>14</sup> των τριών τύπων. Καθώς για την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression αφαιρέθηκε τμήμα από τη βάση της θωράκισης και ο ανιχνευτής μετατοπίστηκε προς τα κάτω, ο ανιχνευτής βρίσκεται περισσότερο εκτεθειμένος στην ακτινοβολία του περιβάλλοντος (Κεφάλαιο 2), με συνέπεια το υπόστρωμα του ανιχνευτή XtRa στο unsuppressed φάσμα να είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με την προϋπάρχουσα συγκρότηση της διάταξης. Ωστόσο, η χρήση της ενεργητικής θωράκισης οδηγεί σε αισθητή μείωση του υποστρώματος στο suppressed φάσμα.

Η αξιολόγηση των φασμάτων υποστρώματος πραγματοποιήθηκε σε όρους συνεχούς και σε όρους διακριτού υποστρώματος, καθώς και οι δύο αυτές

<sup>14</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 9, 18 και 29.



συνιστώσες του υποστρώματος επιδρούν στα κατώτερα όρια ανίχνευσης της διάταξης (Σχέση (3.4)).



Εικόνα 3.2: Υποστρώματα πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.

### 3.3.1.1 Μελέτη σε επίπεδο συνεχούς υποστρώματος

Με στόχο την αξιολόγηση του συνεχούς υποστρώματος υπολογίστηκαν για τυπικές ενεργειακές περιοχές οι συντελεστές μείωσης, Reduction Factor, R.F., σύμφωνα με τη Σχέση (3.8). Το ενεργειακό φάσμα χωρίστηκε σε 10 ίσες περιοχές πλάτους 200 keV. Σε κάθε περιοχή εξαιρέθηκαν οι φωτοκορυφές που ενδεχομένως εμφανίζονται στο υπόστρωμα και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι R.F. για δύο περιπτώσεις:

- A. Για μελέτη της ανιχνευτικής διάταξης πριν και μετά την εγκατάσταση του νέου συστήματος. Ως αριθμητής χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια του υποστρώματος μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression (unsuppressed φάσμα), ενώ στον παρονομαστή η αντίστοιχη επιφάνεια πριν την εγκατάσταση του νέου συστήματος. Στον Πίνακα 3.1 παραθέτονται οι συντελεστές R.F. για κάθε ενεργειακή περιοχή, όπως αυτοί προκύπτουν, ως η μέση τιμή των αντίστοιχων συντελεστών R.F. από 11 φάσματα υποστρώματος<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 12 – 22.

<i>Ενεργειακή περιοχή</i>	<i>R.F. μετά/πριν</i>
0-200 keV	1.45
200-400 keV	1.45
400-600 keV	1.38
600-800 keV	1.31
800-1000 keV	1.30
1000-1200 keV	1.32
1200-1400 keV	1.18
1400-1600 keV	1.02
1600-1800 keV	1.00
1800-2000 keV	1.04

**Πίνακας 3.1:** Συντελεστές μείωσης, R.F., για τα φάσματα υποστρώματος πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.1 το συνεχές υπόστρωμα παρουσιάζεται αυξημένο στη νέα διάταξη. Η μεγαλύτερη αύξηση (περίπου 45%) διαπιστώνεται στις χαμηλές ενέργειες (0 – 400 keV), ενώ στις υψηλές ενέργειες (> 1400 keV) η αύξηση είναι αμελητέα.

- B. Για μελέτη της επίδρασης του νέου συστήματος στα φάσματα υποστρώματος unsuppressed και suppressed. Στον Πίνακα 3.2 παρατίθεται η μέση τιμή των συντελεστών R.F., σύμφωνα με τη Σχέση (3.8), για κάθε ενεργειακή περιοχή.

<i>Ενεργειακή περιοχή</i>	<i>R.F. unsup/sup</i>
0-200 keV	2.17
200-400 keV	2.93
400-600 keV	3.33
600-800 keV	3.69
800-1000 keV	3.83
1000-1200 keV	4.16
1200-1400 keV	3.77
1400-1600 keV	4.81
1600-1800 keV	5.32
1800-2000 keV	6.22

**Πίνακας 3.2:** Συντελεστές μείωσης, R.F., για τα unsuppressed και suppressed φάσματα υποστρώματος<sup>16</sup>.

Όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα 3.2, το συνεχές υπόστρωμα μειώνεται αισθητά στο suppressed φάσμα σε σύγκριση με τα επίπεδα του unsuppressed φάσματος. Στις χαμηλές ενέργειες (< 400 keV) φαίνεται να υπάρχει μικρότερη επίδραση του συστήματος Compton Suppression, καθώς το επίπεδο του

<sup>16</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 12 – 33.

συνεχούς υποστρώματος μειώνεται κατά  $\sim 2 - 3$  φορές. Στις μέσες ενέργειες (600 – 1400 keV) το συνεχές υπόστρωμα μειώνεται κατά  $\sim 4$  φορές, ενώ για τις υψηλές ενέργειες ( $> 1400$  keV), η διαφορά ανάμεσα στα δύο φάσματα αγγίζει τις  $\sim 5 - 6$  φορές.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι η χρήση του συστήματος Compton Suppression βελτιώνει το φυσικό συνεχές υπόστρωμα της διάταξης, υπερκαλύπτοντας τη μικρή αύξησή του, εξαιτίας της μετακίνησης του ανιχνευτή μέσα στη θωράκιση. Η βελτίωση του φάσματος σε όρους συνεχούς υποστρώματος είναι μεγαλύτερη στην περιοχή μεσαίων και υψηλών ενεργειών (Πίνακας 3.3<sup>17</sup>), όπου και ανιχνεύονται πολλά ισότοπα φυσικής ραδιενέργειας.

<i>Ενεργειακή περιοχή</i>	<i>R.F. πριν/sup</i>
0-200 keV	1.50
200-400 keV	2.02
400-600 keV	2.41
600-800 keV	2.81
800-1000 keV	2.95
1000-1200 keV	3.15
1200-1400 keV	3.19
1400-1600 keV	4.72
1600-1800 keV	5.30
1800-2000 keV	5.98

Πίνακας 3.3: Συντελεστές μείωσης R.F., για τα φάσματα υποστρώματος πριν εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression και με το σύστημα σε anti-coincidence mode (suppressed φάσμα).

### 3.3.1.2 Μελέτη σε επίπεδο διακριτού υποστρώματος

Για τη μελέτη του διακριτού υποστρώματος της διάταξης, υπολογίσθηκε ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων (counts per second – cps) για κάθε μία από τις φωτοκορυφές του υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa. Πρόκειται για φωτοκορυφές των ισωτόπων των φυσικών ραδιενεργών σειρών του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{232}\text{Th}$ , καθώς και για τη φωτοκορυφή του ισωτόπου  $^{40}\text{K}$ . Ενδεικτικά αποτελέσματα για δύο φάσματα υποστρώματος που λήφθηκαν με διαφορά μερικών ημερών, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4<sup>18</sup>. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων

<sup>17</sup> Ως αριθμητής χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια του υποστρώματος πριν την εγκατάσταση του νέου συστήματος, ενώ στον παρονομαστή η αντίστοιχη επιφάνεια στο suppressed φάσμα.

<sup>18</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 9 και 14.

(cps) και η αντίστοιχη αβεβαιότητα (1σ), για κάθε φωτοκορυφή υποστρώματος, πριν και μετά (unsuppressed φάσμα) την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression. Για κάθε φωτοκορυφή υπολογίζεται ο λόγος των cps μετά την εγκατάσταση του συστήματος προς τα αντίστοιχα cps πριν την εγκατάσταση και η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	πριν το C.S.S. (φάσμα bg4265)	μετά το C.S.S.* (φάσμα bg4271)	λόγος	U
		cps	cps		
<sup>210</sup> Pb	46.52	0.0053 ± 7.5%	0.0051 ± 8.5%	0.96	0.32
<sup>234</sup> Th	63.29	0.0086 ± 5.0%	0.0100 ± 7.1%	1.15	1.61
<sup>235</sup> U- <sup>226</sup> Ra	185.70	0.0127 ± 4.1%	0.0149 ± 3.5%	1.17	2.99
<sup>212</sup> Pb	238.63	0.0098 ± 5.0%	0.0124 ± 4.1%	1.26	3.66
<sup>228</sup> Ac	270.30	0.0012 ± 34.5%	0.0009 ± 56.2%	0.75	0.46
<sup>214</sup> Pb	295.22	0.0017 ± 25.3%	0.0008 ± 60.8%	0.50	1.24
<sup>212</sup> Pb	300.00	--	0.0008 ± 60.5%	--	--
<sup>228</sup> Ac	328.00 <sup>c</sup>	0.0006 ± 67.1%	--	--	--
<sup>228</sup> Ac	338.40 <sup>c</sup>	0.0025 ± 15.6%	0.0026 ± 17.9%	1.03	0.13
<sup>214</sup> Pb	351.99	0.0038 ± 10.0%	0.0031 ± 14.5%	0.83	1.09
<sup>208</sup> Tl	583.14 <sup>c</sup>	0.0039 ± 8.1%	0.0088 ± 4.3%	2.25	9.87
<sup>214</sup> Bi	609.32 <sup>c</sup>	0.0036 ± 9.1%	0.0045 ± 8.2%	1.25	1.86
<sup>208</sup> Tl	860.47 <sup>c</sup>	0.0005 ± 53.2%	0.0015 ± 21.1%	2.82	2.28
<sup>228</sup> Ac	911.07	0.0033 ± 13.4%	0.0037 ± 8.2%	1.14	0.84
<sup>228</sup> Ac	968.90	0.0015 ± 23.3%	0.0022 ± 16.4%	1.42	1.28
<sup>214</sup> Bi	1120.28 <sup>c</sup>	0.0012 ± 21.9%	0.0020 ± 13.2%	1.69	2.20
<sup>214</sup> Bi	1238.10 <sup>c</sup>	0.0004 ± 67.9%	0.0008 ± 33.9%	2.10	1.12
<sup>40</sup> K	1460.75	0.0046 ± 5.3%	0.0270 ± 1.2%	5.87	56.81
<sup>214</sup> Bi	1764.51	0.0014 ± 16.8%	0.0025 ± 8.2%	1.78	3.48

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

\* unsuppressed φάσμα

**Πίνακας 3.4: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων των κυριότερων φωτοκορυφών του υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.**

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.4, όσον αφορά στα ισότοπα των ραδιενεργών σειρών του <sup>238</sup>U και <sup>232</sup>Th δεν παρατηρούνται δραματικές διαφορές ανάμεσα στις φωτοκορυφές υποστρώματος, πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression. Οι όποιες διαφορές παρατηρούνται, ακόμα και στην περίπτωση που είναι στατιστικά σημαντικές (<sup>212</sup>Pb, <sup>208</sup>Tl, <sup>214</sup>Bi), θα πρέπει κυρίως να αποδίδονται στη φυσική κύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου και θορονίου και των θυγατρικών τους στον αέρα, σε συνδυασμό με τη μετατόπιση του ανιχνευτή μέσα στη θωράκιση. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που εξάγεται όμως είναι η μεγάλη αύξηση που παρατηρείται στο υπόστρωμα του <sup>40</sup>K. Η στατιστικά σημαντική αυτή αύξηση – κατά ~6 φορές – αποδίδεται εν μέρει μόνο στο γεγονός ότι ο

ανιχνευτής είναι περισσότερο εκτεθειμένος στην ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Ο κυριότερος λόγος φαίνεται να είναι η φυσική ραδιενέργεια του NaI, η οποία, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία, συμβάλει στην αύξηση του υποστρώματος <sup>40</sup>K της διάταξης (Theodorsson, 2003), (Lutter, et al., 2013).

Αντίστοιχα, αξιολογήθηκε και η επίδραση του συστήματος Compton Suppression, όσον αφορά στο διακριτό υπόστρωμα φασμάτων unsuppressed και suppressed που ελήφθησαν συγχρόνως. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης<sup>19</sup>. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε φωτοκορυφή του διακριτού υποστρώματος δίνονται οι ρυθμοί καταγραφόμενων γεγονότων, οι αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, ο λόγος των cps (συντελεστής Peak Reduction Factor,  $R_p$ ) και η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	unsuppressed	suppressed	$R_p$ (λόγος)	U
		cps	cps		
<sup>210</sup> Pb	46.52	0.0051 ± 8.5%	0.0050 ± 7.3%	0.98	0.16
<sup>234</sup> Th	63.29	0.0100 ± 7.1%	0.0100 ± 5.1%	1.00	0.05
<sup>235</sup> U- <sup>226</sup> Ra	185.70	0.0149 ± 3.5%	0.0140 ± 2.5%	0.94	1.42
<sup>212</sup> Pb	238.63	0.0124 ± 4.1%	0.0137 ± 3.2%	1.10	1.94
<sup>228</sup> Ac	270.30	0.0009 ± 56.2%	0.0006 ± 48.2%	0.68	0.49
<sup>214</sup> Pb	295.22	0.0008 ± 60.8%	0.0011 ± 26.5%	1.36	0.51
<sup>212</sup> Pb	300.00	0.0008 ± 60.5%	0.0006 ± 47.9%	0.72	0.41
<sup>228</sup> Ac	328.00 <sup>c</sup>	--	--	--	--
<sup>228</sup> Ac	338.40 <sup>c</sup>	0.0026 ± 17.9%	0.0019 ± 13.9%	0.73	1.31
<sup>214</sup> Pb	351.99	0.0031 ± 14.5%	0.0035 ± 7.4%	1.11	0.68
<sup>208</sup> Tl	583.14 <sup>c</sup>	0.0088 ± 4.3%	0.0050 ± 4.3%	0.56	8.80
<sup>214</sup> Bi	609.32 <sup>c</sup>	0.0045 ± 8.2%	0.0036 ± 5.6%	0.81	2.06
<sup>208</sup> Tl	860.47 <sup>c</sup>	0.0015 ± 21.1%	0.0009 ± 17.3%	0.63	1.57
<sup>228</sup> Ac	911.07	0.0037 ± 8.2%	0.0032 ± 5.3%	0.85	1.57
<sup>228</sup> Ac	968.90	0.0022 ± 16.4%	0.0019 ± 10.8%	0.86	0.76
<sup>214</sup> Bi	1120.28 <sup>c</sup>	0.0020 ± 13.2%	0.0015 ± 9.2%	0.77	1.54
<sup>214</sup> Bi	1238.10 <sup>c</sup>	0.0008 ± 33.9%	0.0006 ± 21.2%	0.77	0.63
<sup>40</sup> K	1460.75	0.0270 ± 1.2%	0.0273 ± 1.0%	1.01	0.73
<sup>214</sup> Bi	1764.51	0.0025 ± 8.2%	0.0025 ± 4.4%	1.02	0.22

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 3.5: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων των κυριότερων φωτοκορυφών του υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa στο unsuppressed και στο suppressed φάσμα.**

Εν γένει, από όλα τα συγκριτικά φάσματα υποστρώματος που λήφθηκαν<sup>20</sup> παρατηρείται ότι στο suppressed φάσμα οι αβεβαιότητες των σχηματιζόμενων φωτοκορυφών εμφανίζονται μειωμένες, κάτι που θα πρέπει να αποδοθεί στις καλύτερες συνθήκες ανίχνευσης λόγω της μείωσης του συνεχούς υποστρώματος.

<sup>19</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 14 και 25.

<sup>20</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 12 και 33.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.5 αρχικά παρατηρείται ότι τα δύο φάσματα, unsuppressed και suppressed, δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τις περισσότερες φωτοκορυφές του διακριτού υποστρώματος. Ειδικότερα, ισότοπα τα οποία δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, όπως ο  $^{210}\text{Pb}$ , ο  $^{212}\text{Pb}$ , το  $^{234}\text{Th}$  και το  $^{40}\text{K}$ , δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση στα δύο φάσματα ως προς την επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής. Η ίδια συμπεριφορά παρουσιάζεται και για φωτόνια πολυενεργειακών ισωτόπων, τα οποία όμως δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλα φωτόνια. Παράδειγμα αποτελεί το  $^{228}\text{Ac}$ , οι φωτοκορυφές του οποίου, στα 270.30 keV, 911.07 keV και 968.90 keV, αντιστοιχούν σε φωτόνια τα οποία δεν εκπέμπονται διαδοχικά και δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα φάσματα, unsuppressed και suppressed.

Αντίθετα, για τα φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα, η επιφάνεια της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής εμφανίζεται μειωμένη στο suppressed φάσμα. Παράδειγμα αποτελούν τα φωτόνια ενέργειας 583.14 keV του  $^{208}\text{Tl}$  και τα φωτόνια ενέργειας 609.32 keV του  $^{214}\text{Bi}$ , τα οποία εκπέμπονται από το πατρικό πυρήνα σε σειρά με άλλα φωτόνια.

### 3.3.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών

Η σχετική απόκριση των συστημάτων Compton Suppression συνήθως εξετάζεται χρήσει πηγών  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$  (Chung, et al., 1988), (Masse, et al., 1991), (Landsberger, et al., 1996), (Parus, et al., 2003). Στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα ισότοπα, τα οποία έχουν επιλεγεί συμπληρωματικά των προαναφερθέντων, με σκοπό τη μελέτη της διάταξης σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{152}\text{Eu}$  (Parus, et al., 2003),  $^{22}\text{Na}$  (Stover, et al., 2005) ή και άλλων ισωτόπων όπως  $^{51}\text{Ti}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{52}\text{V}$  και  $^{28}\text{Al}$  (Mauerhofer, et al., 1996) για τη μελέτη σε εφαρμογές νευτρονικής ενεργοποίησης.

Στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. έγιναν πειράματα με σκοπό τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης της χρήσης του συστήματος Compton Suppression κατά την ανάλυση διαφόρων ισωτόπων, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία, τόσο κατά τη

φάση βαθμονόμησης της διάταξης, όσο και κατά την αξιοποίησή της, καθώς καταδεικνύει τις βέλτιστες συνθήκες για την ανίχνευση του κάθε ισότοπου.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τις πηγές που ήταν διαθέσιμες στο Εργαστήριο. Πρόκειται για πηγές  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$ , όπως προβλέπεται από τη βιβλιογραφία, αλλά και πηγές άλλων ισωτόπων, όπως  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ . Τα χαρακτηριστικά των ισωτόπων δίνονται αναλυτικά παρακάτω. Τα πυρηνικά δεδομένα προέρχονται από τους (Βέ, et al., 2004), ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα διάσπασης παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

- Το ισότοπο  $^{241}\text{Am}$  είναι α-ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής 432.6 χρόνια και εκπέμπει επίσης φωτόνια ( $\gamma$  και  $X$ ), τα κυριότερα των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{241}\text{Am}$	13.95*	0.0960
	17.75*	0.0570
	26.34	0.0231
	33.20	0.0012
	59.54	0.3592

\* ακτίνες-Χ

Πίνακας 3.6: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{241}\text{Am}$ .

Από τα φωτόνια του  $^{241}\text{Am}$ , αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα φωτόνια ενέργειας 59.54 keV, λόγω του υψηλότερου ποσοστού εκπομπής, αλλά και της σχετικά υψηλής ενέργειας. Σημειώνεται ότι τα φωτόνια ενέργειας 26.34 keV και 33.20 keV, αν και χαμηλής ενέργειας και με μικρή πιθανότητα εκπομπής, εκπέμπονται σε σειρά και είναι δυνατόν να παρουσιάσουν το φαινόμενο true coincidence, δηλαδή να ανιχνευθούν ως ένα με ενέργεια 59.54 keV.

- Το ισότοπο  $^{57}\text{Co}$  αποδιεγείρεται με σύλληψη ηλεκτρονίου, με χρόνο ημιζωής 271.80 ημέρες, την οποία ακολουθεί εκπομπή φωτονίων (Πίνακας 3.7).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{57}\text{Co}$	6.39*	0.1640
	6.40*	0.3260
	14.41 <sup>c</sup>	0.0915
	122.06 <sup>c</sup>	0.8551
	136.47	0.1071

\* ακτίνες-Χ

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.7: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{57}\text{Co}$ .

- Το ισότοπο  $^{60}\text{Co}$  είναι β-ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής 5.27 χρόνια και κατά την αποδιέγερσή του εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά, με χρόνο ημιζωής της στάθμης 0.713 psec, δηλαδή πρακτικά ταυτόχρονα (Πίνακας 3.8). Λόγω της ταυτόχρονης εκπομπής αναμένεται σημαντική μείωση στην επιφάνεια των αντίστοιχων φωτοκορυφών πλήρους απορρόφησης στο suppressed φάσμα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{60}\text{Co}$	1173.24 <sup>c</sup>	0.9985
	1332.50 <sup>c</sup>	0.9998

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.8: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{60}\text{Co}$ .

- Το ισότοπο  $^{133}\text{Ba}$  αποδιεγείρεται με σύλληψη ηλεκτρονίου (Electron Capture, EC) με χρόνο ημιζωής 10.54 χρόνια, την οποία ακολουθεί εκπομπή φωτονίων - γ και X (Πίνακας 3.9).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{133}\text{Ba}$	30.63*	0.3490
	30.97*	0.6450
	34.99*	0.1160
	53.26 <sup>c</sup>	0.0214
	79.61 <sup>c</sup>	0.0265
	80.99 <sup>c</sup>	0.3290
	160.61 <sup>c</sup>	0.0064
	223.24 <sup>c</sup>	0.0045
	276.40 <sup>c</sup>	0.0716
	302.85 <sup>c</sup>	0.1834
	356.01 <sup>c</sup>	0.6205
383.85 <sup>c</sup>	0.0894	

\* ακτίνες-X

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.9: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{133}\text{Ba}$ .

- Το ισότοπο  $^{137}\text{Cs}$  είναι β-ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής 30.05 χρόνια. Κατά την αποδιέγερσή του σε  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  και στη συνέχεια σε  $^{137}\text{Ba}$  εκπέμπεται ένα φωτόνιο-γ ενώ εκπέμπει και ακτίνες-X (Πίνακας 3.10).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{137}\text{Cs}$	31.82*	0.0195
	32.19*	0.0359
	36.38*	0.0106
	661.62	0.8499

\* ακτίνες-X

Πίνακας 3.10: Ενέργεια και ποσοστό εκπομπής του φωτονίου του  $^{137}\text{Cs}$ .



- Το ισότοπο  $^{109}\text{Cd}$  έχει χρόνο ημιζωής 461.4 ημέρες και αποδιεγείρεται με σύλληψη ηλεκτρονίου οδηγώντας, στην εκπομπή φωτονίου  $\gamma$  (Πίνακας 3.11).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{109}\text{Cd}$	21.99*	0.2950
	22.16*	0.5570
	88.03	0.03626

\* ακτίνες-Χ

Πίνακας 3.11: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{109}\text{Cd}$ .

- Το ισότοπο  $^{54}\text{Mn}$  έχει χρόνο ημιζωής 312.13 ημέρες και αποδιεγείρεται με σύλληψη ηλεκτρονίου, οδηγώντας στην εκπομπή φωτονίου  $\gamma$  (Πίνακας 3.12).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{54}\text{Mn}$	5.41*	0.153000
	834.85	0.999997

\* ακτίνες-Χ

Πίνακας 3.12: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{54}\text{Mn}$ .

- Το  $^{152}\text{Eu}$  είναι  $\beta$ -ραδιενεργό ισότοπο με χρόνο ημιζωής 13.52 χρόνια, το οποίο έχει δύο κλάδους διάσπασης, καθώς αποδιεγείρεται τόσο με  $\beta^+$  διάσπαση όσο και με  $\beta^-$  διάσπαση. Το  $^{152}\text{Eu}$  εκπέμπει πολλά φωτόνια σε σειρά (Πίνακας 3.13).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{152}\text{Eu}$	121.78 <sup>c</sup>	0.2841
	244.70 <sup>c</sup>	0.0755
	344.28 <sup>c</sup>	0.2659
	411.12 <sup>c</sup>	0.0224
	443.97 <sup>c</sup>	0.3100
	778.90 <sup>c</sup>	0.1297
	867.38 <sup>c</sup>	0.0424
	964.08 <sup>c</sup>	0.1450
	1085.84 <sup>c</sup>	0.1013
	1112.08 <sup>c</sup>	0.1341
	1408.01 <sup>c</sup>	0.2085

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.13: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{152}\text{Eu}$ .

- Το ισότοπο  $^{134}\text{Cs}$  έχει χρόνο ημιζωής 2.06 χρόνια και αποδιεγείρεται με διάσπαση  $\beta^-$  εκπέμποντας στη συνέχεια φωτόνια, τα κυριότερα των οποίων δίνονται στον Πίνακα 3.14. Το  $^{134}\text{Cs}$  εκπέμπει πλήθος φωτονίων σε σειρά, με κυριότερη την αλληλουχία των φωτονίων ενέργειας 569.33 keV, 795.86 keV και 604.72 keV.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{134}\text{Cs}$	475.37 <sup>c</sup>	0.0148
	563.24 <sup>c</sup>	0.0834
	569.33 <sup>c</sup>	0.1537
	604.72 <sup>c</sup>	0.9763
	795.85 <sup>c</sup>	0.8547
	801.95 <sup>c</sup>	0.0869
	1167.97	0.0099
	1365.19 <sup>c</sup>	0.0179
	1400.59	0.0302

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.14: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{134}\text{Cs}$ .

- Το ισότοπο  $^{226}\text{Ra}$  είναι α-ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής 1600 χρόνια, το οποίο εκπέμπει μόνο ένα φωτόνιο ενέργειας 186.24keV. Μια πηγή  $^{226}\text{Ra}$  περιέχει επιπλέον και θυγατρικά ισότοπα του  $^{226}\text{Ra}$ , όπως:  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$  – όχι απαραίτητα σε ισορροπία – τα οποία εκπέμπουν πλήθος φωτονίων (Πίνακας 3.15).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής
$^{226}\text{Ra}$	186.24	0.0356
$^{210}\text{Pb}$	46.52	0.0425
$^{214}\text{Pb}$	242.80	0.0727
	295.22	0.1841
	351.93	0.3560
$^{214}\text{Bi}$	609.31 <sup>c</sup>	0.4549
	768.36 <sup>c</sup>	0.0489
	934.06 <sup>c</sup>	0.0310
	1120.29 <sup>c</sup>	0.1491
	1238.11 <sup>c</sup>	0.0583
	1377.67	0.0397
	1407.98 <sup>c</sup>	0.0239
	1509.23 <sup>c</sup>	0.0213
	1729.60	0.0284
	1764.49	0.1531
1847.42	0.0203	

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.15: Ενέργειες και ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του  $^{226}\text{Ra}$  και των θυγατρικών του.

Για την αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression χρησιμοποιήθηκαν τόσο σημειακές πηγές όσο και πηγές όγκου. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο αέρα, διαμέτρου 45 mm και πολύ μικρού πάχους, στο οποίο είχε αποθεθεί γνωστή ποσότητα μίας σειράς ραδιενεργών ισωτόπων. Το φίλτρο αυτό μπορεί να θεωρηθεί με ικανοποιητική προσέγγιση ως επιφανειακή

πηγή. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται τα στοιχεία των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν, μελετάται η απόκριση της διάταξης με τη βοήθεια των συντελεστών που παρουσιάσθηκαν στην Παράγραφο 3.2.2 και σχολιάζεται η γενική απόκριση της νέας διάταξης ΧtRa - CSS.

### 3.3.2.1 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση σημειακών πηγών

Οι σημειακές πιστοποιημένες σημειακές πηγές γ-ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.16. Τα πιστοποιητικά των πηγών δίνονται στο Παράρτημα Δ.

Ισότοπο	Ενεργότητα (μCi)	Ενεργότητα (kBq)	Προέλευση	Ημερομηνία αναφοράς
<sup>241</sup> Am	1.087	40.2	Amersham	01/07/1991
<sup>137</sup> Cs	0.995	36.8	Amersham	01/01/1981
<sup>133</sup> Ba	1.149	42.5	Amersham	01/01/1981
<sup>60</sup> Co	1.183	43.8	Amersham	01/01/1981
<sup>152</sup> Eu	1.249	46.2	Amersham	23/10/1992
<sup>226</sup> Ra	1.543	57.1	Amersham	01/12/1992

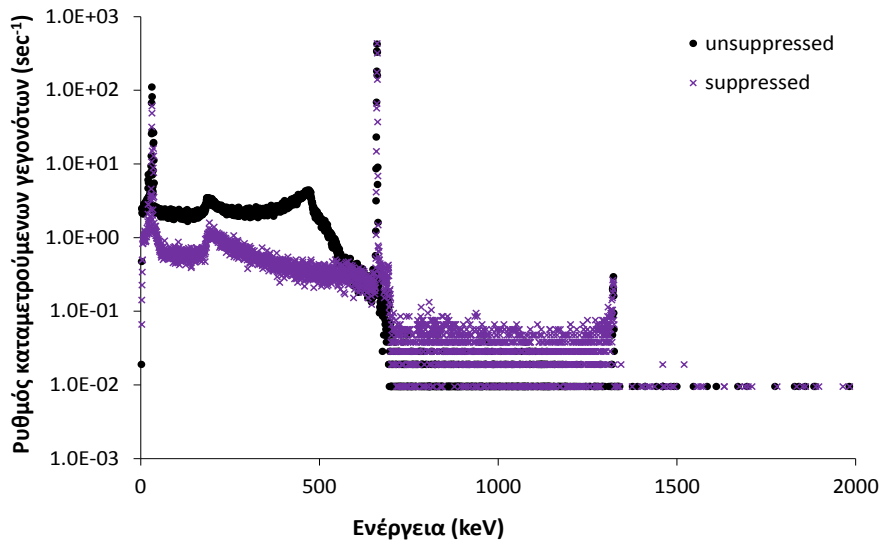
Πίνακας 3.16: Σημειακές πηγές για τη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS.

Χρήσει των σημειακών πηγών πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της θέσης της πηγής μέσα στην ενεργητική θωράκιση. Συγκεκριμένα δοκιμάσθηκαν οι γεωμετρίες:

- πηγή τοποθετημένη σε επαφή με τον ανιχνευτή
- πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 73 mm από τον ανιχνευτή<sup>21</sup>

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα φάσματα που αντιστοιχούν στη σημειακή πηγή <sup>137</sup>Cs σε επαφή. Σημειώνεται ότι λόγω της υψηλής ραδιενέργειας της πηγής εμφανίζεται και ασθενής κορυφή στην ενέργεια των ~ 1323 keV η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της τυχαίας άθροισης δύο φωτονίων ενέργειας 661.62 keV.

<sup>21</sup> Η πηγή είναι τοποθετημένη πάνω σε κενό κυλινδρικό δοχείο γεωμετρίας «2».



Εικόνα 3.3: Unsuppressed και suppressed φάσματα σημειακής πηγής  $^{137}\text{Cs}$  σε επαφή με τον ανιχνευτή.

Στον Πίνακα 3.17 δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, σε όρους συντελεστών T.A.S.F. και  $R_p$ , για τις σημειακές πηγές σε επαφή με τον ανιχνευτή<sup>22</sup> και σε απόσταση<sup>23</sup>. Στην αβεβαιότητα του συντελεστή  $R_p$  λήφθηκαν υπόψη οι αβεβαιότητες της επιφάνειας των φωτοκορυφών στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed), ενώ για το συντελεστή T.A.S.F. και η αβεβαιότητα των συνολικών κρούσεων του φάσματος<sup>24</sup>.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, για τα ισότοπα που δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά στην ανάλυση του suppressed φάσματος αποδίδεται μικρότερη αβεβαιότητα στην επιφάνεια της φωτοκορυφής. Αντίθετα, για τα ισότοπα που συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας της φωτοκορυφής είναι μεγαλύτερη για το suppressed φάσμα καθώς η αντίστοιχη φωτοκορυφή έχει μικρότερη επιφάνεια.

Για τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$ , δεδομένου ότι ο λόγος (P/C) ορίζεται σαφώς (ANSI/IEEE, 1997), είναι δυνατός ο υπολογισμός και του συντελεστή C.A.S.F., σύμφωνα με τη Σχέση (3.10). Οι εν λόγω τιμές για τα δύο αυτά ισότοπα για τις σημειακές πηγές παρατίθενται στον Πίνακα 3.18.

<sup>22</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 34 – 45.

<sup>23</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 46 – 57.

<sup>24</sup> Ο υπολογισμός αυτός περιγράφεται στο Παράρτημα Γ, Παράγραφος Γ.2.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F. σε επαφή	R <sub>p</sub> σε επαφή	T.A.S.F. σε απόσταση	R <sub>p</sub> σε απόσταση
<sup>210</sup> Pb	46.52	1.8 ± 7.3%	0.58 ± 7.3%	1.8 ± 7.5%	0.70 ± 7.5%
<sup>133</sup> Ba	53.26 <sup>c</sup>	0.57 ± 6.4%	0.38 ± 8.5%	0.55 ± 7.8%	0.39 ± 7.8%
<sup>241</sup> Am	59.54	1.192 ± 0.8%	0.804 ± 0.7%	1.13 ± 2.2%	0.80 ± 2.1%
<sup>133</sup> Ba	80.99 <sup>c</sup>	0.401 ± 0.7%	0.265 ± 0.8%	0.364 ± 1.1%	0.262 ± 1.1%
<sup>152</sup> Eu	121.78 <sup>c</sup>	0.81 ± 1.4%	0.187 ± 1.4%	0.65 ± 1.8%	0.157 ± 1.7%
<sup>133</sup> Ba	160.61 <sup>c</sup>	0.33 ± 19.0%	0.22 ± 20.2%	0.3 ± 48.0%	0.21 ± 48.0%
<sup>226</sup> Ra	186.24	1.93 ± 3.0%	0.63 ± 3.0%	2.20 ± 3.8%	0.87 ± 3.8%
<sup>133</sup> Ba	223.24 <sup>c</sup>	1.2 ± 20.2%	0.8 ± 28.8%	1.0 ± 32.0%	0.7 ± 32.0%
<sup>214</sup> Pb	242.80	1.85 ± 1.9%	0.61 ± 1.8%	2.09 ± 2.1%	0.83 ± 2.1%
<sup>152</sup> Eu	244.70 <sup>c</sup>	0.41 ± 8.2%	0.094 ± 8.2%	0.27 ± 9.6%	0.066 ± 9.6%
<sup>133</sup> Ba	276.40 <sup>c</sup>	1.34 ± 1.5%	0.89 ± 2.1%	0.96 ± 2.6%	0.69 ± 2.6%
<sup>214</sup> Pb	295.22	1.90 ± 1.1%	0.621 ± 1.0%	2.21 ± 1.1%	0.874 ± 1.1%
<sup>133</sup> Ba	302.85 <sup>c</sup>	1.50 ± 1.2%	0.99 ± 1.7%	1.16 ± 1.5%	0.84 ± 1.5%
<sup>152</sup> Eu	344.28 <sup>c</sup>	2.09 ± 1.1%	0.481 ± 1.0%	1.90 ± 1.5%	0.462 ± 1.4%
<sup>214</sup> Pb	351.93	2.00 ± 0.8%	0.655 ± 0.8%	2.19 ± 0.8%	0.868 ± 0.7%
<sup>133</sup> Ba	356.01 <sup>c</sup>	1.518 ± 0.3%	1.000 ± 0.4%	1.207 ± 0.7%	0.868 ± 0.7%
<sup>133</sup> Ba	383.85 <sup>c</sup>	1.54 ± 2.4%	1.02 ± 3.3%	1.35 ± 2.5%	0.97 ± 2.5%
<sup>152</sup> Eu	411.12 <sup>c</sup>	0.17 ± 53.1%	0.04 ± 53.1%	0.26 ± 22.4%	0.06 ± 22.4%
<sup>152</sup> Eu	443.97 <sup>c</sup>	0.60 ± 12.9%	0.14 ± 12.9%	0.41 ± 13.6%	0.10 ± 13.6%
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	0.77 ± 1.3%	0.254 ± 1.3%	0.730 ± 1.1%	0.289 ± 1.1%
<sup>137</sup> Cs	661.62	1.988 ± 0.4%	0.967 ± 0.3%	2.07 ± 1.0%	0.991 ± 0.9%
<sup>214</sup> Bi	768.36 <sup>c</sup>	0.60 ± 7.0%	0.20 ± 7.0%	0.51 ± 4.9%	0.20 ± 4.9%
<sup>152</sup> Eu	778.90 <sup>c</sup>	0.57 ± 4.3%	0.132 ± 4.2%	0.48 ± 5.0%	0.118 ± 5.0%
<sup>152</sup> Eu	867.38 <sup>c</sup>	--	--	0.9 ± 67.6%	0.2 ± 67.6%
<sup>214</sup> Bi	934.06 <sup>c</sup>	0.51 ± 13.7%	0.17 ± 13.7%	0.41 ± 11.1%	0.16 ± 11.1%
<sup>152</sup> Eu	964.08 <sup>c</sup>	0.82 ± 4.5%	0.188 ± 4.5%	0.59 ± 4.7%	0.144 ± 4.7%
<sup>152</sup> Eu	1085.84 <sup>c</sup>	1.76 ± 3.5%	0.40 ± 3.5%	1.63 ± 4.4%	0.40 ± 4.4%
<sup>152</sup> Eu	1112.08 <sup>c</sup>	0.85 ± 5.2%	0.20 ± 5.1%	0.71 ± 4.8%	0.172 ± 4.8%
<sup>214</sup> Bi	1120.29	0.51 ± 4.0%	0.168 ± 4.0%	0.49 ± 3.0%	0.195 ± 3.0%
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	1.91 ± 2.0%	0.424 ± 1.8%	2.11 ± 2.2%	0.364 ± 2.0%
<sup>214</sup> Bi	1238.11 <sup>c</sup>	0.55 ± 8.4%	0.18 ± 8.4%	0.49 ± 6.5%	0.19 ± 6.5%
<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	1.79 ± 2.1%	0.397 ± 2.0%	1.94 ± 2.2%	0.335 ± 2.0%
<sup>214</sup> Bi	1377.67	1.8 ± 6.8%	0.6 ± 6.8%	1.9 ± 5.9%	0.75 ± 5.9%
<sup>214</sup> Bi	1407.98 <sup>c</sup>	0.3 ± 48.3%	0.1 ± 48.3%	0.54 ± 17.2%	0.21 ± 17.2%
<sup>152</sup> Eu	1408.01 <sup>c</sup>	0.89 ± 3.3%	0.204 ± 3.3%	0.74 ± 3.8%	0.181 ± 3.7%
<sup>214</sup> Bi	1509.23 <sup>c</sup>	0.6 ± 20.7%	0.2 ± 20.7%	0.54 ± 15.5%	0.21 ± 15.5%
<sup>214</sup> Bi	1729.60	1.71 ± 4.3%	0.56 ± 4.2%	2.1 ± 4.9%	0.84 ± 4.9%
<sup>214</sup> Bi	1764.49	1.82 ± 2.3%	0.60 ± 2.3%	2.13 ± 4.5%	0.85 ± 4.4%
<sup>214</sup> Bi	1847.42	1.7 ± 8.7%	0.6 ± 8.7%	2.1 ± 8.2%	0.85 ± 8.2%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 3.17: Οι συντελεστές A.S.F. και R<sub>p</sub> για σημειακές πηγές σε επαφή και σε απόσταση.**

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	C.A.S.F. σε επαφή	C.A.S.F. σε απόσταση
<sup>137</sup> Cs	661.62	5.43 ± 2.5%	4.27 ± 5.2%
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	5.8 ± 7.5%	4.97 ± 8.4%
<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	5.4 ± 7.7%	4.85 ± 8.7%

<sup>c</sup>:φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 3.18: Οι συντελεστές C.A.S.F. για τις σημειακές πηγές <sup>137</sup>Cs και <sup>60</sup>Co.**

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.17, σε γενικές γραμμές δεν διαπιστώνεται σημαντική διαφοροποίηση για τις δύο σχετικές θέσεις σημειακής πηγής – ανιχνευτή. Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα είναι ότι η χρήση του συστήματος Compton Suppression μπορεί να έχει θετική ή αρνητική επίδραση στην ανάλυση ενός ισότοπου. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται από το συντελεστή T.A.S.F. για τα φωτόνια ενέργειας 59.54 keV του  $^{241}\text{Am}$ , η σχετική φωτοκορυφή φαίνεται ότι στο suppressed φάσμα διακρίνεται ελαφρώς καλύτερα πάνω από το υπόστρωμα (~ 1.1 – 1.2 φορές).

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι, δεν είναι απολύτως σωστή η άποψη ότι τιμή του λόγου T.A.S.F. μεγαλύτερη της μονάδας σημαίνει και αντίστοιχα καλύτερη ανίχνευση της αντίστοιχης φωτοκορυφής, καθώς η φωτοκορυφή ανιχνεύεται σε μία περιοχή του υποστρώματος ενώ, στον συντελεστή T.A.S.F. λαμβάνεται υπόψη ολόκληρο το φάσμα (total area). Ο συντελεστής αυτός για μία συγκεκριμένη ενέργεια  $E$ , δείχνει την βελτίωση που εισάγει το σύστημα Compton Suppression, στο συνεχές υπόστρωμα που οφείλεται στα φωτόνια της ενέργειας  $E$ , σε σχέση με την επίδραση που έχει στην επιφάνεια της αντίστοιχης φωτοκορυφής. Στη συνέχεια του κειμένου η τιμή του συντελεστή T.A.S.F. θα θεωρείται – καταχρηστικά – ότι αντιστοιχεί στη βελτίωση των συνθηκών ανίχνευσης της φωτοκορυφής.

Ωστόσο, όπως φαίνεται από το συντελεστή  $R_p$ , η επιφάνεια της φωτοκορυφής υπόκειται σε μείωση της τάξης του 20% στο suppressed φάσμα, χωρίς να αποκλείεται ένα μέρος της μείωσης να οφείλεται στο φαινόμενο της τυχαίας σύμπτωσης, λόγω της σχετικά υψηλής ενεργότητας της πηγής.

Για το  $^{137}\text{Cs}$  η χρήση της ενεργητικής θωράκισης βελτιώνει τις συνθήκες ανάλυσης της φωτοκορυφής του κατά ~2 φορές. Ωστόσο, ενδιαφέρον παρουσιάζει η τιμή του συντελεστή  $R_p$  για το ισότοπο  $^{137}\text{Cs}$  σε επαφή με τον ανιχνευτή, καθώς ισούται με  $0.967 \pm 0.3\%$  (1σ), τιμή η οποία διαφέρει στατιστικά σημαντικά από το 1. Η διαφορά αυτή ενδεχομένως οφείλεται στη σχετικά υψηλή ενεργότητα της πηγής η οποία οδηγεί στην καταγραφή τυχαίων γεγονότων σύμπτωσης. Αυτό φαίνεται να επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι, όταν η σημειακή πηγή απομακρύνεται από τον ανιχνευτή η μείωση στην οποία υπόκεινται η φωτοκορυφή είναι μικρότερη (~1% έναντι ~3%).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση των θυγατρικών ισωτόπων του  $^{226}\text{Ra}$ :  $^{210}\text{Pb}$ , που εκπέμπει μοναδικό φωτόνιο και  $^{214}\text{Pb}$  που εκπέμπει μεν περισσότερα του ενός φωτόνια, αλλά όχι σε σειρά. Στον Πίνακα 3.17, φαίνεται ότι ο συντελεστής μείωσης της επιφάνειας φωτοκορυφής  $R_p$ , μπορεί να φτάσει την τιμή  $\sim 0.6$  και διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τη μονάδα για όλες τις ενέργειες των φωτονίων του  $^{210}\text{Pb}$  και του  $^{214}\text{Pb}$ . Το γεγονός οδηγεί στην υποψία ότι αυτό οφείλεται στην υψηλή ενεργότητα<sup>25</sup> της πηγής που οδηγεί σε φαινόμενα τυχαίων συμπτώσεων (chance coincidence). Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και με αυτή τη μείωση στην επιφάνεια φωτοκορυφής, η ανίχνευση των φωτονίων γίνεται κατά  $\sim 2$  φορές ευκολότερα στο suppressed φάσμα ( $T.A.S.F. \approx 2$ ). Από την άλλη πλευρά, τα φωτόνια του  $^{214}\text{Bi}$ , τα οποία εκπέμπονται σε σειρά υφίστανται πολύ μεγαλύτερη μείωση της επιφάνειας φωτοκορυφής. Ενδεικτικά αναφέρεται για τα φωτόνια ενέργειας 609.31 keV, η μείωση εκτιμήθηκε έως και 75% ( $R_p = 0.25$ ) για την πηγή επί του ανιχνευτή, καθώς το εν λόγω φωτόνιο εκπέμπεται σε σειρά με πολλά άλλα φωτόνια του  $^{214}\text{Bi}$ . Εν γένει πάντως παρατηρείται μία τάση η τιμή του συντελεστή  $R_p$  να πλησιάζει τη μονάδα όταν η σημειακή πηγή απομακρύνεται από τον ανιχνευτή. Πάντως, οι τόσο χαμηλές τιμές του  $R_p$  θα πρέπει εν μέρει να αποδίδονται και στα συμβάντα τυχαίων συμπτώσεων, όπως φάνηκε και από τα θυγατρικά ισότοπα του  $^{226}\text{Ra}$  που δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά.

Οι φωτοκορυφές του  $^{60}\text{Co}$ , το οποίο εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά, παρουσιάζουν μειωμένους συντελεστές  $R_p$  – περίπου ίσους με 0.4 – δηλαδή στο suppressed φάσμα καταγράφεται μόνο το  $\sim 40\%$  της φωτοκορυφής που εμφανίζεται στο unsuppressed φάσμα.

Η μείωση αυτή είναι ακόμα εντονότερη για την περίπτωση του  $^{152}\text{Eu}$ , το οποίο εκπέμπει περισσότερα φωτόνια σε σειρά. Για παράδειγμα, οι φωτοκορυφές στις ενέργειες 121.78 keV και 1408.01 keV εμφανίζουν μείωση στο suppressed φάσμα της τάξεως του  $\sim 80\%$ , ενώ εκείνη στα 867.38 keV δεν ανιχνεύεται καθόλου.

Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και για το  $^{133}\text{Ba}$ , το οποίο εκπέμπει πλήθος φωτονίων σε σειρά και με περισσότερους από έναν συνδυασμούς. Τα φωτόνια του

<sup>25</sup> Παρόλο που ενεργότητα  $^{226}\text{Ra}$  της πηγής είναι  $\sim 1 \mu\text{Ci}$ , η ύπαρξη στην πηγή και των θυγατρικών του ραδονίου τα οποία εκπέμπουν πλήθος φωτονίων, έχει ως αποτέλεσμα τελικά αρκετά υψηλό ρυθμό εκπομπής φωτονίων

$^{133}\text{Ba}$ , όπως φαίνεται στο διάγραμμα διάσπασής του στο Παράρτημα Β, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- τα φωτόνια που μπορούν να προκύψουν και από άθροιση άλλων φωτονίων μέσω του φαινομένου *summing in*, όπως τα φωτόνια ενέργειας 356.01 keV (53.16 + 302.85 keV). Τα φωτόνια αυτά υπόκεινται σε μικρή μείωση της επιφάνειας ανίχνευσης, με συνέπεια τη βελτίωση των συνθηκών ανίχνευσής τους.
- και εκείνα που δεν μπορούν να προκύψουν ως άθροισμα, αλλά αντίθετα συνεισφέρουν στη δημιουργία *sum peaks*, όπως τα φωτόνια ενέργειας 53.16 keV, 80.99 keV. Για τα φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά, ισχύει ότι και για το  $^{60}\text{Co}$ , δηλαδή παρατηρούνται μειώσεις στις επιφάνειες των φωτοκορυφών έως και ~80%, οι οποίες συνοδεύονται και από ταυτόχρονη χειροτέρευση της δυνατότητας ανίχνευσής τους, έως και κατά ~70%.

Μία ιδιαίτερη περίπτωση είναι τα φωτόνια ενέργειας 383.85 keV, για τα οποία παρατηρείται ότι η τιμή του συντελεστή  $R_p$  στατιστικά δεν διαφέρει από το 1. Ο λόγος είναι ότι η ανίχνευση ή μη των φωτονίων αυτής της ενέργειας μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών και πολύπλοκων διαδικασιών μέσα στον ανιχνευτή. Συγκεκριμένα, τα φωτόνια ενέργειας 383.85 keV αθροίζονται (*summing out*) με τα φωτόνια ενέργειας 53.26 keV στη φωτοκορυφή των 437.11 keV, ενώ επίσης φωτόνια ενέργειας 383.85 keV μπορεί να ανιχνευθούν ως αποτέλεσμα της ταυτόχρονης ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 302.85 keV και 80.99 keV (*summing in*). Όπως φαίνεται τα δύο παραπάνω φαινόμενα αλληλοαναιρούνται σε τέτοιο βαθμό που οι επιφάνειες της αντίστοιχης φωτοκορυφής στα δύο φάσματα δεν διαφέρουν στατιστικά.

Όσον αφορά στους συντελεστές C.A.S.F. που υπολογίσθηκαν για το  $^{137}\text{Cs}$  και το  $^{60}\text{Co}$ , (Πίνακας 3.18), αρχικά παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στις τιμές των συντελεστών C.A.S.F. και T.A.S.F. Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.2.2, ο συντελεστής T.A.S.F. αποτελεί μία ένδειξη της βελτίωσης ανίχνευσης της φωτοκορυφής συγκριτικά με τα επίπεδα ολόκληρου του ενεργειακού φάσματος, ενώ ο συντελεστής C.A.S.F. εξετάζει τη βελτίωση του λόγου του ύψους της φωτοκορυφής προς το αντίστοιχο ύψος σε τυπική περιοχή συνεχούς



υποστρώματος πριν την αιχμή Compton. Για το λόγο αυτό, παρατηρείται ότι για την περίπτωση της πηγής  $^{137}\text{Cs}$  σε επαφή με τον ανιχνευτή, η βελτίωση ανίχνευσης συνολικά στο φάσμα ανέρχεται σε  $\sim 2$  φορές, ενώ αναφορικά με την αιχμή Compton της φωτοκορυφής εκτιμάται βελτίωση κατά  $\sim 5.5$  φορές, δηλαδή στο suppressed φάσμα η αιχμή Compton του  $^{137}\text{Cs}$  είναι  $\sim 5.5$  φορές μικρότερη από την αντίστοιχη στο unsuppressed. Αντίστοιχη είναι η εικόνα και όταν η πηγή είναι σε απόσταση από τον ανιχνευτή, αν και η μείωση της αιχμής Compton στο suppressed φάσμα είναι μικρότερη ( $\sim 4.3$  φορές). Η ίδια εικόνα παρατηρείται και για το  $^{60}\text{Co}$  και για τις δύο σχετικές θέσεις πηγής – ανιχνευτή.

### 3.3.2.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση επιφανειακής πηγής χαμηλής ραδιενέργειας

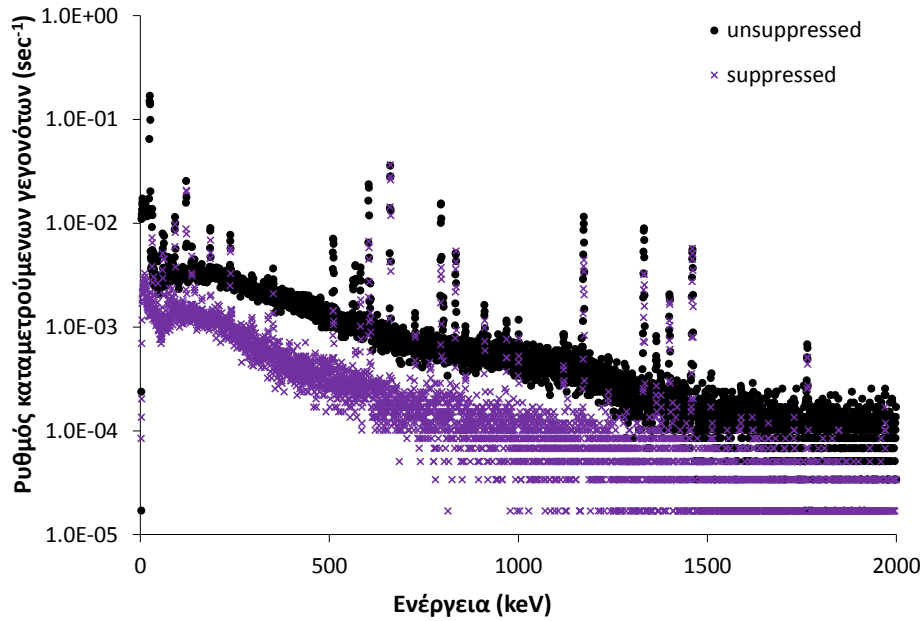
Για τη μελέτη της απόκρισης της νέας διάταξης για επιφανειακές πηγές χρησιμοποιήθηκε φίλτρο ονομαστικής διαμέτρου 45 mm και πολύ μικρού πάχους<sup>26</sup>. Στον Πίνακα 3.19 δίνονται τα ισότοπα της πηγής, οι ραδιενέργειες αναφοράς την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες (1σ). Καθώς η ραδιενέργεια της πηγής είναι πολύ χαμηλή, μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης θα έχει αμελητέα συνεισφορά. Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζονται τα φάσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του φίλτρου τοποθετημένου επί του ανιχνευτή.

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής	Ραδιενέργεια (Bq/φίλτρο)	Αβεβαιότητα (1σ)
$^{241}\text{Am}$	432.6 y	0.11 <sup>27</sup>	5.3%
$^{57}\text{Co}$	271.80 d	0.24	2.37%
$^{60}\text{Co}$	5.2711 y	0.96	1.50%
$^{134}\text{Cs}$	2.0644 y	2.21	2.14%
$^{137}\text{Cs}$	30.05 y	1.60	1.76%
$^{54}\text{Mn}$	312.13 d	0.23	2.21%

Πίνακας 3.19: Ραδιενέργειες της επιφανειακής πηγής στις 02/11/2010.

<sup>26</sup> Από την Άσκηση Διασύγκρισης IAEA-CU-2008-02 (Καρφόπουλος, 2012), (IAEA/AQ/2, 2009).

<sup>27</sup> Στο φίλτρο ανιχνεύθηκε και  $^{241}\text{Am}$ , η συγκέντρωση του οποίου δεν δίνεται από τους διοργανωτές, αλλά εκτιμήθηκε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.



Εικόνα 3.4: Unsuppressed και suppressed φάσματα επιφανειακής πηγής.

Με βάση τις αναλύσεις<sup>28</sup> δίνονται στον Πίνακα 3.20 ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (cps) για κάθε φωτοκορυφή στα φάσματα unsuppressed και το suppressed, καθώς και οι τιμές των συντελεστών T.A.S.F. και  $R_p$ . Όλες οι αβεβαιότητες είναι σε επίπεδο 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$cps_{unsup.}$	$cps_{sup.}$	T.A.S.F.	$R_p$
<sup>241</sup> Am	59.54	0.011 ± 13.8%	0.009 ± 9.8%	2.9 ± 16.9%	0.8 ± 16.9%
<sup>57</sup> Co	122.06 <sup>c</sup>	0.055 ± 3.5%	0.053 ± 2.7%	3.3 ± 4.4%	0.97 ± 4.4%
<sup>57</sup> Co	136.47	0.008 ± 16.1%	0.008 ± 13.8%	3.8 ± 21.2%	1.1 ± 21.1%
<sup>134</sup> Cs	563.24 <sup>c</sup>	0.005 ± 28.5%	--	--	--
<sup>134</sup> Cs	569.33 <sup>c</sup>	0.009 ± 16.3%	0.001 ± 59.2%	0.4 ± 61.4%	0.1 ± 61.4%
<sup>134</sup> Cs	604.72 <sup>c</sup>	0.077 ± 2.4%	0.022 ± 4.7%	0.99 ± 5.3%	0.29 ± 5.3%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.124 ± 1.5%	0.124 ± 1.3%	3.46 ± 2.0%	1.00 ± 1.9%
<sup>134</sup> Cs	795.85 <sup>c</sup>	0.060 ± 3.4%	0.013 ± 5.2%	0.75 ± 6.2%	0.22 ± 6.2%
<sup>134</sup> Cs	801.95 <sup>c</sup>	0.005 ± 7.4%	--	--	--
<sup>54</sup> Mn	834.80	0.019 ± 6.9%	0.019 ± 4.0%	3.4 ± 8.0%	1.0 ± 8.0%
<sup>134</sup> Cs	1167.97	--	--	--	--
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.046 ± 3.2%	0.018 ± 4.3%	1.37 ± 5.3%	0.40 ± 5.3%
<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	0.041 ± 2.8%	0.016 ± 4.3%	1.30 ± 5.2%	0.38 ± 5.2%
<sup>134</sup> Cs	1365.19 <sup>c</sup>	0.002 ± 33.0%	--	--	--
<sup>134</sup> Cs	1400.57	0.008 ± 10.6%	0.007 ± 7.6%	3.1 ± 13.0%	0.9 ± 13.0%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.20: Ρυθμοί καταγραφόμενων γεγονότων, T.A.S.F. και  $R_p$  για την επιφανειακή πηγή.

<sup>28</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 58 – 59.

Όπως διαπιστώνεται, για τα ισότοπα  $^{241}\text{Am}$  και  $^{60}\text{Co}$  για τα οποία μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος και με σημειακές πηγές, η μείωση στην οποία υπόκεινται οι αντίστοιχες φωτοκορυφές δεν φαίνεται να εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία, καθώς ο συντελεστής  $R_p$  είναι ίσος με  $\sim 0.80$  και  $\sim 0.40$ , αντίστοιχα.

Όσον αφορά στο  $^{137}\text{Cs}$ , παρατηρείται ότι για την επιφανειακή πηγή δεν εμφανίζονται μειώσεις στη φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης ( $R_p = 1.00$ ), όπως και αναμένεται με βάση το διάγραμμα διάσπασής του, ενώ στο suppressed ανιχνεύεται  $\sim 3.5$  φορές καλύτερα. Το γεγονός αυτό ενισχύει την υποψία ότι η μείωση της επιφάνειας της εν λόγω φωτοκορυφής που παρουσιάσθηκε για τη γεωμετρία της σημειακής πηγής οφείλεται σε τυχαία συμβάντα σύμπτωσης, λόγω της υψηλής ραδιενέργειας της πηγής.

Για το μονοενεργειακό ισότοπο  $^{54}\text{Mn}$  η απόκριση του συστήματος φαίνεται να είναι αντίστοιχη εκείνης για το  $^{137}\text{Cs}$ , καθώς δεν υφίσταται μειώσεις στη φωτοκορυφή του και ανιχνεύεται στο suppressed φάσμα  $\sim 3.5$  φορές καλύτερα.

Για το  $^{57}\text{Co}$  παρά την σχετικά υψηλή αβεβαιότητα, είναι εμφανής η τάση που ακολουθεί η απόκριση της ανιχνευτικής διάταξης. Οι φωτοκορυφές του  $^{57}\text{Co}$  στα 122.06 keV και 136.47 keV δεν υφίστανται στατιστικά σημαντικές μειώσεις. Για τα φωτόνια ενέργειας 136.47 keV, αυτό ήταν κάτι αναμενόμενο. Όσον αφορά στα φωτόνια ενέργειας 122.06 keV, αυτά εκπέμπονται σε σειρά με τα φωτόνια ενέργειας 14.41 keV και μπορεί να συμμετέχουν, πέραν του φαινομένου true coincidence και σε τυχαίες αθροίσεις (chance coincidence)<sup>29</sup> που οδηγούν σε μείωση της επιφάνειας της φωτοκορυφής. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ενέργειας των φωτονίων 14.41 keV, κάτι τέτοιο δεν είναι πολύ πιθανό, καθώς η ανίχνευσή τους από τον ανιχνευτή NaI(Tl) είναι δύσκολη λόγω του παραθύρου του από αλουμίνιο.

Τέλος, για το  $^{134}\text{Cs}$  παρατηρείται ότι δυσχεραίνεται η ανάλυσή του στο suppressed φάσμα. Κατ' αρχήν, διαπιστώνεται ότι σχεδόν οι μισές φωτοκορυφές του εν λόγω ισότοπου δεν ανιχνεύονται, ενώ η αβεβαιότητα αυτών που ανιχνεύονται είναι υψηλότερη σε σχέση με το unsuppressed. Ενδιαφέρον

---

<sup>29</sup> Υπενθυμίζεται ότι true coincidence παρουσιάζεται κατά την αλληλεπίδραση των φωτονίων με τον ίδιο ανιχνευτή, ενώ chance coincidence όταν τα φωτόνια αλληλεπιδρούν συγχρόνως με τους δύο ανιχνευτές.

παρουσιάζει η τιμή του συντελεστή T.A.S.F. για το φωτόνιο ενέργειας 604.72 keV, καθώς δείχνει ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στο unsuppressed και το suppressed φάσμα όσον αφορά τον όρο A(T/P) (T.A.S.F.  $\approx$  1.00), ενώ η φωτοκορυφή εμφανίζεται στο suppressed φάσμα μειωμένη κατά 70%. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι οι συντελεστές πρέπει να εξετάζονται παράλληλα. Εξαιρέση σε όλα τα παραπάνω αποτελεί η φωτοκορυφή στην ενέργεια 1400.57 keV για την οποία η ανάλυση είναι καλύτερη στο suppressed φάσμα, τόσο σε όρους αβεβαιότητας, όσο και σε όρους T.A.S.F. και  $R_p$ . Τα φωτόνια αυτής της ενέργειας δεν συμπεριλήφθηκαν στον Πίνακα 3.14, καθώς δεν εκπέμπονται άμεσα από το  $^{134}\text{Cs}$ , αλλά αποτελούν άθροιση των φωτονίων ενέργειας 795.85 keV και 604.72 keV. Η εν λόγω φωτοκορυφή υπόκειται μεν σε μείωση της τάξης του 10% στο suppressed φάσμα<sup>30</sup>, αλλά ανιχνεύεται  $\sim$  3 φορές ευκολότερα. Η διαφοροποίηση του συγκεκριμένου φωτονίου σε σχέση με τα υπόλοιπα που εκπέμπει το  $^{134}\text{Cs}$  οφείλεται στην ίδια τη φύση της εκπομπής του, καθώς οδηγεί στην απόκριση του συστήματος σαν να ήταν μονοενεργειακό φωτόνιο, παρόλο που αποτελεί αθροιστική φωτοκορυφή.

### 3.3.2.3 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών όγκου

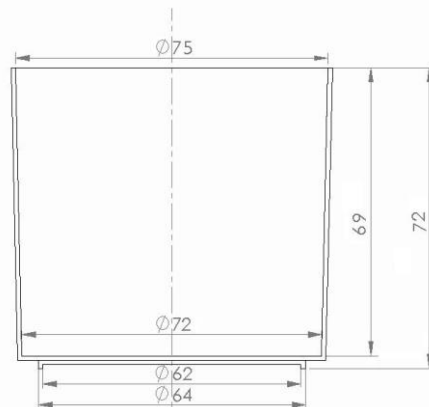
Καθώς οι γεωμετρίες που συνήθως χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. για την ανάλυση δειγμάτων ή τη βαθμονόμηση ανιχνευτικών συστημάτων είναι συνήθως γεωμετρίες όγκου, κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη της απόκρισης του ανιχνευτικού συστήματος για δύο είδη πηγών όγκου:

- χαμηλής ενεργότητας, που αποτελούν τυπικά δείγματα αναλύσεων ρουτίνας (χώμα, νερό, ιπτάμενη τέφρα)
- υψηλότερης ενεργότητας, που αποτελούν τυπικά δείγματα πηγών βαθμονόμησης (υγρά διαλύματα πολλών ραδιενεργών ισοτόπων)

Όλες οι γεωμετρίες όγκου που συνήθως χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. βασίζονται σε κυλινδρικό δοχείο (Εικόνα 3.5), συνολικού όγκου  $282.0 \text{ cm}^3$ , με ελαφρά κωνικότητα που περιγράφεται από τη σχέση:  $R \text{ (cm)} = 0.029 \times h \text{ (cm)} + 3.54$

<sup>30</sup> Η μείωση αυτή πρέπει να αποδίδεται σε τυχαία σύμπτωση με κάποιο από τα υπόλοιπα εκπεμπόμενα σε σειρά φωτόνια (π.χ. με φωτόνια ενέργειας 569.33 keV).

(Αναγνωστάκης, 1998). Η διαφορά των γεωμετριών έγκειται στο διαφορετικό ύψος πλήρωσης του δοχείου (Πίνακας 3.21).



Εικόνα 3.5:Κυλινδρικό δοχείο τυπικής γεωμετρίας όγκου συνολικού όγκου 282 cm<sup>3</sup>.

Γεωμετρία	Όγκος γεωμετρίας (cm <sup>3</sup> )	Ύψος πλήρωσης (cm)
«8»	40.0	10
«5»	97.2	22
«2»	282.0	69

Πίνακας 3.21: Στοιχεία τυπικών γεωμετριών που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

### 3.3.2.3.1 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών όγκου χαμηλής ραδιενέργειας

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η απόκριση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS, κατά την ανάλυση δειγμάτων φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισότοπων σε χαμηλές συγκεντρώσεις, που αποτελεί και τον κύριο όγκο δειγμάτων που αναλύονται στο σύστημα Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα όγκου δύο ειδών:

- δείγματα ιπτάμενης τέφρας από λιγνιτικό σταθμό παραγωγής ενέργειας της Μεγαλόπολης που περιέχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Τα δείγματα αυτά είναι συσκευασμένα σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες<sup>31</sup> (Πίνακας 3.22).

<sup>31</sup> Τα δείγματα ιπτάμενης τέφρας γεωμετρίας «8» και «5» προέρχονται από το σημείο απόθεσης του ΑΗΣ-Α, ενώ το δείγμα γεωμετρίας «2» από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα του ΑΗΣ-Β (Πέππας, 2008).

- δείγματα γεωμετρίας «2» που περιείχαν τεχνητά ισότοπα και είχαν παρασκευασθεί στο πλαίσιο Άσκησης Διασύγκρισης του Διεθνή Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας<sup>32</sup> (Πίνακας 3.23).

Γεωμετρία	Αρχικό δείγμα τέφρας	Μάζα δείγματος (gr)
«8»	PM001DE	37.3
«5»	PM001DE	71.8
«2»	PM4P252	245.6

Πίνακας 3.22: Στοιχεία δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας που μελετήθηκαν στην παρούσα Δ.Δ.

Γεωμετρία	Κωδικός δείγματος	Ισότοπο	Συγκέντρωση (Bq/kg)
«2»	WT087	<sup>134</sup> Cs	15.4 ± 0.9%
		<sup>137</sup> Cs	48.7 ± 0.6%
«2»	WT088	<sup>241</sup> Am	40.1 ± 0.4%
		<sup>60</sup> Co	50.9 ± 0.8%
		<sup>152</sup> Eu	46.5 ± 0.8%
«2»	WT089	<sup>134</sup> Cs	45.9 ± 0.6%
		<sup>137</sup> Cs	29.4 ± 0.7%
		<sup>241</sup> Am	15.2 ± 0.7%

Πίνακας 3.23: Δείγματα όγκου από την Άσκηση Διασύγκρισης IAEA-TEL-2013-04 (15/05/2014).

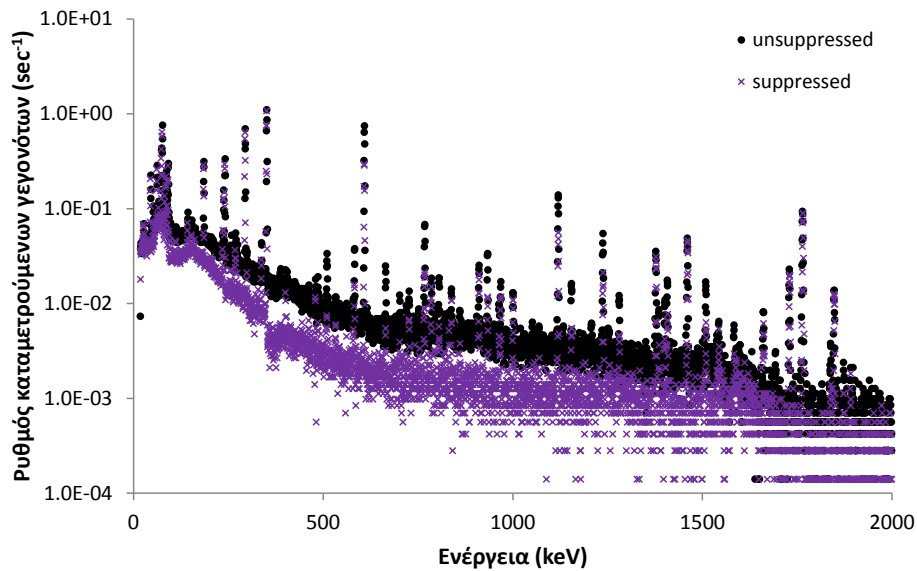
Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα unsuppressed και suppressed φάσματα για το δείγμα PM4P252. Στις αναλύσεις των δειγμάτων για τις τρεις γεωμετρίες δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας<sup>33</sup> δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές των συντελεστών T.A.S.F. και R<sub>p</sub> ανάμεσα στις γεωμετρίες, οπότε για τους σκοπούς αυτής της Παραγράφου δίνονται αποτελέσματα μόνο για τη γεωμετρία «2» που αποτελεί και την πλέον χρησιμοποιούμενη στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. γεωμετρία για τέτοια δείγματα. Οι συντελεστές T.A.S.F. και R<sub>p</sub>, συνοδευόμενοι από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ, δίνονται στον Πίνακα 3.24.

Συνολικά, για όλα τα δείγματα όγκου φυσικής ραδιενέργειας που εξετάσθηκαν, παρατηρήθηκε ότι για τα μονοενεργειακά ισότοπα <sup>210</sup>Pb και <sup>226</sup>Ra, καθώς και το ισότοπο <sup>214</sup>Pb που δεν εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, οι φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο φάσματα, unsuppressed και suppressed. Την ίδια εικόνα παρουσιάζουν και τα φωτόνια του <sup>214</sup>Bi ενέργειας 1729.60 keV, 1764.49 keV και 1847.42 keV, τα οποία

<sup>32</sup> Η Άσκηση IAEA-TEL-2013-03 περιγράφεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.3.5.

<sup>33</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 74 – 79.

δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλα<sup>34</sup>. Αντίθετα, έντονη αρνητική επίδραση λόγω του συστήματος Compton Suppression παρατηρείται στις υπόλοιπες φωτοκορυφές του <sup>214</sup>Bi, το οποίο εκπέμπει πλήθος φωτονίων σε σειρά, και παρατηρείται έως και ~80% μείωση στην επιφάνεια ορισμένων από αυτά.



Εικόνα 3.6: Unsuppressed και suppressed φάσματα δείγματος ιπτάμενης τέφρας PM4P252 όγκου 282.0 cm<sup>3</sup>.

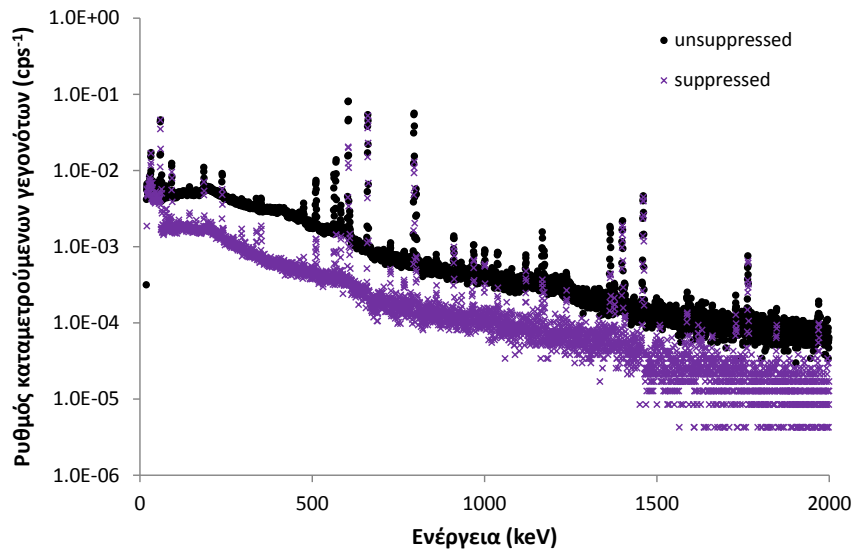
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F γεωμ.2	R <sub>p</sub> γεωμ.2
<sup>210</sup> Pb	46.52	1.6 ± 7.6%	1.01 ± 7.6%
<sup>226</sup> Ra	186.24	1.57 ± 3.6%	1.00 ± 3.6%
<sup>214</sup> Pb	242.80	1.60 ± 4.3%	1.01 ± 4.3%
	295.22	1.58 ± 1.7%	1.00 ± 1.7%
	351.93	1.57 ± 1.1%	1.00 ± 1.1%
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	0.66 ± 1.5%	0.42 ± 1.5%
	768.36 <sup>c</sup>	0.53 ± 8.8%	0.33 ± 8.8%
	934.06 <sup>c</sup>	0.30 ± 13.6%	0.19 ± 13.6%
	1120.29 <sup>c</sup>	0.60 ± 3.8%	0.38 ± 3.8%
	1238.11 <sup>c</sup>	0.62 ± 8.5%	0.39 ± 8.5%
	1377.67	1.5 ± 7.4%	0.93 ± 7.4%
	1407.98 <sup>c</sup>	0.7 ± 17.8%	0.45 ± 17.8%
	1509.23 <sup>c</sup>	0.6 ± 21.1%	0.41 ± 21.1%
	1729.60	1.5 ± 7.1%	0.98 ± 7.1%
	1764.49	1.57 ± 2.6%	0.99 ± 2.6%
1847.42	1.5 ± 11.5%	1.0 ± 11.5%	

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.24: Συντελεστές T.A.S.F. και R<sub>p</sub> για το δείγμα τέφρας όγκου 282.0 cm<sup>3</sup>.

<sup>34</sup> Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι η υψηλή ενεργότητα της σημειακής πηγής <sup>226</sup>Ra (Παράγραφος 3.3.2.1) οδήγησε στην αυξημένη καταγραφή τυχαίων γεγονότων σύμπτωσης, γι αυτό τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με τη σημειακή πηγή να μην θεωρούνται αντιπροσωπευτικά.

Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζονται τα unsuppressed και suppressed φάσματα για το δείγμα τεχνητής ραδιενέργειας όγκου  $282.0 \text{ cm}^3$ , WT089, ενώ οι αντίστοιχοι συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  όπως αυτοί προέκυψαν με βάση τις αντίστοιχες αναλύσεις<sup>35</sup> δίνονται στους Πίνακες 3.25, 3.26 και 3.27.



Εικόνα 3.7: Unsuppressed και suppressed φάσματα δείγματος WT089 όγκου  $282.0 \text{ cm}^3$ .

Συνολικά, για όλα τα δείγματα όγκου τεχνητής ραδιενέργειας που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε ότι οι φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης των μονοενεργειακών ισωτόπων  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$ , δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο φάσματα, unsuppressed και suppressed.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F.	$R_p$
$^{137}\text{Cs}$	661.62	$2.35 \pm 0.5\%$	$1.003 \pm 0.5\%$
	563.24 <sup>c</sup>	-- <sup>36</sup>	--
$^{134}\text{Cs}$	569.33 <sup>c</sup>	$0.21 \pm 29.0\%$	$0.09 \pm 29.0\%$
	604.72 <sup>c</sup>	$0.60 \pm 2.5\%$	$0.257 \pm 2.5\%$
	795.85 <sup>c</sup>	$0.51 \pm 3.1\%$	$0.219 \pm 3.1\%$
	801.95 <sup>c</sup>	$0.32 \pm 13.1\%$	$0.14 \pm 13.1\%$
	1167.97	--	--
	1365.19 <sup>c</sup>	$0.7 \pm 30.3\%$	$0.29 \pm 30.3\%$
	1400.59	$2.0 \pm 15.7\%$	$0.8 \pm 15.7\%$

c: φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.25: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  για το δείγμα, όγκου  $282.0 \text{ cm}^3$ , WT087 (IAEA-TEL-2013-04).

<sup>35</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 68 – 73.

<sup>36</sup> Οπου '--' σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπολογιστεί γιατί δεν ανιχνεύθηκε στο suppressed φάσμα.



Αντίθετα, οι φωτοκορυφές του πολυενεργειακού  $^{60}\text{Co}$  υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed φάσμα της τάξης του 60%. Ανάλογη είναι η απόκριση του συστήματος για το πολυενεργειακό  $^{134}\text{Cs}$ , όπου παρατηρούνται μειώσεις σε όλες τις φωτοκορυφές στο suppressed φάσμα οι οποίες κυμαίνονται από 14% έως 92% ( $R_p$  από 0.86 έως 0.08). Η απόκριση του συστήματος φαίνεται να είναι ανεξάρτητη του δείγματος, καθώς οι συντελεστές  $R_p$  και T.A.S.F. δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν (WT087 και WT089). Αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά για το  $^{134}\text{Cs}$ , η τιμή του συντελεστή T.A.S.F. είναι μικρότερη από 1, γεγονός που δείχνει ότι η χρήση του suppressed φάσματος δεν ενδείκνυται για την ανάλυση, ακόμα και εάν τα επίπεδα του συνεχούς υποστρώματος είναι χαμηλότερα.

Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και το πολυενεργειακό  $^{152}\text{Eu}$ , οι φωτοκορυφές του οποίου εμφανίζονται στο suppressed φάσμα μειωμένες από 4% έως και 93% ( $R_p$  από 0.86 έως 0.07). Όπως και για όλα τα πολυενεργειακά ισότοπα που εξετάστηκαν, οι μειώσεις αυτές καθιστούν τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης για την ανάλυση του  $^{152}\text{Eu}$  μη σκόπιμη.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F.	$R_p$
$^{241}\text{Am}$	59.54	3.90 ± 1.7%	1.01 ± 1.7%
$^{152}\text{Eu}$	121.78 <sup>c</sup>	1.21 ± 1.5%	0.316 ± 1.5%
	244.70 <sup>c</sup>	0.71 10.1%	0.19 10.1%
	344.28 <sup>c</sup>	1.97 ± 3.2%	0.51 ± 3.2%
	411.12 <sup>c</sup>	0.3 ± 66.8%	0.07 ± 66.8%
	443.97 <sup>c</sup>	0.7 ± 22.6%	0.18 ± 22.6%
	778.90 <sup>c</sup>	0.59 ± 6.6%	0.15 ± 6.6%
	867.38 <sup>c</sup>	-- <sup>37</sup>	--
	964.08 <sup>c</sup>	1.76 ± 5.2%	0.46 ± 5.2%
	1085.84 <sup>c</sup>	3.3 ± 4.6%	0.86 ± 4.6%
	1112.08 <sup>c</sup>	1.92 ± 3.9%	0.50 ± 3.9%
	1408.01 <sup>c</sup>	1.95 ± 2.3%	0.51 ± 2.3%
$^{60}\text{Co}$	1173.24 <sup>c</sup>	1.50 ± 1.0%	0.390 ± 1.0%
	1332.50 <sup>c</sup>	1.41 ± 1.0%	0.367 ± 1.0%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.26: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  για το δείγμα, όγκου 282.0 cm<sup>3</sup>, WT088 (IAEA-TEL-2013-04).

<sup>37</sup> Όπου '--' σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπολογιστεί γιατί δεν ανιχνεύθηκε στο suppressed φάσμα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F.	R <sub>p</sub>
<sup>241</sup> Am	59.54	3.00 ± 3.1%	1.00 ± 3.1%
<sup>137</sup> Cs	661.62	3.00 ± 0.8%	1.000 ± 0.8%
<sup>134</sup> Cs	563.24 <sup>c</sup>	0.24 ± 15.3%	0.08 ± 15.3%
	569.33 <sup>c</sup>	0.26 ± 13.9%	0.09 ± 13.9%
	604.72 <sup>c</sup>	0.760 ± 1.3%	0.254 ± 1.3%
	795.85 <sup>c</sup>	0.68 ± 1.6%	0.226 ± 1.6%
	801.95 <sup>c</sup>	0.36 ± 9.2%	0.12 ± 9.2%
	1167.97	1.0 ± 21.3%	0.34 ± 21.3%
	1365.19 <sup>c</sup>	0.8 ± 15.0%	0.26 ± 15.0%
	1400.59	2.6 ± 6.8%	0.86 ± 6.8%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.27: Συντελεστές T.A.S.F. και R<sub>p</sub> για το δείγμα, όγκου 282.0 cm<sup>3</sup>, WT089 (IAEA-TEL-2013-04).

### 3.3.2.3.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression με χρήση πηγών όγκου υψηλής ραδιενέργειας

Ως πηγή όγκου υψηλότερης ραδιενέργειας χρησιμοποιήθηκε πηγή βαθμονόμησης γεωμετρίας «2» που διατίθεται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Πρόκειται για ραδιενεργό διάλυμα πολλών ισοτόπων με κωδική ονομασία QCY13, το οποίο παρασκευάστηκε με βάση το εμπορικά διαθέσιμο μεικτό διάλυμα ραδιοϊσοτόπων με κωδικό QCY.48<sup>38</sup> (Καράγγελος, 2008). Στον Πίνακα 3.28 δίνονται τα ισότοπα που περιέχονταν στην πηγή QCY13, ο χρόνος ημιζωής, οι ενεργότητες την ημερομηνία διεξαγωγής των πειραμάτων και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες (1σ), σύμφωνα με το πιστοποιητικό της πηγής (Παράρτημα Δ). Διαπιστώνεται εύκολα ότι κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ. η παραπάνω πηγή περιείχε μόνο τα ισότοπα <sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co, <sup>137</sup>Cs και <sup>60</sup>Co, καθώς όλα τα υπόλοιπα είχαν διασπασθεί σχεδόν εντελώς και δεν ήταν ανιχνεύσιμα.

Στον Πίνακα 3.29 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των φασμάτων με την πηγή αυτή<sup>39</sup>, σε όρους συντελεστών T.A.S.F και R<sub>p</sub>. Λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές απόκρισης του συστήματος Compton Suppression για την πηγή όγκου, διαπιστώνεται ότι εν γένει βελτιώνονται οι συνθήκες ανίχνευσης των φωτονίων των μονοενεργειακών ισοτόπων <sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co και <sup>137</sup>Cs κατά ~ 2 φορές (T.A.S.F. ≈ 2).

<sup>38</sup> Το τελικό κλάσμα ραδιενέργειας του δείγματος ως προς την αρχική πηγή είναι  $7.549 \times 10^{-3}$ . Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στη Δ.Δ. (Καράγγελος, 2008).

<sup>39</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 64 – 67.

Όσον αφορά στο  $^{60}\text{Co}$ , οι επιφάνεια των φωτοκορυφών μειώνονται στο suppressed φάσμα κατά  $\sim 60\%$ .

Ισότοπο	Χρόνος Ημιζωής	Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια δείγματος QCY13 (gammas/sec/gr)
$^{241}\text{Am}$	432.17 y	59.54	8.4 $\pm$ 1.3%
$^{109}\text{Cd}$	462.60 d	88.03	0.042 $\pm$ 3.1%
$^{57}\text{Co}$	271.79 d	122.06 <sup>c</sup>	0.0015 $\pm$ 0.8%
$^{139}\text{Ce}$	137.64 d	165.85	$\Delta/A$ <sup>40</sup>
$^{203}\text{Hg}$	46.60 d	279.19	$\Delta/A$
$^{113}\text{Sn}$	115.09 d	391.69	$\Delta/A$
$^{85}\text{Sr}$	64.85 d	514.00	$\Delta/A$
$^{137}\text{Cs}$	30.17 y	661.62	14.8 $\pm$ 1.0%
$^{88}\text{Y}$	106.63 d	898.04 <sup>c</sup>	$\Delta/A$
$^{60}\text{Co}$	5.27 y	1173.24 <sup>c</sup>	8.16 $\pm$ 0.8%
$^{60}\text{Co}$	5.27 y	1333.50 <sup>c</sup>	8.16 $\pm$ 0.8%
$^{88}\text{Y}$	106.63 d	1836.07	$\Delta/A$

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.28: Χαρακτηριστικά πηγής όγκου υψηλότερης ραδιενέργειας (23/11/2010).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F	$R_p$
$^{241}\text{Am}$	59.54	1.97 $\pm$ 1.3%	1.00 $\pm$ 1.2%
$^{109}\text{Cd}$	88.03	$\Delta/A$	$\Delta/A$
$^{57}\text{Co}$	122.06 <sup>c</sup>	2.1 $\pm$ 17.5%	1.1 $\pm$ 17.5%
$^{137}\text{Cs}$	661.62	1.985 $\pm$ 0.4%	1.004 $\pm$ 0.4%
$^{60}\text{Co}$	1173.24 <sup>c</sup>	0.736 $\pm$ 0.9%	0.372 $\pm$ 0.9%
	1332.50 <sup>c</sup>	0.696 $\pm$ 0.9%	0.352 $\pm$ 0.9%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.29: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  για την πηγή γεωμετρίας «2» QCY13.

Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να συγκριθούν τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που έγιναν με βάση τα δείγματα σχετικά υψηλής ραδιενέργειας της παρούσας Παραγράφου και χαμηλής ραδιενέργειας της Παραγράφου 3.3.2.3.1, για τα κοινά ισότοπα:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$  (Πίνακας 3.30).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Χαμηλότερη ραδιενέργεια		Υψηλότερη ραδιενέργεια	
		T.A.S.F	$R_p$	T.A.S.F	$R_p$
$^{241}\text{Am}$	59.54	3.90 $\pm$ 1.7%	1.01 $\pm$ 1.7%	1.97 $\pm$ 1.3%	1.00 $\pm$ 1.2%
$^{137}\text{Cs}$	661.62	2.35 $\pm$ 0.5%	1.003 $\pm$ 0.5%	1.985 $\pm$ 0.4%	1.004 $\pm$ 0.4%
$^{60}\text{Co}$	1173.24 <sup>c</sup>	1.50 $\pm$ 1.0%	0.390 $\pm$ 1.0%	0.736 $\pm$ 0.9%	0.372 $\pm$ 0.9%
	1332.50 <sup>c</sup>	1.41 $\pm$ 1.0%	0.367 $\pm$ 1.0%	0.696 $\pm$ 0.9%	0.352 $\pm$ 0.9%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.30: Σύγκριση συντελεστών T.A.S.F. και  $R_p$  για τις πηγές χαμηλότερης και υψηλότερης ραδιενέργειας.

<sup>40</sup> Δεν ανιχνεύεται.

Με βάση τις τιμές του συντελεστή  $R_p$ , για τα μονοενεργειακά ισότοπα  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  δεν εμφανίζονται διαφοροποιήσεις ανάμεσα στο unsuppressed και το suppressed φάσμα για κανένα από τα δείγματα που εξετάστηκαν (χαμηλότερης και υψηλότερης ενεργότητας). Όσον αφορά το  $^{60}\text{Co}$ , επίσης δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο χρησιμοποιούμενα σετ δειγμάτων σε επίπεδο φωτοκορυφών. Και στις δύο περιπτώσεις προκύπτει ότι οι φωτοκορυφές του ισότοπου αυτού υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed φάσμα, οι οποίες οφείλονται στην ταυτόχρονη εκπομπή των φωτονίων του (φαινόμενο True Coincidence).

Όσον αφορά στις τιμές του συντελεστή T.A.S.F. παρατηρείται ότι για όλες τις φωτοκορυφές των τριών ισότοπων, οι τιμές του συντελεστή για τα δείγματα της χαμηλότερης ραδιενέργειας, είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες για τα δείγματα υψηλότερης ενεργότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν η συνολική ραδιενέργεια της πηγής είναι χαμηλότερη, το πλήθος των καταγραφόμενων γεγονότων σε ολόκληρο το ενεργειακό φάσμα να είναι χαμηλότερο. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό του συντελεστή T.A.S.F. που υπολογίζεται από τη Σχέση (3.8), μειώνεται ο λόγος  $A(P/T)$  στα δύο φάσματα.

Συμπερασματικά, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η βελτίωση κατά την ανίχνευση που εισάγει η ενεργητική θωράκιση είναι μεγαλύτερη όταν η συνολική ενεργότητα του αναλυόμενου δείγματος είναι χαμηλότερη. Επιπρόσθετα, σε δείγματα χαμηλότερης ενεργότητας είναι μικρότερη έως και μηδενική η επίδραση του φαινομένου της τυχαίας άθροισης (chance coincidence).

### **3.4 Μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode)**

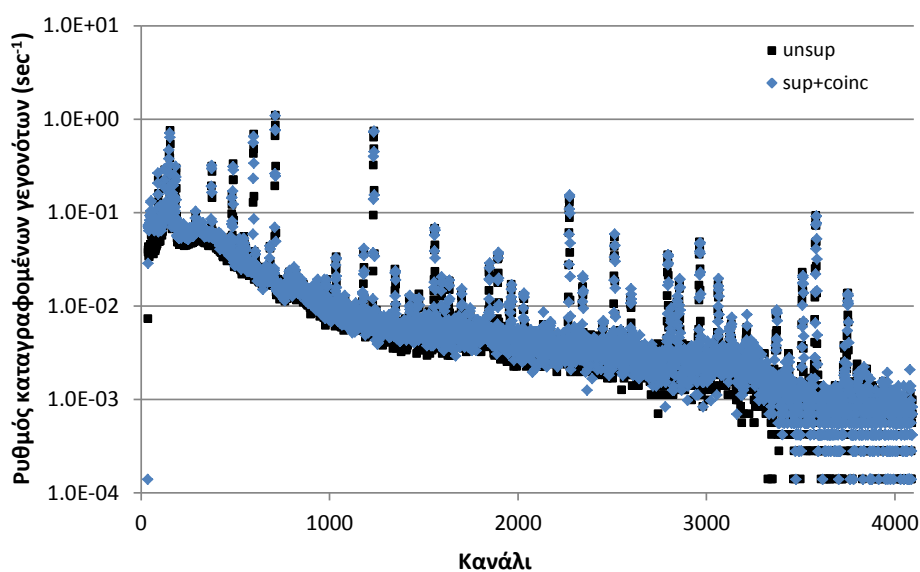
Η μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode) πραγματοποιήθηκε σε δύο επίπεδα, αντίστοιχα με την μελέτη της διάταξης σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης:

- με σύγκριση φασμάτων υποστρώματος με την ενεργητική θωράκιση ενεργή και ανενεργή

- με συγκριτικές μετρήσεις που έγιναν με χρήση πηγών διαφόρων γεωμετριών

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα πειράματα αυτά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και υπολογίζονται και σχολιάζονται οι απαραίτητοι για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος συντελεστές. Σημειώνεται ότι για τη λειτουργία της διάταξης σε σύμπτωση περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ισότοπα τα οποία εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά, για τους λόγους που αναπτύχτηκαν στην Παράγραφο 2.3.1.3.2.

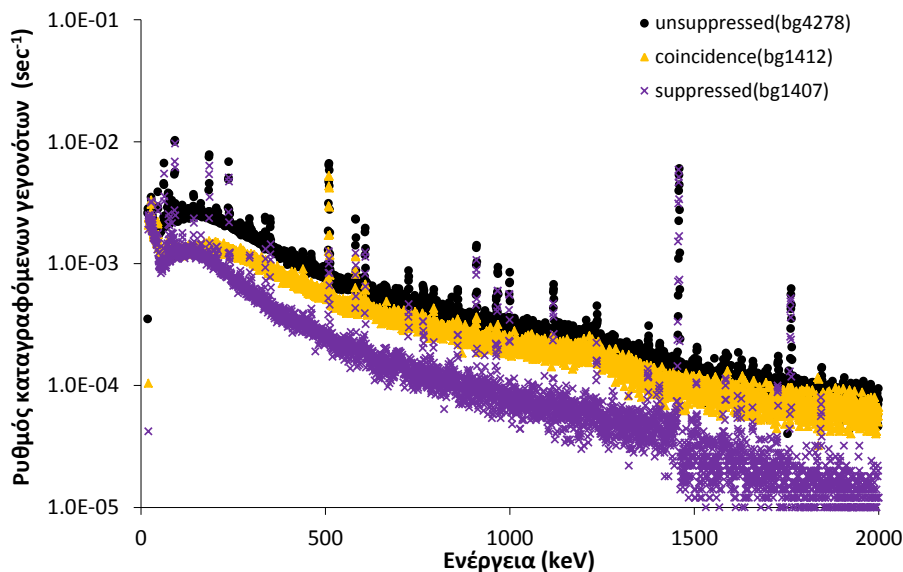
Πριν την παρουσίαση των πειραμάτων σημειώνεται ότι οι δύο λειτουργίες του συστήματος Compton Suppression είναι συμπληρωματικές. Ό,τι οδηγεί στη μη καταγραφή γεγονότων στο suppressed φάσμα (λειτουργία anti-coincidence) είναι αυτό που οδηγεί στην καταγραφή γεγονότων στο coincidence φάσμα. Ως εκ τούτου, η επαλληλία των δύο φασμάτων suppressed και coincidence οδηγεί στατιστικά στο unsuppressed φάσμα. Η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από την Εικόνα 3.8, όπου παρουσιάζονται συγκριτικά, και για το ίδιο δείγμα, το unsuppressed φάσμα και το φάσμα που προκύπτει μετά από άθροιση των φασμάτων suppressed και coincidence (άθροιση περιεχομένου κάθε καναλιού). Είναι εμφανής η εν γένει αλληλοεπικάλυψη των δύο φασμάτων (unsuppressed και suppressed+coincidence).



Εικόνα 3.8: Επαλληλία suppressed και coincidence φάσματος και σύγκριση με unsuppressed.

### 3.4.1 Μελέτη υποστρώματων σε λειτουργία σύμπτωσης

Η αξιολόγηση του φάσματος υποστρώματος της διάταξης XtRa - CSS σε λειτουργία σύμπτωσης πραγματοποιήθηκε τόσο σε σύγκριση με τη συμβατική λειτουργία όσο και με τη λειτουργία σε αντί-σύμπτωση (suppressed). Ως εκ τούτου, λήφθηκαν τρία φάσματα υποστρώματος, ένα για κάθε τρόπο λειτουργίας, διάρκειας 500 000 sec. Στην Εικόνα 3.9 φαίνονται τυπικά τέτοια φάσματα.



Εικόνα 3.9: Τυπικά φάσματα υποστρώματος χωρίς τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης, με χρήση της σε λειτουργία σύμπτωσης και σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης.

Η αξιολόγησή τους πραγματοποιήθηκε μόνο σε όρους συνεχούς υποστρώματος, επειδή στο φάσμα υποστρώματος σε λειτουργία σύμπτωσης δεν εμφανίζονται στατιστικά σημαντικές φωτοκορυφές. Εξαιρέση αποτελούν η φωτοκορυφή στην ενέργεια των 511 keV και η φωτοκορυφή του  $^{208}\text{Tl}$  στην ενέργεια των 583.14 keV, η οποία, όπως φάνηκε από τη μελέτη του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (Παράγραφος 3.3.1.2), επηρεάζεται έντονα από την ενεργητική θωράκιση. Οι δύο λειτουργίες (suppressed και coincidence) είναι συμπληρωματικές, επομένως, κορυφές όπως του  $^{208}\text{Tl}$ , που υφίστανται έντονες μειώσεις στο suppressed φάσμα, αναμένονται να εμφανιστούν στο coincidence φάσμα.

#### 3.4.1.1 Μελέτη σε επίπεδο συνεχούς υποστρώματος

Όπως και στην περίπτωση λειτουργίας της διάταξης σε αντί-σύμπτωση, η αξιολόγηση του συνεχούς υποστρώματος έγινε με τη βοήθεια των συντελεστών

μείωσης, Reduction Factor, R.F. από τη Σχέση (3.8). Για το σκοπό αυτό το ενεργειακό φάσμα χωρίστηκε σε 10 ίσες περιοχές πλάτους 200 keV και σε κάθε περιοχή εξαιρέθηκαν οι φωτοκορυφές που ενδεχομένως εμφανίζονται στο υπόστρωμα. Στον αριθμητή λήφθηκαν οι κρούσεις στο φάσμα υποστρώματος σε σύμπτωση, ενώ στον παρανομαστή οι αντίστοιχες κρούσεις στο φάσμα σύγκρισης (unsuppressed ή suppressed)<sup>41</sup>. Στον Πίνακα 3.31 δίνονται για κάθε ενεργειακή περιοχή οι τιμές των συντελεστών μείωσης R.F. για τη σύγκριση του φάσματος υποστρώματος coincidence με τα αντίστοιχα unsuppressed και suppressed.

<i>Ενεργειακή περιοχή</i>	<i>R.F. coinc./unsup.</i>	<i>R.F. coinc./sup.</i>
0-200 keV	0.52	1.09
200-400 keV	0.64	1.81
400-600 keV	0.69	2.22
600-800 keV	0.71	2.57
800-1000 keV	0.73	2.67
1000-1200 keV	0.74	3.03
1200-1400 keV	0.72	2.60
1400-1600 keV	0.80	3.81
1600-1800 keV	0.80	4.19
1800-2000 keV	0.82	4.77

**Πίνακας 3.31:** Συντελεστής μείωσης, R.F. για τα φάσματα υποστρώματος σε λειτουργία σύμπτωσης.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.31, όταν η διάταξη λειτουργεί σε σύμπτωση, το επίπεδο του συνεχούς υποστρώματος βρίσκεται μεταξύ των υποστρωμάτων των suppressed και unsuppressed φασμάτων. Πιο συγκεκριμένα και όσον αφορά στη σύγκριση με το unsuppressed συνεχές υπόστρωμα, η χρήση του συστήματος Compton Suppression σε σύμπτωση οδηγεί σε μείωση του συνεχούς υποστρώματος η οποία κυμαίνεται από ~ 20% στις υψηλές ενέργειες ( $E > 1400$  keV) έως ~ 50% στις χαμηλές ενέργειες ( $E < 200$  keV). Όσον αφορά τη σύγκριση για τους δύο τρόπους λειτουργίας (σύμπτωση και αντι-σύμπτωση) διαπιστώθηκε ότι η λειτουργία σε αντί-σύμπτωση υπερτερεί σε όρους συνεχούς υποστρώματος, καθώς τα επίπεδα συνεχούς υποστρώματος είναι έως και ~ 5 φορές χαμηλότερα. Πιο συγκεκριμένα, στις χαμηλές ενέργειες ( $E < 200$  keV) η διαφορά είναι μόλις ~ 10%, στις μεσαίες ενέργειες ( $200$  keV  $< E < 1400$  keV) παρατηρείται διαφορά 2 - 3 φορές, ενώ για τις υψηλές ενέργειες ( $E > 1400$  keV) το συνεχές υπόστρωμα στο φάσμα αντί-σύμπτωσης είναι 4 - 5 φορές χαμηλότερο.

<sup>41</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 22, 33 και 80.

### 3.4.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών

Η αξιολόγηση του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης έγινε ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση της λειτουργίας σε αντί-σύμπτωση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά από πηγές διαφόρων γεωμετριών που ήταν διαθέσιμες στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Λεπτομέρειες για τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν δοθεί στην Παράγραφο 3.3.2.

#### 3.4.2.1 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση σημειακών πηγών

Για τη μελέτη του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι σημειακές πηγές που περιγράφονται στην Παράγραφο 3.3.2.1 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.16. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων:

- πηγή σε επαφή με τον ανιχνευτή
- πηγή σε απόσταση 73 mm από τον ανιχνευτή<sup>42</sup>

Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα φάσματα για όλους τους τρόπους λειτουργίας της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τη σημειακή πηγή <sup>137</sup>Cs σε επαφή με τον ανιχνευτή. Όπως σημειώθηκε και στην Παράγραφο 3.3.2.1, η υψηλή ενεργότητα της πηγής οδηγεί στη δημιουργία ψευδοκορυφής στην ενέργεια των 1323 keV λόγω ταυτόχρονης ανίχνευσης δύο φωτονίων ενέργειας 661.62 keV. Παράλληλα, η υψηλή ενεργότητα της πηγής κατά τη λειτουργία του συστήματος σε σύμπτωση, οδηγεί στην εμφάνιση φωτοκορυφής στην ενέργεια των 661.62 keV, μειωμένης βέβαια σε σχέση με το unsuppressed φάσμα.

Στον Πίνακα 3.32 δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων<sup>43</sup> για σημειακές πηγές σε επαφή και σε απόσταση σε όρους συντελεστών T.A.S.F. και  $R_p$ , με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες ( $1\sigma$ ). Για τους υπολογισμούς στον αριθμητή λήφθηκαν τα δεδομένα από το coincidence φάσμα και στον παρανομαστή από το unsuppressed.

<sup>42</sup> Η πηγή είναι τοποθετημένη πάνω σε κενό κυλινδρικό δοχείο γεωμετρίας «2».

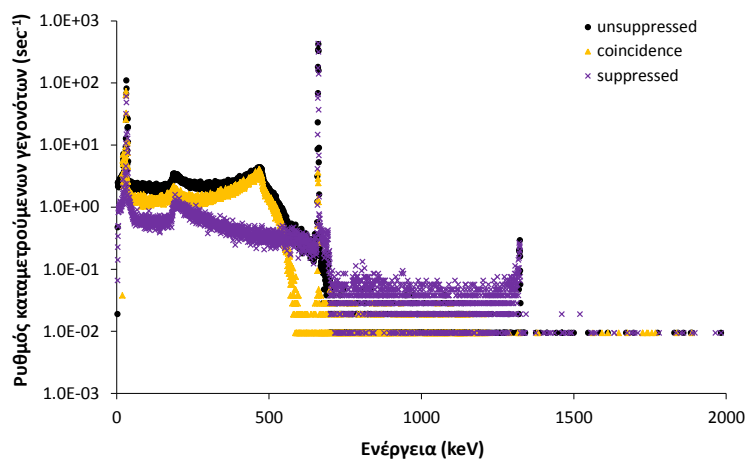
<sup>43</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 81 – 92.



Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F. σε επαφή	$R_p$ σε επαφή	T.A.S.F. σε απόσταση	$R_p$ σε απόσταση
<sup>210</sup> Pb	46.52	1.51 ± 5.2%	0.96 ± 5.2%	0.78 ± 6.7%	0.08 ± 6.7%
<sup>133</sup> Ba	53.26 <sup>c</sup>	1.2 ± 7.4%	0.86 ± 7.4%	1.0 ± 6.2%	0.7 ± 6.1%
<sup>241</sup> Am	59.54	0.144 ± 5.0%	0.0085 ± 4.9%	0.058 ± 6.7%	0.00100 ± 6.6%
<sup>133</sup> Ba	80.99 <sup>c</sup>	1.25 ± 0.6%	0.811 ± 0.6%	1.03 ± 0.8%	0.798 ± 0.7%
<sup>152</sup> Eu	121.78 <sup>c</sup>	0.88 ± 0.9%	0.564 ± 0.9%	1.01 ± 1.0%	0.140 ± 1.0%
<sup>133</sup> Ba	160.61 <sup>c</sup>	1.3 ± 9.4%	0.86 ± 9.4%	1.0 ± 23.2%	0.8 ± 23.2%
<sup>226</sup> Ra	186.24	0.15 ± 16.2%	0.10 ± 16.2%	0.05 ± 63.0%	0.005 ± 63.0%
<sup>133</sup> Ba	223.24 <sup>c</sup>	0.6 ± 47.0%	0.4 ± 47.0%	1.0 ± 32.5%	0.7 ± 32.5%
<sup>214</sup> Pb	242.80	0.17 ± 7.9%	0.106 ± 7.9%	0.13 ± 14.1%	0.013 ± 14.1%
<sup>152</sup> Eu	244.70 <sup>c</sup>	1.04 ± 3.2%	0.66 ± 3.2%	1.48 ± 3.2%	0.206 ± 3.2%
<sup>133</sup> Ba	276.40 <sup>c</sup>	0.91 ± 2.4%	0.59 ± 2.4%	0.89 ± 2.5%	0.69 ± 2.5%
<sup>214</sup> Pb	295.22	0.149 ± 3.9%	0.095 ± 3.9%	0.109 ± 6.5%	0.0106 ± 6.5%
<sup>133</sup> Ba	302.85 <sup>c</sup>	0.64 ± 2.1%	0.41 ± 2.1%	0.70 ± 1.7%	0.538 ± 1.7%
<sup>152</sup> Eu	344.28 <sup>c</sup>	0.59 ± 1.2%	0.376 ± 1.2%	0.49 ± 1.5%	0.069 ± 1.5%
<sup>214</sup> Pb	351.93	0.154 ± 2.5%	0.098 ± 2.5%	0.122 ± 3.5%	0.0118 ± 3.4%
<sup>133</sup> Ba	356.01 <sup>c</sup>	0.53 ± 0.7%	0.346 ± 0.7%	0.60 ± 0.9%	0.462 ± 0.8%
<sup>133</sup> Ba	383.85 <sup>c</sup>	0.149 ± 4.7%	0.10 ± 4.7%	0.29 ± 3.6%	0.221 ± 3.5%
<sup>152</sup> Eu	411.12 <sup>c</sup>	1.2 ± 10.3%	0.74 ± 10.3%	1.1 ± 10.9%	0.15 ± 10.9%
<sup>152</sup> Eu	443.97 <sup>c</sup>	1.02 ± 7.8%	0.65 ± 7.8%	1.22 ± 7.5%	0.17 ± 7.5%
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	1.26 ± 1.0%	0.802 ± 0.9%	1.33 ± 1.0%	0.130 ± 0.9%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0176 ± 2.9%	0.0079 ± 2.9%	0.0154 ± 2.9%	0.00131 ± 2.9%
<sup>214</sup> Bi	768.36 <sup>c</sup>	1.52 ± 4.4%	0.97 ± 4.4%	1.64 ± 4.2%	0.160 ± 4.2%
<sup>152</sup> Eu	778.90 <sup>c</sup>	1.14 ± 2.4%	0.73 ± 2.4%	0.96 ± 2.7%	0.134 ± 2.7%
<sup>152</sup> Eu	867.38 <sup>c</sup>	1.3 ± 12.8%	0.8 ± 12.8%	2.1 ± 10.6%	0.29 ± 10.6%
<sup>214</sup> Bi	934.06 <sup>c</sup>	1.6 ± 7.8%	1.00 ± 7.8%	1.7 ± 7.4%	0.16 ± 7.4%
<sup>152</sup> Eu	964.08 <sup>c</sup>	0.72 ± 3.8%	0.46 ± 3.8%	1.00 ± 3.2%	0.139 ± 3.2%
<sup>152</sup> Eu	1085.84 <sup>c</sup>	0.21 ± 7.6%	0.132 ± 7.6%	0.28 ± 6.3%	0.038 ± 6.3%
<sup>152</sup> Eu	1112.08 <sup>c</sup>	0.68 ± 3.7%	0.43 ± 3.7%	0.87 ± 3.3%	0.122 ± 3.3%
<sup>214</sup> Bi	1120.29	1.39 ± 2.5%	0.89 ± 2.5%	1.54 ± 2.4%	0.150 ± 2.4%
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.72 ± 2.1%	0.362 ± 2.0%	0.72 ± 2.1%	0.378 ± 2.0%
<sup>214</sup> Bi	1238.11 <sup>c</sup>	1.35 ± 5.1%	0.86 ± 5.1%	1.56 ± 4.5%	0.152 ± 4.5%
<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	0.73 ± 2.1%	0.368 ± 2.0%	0.74 ± 2.0%	0.387 ± 2.0%
<sup>214</sup> Bi	1377.67	0.26 ± 19.4%	0.17 ± 19.4%	0.26 ± 17.4%	0.025 ± 17.4%
<sup>214</sup> Bi	1407.98 <sup>c</sup>	1.5 ± 12.9%	0.9 ± 12.9%	1.6 ± 11.6%	0.15 ± 11.6%
<sup>152</sup> Eu	1408.01 <sup>c</sup>	0.68 ± 2.5%	0.43 ± 2.5%	0.91 ± 2.4%	0.126 ± 2.4%
<sup>214</sup> Bi	1509.23 <sup>c</sup>	1.5 ± 14.3%	0.9 ± 14.3%	1.5 ± 13.1%	0.14 ± 13.1%
<sup>214</sup> Bi	1729.60	0.16 ± 18.4%	0.10 ± 18.4%	0.13 ± 16.8%	0.012 ± 16.8%
<sup>214</sup> Bi	1764.49	0.14 ± 7.5%	0.091 ± 7.5%	0.18 ± 5.4%	0.0174 ± 5.4%
<sup>214</sup> Bi	1847.42	0.12 ± 50.4%	0.07 ± 50.4%	0.09 ± 48.9%	0.009 ± 48.9%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 3.32: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  για σημειακές πηγές σε λειτουργία σύμπτωσης.**



**Εικόνα 3.10: Unsuppressed, coincidence και suppressed φάσματα σημειακής πηγής  $^{137}\text{Cs}$  σε επαφή με τον ανιχνευτή.**

Τα μονοενεργειακά ισότοπα  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  σχεδόν εξαφανίζονται όταν το σύστημα λειτουργεί σε σύμπτωση, όπως και το πολυενεργειακό  $^{214}\text{Pb}$ , αλλά χωρίς φωτόνια σε σειρά,  $^{214}\text{Pb}$ . Επίσης εξαφανίζονται και τα φωτόνια του  $^{214}\text{Bi}$  που δεν εκπέμπονται σε σειρά (1729.60 keV, 1764.49 keV και 1847.42 keV). Οι φωτοκορυφές του  $^{214}\text{Bi}$ , που αντιστοιχούν σε φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά, εμφανίζονται στο coincidence φάσμα σχεδόν με την ίδια επιφάνεια που εμφανίζονται και στο unsuppressed φάσμα ( $R_p \approx 1$ ). Την ίδια εικόνα παρουσιάζει το πολυενεργειακό  $^{133}\text{Ba}$ , οι φωτοκορυφές 53.16 keV, 80.99 keV και 160.61 keV του οποίου εμφανίζονται στο coincidence φάσμα  $\sim 15\%$  μειωμένες, ενώ οι φωτοκορυφές του που αντιστοιχούν σε φωτόνια που δεν εκπέμπονται σε σειρά εμφανίζονται αρκετά μειωμένες (60% – 90%) ή και καθόλου. Τέλος, τα φωτόνια του  $^{152}\text{Eu}$  εμφανίζονται στο coincidence φάσμα με σχεδόν τη μισή επιφάνεια σε σχέση με το unsuppressed ( $R_p \approx 0.5$ ).

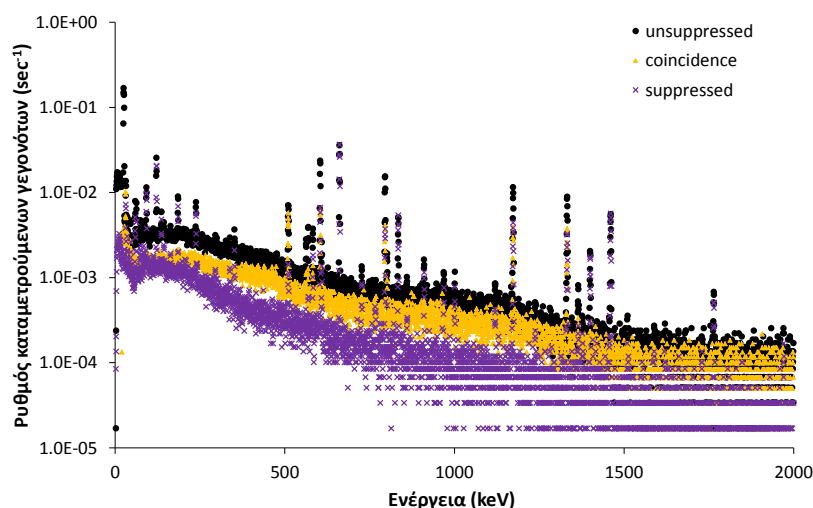
Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η φωτοκορυφή του  $^{210}\text{Pb}$ , ο οποίος παρόλο που εκπέμπει μόνο ένα φωτόνιο, η φωτοκορυφή του δεν εμφανίζει στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στο unsuppressed και το coincidence φάσμα, όταν η πηγή είναι σε επαφή. Ο λόγος μάλλον είναι, όπως ειπώθηκε και στην Παράγραφο 3.3.2.1, ότι η ενεργότητα της πηγής είναι σχετικά υψηλή και πιθανότατα παίζει σημαντικό ρόλο το φαινόμενο της τυχαίας σύμπτωσης. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι όταν η πηγή απομακρύνεται από τον κυρίως ανιχνευτή εμφανίζονται μεγαλύτερες αποκλίσεις ανάμεσα στα δύο φάσματα. Για

μία ακόμα φορά επιβεβαιώνεται ότι η χρήση ισχυρών πηγών σε τέτοιου είδους διερευνήσεις δεν ενδείκνυται.

### 3.4.2.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση επιφανειακής πηγής χαμηλής ραδιενέργειας

Τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής πηγής που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 3.3.2.2 και στον Πίνακα 3.19. Στην Εικόνα 3.11 παρουσιάζονται τα φάσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του φίλτρου τοποθετημένου σε επαφή με τον ανιχνευτή. Από τις αναλύσεις<sup>44</sup> προέκυψαν οι τιμές των συντελεστών T.A.S.F. και  $R_p$  που δίνονται στον Πίνακα 3.33.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.11, αλλά και στα αποτελέσματα των αναλύσεων του Πίνακα 3.33, στην επιφανειακή πηγή δεν εμφανίζονται φωτοκορυφές που να αντιστοιχούν στα μονοενεργειακά ισότοπα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{54}\text{Mn}$ . Το ίδιο συμβαίνει και για το  $^{57}\text{Co}$  για λόγους που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 3.3.2.2. Το πολυενεργειακό  $^{60}\text{Co}$  υφίσταται μειώσεις της τάξης του 60% και στις δύο φωτοκορυφές του, ενώ το  $^{134}\text{Cs}$  υπόκειται σε μειώσεις της τάξης του ~80% στις δύο φωτοκορυφές του με το υψηλότερο ποσοστό εκπομπής (604.72 keV και 795.85 keV). Για τις υπόλοιπες κορυφές του  $^{134}\text{Cs}$  που ανιχνεύονται δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, καθώς οι αβεβαιότητες είναι υψηλές (> 40%).



Εικόνα 3.11: Unsuppressed, coincidence και suppressed φάσματα επιφανειακής πηγής.

<sup>44</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 58 και 93.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F.	R <sub>p</sub>
<sup>241</sup> Am	59.54	-- <sup>45</sup>	--
<sup>57</sup> Co	122.06 <sup>c</sup>	--	--
<sup>57</sup> Co	136.47	--	--
<sup>134</sup> Cs	563.24 <sup>c</sup>	--	--
<sup>134</sup> Cs	569.33 <sup>c</sup>	0.7 ± 43.6%	0.3 ± 43.6%
<sup>134</sup> Cs	604.72 <sup>c</sup>	0.54 ± 7.4%	0.21 ± 7.4%
<sup>137</sup> Cs	661.62	--	--
<sup>134</sup> Cs	795.85 <sup>c</sup>	0.55 ± 7.6%	0.22 ± 7.6%
<sup>134</sup> Cs	801.95 <sup>c</sup>	1.0 ± 37.8%	0.4 ± 37.8%
<sup>54</sup> Mn	834.80	--	--
<sup>134</sup> Cs	1167.97	--	--
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.85 ± 7.4%	0.34 ± 7.4%
<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	1.03 ± 5.5%	0.41 ± 5.5%
<sup>134</sup> Cs	1365.19 <sup>c</sup>	1.1 ± 67.2%	0.4 ± 67.2%
<sup>134</sup> Cs	1400.57	--	--

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.33: Συντελεστές T.A.S.F. και R<sub>p</sub> για την επιφανειακή πηγή σε λειτουργία σύμπτωσης.

### 3.4.2.3 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών όγκου

Κατ' αντιστοιχία με την Παράγραφο 3.3.2.3, με σκοπό τη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS με πηγές όγκου χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη γεωμετριών όγκου:

- γεωμετρίες όγκου χαμηλότερης ραδιενέργειας που αποτελούν τυπικά δείγματα αναλύσεων ρουτίνας στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (χώμα, νερό, ιπτάμενη τέφρα)
- γεωμετρίες όγκου υψηλότερης ραδιενέργειας που αποτελούν τυπικά δείγματα πηγών βαθμονόμησης (υγρά διαλύματα πολλών ραδιονουκλιδίων)

<sup>45</sup> Όπου '--' σημαίνει ότι δεν ανιχνεύθηκε στο φάσμα σύμπτωσης.

### 3.4.2.3.1 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών όγκου χαμηλής ραδιενέργειας

Για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος, κατ' αντιστοιχία με την Παράγραφο 3.3.2.3.1, χρησιμοποιήθηκαν τυπικά δείγματα πηγών που περιέχουν τεχνητά και φυσικά ραδιενεργά ισότοπα:

- δείγματα ιπτάμενης τέφρας γεωμετρίας «2», «5» και «8» (PM001DE, PM001DE και PM4P252) που περιείχαν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα<sup>46</sup> (Πίνακας 3.22)
- δείγματα γεωμετρίας «2» που περιείχαν τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα και είχαν παρασκευασθεί στο πλαίσιο Ασκήσεων Διασύγκρισης<sup>47</sup> (Πίνακας 3.34)

Κωδικός δείγματος	Γεωμ.	Άσκηση Διασύγκρισης	Ισότοπο
WT082	2	ΙΑΕΑ-TEL-2011-03	<sup>60</sup> Co
WT088	2	ΙΑΕΑ-TEL-2013-04	<sup>152</sup> Eu
WT089	2	ΙΑΕΑ-TEL-2013-04	<sup>134</sup> Cs

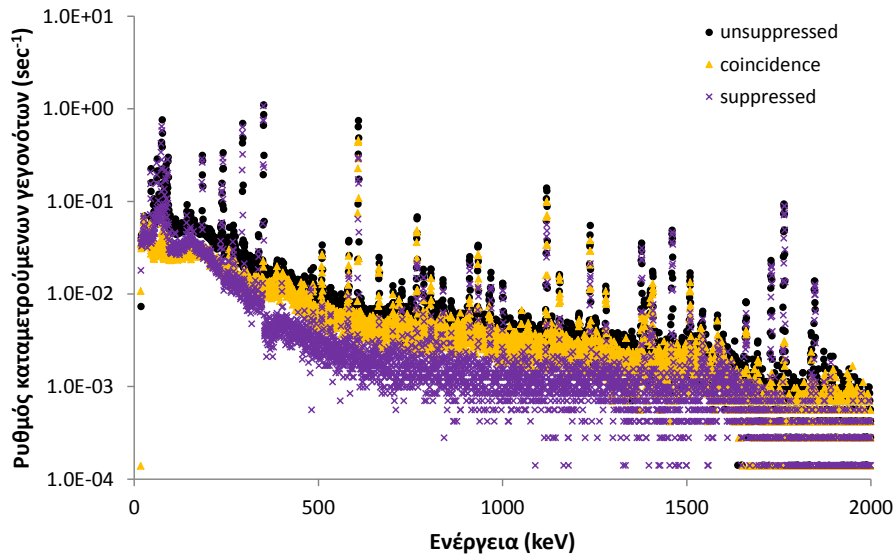
Πίνακας 3.34: Δείγματα όγκου χαμηλής ραδιενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη σε λειτουργία σύμπτωσης.

Στην Εικόνα 3.12 δίνονται τυπικά φάσματα unsuppressed, coincidence και suppressed από τις αναλύσεις του δείγματος ιπτάμενης τέφρας PM4P252. Στις αναλύσεις δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας που έγιναν στις τρεις γεωμετρίες<sup>48</sup> («2», «5» και «8») δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.35 μόνο τα αποτελέσματα για τη γεωμετρία «2». Πιο συγκεκριμένα, δίνονται οι συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$ , συνοδευόμενοι από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

<sup>46</sup> Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στη Δ.Ε. (Πέππας, 2008).

<sup>47</sup> Οι Ασκήσεις περιγράφονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.

<sup>48</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 104 – 108.



Εικόνα 3.12: Unsuppressed, coincidence και suppressed φάσματα δείγματος ιπτάμενης τέφρας.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.A.S.F.	$R_p$
$^{210}\text{Pb}$	46.52	0.6 ± 39.9%	0.11 ± 39.9%
$^{226}\text{Ra}$	186.24	-- <sup>49</sup>	--
$^{214}\text{Pb}$	242.80	--	--
	295.22	--	--
	351.93	0.04 ± 49.6%	0.007 ± 49.6%
$^{214}\text{Bi}$	609.31 <sup>c</sup>	3.49 ± 1.4%	0.656 ± 1.4%
	768.36 <sup>c</sup>	3.9 ± 6.3%	0.73 ± 6.3%
	934.06 <sup>c</sup>	2.1 ± 11.7%	0.40 ± 11.7%
	1120.29 <sup>c</sup>	3.9 ± 3.1%	0.73 ± 3.1%
	1238.11 <sup>c</sup>	3.9 ± 7.1%	0.73 ± 7.1%
	1377.67	0.6 ± 29.1%	0.11 ± 29.1%
	1407.98 <sup>c</sup>	4 ± 17.9%	0.7 ± 17.9%
	1509.23 <sup>c</sup>	4 ± 19.5%	0.7 ± 19.5%
	1729.60	0.3 ± 55.9%	0.05 ± 55.9%
	1764.49	0.15 ± 25.6%	0.028 ± 25.6%
	1847.42	--	--

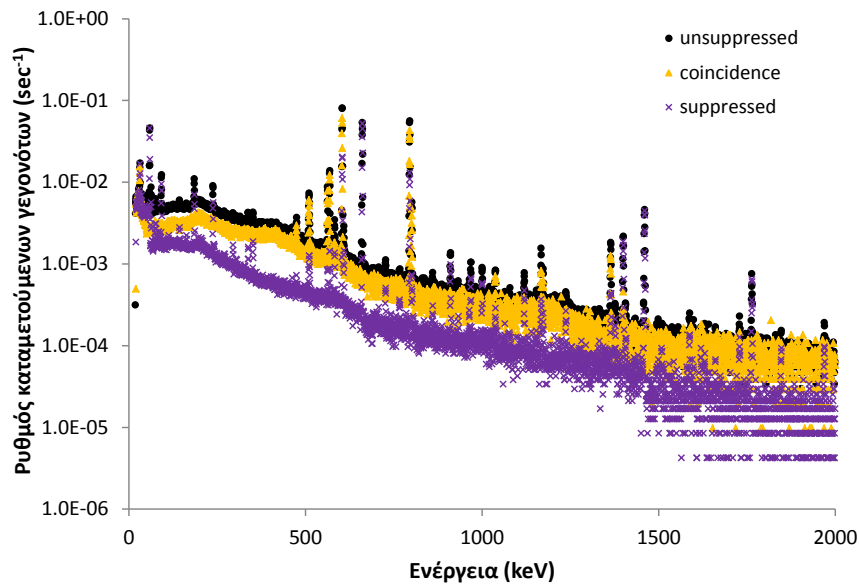
<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.35: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  σε λειτουργία σύμπτωσης για το δείγμα ιπτάμενης τέφρας.

Στην Εικόνα 3.13 δίνονται τυπικά φάσματα unsuppressed, coincidence και suppressed από τις αναλύσεις του δείγματος τεχνητής ραδιενέργειας WT089. Τα αποτελέσματα σε όρους συντελεστών T.A.S.F. και  $R_p$ , όπως προέκυψαν με βάση τις αντίστοιχες αναλύσεις<sup>50</sup>, δίνονται στον Πίνακα 3.36.

<sup>49</sup> Όπου '--' σημαίνει ότι δεν ανιχνεύθηκε στο coincidence φάσμα.

<sup>50</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 98 – 103.



Εικόνα 3.13: Unsuppressed, coincidence και suppressed φάσματα δείγματος WT089.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	A.S.F.	$R_p$
$^{60}\text{Co}$	1173.24 <sup>c</sup>	0.91 ± 4.7%	0.60 ± 4.7%
	1332.50 <sup>c</sup>	0.98 ± 4.3%	0.65 ± 4.3%
$^{134}\text{Cs}$	563.24 <sup>c</sup>	1.38 ± 6.4%	0.93 ± 6.4%
	569.33 <sup>c</sup>	1.37 ± 5.7%	0.93 ± 5.7%
	604.72 <sup>c</sup>	1.10 ± 1.3%	0.744 ± 1.2%
	795.85 <sup>c</sup>	1.15 ± 1.6%	0.78 ± 1.5%
	801.95 <sup>c</sup>	1.26 ± 6.2%	0.85 ± 6.2%
	1167.97	1.1 ± 27.1%	0.8 ± 27.1%
	1365.19 <sup>c</sup>	1.2 ± 11.0%	0.80 ± 11.0%
$^{152}\text{Eu}$	1400.59	0.13 ± 50.6%	0.09 ± 50.6%
	121.78 <sup>c</sup>	1.00 ± 1.9%	0.68 ± 1.9%
	244.70 <sup>c</sup>	1.2 ± 10.1%	0.84 ± 10.1%
	344.28 <sup>c</sup>	0.71 ± 3.5%	0.48 ± 3.5%
	411.12 <sup>c</sup>	1.3 ± 21.6%	0.9 ± 21.6%
	443.97 <sup>c</sup>	1.2 ± 21.7%	0.8 ± 21.7%
	778.90 <sup>c</sup>	1.29 ± 5.2%	0.9 ± 5.2%
	867.38 <sup>c</sup>	1.5 ± 25.4%	1.0 ± 25.4%
	964.08 <sup>c</sup>	0.77 ± 9.3%	0.52 ± 9.3%
	1085.84 <sup>c</sup>	0.16 ± 29.0%	0.11 ± 29.0%
	1112.08 <sup>c</sup>	0.73 ± 8.9%	0.50 ± 8.9%
1408.01 <sup>c</sup>	0.71 ± 4.6%	0.48 ± 4.6%	

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 3.36: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  για δείγμα όγκου χαμηλής ραδιενέργειας σε λειτουργία σύμπτωσης.

Συγκεντρωτικά, παρατηρήθηκε ότι στο coincidence φάσμα ανιχνεύονται φωτοκορυφές και των τριών πολυενεργειακών ισωτόπων που εξετάστηκαν. Οι

φωτοκορυφές του  $^{60}\text{Co}$  στο coincidence φάσμα εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με το unsuppressed κατά  $\sim 40\%$ , τιμή η οποία είναι σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα από τη μελέτη σε αντι-σύμπτωση, αν και δεν αναφέρονται στο ίδιο δείγμα.

Όσον αφορά το πολυενεργειακό  $^{134}\text{Cs}$ , όλες οι φωτοκορυφές του ανιχνεύονται στο coincidence φάσμα, σε αντίθεση με την επιφανειακή πηγή (Παράγραφος 3.4.2.2). Οι φωτοκορυφές με το υψηλότερο ποσοστό εκπομπής (604.72 keV και 795.85 keV) εμφανίζονται μειωμένες στο coincidence φάσμα κατά 20–25%, τιμή αρκετά μικρότερη σε σχέση με την επιφανειακή πηγή ( $\sim 80\%$ ). Ωστόσο, τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το coincidence φάσμα του  $^{134}\text{Cs}$  της πηγής όγκου είναι συμπληρωματικά με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του ίδιου δείγματος για το suppressed φάσμα, αντίθετα με την επιφανειακή πηγή. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη σκέψη ότι η πηγή όγκου  $^{134}\text{Cs}$  που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσως πιο κατάλληλη για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression, καθώς για την επιφανειακή πηγή είναι έντονο το φαινόμενο της τυχαίας σύμπτωσης.

Αντίστοιχη είναι και η εικόνα του πολυενεργειακού  $^{152}\text{Eu}$ , οι φωτοκορυφές του οποίου εμφανίζονται όλες στο coincidence φάσμα, με μειώσεις σε σχέση με unsuppressed από 10% έως και 90% ( $R_p$  από 0.9 έως 0.11), και είναι συμπληρωματικές του αντίστοιχου suppressed φάσματος (Πίνακας 3.26, Παράγραφος 3.3.2.3.1).

### **3.4.2.3.2 Μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης με χρήση πηγών όγκου υψηλής ραδιενέργειας**

Για τη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS σε λειτουργία σύμπτωσης για δείγματα υψηλότερης ραδιενέργειας, όπως οι πηγές βαθμονόμησης, χρησιμοποιήθηκε η πηγή QCY13 που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.3.2.3.2. Δεδομένου ότι σε λειτουργία σύμπτωσης ανιχνεύθηκαν μόνο οι φωτοκορυφές του  $^{60}\text{Co}$ , δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν δεδομένα για τα υπόλοιπα ισότοπα της πηγής. Στον Πίνακα 3.37 δίνονται οι συντελεστές T.A.S.F.



και  $R_p$  για τις δύο φωτοκορυφές του  $^{60}\text{Co}^{51}$ . Για τον υπολογισμό και των δύο συντελεστών στον αριθμητή λήφθηκαν τα δεδομένα του coincidence φάσματος και στον παρανομαστή του unsuppressed.

Ενέργεια (keV)	T.A.S.F.	$R_p$
1173.24 <sup>c</sup>	0.99 ± 1.0%	0.384 ± 1.0%
1332.50 <sup>c</sup>	1.05 ± 0.9%	0.404 ± 0.9%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 3.37: Συντελεστές T.A.S.F. και  $R_p$  για πηγή όγκου QCY13 σε λειτουργία σύμπτωσης.**

Όπως φαίνεται από τις αναλύσεις σε λειτουργία σύμπτωσης, οι φωτοκορυφές του  $^{60}\text{Co}$  εμφανίζονται μειωμένες στο coincidence φάσμα κατά ~ 60%. Η μείωση αυτή είναι παρόμοια με εκείνη του Πινάκα 3.29, που αναφέρεται στη λειτουργία του συστήματος σε αντί-σύμπτωση, δηλαδή τα φάσματα suppressed και unsuppressed δεν είναι συμπληρωματικά όπως αναμένεται. Επίσης, διαφέρει από την τιμή που υπολογίστηκε από τα δείγματα χαμηλότερης ραδιενέργειας της προηγούμενης παραγράφου, όπου υπολογίστηκαν μειώσεις στο coincidence φάσμα της τάξης του 40%. Η διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος που διαπιστώνεται με την πηγή υψηλής ραδιενέργειας θα πρέπει να αποδίδεται στο φαινόμενο της τυχαίας σύμπτωσης.

### 3.5 Συμπεράσματα από τη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Σκοπός του Κεφαλαίου αυτού ήταν να γίνει μία ενδελεχής διερεύνηση της απόκρισης του ανιχνευτή XtRa με και χωρίς τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης. Η διερεύνηση αυτή εστίασε στη μείωση τόσο του συνεχούς υποστρώματος, όσο και της επιφάνειας των φωτοκορυφών. Σε επόμενο Κεφάλαιο, μετά και τη βαθμονόμηση απόδοσης του συστήματος για τους διάφορους τρόπους λειτουργίας του, υπολογίζονται και παρουσιάζονται και τα κατώτερα όρια ανίχνευσης σε όρους M.D.A. για τυπικές γεωμετρίες και δείγματα που αναλύονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της Δ.Δ. έχει μελετηθεί η απόκριση της ανιχνευτικής διάταξης και για άλλα ισότοπα, όπως το  $^7\text{Be}$ , το  $^{131}\text{I}$ , το

<sup>51</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.2, φάσματα 60, 62, 64, 66, 94 – 97.

<sup>22</sup>Na, τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενα Κεφάλαια, όπου περιγράφεται και η σχετική βαθμονόμηση της διάταξης.

Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του συστήματος Compton Suppression που παρουσιάστηκε στο παρόν Κεφάλαιο μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

Αναφορικά με τους συντελεστές που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη μελέτη της απόκρισης μίας διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression, κατ' αρχήν διαπιστώθηκε η ύπαρξης αρκετών τέτοιων συντελεστών. Κάθε συντελεστής παρέχει πληροφορίες για κάτι διαφορετικό. Άλλοι συντελεστές δίνουν πληροφορίες για το συνεχές υπόστρωμα – είτε κάτω από την φωτοκορυφή (C.S.F.) είτε σε κάποια περιοχή του ενεργειακού φάσματος όπου δεν υπάρχει φωτοκορυφή (R.F.) – και άλλοι δίνουν πληροφορίες για την ίδια την φωτοκορυφή. Για την επίδραση ενός συστήματος Compton Suppression στην φωτοκορυφή χρησιμοποιήθηκαν τρεις συντελεστές, καθένας από τους οποίους παρέχει διαφορετική πληροφορία: T.A.S.F., C.A.S.F. (για τα ισότοπα υπολογίζεται ο όρος P/C) και  $R_p$ . Από την εφαρμογή των συντελεστών σε πειράματα με πηγές διάφορων γεωμετριών που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ., προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητά τους. Κατ' αρχήν, ο συντελεστής C.A.S.F. σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις μπορεί να υπολογιστεί, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων το δείγμα περιέχει περισσότερα του ενός ισότοπα, γεγονός που καθιστά αδύνατο τον υπολογισμό του λόγου P/C για κάποιο φωτόνιο πειραματικά. Όσον αφορά το συντελεστή T.A.S.F. διαπιστώθηκε ότι, επειδή ο συντελεστής λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό καταγραφόμενων γεγονότων σε όλο το ενεργειακό φάσμα, η σύγκριση που πραγματοποιεί δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτική, καθώς – εκτός των άλλων – για πολυενεργειακές πηγές λαμβάνει υπόψη το συνεχές υπόστρωμα εξαιτίας όλων των φωτονίων της πηγής. Όπως αναφέρεται και στην Παράγραφο 3.4.1 η χρήση αυτού του συντελεστή ως κριτήριο βελτίωσης της ανιχνευσιμότητας μίας φωτοκορυφής δεν είναι απόλυτα ορθή. Πάντως, η χρήση πολλών πηγών, με διαφορετική γεωμετρία αλλά και διαφορετική σύσταση και ενεργότητα που έγινε στο πλαίσιο της Δ.Δ., βοηθάει στο να σχηματισθεί μία εικόνα σχετικά με την επίδραση που έχει η λειτουργία του συστήματος Compton

Suppression και τη βελτίωση των συνθηκών ανίχνευσης των διαφόρων ισοτόπων. Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής  $R_p$  φάνηκε ότι δείχνει ικανοποιητικά την επίδραση της χρήσης της ενεργητικής θωράκισης στην ίδια την φωτοκορυφή ενδιαφέροντος και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης που έχουν πάνω στη φωτοκορυφή φαινόμενα όπως η πραγματική σύμπτωση ή η τυχαία άθροιση. Επιπλέον, ιδιαίτερα χρήσιμος δείκτης είναι το κατώτερο όριο ανίχνευσης, τα επίπεδα του οποίου στα δύο φάσματα παρουσιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο, μετά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του συστήματος.

Αναφορικά με τα υποστρώματα της διάταξης, στο συμβατικό φάσμα (unsuppressed) καθώς και στα φάσματα με τους δύο τρόπους λειτουργίας της ενεργητικής θωράκισης (suppressed και coincidence), τα συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- **Συνεχές υπόστρωμα**

Το συνεχές υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS προέκυψε ότι στο suppressed φάσμα βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με το αντίστοιχο unsuppressed κατά 2 – 6 φορές, ανάλογα με την ενεργειακή περιοχή – με μεγαλύτερη διαφορά στις υψηλότερες ενέργειες. Αντίστοιχα, το συνεχές υπόστρωμα στο coincidence φάσμα βρέθηκε να είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο unsuppressed κατά 20 – 50% – μεγαλύτερη διαφορά στις χαμηλότερες ενέργειες – και υψηλότερο από το αντίστοιχο suppressed έως και ~ 5 φορές.

- **Διακριτό υπόστρωμα**

Όσον αφορά στο διακριτό υπόστρωμα της διάταξης, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα φάσματα unsuppressed και suppressed για τα φωτόνια που δεν εκπέμπονται σε σειρά ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  και κάποιες φωτοκορυφές του  $^{214}\text{Bi}$  και του  $^{228}\text{Ac}$ ), ενώ δεν ισχύει το ίδιο για τα φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά. Παράλληλα, στο coincidence φάσμα δεν εμφανίζονται φωτοκορυφές διακριτού υποστρώματος, με εξαίρεση την φωτοκορυφή στην ενέργεια των 511.0 keV. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη των υποστρωμάτων της νέας ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS είναι η σημαντική αύξηση

της φωτοκορυφής του  $^{40}\text{K}$  στη νέα διάταξη κατά  $\sim 6$  φορές, σε σύγκριση με πριν από την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.

Όσον αφορά τα συγκριτικά πειράματα με χρήση πηγών διαφόρων ισotόπων και σε διάφορες γεωμετρίες, κατ' αρχήν πρέπει να σημειωθεί ότι ο ιδανικός τρόπος μελέτης της διάταξης περιλαμβάνει τη χρήση μονοϊσοτοπικών πηγών σε κλιμακωτά αυξανόμενες συγκεντρώσεις. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να μελετηθεί η απόκριση της ανιχνευτικής διάταξης για κάθε ισotόπο ξεχωριστά, χωρίς την επίδραση των άλλων ισotόπων του δείγματος. Επίσης, η κλιμακωτά αυξανόμενη συγκέντρωση δίνει τη δυνατότητα μελέτης της επίδρασης της συγκέντρωσης του δείγματος στην ένταση του φαινομένου της τυχαίας σύμπτωσης, ένα φαινόμενο το οποίο – όπως αποδείχθηκε – παίζει σημαντικό ρόλο τόσο κατά την αξιολόγηση του συστήματος, όσο και κατά την αξιοποίηση του. Ωστόσο, κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ. δεν υπήρχε η δυνατότητα για τέτοια μελέτη του συστήματος, λόγω έλλειψης των απαιτούμενων πηγών. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν οι πηγές που ήταν διαθέσιμες στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. και τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται για κάθε ισotόπο ως εξής:

- $^{241}\text{Am}$

Για την ανίχνευση και ανάλυση του  $^{241}\text{Am}$  ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος για όλες τις γεωμετρίες δείγματος που εξετάστηκαν. Η φωτοκορυφή του  $^{241}\text{Am}$  δεν υπόκειται σε σημαντική μείωση στο *suppressed* φάσμα, σε σύγκριση με το *unsuppressed*, ενώ στο *coincidence* φάσμα δεν εμφανίζεται καθόλου. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας της φωτοκορυφής σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν χαμηλότερη στο *suppressed* φάσμα.

- $^{137}\text{Cs}$

Για την ανίχνευση και ανάλυση του  $^{137}\text{Cs}$  ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος για όλες τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν. Η φωτοκορυφή του  $^{137}\text{Cs}$  δεν υφίσταται μείωση στο *suppressed* φάσμα, σε σύγκριση με το *unsuppressed*, ενώ στο *coincidence* φάσμα δεν εμφανίζεται καθόλου. Στα *suppressed* φάσματα που λήφθηκαν η αβεβαιότητα προσδιορισμού της φωτοκορυφής του ισotόπου ήταν πάντοτε χαμηλότερη από ότι στο *unsuppressed*. Παρατηρήθηκε μάλιστα ότι η

ενεργότητα του αναλυόμενου δείγματος δεν παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ανάλυση της φωτοκορυφής του ισότοπου.

- $^{54}\text{Mn}$

Η απόκριση του νέου συστήματος για το μονοενεργειακό  $^{54}\text{Mn}$  είναι αντίστοιχη του μονοενεργειακού  $^{137}\text{Cs}$ , καθώς η φωτοκορυφή του ισότοπου δεν ανιχνεύθηκε στο coincidence φάσμα και δεν υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed σε σύγκριση με το unsuppressed. Επιπλέον, η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας της φωτοκορυφής είναι χαμηλότερη στο suppressed φάσμα. Ως εκ τούτου, ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος.

- $^{109}\text{Cd}$

Αντίστοιχη είναι και η περίπτωση του μονοενεργειακού  $^{109}\text{Cd}$ , όπου ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος. Η φωτοκορυφή του ισότοπου δεν ανιχνεύεται στο coincidence φάσμα, δεν υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed σε σύγκριση με το unsuppressed και η επιφάνειά της προσδιορίζεται με χαμηλότερη αβεβαιότητα στο suppressed φάσμα.

- $^{57}\text{Co}$

Για την ανάλυση του  $^{57}\text{Co}$  ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος για κάθε γεωμετρία καθώς, όπως προκύπτει από τη μελέτη της φωτοκορυφής του στην ενέργεια των 122.06 keV, δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική μείωση στο suppressed φάσμα και δεν ανιχνεύεται καθόλου στο coincidence φάσμα. Ακόμα, κατ' αντιστοιχία με τα προαναφερθέντα ισότοπα, στο suppressed φάσμα προσδιορίζεται με χαμηλότερες αβεβαιότητες.

- $^{60}\text{Co}$

Για την ανάλυση του  $^{60}\text{Co}$ , το οποίο εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά διαπιστώθηκε ότι η ενεργητική θωράκιση μειώνει την επιφάνεια των αντίστοιχων φωτοκορυφών κατά ~ 60% στο suppressed φάσμα και ~ 40% στο coincidence φάσμα. Ως εκ τούτου, ενδείκνυται η χρήση του *unsuppressed* φάσματος.

- $^{134}\text{Cs}$

Για το πολυενεργειακό ισότοπο  $^{134}\text{Cs}$  ενδείκνυται η χρήση του *unsuppressed* φάσματος καθώς με τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης παρατηρούνται μειώσεις

στην επιφάνεια των φωτοκορυφών του, οι οποίες στο suppressed φάσμα κυμαίνονται από 70% έως 90%, ενώ στο coincidence είναι της τάξης του ~ 20%.

- **$^{152}\text{Eu}$**

Η χρήση του *unsuppressed* φάσματος ενδείκνυται και για το πολυενεργειακό ισότοπο  $^{152}\text{Eu}$ , καθώς με τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης παρατηρούνται μειώσεις στην επιφάνεια των φωτοκορυφών του που αγγίζουν στο suppressed φάσμα μέχρι και το ~ 95%, ενώ στο coincidence κυμαίνονται περί το ~ 15 – 30%, με ακραίες περιπτώσεις της τάξης του 50% (φωτόνια ενέργειας 344.28 keV, 964.08 keV, 1112.08 keV και 1408.01 keV).

- **$^{234}\text{Th}$**

Για την ανίχνευση και ανάλυση του  $^{234}\text{Th}$ , από τα φωτόνια του ενέργειας 63.29 keV, ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος. Η φωτοκορυφή του  $^{234}\text{Th}$  δεν υπόκειται σε μειώσεις στο suppressed φάσμα σε σύγκριση με το *unsuppressed*, ενώ στο coincidence φάσμα δεν εμφανίζεται καθόλου. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας της φωτοκορυφής ήταν χαμηλότερη στο suppressed φάσμα.

- **$^{212}\text{Pb}$**

Για την ανίχνευση και ανάλυση του  $^{212}\text{Pb}$  ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος. Οι φωτοκορυφές του ισότοπου δεν υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed φάσμα σε σύγκριση με το *unsuppressed*, ενώ στο coincidence φάσμα δεν εμφανίζονται καθόλου. Επιπλέον, η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας των φωτοκορυφών είναι χαμηλότερη στο suppressed φάσμα.

- **$^{228}\text{Ac}$**

Η ανίχνευση του  $^{228}\text{Ac}$  μπορεί να γίνει τόσο από το suppressed όσο και από το *unsuppressed* φάσμα, ανάλογα με τις φωτοκορυφές που θα χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση. Οι φωτοκορυφές του ισότοπου που δεν αντιστοιχούν σε φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά (270.30 keV, 911.07 keV και 968.90 keV) ανιχνεύονται στο suppressed με χαμηλότερες αβεβαιότητες, ενώ αντίθετα για τις υπόλοιπες που αντιστοιχούν σε φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά (328.00 keV και 338.40 keV) προτιμάται η χρήση του *unsuppressed* φάσματος.

- **<sup>208</sup>Tl**

Για το πολυενεργειακό ισότοπο <sup>208</sup>Tl ενδείκνυται η χρήση του *unsuppressed* φάσματος καθώς με τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης παρατηρούνται μειώσεις στην επιφάνεια των φωτοκορυφών του που στο *suppressed* φάσμα είναι της τάξης του 40 – 45%, ενώ στο *coincidence* φάσμα εμφανίζεται μόνο η μία (583.14 keV) μειωμένη σε σχέση με το *unsuppressed* φάσμα κατά 55%.

- **<sup>40</sup>K**

Για την ανίχνευση και ανάλυση του <sup>40</sup>K ενδείκνυται η χρήση του *suppressed* φάσματος. Η φωτοκορυφή του <sup>40</sup>K στο *suppressed* φάσμα δεν υπόκειται σε μειώσεις σε σύγκριση με το *unsuppressed* φάσμα και η επιφάνειά της προσδιορίζεται με χαμηλότερη αβεβαιότητα, ενώ στο *coincidence* φάσμα δεν εμφανίζεται καθόλου. Πάντως, λόγω του αυξημένου υποστρώματος της διάταξης σε <sup>40</sup>K, τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσής του παρουσιάζονται αυξημένα μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.

- **<sup>226</sup>Ra και θυγατρικά**

Ανάλυση το ισότοπου <sup>226</sup>Ra, το οποίο στα τυπικά περιβαλλοντικά δείγματα βρίσκεται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του <sup>214</sup>Pb και <sup>214</sup>Bi, μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο από το *suppressed* φάσμα όσο και από το *unsuppressed*, ανάλογα με τις φωτοκορυφές που επιλέγονται για την ανίχνευσή του. Το *suppressed* φάσμα υπερτερεί για τα ισότοπα της σειράς που δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb και <sup>214</sup>Pb, αλλά και για τα μη εκπεμπόμενα σε σειρά φωτόνια του <sup>214</sup>Bi (1729.60 keV, 1764.49 keV και 1847.42 keV)<sup>52</sup>, καθώς οδηγεί σε χαμηλότερες αβεβαιότητες προσδιορισμού των επιφανειών, χωρίς να μειώνονται οι φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης. Για τα εν σειρά εκπεμπόμενα φωτόνια του <sup>214</sup>Bi, προτείνεται η χρήση του *unsuppressed* φάσματος.

Συγκεντρωτικά, τα παραπάνω συμπεράσματα αναφορικά με το προτεινόμενο φάσμα ανάλυσης για κάθε ένα από τα ισότοπα που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.38.

<sup>52</sup> Επισημαίνεται ότι τα φωτόνια αυτά του <sup>214</sup>Bi συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του, λόγω του χαμηλού ποσοστού εκπομπής τους.

Φάσμα	Ισότοπα
unsuppressed φάσμα	$^{60}\text{Co}$ , $^{134}\text{Cs}$ , $^{152}\text{Eu}$ , $^{208}\text{Tl}$ , $^{214}\text{Bi}$ (604.31 keV, 1120.29 keV), $^{228}\text{Ac}$ (328.00 keV, 338.40 keV)
suppressed φάσμα	$^{241}\text{Am}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{54}\text{Mn}$ , $^{109}\text{Cd}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{234}\text{Th}$ , $^{212}\text{Pb}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{214}\text{Pb}$ , $^{228}\text{Ac}$ (270.30 keV, 911.07 keV, 968.90 keV), $^{214}\text{Bi}$ (1729.60 keV, 1764.49 keV, 1847.42 keV)

Πίνακας 3.38: Προτεινόμενο φάσμα ανάλυσης για τα διάφορα ισότοπα που μελετήθηκαν.

Ένα ακόμα συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη της νέας ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS, είναι ότι η λειτουργία της σε σύμπτωση (coincidence mode) δεν φαίνεται να βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες ανίχνευσης κάποιου ισότοπου από αυτά που εξετάστηκαν. Κατά συνέπεια, δεδομένου ότι τα ηλεκτρονικά της διάταξης επιτρέπουν την ταυτόχρονη συλλογή δύο μόνο φασμάτων, και συγκεκριμένα:

- i. του unsuppressed φάσματος και του coincidence φάσματος είτε,
- ii. του unsuppressed φάσματος και του suppressed φάσματος

προτείνεται η διάταξη να είναι ρυθμισμένη μονίμως για τη συλλογή του unsuppressed και του suppressed φάσματος, μία ρύθμιση που βελτιώνει τα επίπεδα ανίχνευσης για πλήθος ισωτόπων.

Επιπλέον, από τα πειράματα διαπιστώθηκε πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος της τυχαίας σύμπτωσης για έναν τόσο μεγάλο ανιχνευτή όπως ο XtRa κατά την ανάλυση ισχυρών πηγών, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη κατά την ανάλυση δειγμάτων υψηλής ραδιενέργειας και κυρίως κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης με χρήση προτύπων πηγών.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

## ***Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.***

---

### **4.1 Εισαγωγή**

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. Αρχικά, περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης ενός τέτοιου συστήματος και δίνεται έμφαση στις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει. Δίνονται στοιχεία σχετικά με τις ακολουθούμενες τεχνικές, καθώς επίσης και για τις πηγές που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για το σκοπό αυτό. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. χρήσει των πηγών που διατίθενται στο Εργαστήριο.

### **4.2 Βαθμονόμηση απόδοσης διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression**

Όπως έγινε κατανοητό και από τα προηγούμενα Κεφάλαια, συστήματα Compton Suppression χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια με στόχο την βελτίωση των επιπέδων ανίχνευσης κατά τη  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση. Ωστόσο, η βαθμονόμηση τέτοιων συστημάτων ακόμα και σήμερα ενέχει δυσκολίες, ειδικά όταν εμπλέκονται ισότοπα με περίπλοκα σχήματα διάσπασης (Fan, et al., 2012). Η δυσκολία βαθμονόμησης απόδοσης μίας ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression έγκειται στη διαφορετική απόκριση του συστήματος, ανάλογα με το σχήμα αποδιέγερσης του υπό ανάλυση ισοτόπου. Κατά την ανάλυση ενός ισοτόπου το

οποίο εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας εξαρτάται από την πιθανότητα καταγραφής τους από το σύστημα. Η πιθανότητα καταγραφής φωτονίων ενέργειας  $E$ , εκτός από την γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή και την ενέργεια  $E$  των φωτονίων, εξαρτάται και από το σχήμα αποδιέγερσης του ισότοπου, καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο της σύγχρονης ανίχνευσης δύο φωτονίων που εκπέμπονται σε σειρά, από τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τη μη καταγραφή τελικά του φωτονίου ενέργειας  $E$  από το σύστημα. Κατά συνέπεια, η απόδοση αυτή δεν μπορεί να εκτιμάται από καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης της μορφής  $eff = f(E)$ , η οποία έχει προσδιορισθεί με χρήση προτύπων πηγών κατά τη συνήθη πρακτική (Debertin, et al., 1988). Η απόδοση ανίχνευσης στη συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να εκτιμάται πειραματικά για κάθε μία ενέργεια φωτονίου που ενδιαφέρει. Η πειραματική αυτή τιμή θα πρέπει εν συνεχεία να χρησιμοποιείται κατά τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του αντίστοιχου ισότοπου. Η μοναδική περίπτωση, κατά την οποία έχει νόημα ο προσδιορισμός καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης για ένα σύστημα Compton Suppression, είναι στην περίπτωση που ενδιαφέρει η ανάλυση φωτονίων τα οποία δεν εκπέμπονται σε σειρά. Και πάλι, στην περίπτωση αυτή η καμπύλη βαθμονόμησης θα πρέπει να έχει προσδιορισθεί με χρήση φωτονίων τα οποία επίσης δεν εκπέμπονται σε σειρά.

#### **4.2.1 Πηγές που χρησιμοποιούνται για βαθμονόμηση απόδοσης διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression**

Όπως συμβαίνει και στις συμβατικές ανιχνευτικές διατάξεις, η βαθμονόμηση απόδοσης ενός συστήματος Compton Suppression εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται. Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση των πηγών που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση τέτοιων συστημάτων, για μετρήσεις ραδιενέργειας σε δείγματα χαμηλών συγκεντρώσεων. Το είδος των πηγών που απαιτούνται για βαθμονόμηση σε πειράματα νετρονικής ενεργοποίησης είναι διαφορετικό.

Εν γένει, για τη βαθμονόμηση συστημάτων Compton Suppression στη βιβλιογραφία απαντώνται σημειακές πηγές, πολυϊσοτοπικά διαλύματα και

πιστοποιημένα υλικά αναφοράς (Standard Reference Materials - SRM). Αρκετές φορές μάλιστα επιλέγεται η χρήση περισσότερων της μίας κατηγορίας πηγών. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι επιλογές που έχουν κάνει ορισμένοι ερευνητές:

- Οι (Hunt, et al., 1978) με σκοπό την ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων βαθμονόμησαν την ανιχνευτική τους διάταξη στην ενεργειακή περιοχή 100 – 1000 keV κατασκευάζοντας διαλύματα τα οποία περιείχαν τα μονοενεργειακά ισότοπα  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{54}\text{Mn}$ .
- Οι (Chung, et al., 1988), για τη μελέτη της απόθεσης του  $^{137}\text{Cs}$  μέσω της βροχής χρησιμοποίησαν για τη βαθμονόμηση απόδοσης διάλυμα που περιείχε μόνο  $^{137}\text{Cs}$ .
- Οι (Lee, et al., 1991) για την ανάλυση δειγμάτων χώματος σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος χρησιμοποίησαν για τη βαθμονόμηση δείγματα χώματος με διάφορες συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ .
- Οι (Harbottle, et al., 1994) χρησιμοποίησαν τόσο πιστοποιημένα δείγματα, όσο και ραδιενεργό διάλυμα το οποίο κατασκεύασαν οι ίδιοι και περιείχε τα ισότοπα  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  και  $^{88}\text{Y}$ .
- Οι (Kierzek, et al., 1997) κατασκεύασαν σημειακές πηγές που περιείχαν τα ισότοπα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{152}\text{Eu}$ , προκειμένου να μελετήσουν πόσο επηρεάζεται η απόδοση ανίχνευσης των μονοενεργειακών ισωτόπων από τη συνολική ραδιενέργεια της πηγής.
- Οι (Sudarti, et al., 1997) βαθμονόμησαν με δύο τρόπους: τόσο με πιστοποιημένες πηγές  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$ , όσο και με μία σειρά από πρότυπα υλικά (SRM) περιβαλλοντικής και βιολογικής προέλευσης.
- Οι (Hwanga, et al., 1998) επέλεξαν για τη βαθμονόμηση πολυενεργειακή πηγή που περιείχε τα ισότοπα  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  και  $^{155}\text{Eu}$ , με σκοπό να καλύψουν την ενεργειακή περιοχή 80 – 1300 keV.
- Οι (Ishikawa, et al., 2000) χρησιμοποίησαν πρότυπα διαλύματα, στα οποία προσέθεσαν δέκα διαφορετικά ραδιενεργά ισότοπα όπως  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$ .
- Οι (Peerani, et al., 2002) χρησιμοποίησαν τα ισότοπα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  που περιέχονται σε μεικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα,

προσθέτοντας και τα ισότοπα  $^{22}\text{Na}^{53}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  και  $^{65}\text{Zn}$ , τα οποία δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, προκειμένου να βαθμονομήσουν την ενεργειακή περιοχή 60 – 1800 keV.

- Οι (Elekes, et al., 2003) για βαθμονόμηση στην ενεργειακή περιοχή 120 – 4800 keV χρησιμοποίησαν πηγές  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{66}\text{Ga}$  και  $^{152}\text{Eu}$ . Η βαθμονόμηση αυτή επεκτάθηκε σε υψηλότερες ενέργειες χρήσει άλλων τεχνικών που ξεφεύγουν από το αντικείμενο της Παραγράφου αυτής της Δ.Δ.
- Οι (Cho, et al., 2005) βαθμονόμησαν στην ενεργειακή περιοχή 60 – 1408 keV χρήσει των ισωτόπων  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  και  $^{241}\text{Am}$ , με σκοπό την ανάλυση δειγμάτων νετρονικής ενεργοποίησης.
- Οι (Reguigui, et al., 2005) χρησιμοποίησαν πιστοποιημένο υλικό αναφοράς. (IAEA-Soil-375) με γνωστές συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{226}\text{Ra}$  υπολογίζοντας αποδόσεις μόνο για τα ισότοπα ενδιαφέροντος.
- Οι (Schumaker, et al., 2007) προσδιόρισαν το λόγο της απόδοσης φωτοκορυφής προς την ολική, χρήσει τριών προτύπων πηγών  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  και  $^{88}\text{Y}$ .
- Οι (Cetiner, 2008) χρησιμοποίησαν πιστοποιημένη μεικτή πηγή ευρωπαϊού - αντιμονίου ( $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$  και  $^{125}\text{Sb}$ ), η οποία εκπέμπει επαρκές πλήθος φωτονίων σε ευρύ ενεργειακό φάσμα.
- Οι (Fan, et al., 2012) βαθμονόμησαν αρχικά, πειραματικά με έντεκα μονοενεργειακά ισότοπα ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  και  $^{65}\text{Zn}$ ) που κάλυπταν την ενεργειακή περιοχή 60 – 1115.6 keV, και στη συνέχεια μέχρι την ενέργεια των 2800 keV με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo.
- Οι (McNamara, et al., 2012) χρησιμοποίησαν πρότυπη πηγή πολλών ισωτόπων, η οποία περιείχε τα ισότοπα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  και  $^{60}\text{Co}$  προκειμένου να βαθμονομήσουν στην ενεργειακή περιοχή 60 – 2000 keV.

<sup>53</sup> Το συγκεκριμένο ισότοπο παρουσιάζει ιδιαιτερότητα καθώς διασπάται με διάσπαση  $\beta^+$  και στη συνέχεια αποδιεγείρεται με φωτόνιο- $\gamma$ . Τα φωτόνια 511 keV που ακολουθούν την εξαΐλωση του ποζιτρονίου εκπέμπονται πρακτικά ταυτόχρονα με το φωτόνιο- $\gamma$  από την αποδιέγερση του πυρήνα.

- Οι (Britton, et al., 2013), χρησιμοποίησαν μονοϊσοτοπικές πηγές και ραδιενεργό παρασκεύασμα πολλών ισοτόπων που περιείχε  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{113}\text{Sn}$  και  $^{137}\text{Cs}$  για να βαθμονομήσουν στην ενεργειακή περιοχή 37 – 662 keV.
- Οι (Sima, et al., 2013) βαθμονομήσαν στην ενεργειακή περιοχή 46 – 1800 keV με διάλυμα πολλών ισοτόπων το οποίο περιείχε τα ισότοπα  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{60}\text{Co}$  και  $^{88}\text{Y}$ . Επιπρόσθετα, βαθμονομήσαν τη διάταξη χρήσει σημειακών πηγών και υγρού διαλύματος  $^{134}\text{Cs}$ , υπολογίζοντας και στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed) την επίδραση της διαδοχικής εκπομπής περισσότερων του ενός φωτονίων.

### 4.3 Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης

Στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. πραγματοποιήθηκε πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτικού συστήματος XtRa - CSS για τις τυπικές γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ( $40.0\text{ cm}^3$ ,  $97.2\text{ cm}^3$  και  $282.0\text{ cm}^3$ ). Υπενθυμίζεται ότι η διάταξη μπορεί να συλλέγει δύο φάσματα συγχρόνως:

- συμβατικό φάσμα και φάσμα σε αντί-σύμπτωση (suppressed)
- συμβατικό φάσμα και φάσμα σε σύμπτωση (coincidence)

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για τις δύο λειτουργίες του συστήματος: συμβατική και σε αντί-σύμπτωση, καθώς, όπως διαπιστώθηκε η λειτουργία σε σύμπτωση δεν παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές της Δ.Δ. (Κεφάλαιο 3). Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν:

- δείγματα στερεού KCl
- πιστοποιημένο χώμα από το Δ.Ο.Α.Ε.
- υγρά δείγματα τα οποία είχαν διατεθεί στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο Ασκήσεων Διασύγκρισης

Σε κάθε περίπτωση για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης χρησιμοποιείται η Σχέση (4.1) και για τη σύγκριση των τιμών των αποδόσεων μεταξύ του unsuppressed και του suppressed φάσματος υπολογίζεται η απόκλιση με βάση τη Σχέση (4.2).

$$\text{eff} = \frac{\text{area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{activity}} \quad \text{Σχέση (4.1)}$$

$$\text{απόκλιση} = \frac{(\text{eff}_{\text{unsup}} - \text{eff}_{\text{sup}})}{\text{eff}_{\text{unsup}}} \quad \text{Σχέση (4.2)}$$

όπου *eff* είναι η απόδοση φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης, *area* είναι η καθαρή επιφάνεια της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, *time* η διάρκεια λήψης του φάσματος, *yield* το ποσοστό εκπομπής των υπό ανάλυση φωτονίων και *activity* η ενεργότητα της πηγής (σε Bq).

### 4.3.1 Βαθμονόμηση με δείγμα στερεού KCl

Για τη δημιουργία πηγής  $^{40}\text{K}$  χρησιμοποιήθηκε φυσικό άλας KCl<sup>54</sup>. Κατασκευάστηκαν πηγές και στις τρεις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Πίνακας 4.1) με συγκέντρωση  $^{40}\text{K}$  16.67 kBq/kg  $\pm$  0.1%(1σ).

Δείγμα	Κωδικός γεωμετρίας	Μάζα (gr)
MKCl2	«2»	344.3
MKCl5	«5»	101.6
MKCl8	«8»	50.3

Πίνακας 4.1: Πηγές όγκου στερεού KCl.

Στον Πίνακα 4.2 δίνεται ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων για τη φωτοκορυφή του  $^{40}\text{K}$  – μετά την αφαίρεση του υποστρώματος – στα φάσματα που λήφθηκαν με τις πηγές KCl<sup>55</sup> και η αντίστοιχη απόδοση φωτοκορυφής, για κάθε γεωμετρία. Οι τιμές συνοδεύονται από τις ολικές αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ.

Τρόπος λειτουργίας	Γεωμετρία	Net cps	Απόδοση φωτοκορυφής <sup>56</sup>
Συμβατικός (φάσμα unsuppressed)	«2»	9.12 $\pm$ 0.5%	0.01506 $\pm$ 0.5%
	«5»	4.96 $\pm$ 0.5%	0.0278 $\pm$ 0.6%
	«8»	3.02 $\pm$ 0.7%	0.0342 $\pm$ 0.7%
Αντισύμπτωση (suppressed φάσμα)	«2»	9.06 $\pm$ 0.4%	0.01496 $\pm$ 0.4%
	«5»	4.97 $\pm$ 0.5%	0.0278 $\pm$ 0.6%
	«8»	3.02 $\pm$ 0.7%	0.0341 $\pm$ 0.7%

Πίνακας 4.2: Αποδόσεις  $^{40}\text{K}$  για τις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου με την πηγή στερεού KCl.

<sup>54</sup> Πρόκειται για το προϊόν με κωδικό Art4935 της MERCK με καθαρότητα υψηλότερη του 99.55%.

<sup>55</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 109 – 114.

<sup>56</sup> Στην αβεβαιότητα της απόδοσης περιλαμβάνεται και η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας της πηγής.

### 4.3.2 Βαθμονόμηση με πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327 πιστοποιημένο από το Δ.Ο.Α.Ε.

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. διατίθεται το πρότυπο χώμα από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (Δ.Ο.Α.Ε.) με κωδική ονομασία ΙΑΕΑ327, του οποίου τα επίπεδα ραδιενέργειας (Πίνακα 4.3) είναι συγκρίσιμα με εκείνα που τυπικά απαντώνται στα Ελληνικά εδάφη, τόσο για τις σειρές του Ουρανίου και του Θορίου όσο και για το  $^{40}\text{K}$  (Anagnostakis, et al., 1996). Το πιστοποιητικό του δείγματος παρατίθεται στο Παράρτημα Δ.

Ισότοπο	Χρόνος Ημιζωής	Ραδιενέργεια (Bq/kg)
$^{40}\text{K}$	$1.25 \times 10^9$ y	621 ± 1.5%
$^{90}\text{Sr}$	28.80 y	2.37 ± 5.9%
$^{137}\text{Cs}$	30.05 y	15.9 ± 1.2%
$^{210}\text{Pb}$	22.23 y	32.2 ± 8.5%
$^{226}\text{Ra}$	1600 y	33.8 ± 4.1%
$^{228}\text{Ra}$	5.75 y	3.7 ± 2.4%
$^{230}\text{Th}$	75380 y	34.1 ± 5.0%
$^{232}\text{Th}$	$14.02 \times 10^9$ y	38.7 ± 3.9%
$^{234}\text{U}$	$2.45 \times 10^5$ y	31.9 ± 4.7%
$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$ y	32.8 ± 4.3%
$^{238}\text{Pu}$	87.74 y	0.02 ± 10.0%
$^{239}\text{Pu}$	24100 y	0.58 ± 3.4%
$^{240}\text{Pu}$	6561 y	

Πίνακας 4.3: Περιεχόμενα ισότοπα και συγκεντρώσεις στο πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327 (01/05/2014).

Με το πρότυπο ΙΑΕΑ327 έχουν παρασκευασθεί στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. από δύο όμοια δείγματα για κάθε μία από τις γεωμετρίες «2», «5» και «8» (Πίνακας 4.4). Κατά τη συσκευασία προσδιορίστηκε η υγρασία του προτύπου ίση με 2%. Σημειώνεται ότι τα δείγματα γεωμετρίας «2» είναι αεροστεγώς σφραγισμένα σε αντίθεση με τα δείγματα γεωμετριών «5» και «8». Περισσότερες πληροφορίες για τα δείγματα αυτά μπορούν να αναζητηθούν στη Δ.Δ. (Καράγγελος, 2008).

Δείγμα	Κωδικός γεωμετρίας	Ξηρή μάζα (gr)
ΧΙΑΕΑ3271	«2»	323.5
ΧΙΑΕΑ3272		346.9
ΧΙΑΕΑ3273	«5»	88.2
ΧΙΑΕΑ3274		95.2
ΧΙΑΕΑ3275	«8»	41.0
ΧΙΑΕΑ3276		42.6

Πίνακας 4.4: Δείγματα που παρασκευάστηκαν από το πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για κάθε γεωμετρία λήφθηκαν υπόψη και τα δύο δείγματα της εκάστοτε γεωμετρίας. Υπολογίστηκε η σταθμισμένη μέση τιμή των cps κάθε φάσματος – αφού πρώτα αφαιρέθηκε η συνεισφορά του υποστρώματος (net cps) – και στη συνέχεια υπολογίστηκε η απόδοση φωτοκορυφής. Στα σφραγισμένα δείγματα γεωμετρίας «2» το  $^{226}\text{Ra}$  είναι σε ισορροπία με τα θυγατρικά του ισότοπα  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{214}\text{Pb}$ . Ως εκ τούτου, υπολογισμός της απόδοσης της γεωμετρίας «2» έγινε και για τις φωτοκορυφές των θυγατρικών ισωτόπων  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{214}\text{Pb}$ . Σε κανένα από τα δείγματα δεν χρησιμοποιήθηκαν τα φωτόνια 92.40 keV και 92.80 keV του  $^{234}\text{Th}$  που εκπέμπονται με παραπλήσια ποσοστά εκπομπής (2.18% και 2.15%, αντίστοιχα) (Παράρτημα Β). Τα φωτόνια αυτά σχηματίζουν διπλή φωτοκορυφή στην ενέργεια 92.60 keV και δεν αναλύονται ως δύο ξεχωριστές (Αναγνωστάκης, 1998).

Στους Πίνακες 4.5, 4.7 και 4.6 δίνονται για κάθε μία από τις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου «2», «5» και «8» αντίστοιχα, τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το unsuppressed και το suppressed φάσμα και οι ολικές αβεβαιότητες<sup>57</sup> σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ (combined standard uncertainty).

Ενέργεια (keV)	net cps <sub>uns.</sub> <sup>58</sup>	Απόδοση <sub>uns.</sub>	net cps <sub>sup.</sub> <sup>58</sup>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
63.30	0.023 ± 7.4%	0.057 ± 8.0%	0.022 ± 5.8%	0.055 ± 6.6%
295.22	0.087 ± 1.4%	0.042 ± 2.5%	0.087 ± 1.2%	0.042 ± 2.6%
351.93	0.154 ± 2.1%	0.0383 ± 1.8%	0.154 ± 1.7%	0.0381 ± 1.7%
609.31 <sup>c</sup>	0.121 ± 1.4%	0.0235 ± 2.1%	0.0417 ± 1.3%	0.0081 ± 2.1%
661.62	0.110 ± 1.1%	0.0242 ± 2.3%	0.111 ± 1.2%	0.0244 ± 2.2%
1120.29 <sup>c</sup>	0.0281 ± 2.9%	0.0166 ± 3.4%	0.0069 ± 5.8%	0.0041 ± 6.0%
1460.75	0.322 ± 1.3%	0.0147 ± 2.0%	0.324 ± 1.5%	0.0148 ± 1.9%
1729.60	0.0057 ± 4.3%	0.0176 ± 4.6%	0.0056 ± 2.5%	0.0174 ± 3.0%
1764.49	0.0257 ± 1.7%	0.0148 ± 2.0%	0.0248 ± 2.1%	0.0143 ± 1.9%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.5: Βαθμονόμηση απόδοσης για τη γεωμετρία «2» με το πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327.

Ενέργεια (keV)	net cps <sub>uns.</sub> <sup>59</sup>	Απόδοση <sub>uns.</sub>	net cps <sub>sup.</sub> <sup>59</sup>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
63.30	0.013 ± 8.1%	0.119 ± 8.1%	0.01 ± 9.0%	0.13 ± 9.0%
661.62	0.060 ± 2.1%	0.048 ± 3.3%	0.060 ± 2.4%	0.048 ± 3.0%
1460.75	0.164 ± 3.4%	0.0275 ± 0.5%	0.1636 ± 3.3%	0.0274 ± 0.5%

Πίνακας 4.6: Βαθμονόμηση απόδοσης για τη γεωμετρία «5» με το πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327.

<sup>57</sup> Για τα καθαρά cps ελήφθη υπόψη και η αβεβαιότητα λόγω του υποστρώματος, ενώ για την απόδοση ελήφθη υπόψη και η αβεβαιότητα της πηγής.

<sup>58</sup> Σταθμισμένη μέση τιμή από τα δείγματα ΙΑΕΑ3271 και ΙΑΕΑ3272.

<sup>59</sup> Σταθμισμένη μέση τιμή από τα δείγματα ΙΑΕΑ3273 και ΙΑΕΑ3274.



Ενέργεια (keV)	$net\ cps_{uns.}^{60}$	Απόδοση $_{uns.}$	$net\ cps_{sup.}^{60}$	Απόδοση $_{sup.}$
63.30	0.0092 ± 6.8%	0.18 ± 7.5%	0.0087 ± 7.4%	0.17 ± 8.0%
661.62	0.0333 ± 1.5%	0.0591 ± 1.5%	0.0340 ± 1.0%	0.0598 ± 1.1%
1460.75	0.093 ± 1.2%	0.0341 ± 1.2%	0.093 ± 1.5%	0.0340 ± 1.1%

Πίνακας 4.7: Βαθμονόμηση απόδοσης για τη γεωμετρία «8» με το πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327.

Στον Πίνακα 4.8 δίνονται για όλες τις γεωμετρίες όγκου, ο λόγος των αποδόσεων (suppressed προς unsuppressed), η ποσοστιαία απόκλιση των δύο τιμών και οι τιμές της στατιστικής μεταβλητής U. Από τη σύγκριση παρατηρείται ότι δεν εμφανίζεται στατιστικά σημαντική διαφορά της απόδοσης για τους δύο τρόπους λειτουργίας του συστήματος, με εξαίρεση τα φωτόνια του  $^{214}\text{Bi}$ , ενέργειας 609.31 keV και 1120.29 keV, τα οποία εκπέμπονται σε σειρά.

Ενέργεια (keV)	Γεωμετρία «2»			Γεωμετρία «5»			Γεωμετρία «8»		
	λόγος sup/unsup	απόκλιση	U	λόγος sup/unsup	απόκλιση	U	λόγος sup/unsup	απόκλιση	U
63.30	0.935	6.5%	0.64	1.126	-12.6%	0.97	0.937	6.3%	0.67
295.22	0.989	1.1%	0.25						
351.93	0.978	2.2%	0.59						
609.31 <sup>c</sup>	0.339	66.1%	27.92						
661.62	0.998	0.2%	0.06	1.022	-2.2%	0.49	1.011	-1.1%	0.70
1120.29 <sup>c</sup>	0.237	76.3%	20.63						
1460.75	0.987	1.3%	0.32	0.998	0.2%	0.31	0.997	0.3%	0.33
1729.60	0.963	3.7%	0.66						
1764.49	0.945	5.5%	1.45						

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.8: Σύγκριση αποδόσεων για το πρότυπο χώμα ΙΑΕΑ327.

### 4.3.3 Βαθμονόμηση με τα δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03

Το Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. συμμετείχε το 2011 στην Άσκηση Διασύγκρισης του Δ.Ο.Α.Ε. ΙΑΕΑ-TEL-2011-03 για τον προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων σε τρία δείγματα νερού και ένα χώματος (Πίνακες 4.9 και 4.10).

Ισότοπο	Δείγματα νερού (Bq/kg)		
	spiked water 1	spiked water 2	spiked water 3
$^{241}\text{Am}$	4.7 ± 2.1%	2.4 ± 4.2%	3.3 ± 3.0%
$^{133}\text{Ba}$	5.0 ± 2.0%	2.5 ± 4.0%	3.5 ± 2.9%
$^{60}\text{Co}$	15.3 ± 1.3%	7.6 ± 1.3%	10.7 ± 1.9%
$^{134}\text{Cs}$	7.7 ± 1.3%	3.8 ± 2.6%	5.4 ± 1.9%
$^{137}\text{Cs}$	6.2 ± 1.6%	3.1 ± 3.2%	4.4 ± 2.3%
$^{152}\text{Eu}$	15.4 ± 1.3%	7.7 ± 1.3%	10.8 ± 1.9%

Πίνακας 4.9: Συγκεντρώσεις δειγμάτων νερού της Άσκησης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03 (15/11/2011).

<sup>60</sup> Σταθμισμένη μέση τιμή από τα δείγματα ΙΑΕΑ3275 και ΙΑΕΑ3276.

<b>Δείγμα χώματος – soil sample 4</b>		
<b>Ισότοπο</b>	<b>Συγκέντρωση (Bq/kg)</b>	
<sup>40</sup> K	485	± 2.3%
<sup>137</sup> Cs	14.4	± 4.2%
<sup>208</sup> Tl	13.0	± 5.4%
<sup>210</sup> Pb	42.6	± 5.2%
<sup>212</sup> Pb	36.5	± 4.4%
<sup>214</sup> Pb	50.0	± 7.6%
<sup>214</sup> Bi	50.0	± 5.6%
<sup>226</sup> Ra	50.2	± 4.0%
<sup>228</sup> Ac	41.0	± 4.9%
<sup>238</sup> U	27.0	± 5.2%
<sup>241</sup> Am	0.21	± 38.1%

Πίνακας 4.10: Συγκεντρώσεις δείγματος χώματος της Άσκησης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03 (15/11/2011).

Από τα δείγματα της Άσκησης δημιουργήθηκε μία σειρά από δείγματα σε διάφορες γεωμετρίες, τα στοιχεία των οποίων δίνονται στον Πίνακα 4.11.

<b>Δείγμα Άσκησης</b>	<b>Δείγμα Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.</b>	<b>Κωδικός γεωμετρίας</b>	<b>Μάζα δείγματος (gr)</b>
spiked water 1	WT080	«2»	285.6
spiked water 1	WT083	«8»	40.0
spiked water 2	WT081	«2»	278.0
spiked water 3	WT082	«2»	275.7
soil sample 4	MS638	«5»	126.8 <sup>61</sup>

Πίνακας 4.11: Δείγματα που παρασκευάστηκαν στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. για την Άσκηση Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «2» και για υλικό νερό χρησιμοποιήθηκαν και τα τρία δείγματα νερού της Άσκησης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03, τα οποία περιέχουν τα ίδια ισότοπα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις, υπολογίζοντας τη σταθμισμένη μέση τιμή τους. Με το δείγμα χώματος MS638, υπολογίστηκε η απόδοση της γεωμετρίας «5» για φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, καθώς το δείγμα είναι βαμμένο με ειδική ρητίνη που δεν επιτρέπει τη διαρροή του ραδονίου (Πίνακας 4.13). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων<sup>62</sup> δίνονται στους Πίνακες 4.12 για υλικό νερό και 4.13 για υλικό χώμα. Κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής δεν έχουν πραγματοποιηθεί

<sup>61</sup> Μάζα ξηρού

<sup>62</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 127 – 144.

διορθώσεις για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Επίσης δεν χρησιμοποιήθηκε η φωτοκορυφή του  $^{210}\text{Pb}^{63}$ .

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Γεωμετρία «2» – υλικό νερό		Γεωμετρία «8» – υλικό νερό	
		Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>	Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
$^{133}\text{Ba}$	53.26 <sup>c</sup>	0.05 ± 34.5%	0.10 ± 59.6%	--	--
$^{241}\text{Am}$	59.54	0.064 ± 2.1%	0.065 ± 2.8%	0.181 ± 4.0%	0.185 ± 3.3%
$^{133}\text{Ba}$	80.99 <sup>c</sup>	0.042 ± 2.5%	0.0087 ± 9.6%	0.09 ± 9.2%	0.029 ± 13.8%
$^{152}\text{Eu}$	121.78 <sup>c</sup>	0.0438 ± 1.0%	0.0189 ± 1.7%	0.109 ± 2.4%	0.046 ± 4.0%
$^{133}\text{Ba}$	160.61 <sup>c</sup>	0.60 ± 7.4%	--	--	--
$^{133}\text{Ba}$	223.24 <sup>c</sup>	0.1 ± 70.3%	--	--	--
$^{152}\text{Eu}$	244.70 <sup>c</sup>	0.026 ± 4.4%	0.0108 ± 5.2%	0.061 ± 6.7%	0.023 ± 18.2%
$^{133}\text{Ba}$	276.40 <sup>c</sup>	0.032 ± 12.1%	0.028 ± 11.2%	0.09 ± 32.3%	0.06 ± 31.8%
$^{133}\text{Ba}$	302.85 <sup>c</sup>	0.027 ± 8.5%	0.027 ± 7.6%	0.06 ± 20.3%	0.059 ± 11.2%
$^{152}\text{Eu}$	344.28 <sup>c</sup>	0.031 ± 1.9%	0.0188 ± 2.2%	0.079 ± 5.3%	0.046 ± 4.5%
$^{133}\text{Ba}$	356.01 <sup>c</sup>	0.028 ± 2.2%	0.0262 ± 3.2%	0.064 ± 5.5%	0.061 ± 4.6%
$^{133}\text{Ba}$	383.85 <sup>c</sup>	0.032 ± 8.4%	0.031 ± 7.2%	0.07 ± 25.9%	0.09 ± 11.4%
$^{152}\text{Eu}$	411.12 <sup>c</sup>	0.026 ± 12.2%	0.019 ± 43.0%	0.07 ± 48.1%	--
$^{152}\text{Eu}$	443.97 <sup>c</sup>	0.021 ± 12.5%	0.009 ± 21.0%	--	--
$^{134}\text{Cs}$	563.25 <sup>c</sup>	0.021 ± 6.0%	0.007 ± 20.9%	0.05 ± 21.1%	--
$^{134}\text{Cs}$	569.33 <sup>c</sup>	0.019 ± 5.6%	0.0037 ± 19.9%	0.05 ± 20.5%	0.015 ± 46.9%
$^{134}\text{Cs}$	604.72 <sup>c</sup>	0.0200 ± 1.3%	0.0077 ± 2.4%	0.048 ± 3.4%	0.0168 ± 4.2%
$^{137}\text{Cs}$	661.62	0.0257 ± 1.2%	0.0263 ± 1.4%	0.060 ± 2.5%	0.061 ± 1.8%
$^{152}\text{Eu}$	778.90 <sup>c</sup>	0.0192 ± 2.3%	0.0060 ± 5.0%	0.040 ± 7.6%	0.011 ± 15.0%
$^{134}\text{Cs}$	795.86 <sup>c</sup>	0.0192 ± 1.5%	0.0070 ± 2.3%	0.050 ± 5.1%	0.0164 ± 4.8%
$^{134}\text{Cs}$	801.95 <sup>c</sup>	0.015 ± 3.8%	0.004 ± 23.1%	0.048 ± 9.0%	0.014 ± 46.1%
$^{152}\text{Eu}$	867.38 <sup>c</sup>	0.013 ± 11.8%	0.003 ± 45.7%	0.02 ± 65.7%	--
$^{152}\text{Eu}$	964.08 <sup>c</sup>	0.016 ± 3.3%	0.0137 ± 2.7%	0.041 ± 6.4%	0.034 ± 4.5%
$^{134}\text{Cs}$	1038.61 <sup>c</sup>	0.03 ± 63.0%	--	--	--
$^{152}\text{Eu}$	1085.84 <sup>c</sup>	0.015 ± 4.1%	0.0149 ± 2.7%	0.034 ± 11.0%	0.037 ± 5.7%
$^{152}\text{Eu}$	1112.08 <sup>c</sup>	0.015 ± 4.1%	0.0131 ± 4.0%	0.029 ± 12.3%	0.027 ± 8.2%
$^{134}\text{Cs}$	1167.97	--	--	--	--
$^{60}\text{Co}$	1173.24 <sup>c</sup>	0.0150 ± 0.8%	0.00751 ± 1.0%	0.0339 ± 1.7%	0.0158 ± 1.9%
$^{60}\text{Co}$	1332.50 <sup>c</sup>	0.0139 ± 0.7%	0.00674 ± 1.0%	0.0320 ± 1.6%	0.0141 ± 2.1%
$^{134}\text{Cs}$	1365.19 <sup>c</sup>	0.019 ± 12.9%	0.010 ± 23.4%	0.06 ± 65.3%	--
$^{152}\text{Eu}$	1408.01 <sup>c</sup>	0.0128 ± 2.3%	0.0117 ± 2.2%	0.025 ± 6.7%	0.025 ± 5.4%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 4.12:** Αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για υλικό νερό, όπως υπολογίσθηκαν με δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2011-03.

<sup>63</sup> Η ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  θα μπορούσε να εκτιμηθεί κατά την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος και να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση, μόνο στην περίπτωση που το υλικό ήταν αεροστεγώς συσκευασμένο συνεχώς από την ημερομηνία αναφοράς.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
<sup>241</sup> Am <sup>64</sup>	59.54	0.6 ± 41.5%	0.8 ± 40.8%
<sup>234</sup> Th	63.30	0.11 ± 15.0%	0.11 ± 12.1%
<sup>228</sup> Ac	129.07 <sup>c</sup>	0.09 ± 17.9%	0.02 ± 49.9%
<sup>226</sup> Ra	186.24	0.130 ± 6.1%	0.127 ± 5.2%
<sup>228</sup> Ac	209.25 <sup>c</sup>	0.063 ± 14.6%	0.045 ± 13.8%
<sup>212</sup> Pb	238.63	0.083 ± 5.1%	0.084 ± 5.0%
<sup>214</sup> Pb	242.80	0.067 ± 14.4%	0.069 ± 13.7%
<sup>228</sup> Ac	270.25 <sup>c</sup>	0.07 ± 20.9%	0.043 ± 14.4%
<sup>208</sup> Tl	277.37 <sup>c</sup>	0.05 ± 23.4%	--
<sup>214</sup> Pb	295.22	0.051 ± 8.8%	0.051 ± 8.2%
<sup>212</sup> Pb	300.09	0.075 ± 7.3%	0.042 ± 7.4%
<sup>228</sup> Ac	328.00 <sup>c</sup>	0.05 ± 21.8%	0.013 ± 47.9%
<sup>228</sup> Ac	338.40 <sup>c</sup>	0.056 ± 6.8%	0.049 ± 6.0%
<sup>214</sup> Pb	351.93	0.047 ± 7.8%	0.047 ± 7.7%
<sup>228</sup> Ac	409.46 <sup>c</sup>	0.04 ± 33.7%	0.013 ± 55.5%
<sup>228</sup> Ac	463.00 <sup>c</sup>	0.045 ± 13.5%	0.013 ± 22.5%
<sup>208</sup> Tl	583.14 <sup>c</sup>	0.038 ± 6.0%	0.0129 ± 6.8%
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	0.027 ± 5.9%	0.0096 ± 6.3%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.039 ± 4.9%	0.040 ± 4.5%
<sup>214</sup> Bi	768.36 <sup>c</sup>	0.018 ± 23.0%	0.007 ± 19.5%
<sup>228</sup> Ac	794.94 <sup>c</sup>	0.024 ± 26.0%	0.004 ± 42.3%
<sup>208</sup> Tl	860.53 <sup>c</sup>	0.035 ± 15.7%	0.016 ± 17.7%
<sup>228</sup> Ac	911.20 <sup>c</sup>	0.031 ± 5.6%	0.025 ± 5.4%
<sup>214</sup> Bi	934.06 <sup>c</sup>	0.022 ± 25.1%	0.005 ± 48.0%
<sup>228</sup> Ac	964.79 <sup>c</sup>	0.030 ± 8.2%	0.019 ± 7.9%
<sup>228</sup> Ac	968.96 <sup>c</sup>	0.029 ± 7.1%	0.024 ± 6.1%
<sup>214</sup> Bi	1120.29 <sup>c</sup>	0.019 ± 8.2%	0.0046 ± 11.8%
<sup>214</sup> Bi	1238.11 <sup>c</sup>	0.019 ± 17.0%	0.004 ± 23.0%
<sup>214</sup> Bi	1377.67 <sup>c</sup>	0.022 ± 14.6%	0.019 ± 12.0%
<sup>214</sup> Bi	1407.98 <sup>c</sup>	--	--
<sup>40</sup> K	1460.75	0.0267 ± 2.4%	0.0266 ± 2.4%
<sup>214</sup> Bi	1509.23 <sup>c</sup>	0.015 ± 34.0%	0.006 ± 32.4%
<sup>214</sup> Bi	1729.60 <sup>c</sup>	0.025 ± 12.9%	0.022 ± 9.9%
<sup>214</sup> Bi	1764.49	0.018 ± 6.8%	0.017 ± 6.3%
<sup>214</sup> Bi	1847.42 <sup>c</sup>	0.020 ± 22.2%	0.019 ± 13.5%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 4.13: Αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για υλικό χώμα και γεωμετρία «5», όπως υπολογίσθηκαν με δείγμα από την Άσκηση Διασύγκρισης IAEA-TEL-2011-03.**

Από τους δύο Πίνακες 4.12 και 4.13 καταρχήν παρατηρείται ότι για τα φωτόνια που δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλα, δεν εμφανίζονται στατιστικά σημαντικές

<sup>64</sup> Η πολύ υψηλή αβεβαιότητα στην απόδοση οφείλεται πρωτίστως στην υψηλή αβεβαιότητα της τιμής της ραδιενέργειας του <sup>241</sup>Am στο δείγμα (38%)

διαφορές ανάμεσα στα δύο φάσματα, unsuppressed και suppressed. Αντίθετα, η απόδοση ανίχνευσης στο suppressed φάσμα για τα εκπεμπόμενα σε σειρά φωτόνια είναι χαμηλότερη από ότι στο unsuppressed, γεγονός που καταδεικνύει ότι για την ανίχνευση των φωτονίων αυτών ενδείκνυται η χρήση του unsuppressed φάσματος.

Για τα ισότοπα για τα οποία έχουν υπολογισθεί αποδόσεις και με το πιστοποιημένο χώμα ΙΑΕΑ327 (Παράγραφος 4.3.2) εν γένει διαπιστώνεται σύγκλιση των τιμών για τις ενέργειες των φωτονίων του  $^{137}\text{Cs}$  και του  $^{40}\text{K}$ . Για να γίνει η αντίστοιχη σύγκριση και για τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών (63.30 keV) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορετική αυτοαπορρόφηση στα δύο δείγματα χώματος. Ανάγοντας την απόδοση του δείγματος χώματος MS638 σε χώμα πυκνότητας ίσης με του προτύπου χώματος ΙΑΕΑ327 είναι δυνατή η σύγκριση των αποδόσεων και για την ενέργεια των 63.30 keV (Πίνακας 4.14). Σημειώνεται ότι οι τιμές στον Πίνακα δεν δίνονται με το σωστό πλήθος δεκαδικών ψηφίων, καθώς αποτελούν ενδιάμεσα στάδια υπολογισμών.

Ενέργεια (keV)	Απόδοση MS638 <sup>65</sup>	Απόδοση ΙΑΕΑ327	U
63.30	0.124 ± 12.1%	0.119 ± 9.0%	0.4
661.62	0.0443 ± 4.5%	0.0469 ± 3.0%	1.3
1460.75	0.0278 ± 2.3%	0.0273 ± 1.7%	0.8

Πίνακας 4.14: Σύγκριση αποδόσεων γεωμετρίας «5» suppressed φάσματος με αναγωγή στην πυκνότητα του πρότυπου δείγματος χώματος ΙΑΕΑ327.

#### 4.3.4 Βαθμονόμηση με τα δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2012-04

Το Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. συμμετείχε το 2012 στην Άσκηση Διασύγκρισης του Δ.Ο.Α.Ε. ΙΑΕΑ-TEL-2012-04 για τον προσδιορισμό γ-ραδιενεργών ισωτόπων σε δείγματα άχυρου, χώματος και υδατικά διαλύματα 2% m/m HNO<sub>3</sub>, από κάθε ένα από τα οποία δημιουργήθηκε ένα δείγμα γεωμετρίας «2» (Πίνακας 4.15). Στο πλαίσιο της Δ.Δ. και για τον υπολογισμό των αποδόσεων της ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS για τη γεωμετρία «2» χρησιμοποιήθηκαν τα δείγματα νερού και χώματος. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των τριών δειγμάτων νερού<sup>66</sup> δίνονται στον Πίνακα 4.16. Σημειώνεται ότι δεν έχουν γίνει διορθώσεις για τα φαινόμενα της αυτοαπορρόφησης και της πραγματικής σύμπτωσης.

<sup>65</sup> Έχει γίνει αναγωγή της απόδοσης σε χώμα πυκνότητας ίσης με του χώματος ΙΑΕΑ327.

<sup>66</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 145 – 150.

Δείγμα	Ισότοπο	Συγκέντρωση (Bq/kg)	Δείγμα Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.	Κωδικός γεωμετρίας	Μάζα <sup>67</sup> (gr)
spiked water 1	<sup>134</sup> Cs	82.6 ± 0.9%	WT084	«2»	279.4
	<sup>152</sup> Eu	118.6 ± 0.8%			
spiked water 2	<sup>241</sup> Am	120.9 ± 0.6%	WT085	«2»	278.1
	<sup>137</sup> Cs	102.5 ± 0.7%			
spiked water quality control 3	<sup>137</sup> Cs	125.8 ± 0.6%	WT086	«2»	278.8
	<sup>60</sup> Co	201.4 ± 0.9%			
άχυρο (hay sample 4)	<sup>134</sup> Cs	316 ± 6.3%	MS643	«2»	120.6
	<sup>137</sup> Cs	815 ± 2.9%			
χώμα (soil sample 4)	<sup>228</sup> Ac	32.4 ± 4.9%	MS642	«2»	184.5
	<sup>241</sup> Am	1.78 ± 5.6%			
	<sup>137</sup> Cs	118.6 ± 2.4%			
	<sup>40</sup> K	207.7 ± 4.0%			
	<sup>210</sup> Pb	595 ± 3.2%			
	<sup>212</sup> Pb	31.0 ± 3.9%			
	<sup>208</sup> Tl	11.5 ± 5.2%			
	<sup>238</sup> U	23.6 ± 3.0%			

Πίνακας 4.15: Συγκεντρώσεις δειγμάτων της Άσκησης ΙΑΕΑ-TEL-2012-04 (01/01/2012) και τα αντίστοιχα δείγματα Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Δείγμα	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
spiked water 1	<sup>134</sup> Cs	563.25 <sup>c</sup>	0.023 ± 8.3%	0.0030 ± 27.6%
		569.33 <sup>c</sup>	0.020 ± 7.8%	0.0031 ± 26.6%
		604.72 <sup>c</sup>	0.0224 ± 1.7%	0.0078 ± 2.4%
		795.86 <sup>c</sup>	0.0193 ± 2.1%	0.0062 ± 2.7%
		801.95 <sup>c</sup>	0.0183 ± 5.2%	0.0040 ± 22.6%
		1038.61 <sup>c</sup>	0.02 ± 53.6%	--
		1167.97	--	0.007 ± 62.9%
	1365.19 <sup>c</sup>	0.022 ± 16.8%	0.006 ± 30.4%	
	<sup>152</sup> Eu	121.78 <sup>c</sup>	0.0472 ± 1.6%	0.0184 ± 2.4%
		244.70 <sup>c</sup>	0.032 ± 7.4%	0.0126 ± 7.5%
		344.28 <sup>c</sup>	0.0341 ± 2.3%	0.0194 ± 2.5%
		411.12 <sup>c</sup>	0.0292 ± 16.3%	0.005 ± 51.8%
		443.97 <sup>c</sup>	0.021 ± 15.2%	0.006 ± 30.6%
		778.90 <sup>c</sup>	0.020 ± 6.9%	0.0063 ± 5.9%
		867.38 <sup>c</sup>	0.013 ± 14.8%	--
		964.08 <sup>c</sup>	0.0147 ± 4.4%	0.0123 ± 3.9%
		1085.84 <sup>c</sup>	0.0181 ± 5.2%	0.0164 ± 4.1%
		1112.08 <sup>c</sup>	0.0152 ± 6.2%	0.0137 ± 3.2%
		1408.01 <sup>c</sup>	0.0137 ± 3.1%	0.0124 ± 2.8%
spiked water 2		<sup>241</sup> Am	59.54	0.070 ± 1.3%
	<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0261 ± 1.0%	0.0263 ± 0.9%
quality control 3	<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0261 ± 0.8%	0.0261 ± 0.8%
		1173.24 <sup>c</sup>	0.0165 ± 1.0%	0.0074 ± 1.1%
	<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	0.0151 ± 0.4%	0.0065 ± 0.6%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.16: Αποδόσεις ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «2» και υλικό νερό, όπως εκτιμήθηκε με τα δείγματα της Άσκησης Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2012-04.

<sup>67</sup> Για τα στερεά δείγματα η μάζα αναφέρεται σε μάζα ξηρού.

### 4.3.5 Βαθμονόμηση με τα δείγματα από την Άσκηση Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2013-04

Το Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. το 2013 συμμετείχε στην Άσκηση Διασύγκρισης του Δ.Ο.Α.Ε ΙΑΕΑ-TEL-2013-04 για τον προσδιορισμό ανθρωπογενών ραδιενεργών ισοτόπων σε δείγματα νερού, από τα οποία συσκευάστηκαν δείγματα γεωμετρίας «2» (Πίνακας 4.17).

Δείγμα	Ισότοπο	Συγκέντρωση (Bq/kg)	Δείγμα Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.	Κωδικός γεωμετρίας	Μάζα (gr)
spiked water 1	<sup>134</sup> Cs	24.4 ± 0.9%	WT087	2	279.2
	<sup>137</sup> Cs	50.3 ± 0.6%			
spiked water 2	<sup>241</sup> Am	40.2 ± 0.4%	WT088	2	280.2
	<sup>60</sup> Co	50.9 ± 0.8%			
	<sup>152</sup> Eu	49.9 ± 0.8%			
spiked water quality control 3	<sup>134</sup> Cs	72.7 ± 0.6%	WT089	2	280.4
	<sup>137</sup> Cs	30.3 ± 0.7%			
	<sup>241</sup> Am	15.2 ± 0.7%			

Πίνακας 4.17: Συγκεντρώσεις δειγμάτων της Άσκησης ΙΑΕΑ-TEL-2013-04 (01/01/2013).

Στους Πίνακες 4.18, 4.19 και 4.20 δίνονται οι αντίστοιχες αποδόσεις που προέκυψαν<sup>68</sup>. Οι αβεβαιότητες είναι ολικές<sup>69</sup> και σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0260 ± 0.7%	0.0261 ± 0.7%
<sup>134</sup> Cs	563.25 <sup>c</sup>	0.020 ± 5.6%	--
	569.33 <sup>c</sup>	0.021 ± 5.3%	0.0019 ± 28.6%
	604.72 <sup>c</sup>	0.0224 ± 1.4%	0.0058 ± 2.4%
	801.95 <sup>c</sup>	0.0181 ± 4.3%	0.0025 ± 12.4%
	1038.61 <sup>c</sup>	--	--
	1167.97 <sup>c</sup>	0.011 ± 46.6%	--
	1365.19 <sup>c</sup>	0.020 ± 20.0%	0.006 ± 22.8%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.18: Αποδόσεις ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «2» για υλικό νερό με το δείγμα spiked water 1 της Άσκησης Διασύγκρισης ΙΑΕΑ-TEL-2013-04.

<sup>68</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 155 – 158.

<sup>69</sup> Στην αβεβαιότητα συνυπολογίζεται η αβεβαιότητα της επιφάνειας της φωτοκορυφής και η αβεβαιότητα της συγκέντρωσης.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
<sup>241</sup> Am	59.54	0.0683 ± 1.2%	0.0693 ± 1.4%
<sup>152</sup> Eu	121.78 <sup>c</sup>	0.0471 ± 1.1%	0.0148 ± 1.6%
	244.70 <sup>c</sup>	0.029 ± 5.6%	0.0054 ± 8.5%
	344.28 <sup>c</sup>	0.0342 ± 2.4%	0.0174 ± 2.4%
	411.12 <sup>c</sup>	0.027 ± 9.7%	0.002 ± 66.1%
	443.97 <sup>c</sup>	0.024 ± 7.6%	0.004 ± 21.3%
	778.90 <sup>c</sup>	0.0202 ± 2.3%	0.0031 ± 6.2%
	867.38 <sup>c</sup>	0.014 ± 9.9%	--
	964.08 <sup>c</sup>	0.0160 ± 4.0%	0.0073 ± 3.6%
	1085.84 <sup>c</sup>	0.0175 ± 4.2%	0.0150 ± 2.2%
	1112.08 <sup>c</sup>	0.0152 ± 2.9%	0.0076 ± 2.8%
	1408.01 <sup>c</sup>	0.0132 ± 1.7%	0.0067 ± 2.0%
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.0168 ± 1.0%	0.00655 ± 1.1%
	1332.50 <sup>c</sup>	0.0153 ± 1.0%	0.00563 ± 1.2%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.19: Αποδόσεις ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «2» για υλικό νερό με το δείγμα spiked water 2 της Άσκησης Διασύγκρισης IAEA-TEL-2013-04.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>uns.</sub>	Απόδοση <sub>sup.</sub>
<sup>241</sup> Am	59.54	0.067 ± 2.5%	0.068 ± 2.2%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0261 ± 0.9%	0.0260 ± 0.8%
<sup>134</sup> Cs	563.25 <sup>c</sup>	0.0218 ± 3.0%	0.0017 ± 15.0%
	569.33 <sup>c</sup>	0.0209 ± 2.7%	0.0018 ± 13.7%
	604.72 <sup>c</sup>	0.0224 ± 0.8%	0.00568 ± 1.3%
	795.86 <sup>c</sup>	0.0193 ± 0.9%	0.00433 ± 1.5%
	801.95 <sup>c</sup>	0.0172 ± 3.3%	0.0021 ± 8.6%
	1038.61 <sup>c</sup>	0.017 ± 22.2%	0.005 ± 42.5%
	1167.97 <sup>c</sup>	0.019 ± 12.7%	0.0064 ± 17.2%
	1365.19 <sup>c</sup>	0.020 ± 10.6%	0.0052 ± 10.7%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.20: Αποδόσεις για υλικό νερό ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «2» με το δείγμα νερού quality control 3 της Άσκησης Διασύγκρισης IAEA-TEL-2013-04.

#### 4.3.6 Συγκεντρωτικές τιμές απόδοσης για τις τυπικές γεωμετρίες του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τιμές της απόδοσης της διάταξης XtRa - CSS που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, διαπιστώνεται ότι οι τιμές των αποδόσεων πλήρους απορρόφησης που υπολογίστηκαν από τα διάφορα δείγματα εν γένει συγκλίνουν μεταξύ τους, δηλαδή οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι στατιστικά μη-σημαντικές.



Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός σταθμισμένων μέσω τιμών των αποδόσεων που προέκυψαν για κάθε ισότοπο ξεχωριστά και για κάθε τυποποιημένη γεωμετρία όγκου πρέπει οι διάφορες τιμές να αναφέρονται στο ίδιο υλικό. Υλικά διαφορετικής σύστασης οδηγούν σε διαφορετική αυτοαπορρόφηση μέσα στο υλικό, φαινόμενο το οποίο επηρεάζει κατά κύριο λόγο φωτόνια χαμηλών ενεργειών (< 200 keV). Κατά την ανάλυση δείγματος σύστασης διαφορετικής από της πηγής βαθμονόμησης, η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων χαμηλών ενεργειών που εκτιμάται από την πηγή βαθμονόμησης είναι διαφορετική από την απόδοση ανίχνευσης κατά την ανάλυση του δείγματος. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλης μεθόδου αντιμετώπισης του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης των φωτονίων μέσα στο δείγμα. Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αυτοαπορρόφησης έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται πειραματική-υπολογιστική μέθοδος (Anagnostakis, et al., 1995), η οποία βασίζεται στην εισαγωγή συντελεστή αναγωγής της απόδοσης ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη διαφορά της απόδοσης ανάμεσα στην πηγή βαθμονόμησης και το αναλυόμενο δείγμα της ίδιας γεωμετρίας. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται για συγκεκριμένο ζεύγος υλικών πηγής βαθμονόμησης και δείγματος και για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων. Ο υπολογισμός της τιμής του συντελεστή γίνεται με χρήση του προγράμματος «factor» γραμμένου σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN (Αναγνωστάκης, 1998), το οποίο λαμβάνει ως υλικό της πηγής βαθμονόμησης υδάτινο διάλυμα 4M HCl – καθώς οι βαθμονομήσεις στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. έχουν πραγματοποιηθεί με πρότυπες πηγές 4M HCl - και ζητά από τον χρήστη να εισάγει τη γεωμετρία ανάλυσης και τη σύσταση και πυκνότητα του υλικού του δείγματος.

Στον Πίνακα 4.21 δίνονται οι συντελεστές αναγωγής της απόδοσης που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα factor και χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση φωτονίων ενέργειας < 200 keV για την αναγωγή των πειραματικών αποδόσεων σε υλικό πηγής 4M HCl για κάθε γεωμετρία.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Γεωμετρία	Δείγμα	Υλικό	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	Συντελεστής αναγωγής <sup>70</sup>
<sup>241</sup> Am	59.54	«2»	IAEA-TEL-2011-03	νερό	0.9921	1.102
		«2»	IAEA-TEL-2012-04	νερό	0.9885	1.102
		«2»	IAEA-TEL-2013-04	νερό	0.9927	1.102
		«8»	IAEA-TEL-2011-03	νερό	1.0000	1.028
<sup>234</sup> Th	63.29	«2»	IAEA327	χώμα	1.1486	0.846
		«2»	IAEA-TEL-2012-03	χώμα	0.6543	1.083
		«5»	IAEA327	χώμα	0.9074	0.971
		«5»	IAEA-TEL-2011-03	χώμα	1.3045	0.872
		«8»	IAEA327	χώμα	1.0250	0.967
<sup>152</sup> Eu	121.78	«2»	IAEA-TEL-2011-03	νερό	0.9921	1.022
		«2»	IAEA-TEL-2012-04	νερό	0.9885	1.022
		«2»	IAEA-TEL-2013-04	νερό	0.9927	1.022
		«8»	IAEA-TEL-2011-03	νερό	1.0000	1.006

Πίνακας 4.21: Συντελεστές αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης.

Στους Πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι σταθμισμένες μέσες τιμές των αποδόσεων που προέκυψαν για κάθε ισότοπο ξεχωριστά και για κάθε τυποποιημένη γεωμετρία όγκου ανηγμένες σε υλικό 4M HCl. Σημειώνεται ότι δεν έχει γίνει καμία διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>unsup</sub>	Απόδοση <sub>sup</sub>
<sup>241</sup> Am	59.54	0.0618 ± 2.8%	0.0624 ± 2.8%
<sup>234</sup> Th	63.29	0.070 ± 6.7%	0.066 ± 5.6%
<sup>212</sup> Pb	238.63	0.048 ± 4.8%	0.048 ± 4.7%
<sup>214</sup> Pb	295.22	0.0418 ± 2.5%	0.0417 ± 2.6%
	351.93	0.0383 ± 1.8%	0.0381 ± 1.7%
<sup>133</sup> Ba	302.85 <sup>c</sup>	0.0335 ± 8.7%	0.015 ± 33.6%
	356.01 <sup>c</sup>	0.0298 ± 2.1%	0.016 ± 9.8%
<sup>152</sup> Eu	121.78 <sup>c</sup>	0.0456 ± 1.6%	0.016 ± 13.1%
	344.28 <sup>c</sup>	0.0337 ± 1.5%	0.0185 ± 5.0%
	778.90 <sup>c</sup>	0.0201 ± 2.2%	0.004 ± 36.7%
	1408.01 <sup>c</sup>	0.0133 ± 1.2%	0.0076 ± 1.3%
<sup>134</sup> Cs	604.72 <sup>c</sup>	0.0223 ± 2.1%	0.0060 ± 11.1%
	795.86 <sup>c</sup>	0.0192 ± 2.2%	0.0045 ± 14.0%
<sup>228</sup> Ac	338.32 <sup>c</sup>	0.039 ± 6.0%	0.032 ± 6.0%
	911.20	0.021 ± 5.2%	0.017 ± 5.2%
	968.96	0.020 ± 5.9%	0.018 ± 5.9%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.02598 ± 0.8%	0.02605 ± 0.7%
<sup>208</sup> Tl	583.19 <sup>c</sup>	0.026 ± 5.5%	0.0087 ± 5.5%
	860.53 <sup>c</sup>	0.021 ± 11.1%	0.009 ± 11.1%
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.01630 ± 3.2%	0.0071 ± 7.1%
	1332.50 <sup>c</sup>	0.01505 ± 2.0%	0.0064 ± 7.0%
<sup>40</sup> K	1460.75	0.01502 ± 1.7%	0.01494 ± 1.3%
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	0.0235 ± 2.1%	0.0081 ± 2.1%
	1120.29 <sup>c</sup>	0.0166 ± 3.4%	0.0041 ± 6.0%
	1764.49	0.0148 ± 2.0%	0.0143 ± 1.9%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 4.22: Συγκεντρωτικές πειραματικές τιμές απόδοσης για τη γεωμετρία «2».

<sup>70</sup> Η απόδοση φωτοκορυφής του δείγματος διαιρείται με τον συντελεστή αυτό ώστε να προκύψει η ανηγμένη σε 4M HCl απόδοση.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>unSUP</sub>	Απόδοση <sub>SUP</sub>
<sup>234</sup> Th	63.29	0.133 ± 6.5%	0.132 ± 6.2%
<sup>212</sup> Pb	238.63	0.090 ± 2.5%	0.089 ± 2.6%
<sup>214</sup> Pb	295.22	0.057 ± 2.7%	0.057 ± 3.4%
	351.93	0.051 ± 2.3%	0.051 ± 2.3%
<sup>228</sup> Ac	338.32 <sup>c</sup>	0.059 ± 2.8%	0.049 ± 6.0%
	911.20	0.0322 ± 2.3%	0.025 ± 5.4%
	968.96	0.0314 ± 2.8%	0.024 ± 6.0%
<sup>208</sup> Tl	583.19 <sup>c</sup>	0.042 ± 3.0%	0.0133 ± 6.6%
	860.53 <sup>c</sup>	0.038 ± 5.8%	0.016 ± 17.8%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0463 ± 2.9%	0.0468 ± 3.3%
<sup>40</sup> K	1460.75	0.0277 ± 0.5%	0.0277 ± 0.6%
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	0.030 ± 3.9%	0.0098 ± 6.2%
	1120.29 <sup>c</sup>	0.0199 ± 4.5%	0.0047 ± 11.6%
	1764.49	0.0184 ± 2.6%	0.017 ± 6.3%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 4.23: Συγκεντρωτικές πειραματικές τιμές απόδοσης για τη γεωμετρία «5».**

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>unSUP</sub>	Απόδοση <sub>SUP</sub>
<sup>241</sup> Am	59.54	0.176 ± 4.0%	0.180 ± 3.3%
<sup>234</sup> Th	63.29	0.19 ± 7.5%	0.17 ± 8.0%
<sup>133</sup> Ba	302.85 <sup>c</sup>	0.056 ± 20.3%	0.059 ± 11.2%
	356.01 <sup>c</sup>	0.064 ± 5.5%	0.061 ± 4.6%
<sup>134</sup> Cs	604.72 <sup>c</sup>	0.048 ± 3.4%	0.017 ± 4.2%
	795.86 <sup>c</sup>	0.041 ± 5.1%	0.014 ± 4.8%
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0592 ± 4.0%	0.0600 ± 3.3%
<sup>152</sup> Eu	121.78 <sup>c</sup>	0.109 ± 2.4%	0.045 ± 4.0%
	344.28 <sup>c</sup>	0.079 ± 5.3%	0.046 ± 4.5%
	778.90 <sup>c</sup>	0.040 ± 8.2%	0.011 ± 15.0%
	1408.01 <sup>c</sup>	0.025 ± 7.8%	0.025 ± 5.4%
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.0339 ± 1.7%	0.0158 ± 1.9%
	1332.50 <sup>c</sup>	0.0317 ± 2.2%	0.0142 ± 2.7%
<sup>40</sup> K	1460.75	0.0342 ± 0.6%	0.0341 ± 0.6%

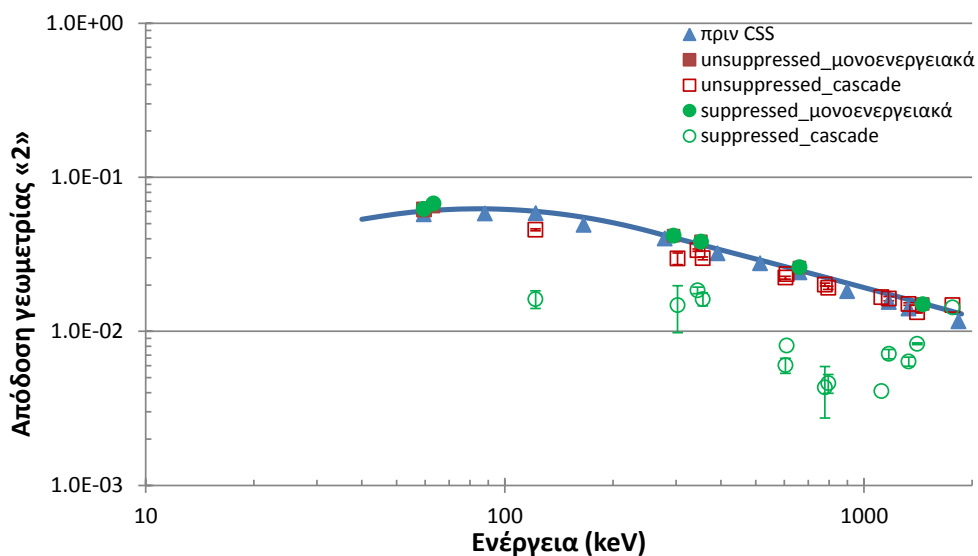
<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 4.24: Συγκεντρωτικές πειραματικές τιμές απόδοσης για τη γεωμετρία «8».**

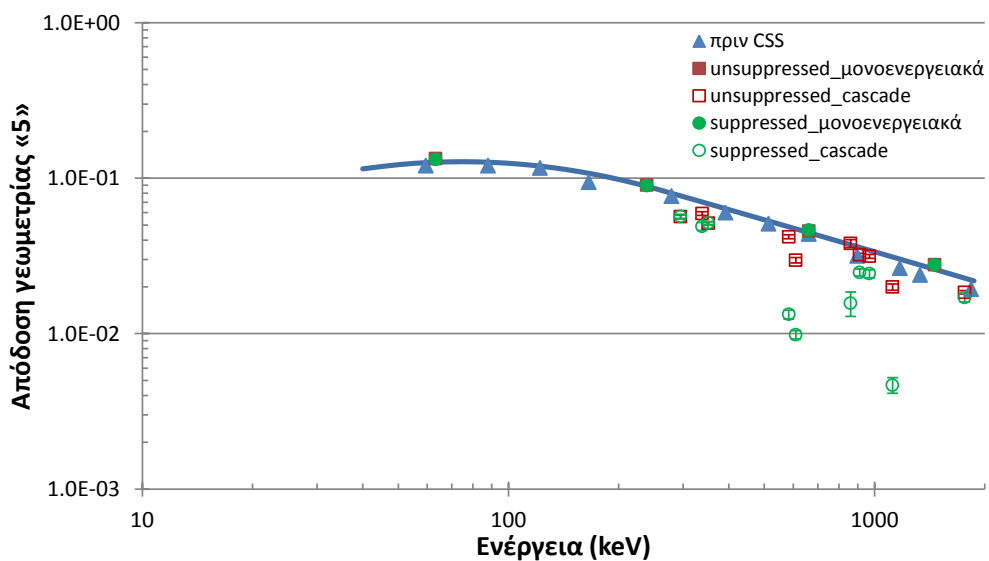
Σκόπιμο είναι οι πειραματικές τιμές απόδοσης που προσδιορίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία να συγκριθούν με την ισχύουσα – πριν από την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression – καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa. Η εν λόγω καμπύλη προσδιορίστηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Καράγγελος, 2008) και διορθώθηκε για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης<sup>71</sup> στη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012). Στις Εικόνες 4.1, 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται σε μορφή

<sup>71</sup> Στην πραγματικότητα, αυτό που διορθώθηκε ήταν οι πειραματικές τιμές της απόδοσης, όπου υπήρχε επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, και στη συνέχεια ακολούθησε η κατάλληλη προσαρμογή για τον προσδιορισμό των καμπυλών βαθμονόμησης απόδοσης.

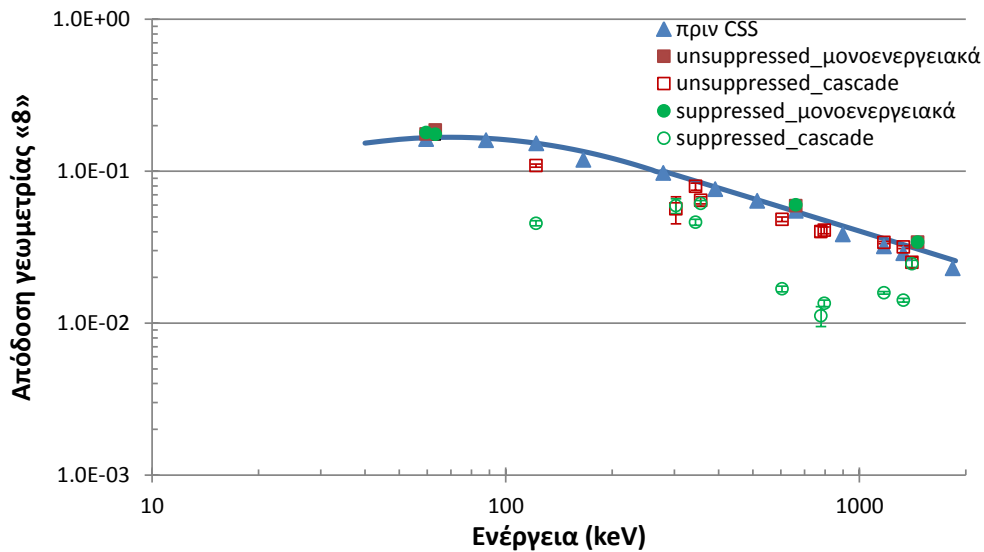
διαγράμματος οι πειραματικές τιμές αποδόσεις για τις τυπικές γεωμετρίες όγκου «2», «5» και «8», αντίστοιχα, σε σύγκριση με την καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression, διορθωμένη για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence). Μολονότι η καμπύλη απόδοσης που παρουσιάζεται στα γραφήματα αυτά είναι διορθωμένη για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία (μπλε τρίγωνα) που παρουσιάζονται δεν είναι διορθωμένα έτσι ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμα με το πειραματικά σημεία της παρούσας Δ.Δ., στα οποία επίσης δεν έχουν εφαρμοστεί διορθώσεις για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα πειραματικής απόδοσης διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «2».



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα πειραματικής απόδοσης διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «5».



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα πειραματικής απόδοσης διάταξης ΧtRa - CSS για τη γεωμετρία «8».

Από τα διαγράμματα σύγκρισης των νέων πειραματικών τιμών απόδοσης, μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression με την καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή ΧtRa πριν την εγκατάσταση, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, στο unsuppressed φάσμα οδηγούν σε υποεκτίμηση της απόδοσης, εάν δεν ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence).
- Οι πειραματικές αποδόσεις που προσδιορίζονται για τα μονοενεργειακά ισότοπα είναι ελαφρώς υψηλότερες σε σχέση με την ισχύουσα καμπύλη βαθμονόμησης, ανάλογα με τη γεωμετρία, γεγονός που οφείλεται στην μετακίνηση του καλύμματος του ανιχνευτή ΧtRa κατά την εγκατάσταση του νέου συστήματος (Κεφάλαιο 2) με αποτέλεσμα να αλλάξει ελαφρά η σχετική θέση πηγής - ανιχνευτή.
- Αναφορικά με τα πολυενεργειακά ισότοπα στο suppressed φάσμα, είναι εμφανής η απόκλισή τους από την καμπύλη βαθμονόμησης, γεγονός που αναμενόταν. Ο λόγος είναι ότι η απόκριση του συστήματος Compton Suppression κατά την ανάλυση ενός τέτοιου ισοτόπου εξαρτάται από το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου.

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός νέων καμπυλών βαθμονόμησης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για κάθε χρησιμοποιούμενη γεωμετρία και κάθε τρόπο λειτουργίας. Οι καμπύλες αυτές στο unsuppressed φάσμα (συμβατικός τρόπος λειτουργίας, ανιχνευτής «4») θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλα τα ισότοπα – με τις κατάλληλες διορθώσεις κατά την ανάλυση ισοτόπων που υπόκεινται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης – ενώ για το suppressed φάσμα (λειτουργία σε αντί-σύμπτωση, ανιχνευτής «14») θα ισχύουν μόνο για τα μονοενεργειακά ισότοπα, και εν γένει για φωτόνια που δεν εκπέμπονται σε σειρά. Για το suppressed φάσμα και για ισότοπα που εκπέμπουν σε σειρά θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο τα αντίστοιχα πειραματικά σημεία, τα οποία έχουν προσδιορισθεί με τα ίδια ισότοπα.

#### 4.4 Καμπύλες βαθμονόμησης διάταξης XtRa - CSS

Όπως φάνηκε από την προηγούμενη Παράγραφο, η χρήση των διαθέσιμων στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. πηγών δεν οδηγεί σε επαρκές πλήθος φωτοκορυφών – ειδικά στην περιοχή ενεργειών κάτω από 200 keV – ώστε να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης για τους δύο τρόπους λειτουργίας της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS (unsuppressed φάσμα για όλα τα ισότοπα και suppressed μόνο για τα μονοενεργειακά). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι οι πειραματικές τιμές της απόδοσης, μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression είναι ελαφρώς αυξημένες, σε σχέση με τις μέχρι τότε ισχύουσες καμπύλες. Ως εκ τούτου, για τον προσδιορισμό της νέας καμπύλης βαθμονόμησης επιλέχθηκε, εκτός των διαθέσιμων πειραματικών σημείων απόδοσης, να γίνει εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής για επιπλέον ενέργειες με μεθόδους μεταφοράς απόδοσης.

Με σκοπό την καλύτερη μελέτη της επίδρασης της αλλαγής της σχετικής θέσης ανιχνευτή – δείγματος μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression, και την εκτίμηση της ποσοστιαίας αύξησης στην απόδοση φωτοκορυφής, έγινε σύγκριση φασμάτων τα οποία ελήφθησαν με τις ίδιες πηγές, πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression. Συγκεκριμένα, για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν φάσματα των πηγών που

παρασκευάστηκαν στο πλαίσιο Άσκησης Διασύγκρισης<sup>72</sup>. Στον Πίνακα 4.25 δίνονται οι τιμές της απόδοσης<sup>73</sup> όπως εκτιμήθηκαν πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression (unsuppressed φάσμα), η ποσοστιαία απόκλιση τους, καθώς και η μέση τιμή της απόκλισης για κάθε γεωμετρία όγκου. Όπως διαπιστώνεται, σε κάθε περίπτωση η απόδοση μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression είναι υψηλότερη.

Γεωμετρία	Ενέργεια (keV)	Απόδοση <sub>πριν</sub>	Απόδοση <sub>μετά</sub>	Απόκλιση	Μέση τιμή απόκλισης
«2»	59.54	0.0592 ± 1.5%	0.062 ± 1.5%	4.5%	4.1%
	88.01	0.061 ± 2.7%	0.065 ± 2.5%	6.6%	
	661.62	0.0250 ± 1.1%	0.0260 ± 1.0%	4.0%	
	1173.24	0.0159 ± 1.1%	0.0164 ± 1.1%	2.6%	
	1332.50	0.0148 ± 1.1%	0.0152 ± 1.1%	2.9%	
«5»	59.54	0.126 ± 1.3%	0.130 ± 1.3%	3.4%	3.1%
	88.01	0.129 ± 2.4%	0.132 ± 2.3%	1.8%	
	661.62	0.0459 ± 1.0%	0.0478 ± 1.0%	4.3%	
	1173.24	0.0274 ± 1.1%	0.0283 ± 1.1%	3.1%	
	1332.50	0.0251 ± 1.1%	0.0258 ± 1.1%	3.1%	
«8»	59.54	0.177 ± 1.3%	0.183 ± 1.3%	3.4%	3.0%
	88.01	0.177 ± 2.6%	0.184 ± 2.4%	3.8%	
	661.62	0.0597 ± 1.1%	0.0627 ± 1.1%	4.8%	
	1173.24	0.0346 ± 1.1%	0.0350 ± 1.1%	1.2%	
	1332.50	0.0315 ± 1.1%	0.0321 ± 1.1%	2.1%	

Πίνακας 4.25: Αποδόσεις φωτοκορυφής πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.

Για την εκτίμηση των νέων καμπυλών απόδοσης αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν:

- Τα διαθέσιμα πειραματικά σημεία, για κάθε γεωμετρία, από τους Πίνακες 4.22, 4.23 και 4.24. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν φωτόνια που δεν συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence), καθώς και τα φωτόνια του <sup>60</sup>Co, μετά από κατάλληλες διορθώσεις.
- Για τις ενέργειες για τις οποίες δεν διατίθεντο πειραματικά σημεία, η απόδοση εκτιμήθηκε από την ισχύουσα καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης για κάθε

<sup>72</sup> Άσκηση Διασύγκρισης της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε.) το 2006. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012).

<sup>73</sup> Οι τιμές αυτές της απόδοσης δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, καθώς η ραδιενέργεια των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν ελέγχεται ως προς τη ακρίβειά της.

γεωμετρία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.26<sup>74</sup>, με αύξησή της κατά ποσοστό ίσο με τη μέση τιμή της απόκλισης του Πίνακα 4.25 για κάθε γεωμετρία.

Στα σημεία που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία, προσαρμόζονται δύο συναρτήσεις αναδρομής της μορφής:

$$\ln(\text{efficiency}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(E) + \alpha_2 \cdot \ln(E)^2 \quad \text{Σχέση (4.3)}$$

με διαχωριστικό σημείο (midpoint) στην ενέργεια 279.19 keV, καθώς – όπως έχει προκύψει από μακροχρόνια εμπειρία στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. – η επιλογή αυτής της μορφής καμπυλών και αυτού του διαχωριστικού σημείου οδηγεί σε ικανοποιητική προσαρμογή στα διαθέσιμα σημεία.

Στον Πίνακα 4.27 δίνονται οι συντελεστές των καμπυλών βαθμονόμησης για τις τρεις γεωμετρίες όγκου που συνήθως χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., όπως προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία.

	Γεωμετρία «2»		Γεωμετρία «5»		Γεωμετρία «8»	
	< 279.19 keV	> 279.19 keV	< 279.19 keV	> 279.19 keV	< 279.19 keV	> 279.19 keV
$\alpha_0$	-8.5561E+00	1.4918E+00	-7.5517E+00	1.0127E+00	-6.9623E+00	1.4918E+00
$\alpha_1$	2.5868E+00	-6.4444E-01	2.5233E+00	-5.9786E-01	2.4383E+00	-6.4444E-01
$\alpha_2$	-2.9125E-01	-5.2333E-03	-2.9135E-01	-6.4029E-03	-2.8725E-01	-5.2333E-03
RMS	1.98%	1.23%	3.12%	1.77%	4.29%	2.95%
R	0.9753	0.9997	0.9941	0.9994	0.9912	0.9986

Πίνακας 4.26: Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression (Καρφόπουλος, 2012).

	Γεωμετρία «2»		Γεωμετρία «5»		Γεωμετρία «8»	
	< 279.19 keV	> 279.19 keV	< 279.19 keV	> 279.19 keV	< 279.19 keV	> 279.19 keV
$\alpha_0$	-7.1736E+00	-1.7998E-00	-7.3258E+00	2.4849E+00	-4.8486E+00	-4.3777E-01
$\alpha_1$	2.0519E+00	4.2787E-02	2.4155E+00	-1.0779E-00	1.5900E+00	-7.1901E-02
$\alpha_2$	-2.3822E-01	-5.0849E-02	-2.7742E-01	3.3488E-02	-2.0113E-01	-4.4862E-02
RMS	1.59%	2.60%	1.05%	1.55%	1.92%	3.33%
R	0.9940	0.9958	0.9963	0.9989	0.9939	0.9909

Πίνακας 4.27: Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression.

Συγκεντρωτικά, στις Εικόνες 4.4, 4.5 και 4.6 δίνονται σε μορφή γραφήματος συναρτήσεων της ενέργειας, οι καμπύλες βαθμονόμησης για τις γεωμετρίες «2», «5» και «8», αντίστοιχα, καθώς και τα πειραματικά σημεία από τα οποία έχουν προκύψει. Στον Πίνακα 4.28 δίνονται οι αποκλίσεις των αποδόσεων που έχουν προκύψει από τα πειραματικά σημεία, από τις αντίστοιχες τιμές απόδοσης που

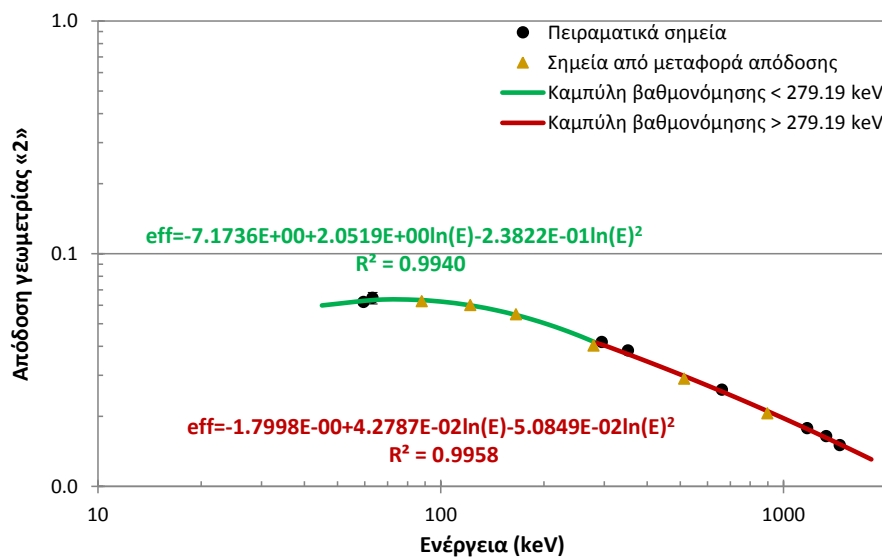
<sup>74</sup> Υπενθυμίζεται ότι οι ισχύουσες καμπύλες βαθμονόμησης προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012) και έχουν παραχθεί με πειραματικά σημεία τα οποία έχουν υποστεί διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence).



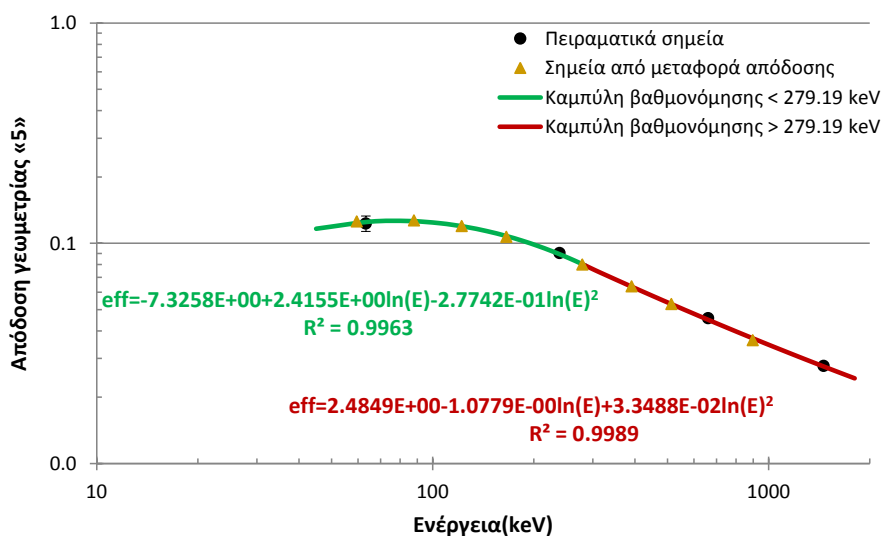
υπολογίζονται από τις καμπύλες. Σημειώνεται ότι για την περίπτωση του  $^{60}\text{Co}$  έχουν πραγματοποιηθεί διορθώσεις για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012).

Ενέργεια (keV)	Γεωμετρία «2»		Γεωμετρία «5»		Γεωμετρία «8»	
	απόκλιση	U	απόκλιση	U	απόκλιση	U
59.54	-1.5%	0.449	--		-2.1%	0.469
63.29	+1.9%	0.324	-1.6%	0.198	+2.9%	0.269
238.63	--		+0.9%	0.321	--	
295.22	+2.4%	0.688	--		--	
351.93	+3.4%	1.122	--		--	
661.62	+1.6%	0.603	+1.7%	0.512	+2.4%	0.688
1173.24	+0.8%	0.207	--		+0.4%	0.104
1332.50	+1.6%	0.485	--		+1.9%	0.483
1460.75	-1.1%	0.338	+0.6%	0.398	-1.7%	0.491

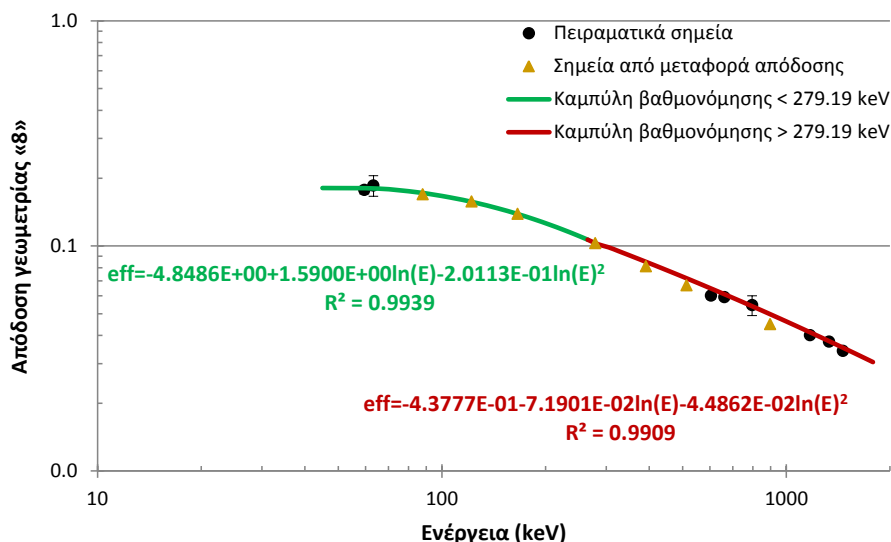
Πίνακας 4.28: Σύγκριση πειραματικών σημείων απόδοσης με τις καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης.



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα πειραματικής απόδοσης διάταξης ΧtRa - CSS για τη γεωμετρία «2».



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα πειραματικής απόδοσης διάταξης ΧtRa - CSS για τη γεωμετρία «5».



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα πειραματικής απόδοσης διάταξης ΧtRa - CSS για τη γεωμετρία «8».

Όπως φαίνεται, τόσο από τον Πίνακα 4.28, όσο και από τα διαγράμματα, δεν παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στις νέες καμπύλες βαθμονόμησης και τα πειραματικά σημεία. Ως εκ τούτου, υιοθετούνται οι καμπύλες βαθμονόμησης που περιγράφονται στον Πίνακα 4.27, για τις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου «2», «5» και «8» και οι οποίες για το μεν unsuppressed φάσμα (ανιχνευτής «4») θα χρησιμοποιούνται για όλα τα ισότοπα – με τις κατάλληλες διορθώσεις κατά την ανάλυση ισωτόπων που υπόκεινται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης – ενώ για το suppressed φάσμα (ανιχνευτής «14») θα χρησιμοποιούνται μόνο για τα μονοενεργειακά ισότοπα, και εν γένει για φωτόνια που δεν εκπέμπονται σε σειρά.

#### 4.5 Κατώτερα όρια ανίχνευσης

Μετά τον προσδιορισμό των καμπυλών βαθμονόμησης απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS είναι δυνατός ο υπολογισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας, M.D.A., σύμφωνα με τη Σχέση (3.5). Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα κατώτερα όρια ανίχνευσης σε όρους M.D.A και για τους δύο τρόπους λειτουργίας της ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS (unsuppressed και suppressed) για μία σειρά από ισότοπα, με σκοπό να καλύπτονται όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις, όπως:

- να ανιχνεύονται ή όχι στο διακριτό υπόστρωμα
- να είναι μονοενεργειακά ή να εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά
- να είναι φυσικής ή τεχνητής προέλευσης
- οι ενέργειες των φωτονίων να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού φάσματος

Υπενθυμίζεται ότι το κατώτερο όριο ανίχνευσης εξαρτάται από το υπό ανάλυση δείγμα και τα επίπεδα του συνεχούς υποστρώματος κατά την ανάλυσή του, όπως φαίνεται και από τη σχέση υπολογισμού του – Σχέση (3.4). Για το λόγο αυτό τα επίπεδα ανίχνευσης υπολογίσθηκαν για δύο τύπους δειγμάτων που συνήθως αναλύονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.: για τυπικό δείγμα χώματος με μέσα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας και για φίλτρο ατμοσφαιρικού αεροζόλ με πολύ χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Στους Πίνακες 4.29 και 4.30 δίνονται τα κατώτερα όρια ανίχνευσης σε όρους Μ.Δ.Α. Σημειώνεται ότι για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά και προσδιορίζονται από το suppressed φάσμα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί πειραματική τιμή της απόδοσης για κάθε φωτόνιο. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός του Μ.Δ.Α. έγινε μόνο για ισότοπα που υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την απόδοση φωτοκορυφής.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	M.D.A. <sup>unsup</sup> (Bq/kg)	M.D.A. <sup>sup</sup> (Bq/kg)
<sup>210</sup> Pb	46.52	4.13	3.48
<sup>241</sup> Am	59.54	0.46	0.38
<sup>234</sup> Th	63.29	5.29	4.33
<sup>214</sup> Pb	351.93	0.61	0.35
<sup>7</sup> Be	477.62	1.90	0.80
<sup>214</sup> Bi	609.31 <sup>c</sup>	0.63	1.14
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.21	0.10
<sup>54</sup> Mn	834.85	0.26	0.11
<sup>228</sup> Ac	911.07	1.09	0.84
<sup>228</sup> Ac	968.90	2.03	1.57
<sup>65</sup> Zn	1115.54	0.66	0.32
<sup>60</sup> Co	1173.24 <sup>c</sup>	0.50	0.60
<sup>60</sup> Co	1332.50 <sup>c</sup>	0.36	0.58
<sup>40</sup> K	1460.75	5.16	5.26
<sup>214</sup> Bi	1764.49	1.89	1.60

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 4.29: Κατώτερη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS για τυπικό δείγμα χώματος γεωμετρίας «2».**

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	M.D.A. <sub>un<sup>sup</sup></sub> (μBq/m <sup>3</sup> )	M.D.A. <sub>sup</sub> (μBq/m <sup>3</sup> )
<sup>131</sup> I	364.50	17	9
<sup>7</sup> Be	477.60	141	88
<sup>137</sup> Cs	661.62	18	10

Πίνακας 4.30: Κατώτερη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS για τυπικό δείγμα ατμοσφαιρικού αεροζόλ γεωμετρίας «10»<sup>75</sup>.

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης που παρουσιάσθηκε στο Κεφάλαιο 3, επιβεβαιώνονται και από τα κατώτερα όρια ανίχνευσης των Πινάκων αυτών. Για τα ισότοπα τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, το κατώτερο όριο ανίχνευσης στο suppressed φάσμα είναι υψηλότερο από ότι στο unsuppressed, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει για τα ισότοπα τα οποία δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά. Επίσης διαπιστώνεται ότι για τα μονοενεργειακά ισότοπα τα οποία δεν ανιχνεύονται στο υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης (<sup>7</sup>Be, <sup>137</sup>Cs, <sup>54</sup>Mn και <sup>65</sup>Zn) η βελτίωση του M.D.A. είναι της τάξης του 2, με εξαίρεση το <sup>241</sup>Am, το οποίο όμως ανιχνεύεται στην περιοχή χαμηλών ενεργειών όπου η βελτίωση που εισάγει το σύστημα Compton Suppression είναι μικρή, όπως έχει καταδειχθεί και στο Κεφάλαιο 3. Αντίθετα, για τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται στο υπόστρωμα της διάταξης, δεν παρατηρείται σημαντική βελτίωση του M.D.A. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης για τα ισότοπα αυτά εξαρτάται πρωτίστως από την κύμανση αυτής καθεαυτής της φωτοκορυφής του υποστρώματος και δευτερευόντως από το συνεχές υπόστρωμα.

<sup>75</sup> Οι τυπικές συνθήκες αναφέρονται σε δειγματοληψία διάρκειας 12 h και συνολικού όγκου αέρα ~ 1000 m<sup>3</sup> και στη συνέχεια γ-φασματοσκοπική ανάλυση διάρκειας 48 h.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## *Προσομοίωση του συστήματος Compton Suppression με τη μέθοδο Monte Carlo*

---

### 5.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτικού συστήματος XtRa - CSS, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στις τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo και την εφαρμογή τους στη  $\gamma$ -φασματοσκοπία και παρουσιάζεται ο κώδικας Monte Carlo PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Στη συνέχεια, περιγράφεται συνοπτικά η τροποποίηση του κώδικα ώστε να συμπεριληφθεί στη λειτουργία του το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (True Coincidence) και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του τροποποιημένου κώδικα με πειραματικά αποτελέσματα. Η τροποποίηση αυτή έγινε στο πλαίσιο Διπλωματικής Εργασίας η οποία εκπονήθηκε παράλληλα με τη Διδακτορική Διατριβή. Στο πλαίσιο της Δ.Δ. ο κώδικας τροποποιήθηκε περαιτέρω, με σκοπό την εισαγωγή σε αυτόν της δυνατότητας προσομοίωσης δύο ανιχνευτών, οι οποίοι να επικοινωνούν μεταξύ τους, όπως συμβαίνει στο σύστημα Compton Suppression. Ο τροποποιημένος κώδικας που λαμβάνει υπόψη, τόσο το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, όσο και τη χρήση ενεργητικής θωράκισης, συγκρίνεται με πειραματικά αποτελέσματα, αξιολογείται και τελικά χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση απόδοσης του νέου ανιχνευτικού συστήματος και για τους δύο τρόπους λειτουργίας, δηλαδή συμβατικά (unsuppressed φάσμα) και σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα).

## 5.2 Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo

Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo αποτελεί μία αριθμητική μέθοδο επίλυσης προβλημάτων που στηρίζεται σε τεχνικές τυχαίες δειγματοληψίας. Ο τρόπος λειτουργίας της μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχος με τη ρίψη ενός ζαριού σε ένα παιχνίδι τύχης. Δεν είναι άλλωστε τυχαία η επιλογή της ονομασίας, καθώς προέρχεται από το καζίνο του Μόντε Κάρλο στο Μονακό.

Οι τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo συχνά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολιών με την ύλη, λόγω της στοχαστικής φύσης τους. Η προσομοίωση τέτοιων προβλημάτων συνίσταται στην παραγωγή και παρακολούθηση τυχαίων ιστοριών μεμονωμένων σωματιδίων και την καταγραφή των μέσων τιμών των εξεταζόμενων μεγεθών, όπως για παράδειγμα η εμβέλεια των σωματιδίων μέσα σε ένα υλικό. Η ιστορία ενός σωματιδίου ή φωτονίου το οποίο αλληλεπιδρά με την ύλη περιγράφεται από στοχαστικές μεταβλητές, όπως το είδος της αλληλεπίδρασης, η αποτιθέμενη ενέργεια, η διεύθυνση της τροχιάς μετά την αλληλεπίδραση κλπ. Τηρώντας τους φυσικούς νόμους καθώς και τους μηχανισμούς που διέπουν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, η μέθοδος Monte Carlo προσομοιώνει την ιστορία ενός σωματιδίου ή φωτονίου, η οποία ξεκινάει ως μία ελεύθερη διαδρομή στον τρισδιάστατο χώρο, όπου για τυχαίους λόγους μπορεί – ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής του με την ύλη – να αλλάξει κατεύθυνση κίνησης, να χάσει ένα μέρος ή και ολόκληρη την αρχική του ενέργεια, με συνέπεια την παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων ή φωτονίων. Η παραγωγή των τυχαίων ιστοριών στηρίζεται στη διαδικασία στατιστικής δειγματοληψίας και υλοποιείται με την επιλογή τυχαίων αριθμών, χρησιμοποιώντας κατάλληλη γεννήτρια. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για μεγάλο αριθμό ιστοριών και οι υπολογιζόμενες μέσες τιμές των μεγεθών που ενδιαφέρουν, προσεγγίζουν ικανοποιητικότερα την πραγματική τιμή τους, όσο το πλήθος των ιστοριών που προσομοιώνονται αυξάνεται. Παράλληλα, μειώνεται και η τυχαία αβεβαιότητα που τις συνοδεύει, καθώς η τιμή της είναι ανάλογη του αντίστροφου της ρίζας του πλήθους των ιστοριών (Sobol, 1994).

Με βάση τη λογική αυτή έχουν αναπτυχθεί διάφοροι κώδικες προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ύλη, όπως οι: EGS4 (Nelson, et al., 1985), ETRAN (Berger, et al., 1988), ITS3 (Halbleib, et al., 1992), EGSnrc (Kawrakow, et al., 2000), GEANT (Brun, et al., 1987), MCNP (Briesmeister, 1997). Στο πλαίσιο της Δ.Δ. χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας PENELOPE (Baro, et al., 1995), ο οποίος θα παρουσιασθεί στην Παράγραφο 5.3.

### **5.2.1 Η χρησιμότητα της προσομοίωσης Monte Carlo σε εφαρμογές γ-φασματοσκοπίας**

Η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση διάφορων προβλημάτων που αφορούν στην αλληλεπίδραση των ακτινοβολιών με την ύλη (Sima, et al., 2009). Μία σχετικά απλή αλλά πολύ χρήσιμη εφαρμογή τους, η οποία ξεκίνησε από τους (Wainio, et al., 1966), είναι η προσομοίωση ανιχνευτικών συστημάτων γ-φασματοσκοπίας με ανιχνευτές HPGe. Σήμερα, η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές γ-φασματοσκοπίας, ειδικά για τη βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτικών διατάξεων και την επίλυση συναφών προβλημάτων, όπως αυτά που εισάγονται από διαφορές στη γεωμετρία, την πυκνότητα και τη σύσταση ενός δείγματος, σε σχέση με την πηγή βαθμονόμησης. Τέτοιου είδους διαφορές εισάγουν σημαντική αβεβαιότητα τύπου Β, κατά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενός ισότοπου στο δείγμα. Για παράδειγμα, η αυτοαπορρόφηση φωτονίων χαμηλών ενεργειών σε δείγματα χρώματος μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη από ότι σε υδατικά διαλύματα. Ιδανικά, για κάθε αναλυόμενο δείγμα πρέπει να χρησιμοποιείται πηγή βαθμονόμησης ίδιας σύστασης και γεωμετρίας. Καθώς όμως αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo (Wang, et al., 2002), (Sebastiao, et al., 2007), (Sima, et al., 2009).

Οι τεχνικές Monte Carlo δίνουν, επιπλέον, τη δυνατότητα προσομοίωσης διατάξεων με περισσότερους από έναν ανιχνευτές, όπως συμβαίνει στα συστήματα Compton Suppression (Kiang, et al., 1995), (Scates, et al., 2006), (Kulisek, et al., 2007), (Schumaker, et al., 2007), (McNamara, et al., 2012), (Britton, et al., 2013), (Han, et al., 2013), (Sima, et al., 2013). Η βαθμονόμηση τέτοιων συστημάτων, όπως τονίσθηκε και στο Κεφάλαιο 4, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη καθώς, η απόδοση

ανίχνευσης ενός φωτονίου εξαρτάται, όχι μόνο από την ενέργειά του, αλλά και από το σχήμα διάσπασης του αντίστοιχου ισοτόπου. Στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται στο παρόν Κεφάλαιο η βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης ΧtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. χρήσει τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo και ειδικότερα του κώδικα PENELOPE.

### 5.3 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE

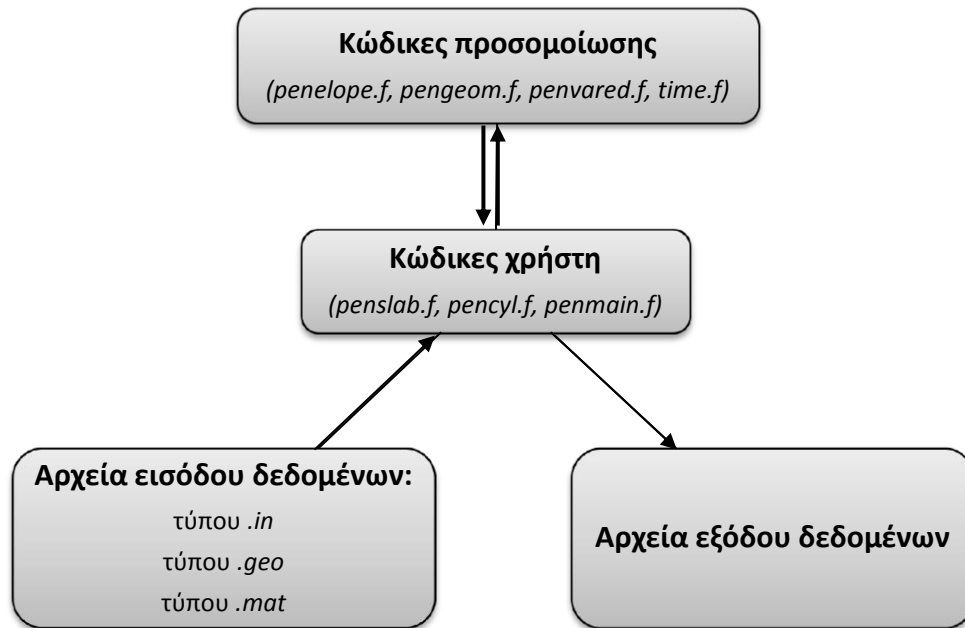
Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE (**PE**Netration and **E**nergy **LO**ss of **P**ositrons and **E**lectrons) αναπτύχθηκε το 1995 στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης και είναι γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN (Baro, et al., 1995). Ο εν λόγω κώδικας κατασκευάστηκε αρχικά με σκοπό την προσομοίωση ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, ενώ αργότερα προστέθηκε και η δυνατότητα προσομοίωσης φωτονίων (Sempau, et al., 1997). Κατά την πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί αρκετές εκδόσεις του κώδικα (2000, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2011 και 2014). Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. κατά την έναρξη της παρούσας Δ.Δ. ήταν σε χρήση η έκδοση του 2005 και αυτή είναι και η έκδοση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στη Δ.Δ.<sup>76</sup>. Στη συνέχεια, γίνεται μία επιγραμματική περιγραφή της λειτουργίας του κώδικα PENELOPE, ενώ λεπτομερέστερη περιγραφή μπορεί να αναζητηθεί στη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012).

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης του κώδικα PENELOPE στηρίζεται σε ένα μοντέλο διασποράς (scattering model) που συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων και αναλυτικά μοντέλα της ενεργού διατομής, για τους διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης. Βρίσκει εφαρμογή στην περίπτωση σωματιδίων ή φωτονίων με ενέργειες στην περιοχή από 50 eV έως 1 GeV. Ο κώδικας αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτίνων, ενταγμένων σε κώδικες προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα λειτουργίας του κώδικα στην Εικόνα 5.1.

---

<sup>76</sup> Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Δ.Δ. εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο και η έκδοση του 2008, η οποία περιλαμβάνει αρκετές πρόσθετες λειτουργίες που διευκολύνουν το χρήστη, χωρίς όμως να περιέχει τις λειτουργίες για τις οποίες τροποποιήθηκε η έκδοση του 2005.





Εικόνα 5.1: Διάγραμμα λειτουργίας κώδικα προσομοίωσης PENELOPE.

Οι κώδικες προσομοίωσης (*penelope.f*, *pengeom.f*, *penvared.f*, *material.f*, *timer.f*) περιέχουν τις υπορουτίνες προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις των ακτινοβολιών με την ύλη. Η περιγραφή του προς προσομοίωση προβλήματος γίνεται μέσω των αρχείων εισόδου του κώδικα. Αναφέρονται τρεις τύποι αρχείων εισόδου: αρχεία *.in*, αρχεία *.geo*, αρχεία *.mat*, μέσω των οποίων εισάγονται οι παράμετροι της προσομοίωσης (για παράδειγμα το είδος της ακτινοβολίας, η ενέργεια σωματιδίων ή φωτονίων), η γεωμετρία του προβλήματος και τα υλικά του προβλήματος, αντίστοιχα. Απαραίτητη συνιστώσα του κώδικα PENELOPE είναι ένας κώδικας χρήστη<sup>77</sup>, ο οποίος συνδέει τα αρχεία εισόδου δεδομένων με τους κώδικες προσομοίωσης, ελέγχει την πορεία της προσομοίωσης και καταγράφει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με ένα τρόπο που να είναι χρήσιμος στο χρήστη. Στην έκδοση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Δ.Δ. περιέχονταν τρεις κώδικες χρήστη: *penslab.f* (για επίπεδες πλάκες), *pencyl.f* (για απλές και σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές), και *penmain.f* (για σύνθετα προβλήματα πιο πολύπλοκης γεωμετρίας).

Σημειώνεται ότι σημαντικό πλεονέκτημα του κώδικα PENELOPE είναι και το γεγονός ότι όλα τα περιεχόμενα σε αυτόν προγράμματα και υπορουτίνες

<sup>77</sup> Ο κώδικας χρήστη (user code) κατασκευάζεται από το χρήστη και μέσω αυτού περιγράφεται το προς επίλυση πρόβλημα.

παρέχονται υπό τη μορφή ανοικτού κώδικα (open source), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο χρήστη να τα τροποποιήσει ανάλογα με τις ανάγκες των εφαρμογών του. Στο Παράρτημα Ε δίνεται αναλυτική περιγραφή του κώδικα PENELOPE.

Στις εφαρμογές της Δ.Δ. χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ο κώδικας χρήστη *penmain*, ο οποίος τροποποιήθηκε κατάλληλα, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Στις παραγράφους που ακολουθούν αρχικά παρουσιάζονται συνοπτικά:

- η λειτουργία των αρχείων εισόδου και εξόδου και των εικονικών ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα χρήστη *penmain*,
- η διαδικασία αξιοποίησης των αρχείων εξόδου του κώδικα χρήστη *penmain*, με σκοπό τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής ανιχνευτικής διάταξης, που αποτελεί και το μέγεθος σύγκρισης για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κώδικα, και
- η διαδικασία εκτίμησης του γεωμετρικού μοντέλου για την προσομοίωση μίας γ-ανιχνευτικής διάταξης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στην Παράγραφο 5.5.1 οι τροποποιήσεις που έγιναν στον κώδικα χρήστη *penmain*, με σκοπό την εισαγωγή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και στην Παράγραφο 5.5.2 η εισαγωγή της δυνατότητας προσομοίωσης συστήματος Compton Suppression.

### 5.3.1 Αρχεία εισόδου του κώδικα χρήστη *penmain*

Είναι σημαντικό ο χρήστης να γνωρίζει επακριβώς πως κατασκευάζονται τα αρχεία εισόδου και κάθε φορά να εισάγει σωστά τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά τα αρχεία εισόδου του κώδικα<sup>78</sup>.

- **Αρχείο τύπου .in** (Σχήμα 5.1 στο τέλος του Κεφαλαίου):

Σε αυτό το αρχείο ο χρήστης ορίζει κατά σειρά το όνομα της προσομοίωσης, τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που προσομοιώνεται (είδος, ενέργεια και θέση

<sup>78</sup> Στο πακέτο του κώδικα PENELOPE διατίθεται και εγχειρίδιο χρήσης στην αγγλική γλώσσα στο οποίο περιγράφεται η ακριβής δομή των αρχείων εισόδου, ενώ στη Δ.Ε. (Αθανασίου, 2006) παρουσιάζονται αναλυτικά, στην ελληνική γλώσσα, ο τρόπος κατασκευής όλων των αρχείων, καθώς και τα σημεία που παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή.

σημειακής πηγής ακτινοβολίας), το κατώτερο όριο ενέργειας μέχρι το οποίο παρακολουθεί ο κώδικας το σωματίδιο ή φωτόνιο (cut-off energy), καθώς και τα ονόματα των αρχείων υλικών και γεωμετρίας της προσομοίωσης. Επίσης, σε αυτό το αρχείο ο χρήστης ορίζει τους εικονικούς ανιχνευτές<sup>79</sup> που χρησιμοποιούνται, τα χαρακτηριστικά τους (ενεργειακό παράθυρο, κανάλια) και τέλος θέτει τις συνθήκες περάτωσης της προσομοίωσης (μέγιστο χρονικό διάστημα και μέγιστο πλήθος ιστοριών).

- **Αρχείο τύπου .geo** (Σχήμα 5.2 στο τέλος του Κεφαλαίου):

Σε αυτό το αρχείο ο χρήστης ορίζει τη γεωμετρία του συστήματος που εξετάζεται, μέσω των μαθηματικών εκφράσεων των επιφανειών από τις οποίες αποτελείται. Η δομή του αρχείου είναι προκαθορισμένη και πρέπει να τηρείται πιστά. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα συνδυάζοντας τις διάφορες επιφάνειες, να σχηματίσει σώματα (bodies) της διάταξης, όπως για παράδειγμα ο κρύσταλλος γερμανίου ενός ανιχνευτή HPGe. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εποπτείας της δημιουργίας του αρχείου γεωμετρίας σε όλα τα στάδιά της, μέσω δύο απεικονιστικών προγραμμάτων σε δύο και στις τρεις διαστάσεις, το *gview2d* και το *gview3d*, αντίστοιχα.

- **Αρχείο τύπου .mat:**

Σε αυτό το αρχείο δηλώνονται τα υλικά των σωμάτων που συμμετέχουν στο σύστημα που προσομοιώνεται. Το αρχείο περιέχει τις φυσικές σταθερές και τις παραμέτρους που απαιτούνται για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με κάθε υλικό του συστήματος. Δημιουργείται με χρήση του προγράμματος *material*, το οποίο περιέχεται στα προγράμματα του κώδικα PENELOPE. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτοιμα υλικά τα οποία προϋπάρχουν σε βιβλιοθήκες του κώδικα PENELOPE ή να δημιουργηθούν από το χρήστη νέα, σύνθετα υλικά.

Το πρόγραμμα *material* κατασκευάζει ένα αρχείο για κάθε υλικό. Μετά την κατασκευή των αρχείων υλικών απαιτείται η δημιουργία ενός συνολικού αρχείου υλικών, το οποίο περιέχει τις απαραίτητες παραμέτρους για όλα τα υλικά και αποτελεί το αρχείο εισόδου υλικών τύπου *.mat*<sup>80</sup>. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται

---

<sup>79</sup> Περισσότερες λεπτομέρειες στην Παράγραφο 5.3.2.

<sup>80</sup> Αυτό ισχύει για την έκδοση του 2005. Στην έκδοση του 2008 τα αρχεία υλικών δηλώνονται με τη σειρά καθένα ξεχωριστά στο αρχείο εισόδου *.in*.

ότι η σειρά με την οποία εισάγονται τα μεμονωμένα αρχεία υλικών πρέπει να είναι ίδια με τη σειρά ορισμού των υλικών στο αρχείο γεωμετρίας *.geo*, καθώς καθορίζει το υλικό για κάθε σώμα της κατασκευής.

### 5.3.2 Εικονικοί ανιχνευτές του κώδικα χρήστη *penmain*

Το είδος των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από την προσομοίωση και ο τρόπος που αυτά χρησιμοποιούνται, καθορίζονται από τμήματα του κώδικα χρήστη τα οποία καλούνται εικονικοί ανιχνευτές. Μέσω των εικονικών ανιχνευτών ορίζονται τα μεγέθη που καταγράφονται στα αρχεία εξόδου. Ανάλογα με το εξεταζόμενο μέγεθος, χρησιμοποιούνται τρία είδη εικονικών ανιχνευτών:

- **Εικονικός ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector):**

Ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας καταγράφει – υπό μορφή ενεργειακού φάσματος – την ενέργεια που αποτίθεται από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων ή φωτονίων που προσομοιώνονται, σε συγκεκριμένο σώμα ή ομάδα σωμάτων της γεωμετρίας. Το σώμα, ή η ομάδα σωμάτων, πρέπει υποχρεωτικά να αποτελούν τμήμα του αρχείου γεωμετρίας *.geo*. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και 5 εικονικοί ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας.

- **Εικονικός ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (impact detector):**

Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης καταγράφει το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων που εισέρχονται σε μια περιοχή (σώμα ή ομάδα σωμάτων) της γεωμετρίας, ανεξάρτητα από το αν γίνεται αλληλεπίδραση εντός της συγκεκριμένης περιοχής. Επιπλέον, δύναται να καταγράψει και άλλα μεγέθη, χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας κατά την είσοδό της στην περιοχή του ανιχνευτή (για παράδειγμα το είδος της ακτινοβολίας, τη γωνία εισόδου κλπ). Το σώμα ή η ομάδα σωμάτων που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό του ανιχνευτή πρέπει να αποτελούν τμήμα του αρχείου γεωμετρίας *.geo*, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και 5 εικονικοί ανιχνευτές αλληλεπίδρασης.

- **Εικονικός ανιχνευτής δόσης (dose enclosure):**

Ο ανιχνευτής δόσης καταγράφει την απορροφόμενη δόση σε μία περιοχή της γεωμετρίας. Η περιοχή αυτή ορίζεται από πλέγμα ορθογωνικής διατομής, οι διαστάσεις του οποίου ορίζονται στο αρχείο εισόδου *.in* (γραμμές *DRIDX*, *GRIDY*,

GRIDZ και GRIDBN στο Σχήμα 5.1). Σημειώνεται ότι το πλέγμα ορίζεται ανεξάρτητα από το αρχείο γεωμετρίας *.geo* της προσομοίωσης.

### 5.3.3 Αρχεία εξόδου του κώδικα χρήστη *penmain*

Ο κώδικας χρήστη *penmain*, όπως διανέμεται με τον κώδικα PENELOPE, παράγει εικοσιένα (21) αρχεία εξόδου τα οποία περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης<sup>81</sup>. Περιλαμβάνουν τις τιμές των μεγεθών που έχουν ζητηθεί από το χρήστη, ενώ ενημερώνονται σε τακτά χρονικά διάστημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως ορίζεται από το χρήση στο αρχείο εισόδου *.in* (γραμμή DUMPP στο Σχήμα 5.1). Στη συνέχεια περιγράφονται δύο από τα αρχεία εξόδου δεδομένων του κώδικα χρήστη *penmain*, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Δ.Δ.

- **Το αρχείο εξόδου *penmain.dat*:**

Στο αρχείο αυτό συνοψίζονται όλα τα δεδομένα της προσομοίωσης και παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματά της. Το αρχείο αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρατίθενται τα δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης όπως ορίζονται από το χρήστη στα αρχεία εισόδου (Σχήμα 5.3 στο τέλος του Κεφαλαίου), ενώ στο δεύτερο μέρος, το οποίο συνεχώς ανανεώνεται με την εξέλιξη της προσομοίωσης, στοιχεία σχετικά με τα τρέχοντα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήμα 5.4 στο τέλος του Κεφαλαίου).

- **Το αρχείο εξόδου *pm\_spc\_enddet\_nn.dat*:**

Πρόκειται για το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector). Η μεταβλητή *nn* στο όνομα του αρχείου εξόδου δηλώνει τον αύξοντα αριθμό του χρησιμοποιούμενου εικονικού ανιχνευτή. Οι πληροφορίες του αρχείου εξόδου είναι κατανεμημένες σε τρεις στήλες (Σχήμα 5.5 στο τέλος του Κεφαλαίου). Στην πρώτη στήλη του αρχείου δίνεται το ενεργειακό παράθυρο (η μέση ενέργεια του εκάστοτε παραθύρου). Στη δεύτερη στήλη του αρχείου δίνεται η πιθανότητα απόθεσης ενέργειας εντός των ορίων του ενεργειακού παραθύρου, ανηγμένα στο πλήθος των ιστοριών και το εύρος του ενεργειακού παραθύρου  $dE$ <sup>82</sup>. Στην τρίτη στήλη δίνεται η αβεβαιότητα της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας στο κάθε ενεργειακό παράθυρο σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ.

<sup>81</sup> Αναλυτική περιγραφή των αρχείων εξόδου όλων των κωδίκων χρήστη του κώδικα PENELOPE μπορούν να αναζητηθούν στη Δ.Ε. (Αθανασίου, 2006).

<sup>82</sup> Πρόκειται ουσιαστικά για την πυκνότητα πιθανότητας (probability density – pdf).

### 5.3.4 Υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης

Στην περίπτωση που το προς επίλυση πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) ενός ανιχνευτή, για γεωμετρία πηγής τοποθετημένης κοντά σε αυτόν, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που καταγράφονται στο αρχείο εξόδου *pm\_spc\_enddet\_nn.dat*. Σε ένα  $\gamma$ -φάσμα, θεωρητικά, κάτω από μία φωτοκορυφή καταγράφονται μόνο τα φωτόνια τα οποία αποθέτουν όλη την αρχική τους ενέργεια στον ανιχνευτή. Στην πραγματικότητα όμως, καταγράφεται και ένα μικρό ποσοστό φωτονίων τα οποία έχουν υποστεί μικρή απώλεια ενέργειας, λόγω προηγούμενης αλληλεπίδρασης (π.χ. μέσα την πηγή), όπως για παράδειγμα φωτόνια χαμηλών ενεργειών ( $E < 100 \text{ keV}$ ) τα οποία έχουν υποστεί σκέδαση υπό πολύ μικρή γωνία<sup>83</sup>. Για τον ορθό υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα φωτόνια αυτά, καθώς είναι δυνατόν να καταγράφονται στη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης ενέργειας (Καρφόπουλος, 2012). Για το λόγο αυτό, η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης μέσω προσομοίωσης πρέπει να υπολογίζεται από την Σχέση:

$$\text{eff}_{\text{peak}} = \left( \sum_n \text{pdf}_i \right) \cdot dE \quad \text{Σχέση (5.1)}$$

όπου:

$\text{eff}_{\text{peak}}$  : η απόδοση φωτοκορυφής

$\text{pdf}_i$  : η πιθανότητα απόθεσης ενέργειας εντός των ορίων του ενεργειακού παραθύρου  $i$

$dE$  : το εύρος των χρησιμοποιούμενων ενεργειακών παραθύρων

$n$  : το πλήθος των ενεργειακών παραθύρων που πρέπει να αθροιστούν, ώστε να προκύψει η ενεργειακή περιοχή μέσα στην οποία καταγράφονται όλα τα φωτόνια τα οποία θα καταγράφονταν κάτω από την αντίστοιχη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης στο πραγματικό φάσμα. Δεδομένου ότι μία φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης πρακτικά οριοθετείται στην περιοχή [κεντροειδές  $\pm 1.5 \cdot \text{FWHM}$ ], η τιμή του  $n$  εξαρτάται από το εύρος ημίσειας

<sup>83</sup> Αυτό δημιουργεί μία πολύ μικρή – συνήθως ανεπαίσθητη – ασυμμετρία της φωτοκορυφής.

ύψους (FWHM) της ανιχνευτικής διάταξης, για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και δίνεται από τη Σχέση:

$$n = \frac{1.5 \cdot \text{FWHM}}{dE} \quad \text{Σχέση (5.2)}$$

Η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο  $1\sigma$  υπολογίζεται με εφαρμογή του νόμου διάδοσης σφαλμάτων και τις τιμές της αβεβαιότητας της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας (pdf) για κάθε ενεργειακό παράθυρο, από τη Σχέση:

$$\text{unc}_{\text{eff\_peak}} = \frac{\sqrt{\sum_n (\sigma_{\text{pdf}_i}^2) \cdot dE}}{3} \quad \text{Σχέση (5.3)}$$

όπου

$\text{unc}_{\text{eff\_peak}}$  : η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο  $1\sigma$

$\sigma_{\text{pdf}_i}^2$  : η απόλυτη αβεβαιότητα της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας (pdf) στο  $i$ -ενεργειακό παράθυρο

$n$  : πλήθος ενεργειακών καναλιών, όπως υπολογίζεται από τη Σχέση (5.2)

## 5.4 Εκτίμηση γεωμετρικού μοντέλου για προσομοίωση $\gamma$ -ανιχνευτικής διάταξης

Κατά την εφαρμογή της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo, είναι σκόπιμο πάντα να γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι πειραματικά προσδιορισθείσες τιμές της απόδοσης του ανιχνευτή. Με την παραδοχή ότι ο κώδικας προσομοίωσης προσομοιώνει αξιόπιστα την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη, οι στατιστικά σημαντικές αποκλίσεις που ενδεχομένως εμφανίζονται κατά τη σύγκριση αυτή είναι δυνατό να οφείλονται σε ακατάλληλη ή εσφαλμένη επιλογή των παραμέτρων της προσομοίωσης, ή σε ανεπαρκή αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου.

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επιλέγονται κατά την προσομοίωση είναι η γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή. Σύμφωνα μάλιστα με τη βιβλιογραφία, είναι η συχνότερα αναφερόμενη αιτία εμφάνισης αποκλίσεων, μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (Jurado Vargas, et al., 2006). Όπως έχει διαπιστωθεί (Rodenas, et al.,

2007), στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο προσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης καταλήγει σε υψηλότερες τιμές της απόδοσης, σε σχέση με τον πειραματικό, κάτι που μπορεί να αποδοθεί σε τρεις αιτίες:

- Την ελλιπή γνώση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή ή / και της πηγής. Ενδεικτικά αναφέρεται η διάμετρος του κρυστάλλου του ανιχνευτή, το πάχος του, οι διαστάσεις της εσωτερικής οπής (Rodenas, et al., 2007), (Boson, et al., 2008).
- Την ανομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του κρυστάλλου του ανιχνευτή (Bochud, et al., 2006). Εντός του κρυστάλλου δημιουργούνται περιοχές μειωμένης έντασης, στις οποίες ο χρόνος συλλογής των φορτίων είναι μεγαλύτερος, έχοντας ως συνέπεια την μερική συλλογή τους. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η απώλεια γεγονότων από τη φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης (Friedman, et al., 2001). Το φαινόμενο αυτό δεν παρακολουθείται από την προσομοίωση, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η απόδοση του ανιχνευτή.
- Την ύπαρξη ανενεργών ή νεκρών ζωνών στον κρύσταλλο του ανιχνευτή (dead layer) (Rodenas, et al., 2003). Ως dead layer θεωρείται το τμήμα του κρυστάλλου γερμανίου (Ge) στο οποίο εάν αποτεθεί ενέργεια από φωτόνια ή δευτερογενή ηλεκτρόνια, δεν καταγράφεται σήμα στο γ-φάσμα. Η ύπαρξή του οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται η ευαίσθητη περιοχή (intrinsic region) του ανιχνευτή.

Είναι κατά συνέπεια απαραίτητο η προσομοίωση να μην βασισθεί μόνον στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που είναι διαθέσιμα από τον κατασκευαστή. Για τον προσδιορισμό των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή μπορούν κατ' αρχήν να αξιοποιηθούν στοιχεία από το πιστοποιητικό του κατασκευαστή, κατασκευαστικά σχέδιά του, ενώ ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν και την τεχνική της ραδιογραφίας (Aaltonen, et al., 1994), (Friedman, et al., 2001), (Hurtado, et al., 2004), (Dryak, et al., 2006). Με τον τρόπο αυτό, εκτός από την επιβεβαίωση των βασικών διαστάσεων του ανιχνευτή, ελέγχεται και η ακριβής θέση του εντός του κρυστάτη, ενώ είναι δυνατό να προσδιοριστεί και η καμπυλότητα της άνω επιφάνειας του ανιχνευτή.



Ο προσδιορισμός του εύρους και του σχήματος των νεκρών περιοχών (dead layers) αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών εργασιών (Herold, et al., 1991), (Kamboj, et al., 1996), (Korun, et al., 1997), (Clouvas, et al., 1998), (Ashrafi, et al., 1999), (Ewa, et al., 2001), (Vidmar, et al., 2001), (Hardy, et al., 2002), (Karamanis, et al., 2002), (Laborie, et al., 2002), (Wang, et al., 2002), (Helmer, et al., 2003), (Rodenas, et al., 2003), (Hurtado, et al., 2004), (Sima, et al., 2004), (Maleka, et al., 2005), (Bochud, et al., 2006), (Huy, et al., 2007), (Peyres, et al., 2007). Σε αρκετές περιπτώσεις, οι κατασκευαστές των κρυστάλλων παρέχουν εκτίμηση του εύρους των νεκρών περιοχών (dead layers) στα πιστοποιητικά των ανιχνευτών. Ωστόσο, η αδυναμία απευθείας μέτρησης τους, η ενδεχόμενη ανομοιομορφία τους και το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά τους ενδεχομένως μεταβάλλονται με το χρόνο (γήρανση του κρυστάλλου) επιβάλλουν τον πειραματικό προσδιορισμό τους.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, για τη διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου του ανιχνευτή, ο προσδιορισμός των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κρυστάλλου, αλλά και το εύρος των νεκρών περιοχών του γίνεται παράλληλα. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, για τη διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου του ανιχνευτή, γίνεται προσαρμογή μόνο των νεκρών ζωνών, ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, οι όποιες ασάφειες στα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κρυστάλλου αλλά και η ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου αντισταθμίζονται από το πάχος και τη μορφή των νεκρών ζωνών. Για τον προσδιορισμό των διαστάσεων του γεωμετρικού μοντέλου έχουν αναπτυχθεί πειραματικές μέθοδοι προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή, οι οποίες στηρίζονται στη σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων και πειραματικών τιμών (Ludington, et al., 2000), (Nir-El, et al., 2001), (Karamanis, et al., 2002), (Rodenas, et al., 2003), (Helmer, 2003), (Sima, et al., 2004), (Peyres, et al., 2007). Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών γίνεται συνήθως με την ημιεμπειρική μέθοδο δοκιμής – απόρριψης (trial and error method) (Courtine, et al., 2008). Η μέθοδος εφαρμόζεται για φωτόνια που καλύπτουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο μέρος του εύρους λειτουργίας του ανιχνευτή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι, όπως προκύπτει από τις εφαρμογές της βιβλιογραφίας αλλά έχει μελετηθεί εκτενώς στη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012), ο

συνδυασμός των γεωμετρικών παραμέτρων που οδηγούν στην επιθυμητή σύγκλιση δεν είναι μοναδικός. Η εύρεση ενός γεωμετρικού μοντέλου, ολοκληρωμένου και ακριβούς για κάθε περίπτωση/γεωμετρία δεν είναι πάντοτε εφικτή.

Η μεθοδολογία επιλογής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. στηρίζεται στη μέθοδο δοκιμής – απόρριψης και αποτελείται εν συντομία από τα εξής βήματα (Agrafiotis, et al., 2011):

- Αρχικά, υιοθετούνται οι εξωτερικές διαστάσεις του ανιχνευτή που είναι διαθέσιμες από τον κατασκευαστή.
- Γίνεται υπόθεση για τις διαστάσεις των νεκρών ζωνών (dead layers) του ανιχνευτή με βάση άλλες εργασίες, άλλους ανιχνευτές ή άλλες παρόμοιες γεωμετρίες που έχουν ήδη μελετηθεί.
- Γίνεται προσομοίωση της ανιχνευτικής διάταξης με βάση την αρχική υπόθεση και από τα αποτελέσματά της υπολογίζεται η απόδοση φωτοκορυφής, η οποία συγκρίνεται με αντίστοιχες πειραματικές τιμές.
- Από τη σύγκριση και ανάλογα με την απόκλιση πειραματικών δεδομένων και δεδομένων προσομοίωσης, προκύπτει το αν και κατά πόσο θα πρέπει να τροποποιηθούν οι διαστάσεις της νεκρής ζώνης.
- Έτσι, προκύπτουν νέες διαστάσεις των dead layers και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι πειραματικές τιμές και εκείνες της προσομοίωσης να συγκλίνουν. Στη βιβλιογραφία, αποδεκτές θεωρούνται αποκλίσεις της τάξης του 1 – 3% (Schlager, 2007), αν και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν γίνει δεκτές και μεγαλύτερες αποκλίσεις, της τάξης του 5% (Liu, et al., 2006).

Η παραπάνω μεθοδολογία έχει εφαρμοσθεί για τον χαρακτηρισμό διάφορων ανιχνευτικών διατάξεων του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., οδηγώντας σε αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοίωσης μικρότερες από 3%:

- του ανιχνευτή HPGe (απόδοση 33%) (Βασιλοπούλου, 2008)
- του in-situ ανιχνευτή BEGe (Αγραφιώτης, 2010)
- του ανιχνευτή XtRa πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression (Καρφόπουλος, 2012)
- του ανιχνευτή HPGe (απόδοση 40%) (Παπαδιονυσίου, 2015)

Ειδικά για τον ανιχνευτή XtRa, ο οποίος αφορά στην υπόψη Δ.Δ., επισημαίνεται ότι διατίθεται αρκετά λεπτομερές κατασκευαστικό σχέδιο<sup>84</sup>, όπου παρέχονται οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις του κρυστάλλου (διάμετρος και μήκος) καθώς και οι διαστάσεις της εσωτερικής οπής και του παραθύρου του κρυστάτη<sup>85</sup>. Επίσης δίνονται στοιχεία για τις διαστάσεις του κρυστάτη και τη σχετική θέση του ανιχνευτή μέσα σε αυτόν, καθώς και μία εκτίμηση του εύρους της άνω νεκρής ζώνης του κρυστάλλου. Οι διαστάσεις αυτές των dead layers, με εφαρμογή της ημιεμπειρικής επαναληπτικής μεθόδου μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα, ώστε να οδηγούν σε επαρκή σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα της απόδοσης, για τις συνήθεις γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

## 5.5 Τροποποίηση του κώδικα χρήστη *penmain*

Όπως διαπιστώθηκε κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής της νέας ανιχνευτικής διάταξης (Κεφάλαιο 4), το πλήθος των διαθέσιμων πειραματικών σημείων δεν είναι επαρκές ώστε να μπορεί να προσδιορισθεί κατάλληλη πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο. Για να είναι όμως αυτό δυνατό στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να μπορούν να προσομοιωθούν:

- το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, δηλαδή η εκπομπή φωτονίων σε σειρά, καθώς αυτό το φαινόμενο έχει ιδιαίτερη σημασία σε μεγάλους ανιχνευτές όπως ο ανιχνευτής XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., και
- ο τρόπος λειτουργίας της ενεργητικής θωράκισης, δηλαδή η επικοινωνία των δύο ανιχνευτών (πρωτεύων και δευτερεύων).

Στον πρωτότυπο κώδικα χρήστη *penmain* δεν λαμβάνονται υπόψη τα παραπάνω και επομένως ήταν απαραίτητη η τροποποίησή του. Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις του πρωτότυπου κώδικα *penmain* με σκοπό την εισαγωγή των παραπάνω λειτουργιών.

<sup>84</sup> Σχήμα 5.9 στο τέλος του Κεφαλαίου

<sup>85</sup> Στο Σχήμα είναι επίσης εμφανής μία καμπυλότητα της άνω επιφάνειας του κρυστάλλου για την οποία, ωστόσο, δεν παρέχονται επιπλέον στοιχεία.

### 5.5.1 Τροποποίηση του κώδικα χρήστη *renmain* ώστε να περιλαμβάνει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης

Στο πλαίσιο της Δ.Ε. (Χιώνης, 2011), ο κώδικας χρήστη *renmain* του κώδικα PENELOPE (έκδοση 2005) τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να συμπεριληφθεί στη λειτουργία του το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, για ένα μικρό αριθμό ισοτόπων ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{57}\text{Co}$  και  $^{134}\text{Cs}$ ). Το λογικό διάγραμμα του τροποποιημένου σε αυτό το στάδιο κώδικα δίνεται στην Δ.Ε. (Χιώνης, 2011)<sup>86</sup>. Πρέπει στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι, κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ., η ομάδα που αναπτύσσει τον κώδικα PENELOPE εργαζόταν προς την κατεύθυνση της τροποποίησης του κώδικα, προκειμένου να αντιμετωπίζει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, χωρίς όμως να είναι διαθέσιμη έως σήμερα η σχετική νέα έκδοση του κώδικα.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η φιλοσοφία πάνω στην οποία βασίσθηκε η τροποποίηση του κυρίως κώδικα *renmain*, είναι απαραίτητη η υπενθύμιση ορισμένων στοιχείων για τον τρόπο λειτουργίας του. Στον πρωτότυπο κώδικα, η βασική λογική της προσομοίωσης εστιάζεται στη μεμονωμένη παρακολούθηση της πορείας ενός πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου μέσα στην ύλη. Στην πορεία αυτή περιλαμβάνονται τόσο οι αλληλεπιδράσεις του πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου, όσο και εκείνες που πραγματοποιούν τα παραγόμενα δευτερογενή σωματίδια. Η πορεία αυτή χαρακτηρίζεται ως μία ιστορία (*shower*). Προκειμένου να μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά την προσομοίωση και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, η έννοια της «ιστορίας» μέσα στον κώδικα έπρεπε να αλλάξει. Στον τροποποιημένο κώδικα ως ιστορία (*shower*) θεωρείται η διάσπαση και η πλήρης αποδιέγερση ενός ραδιενεργού πυρήνα. Προσομοιώνεται, με άλλα λόγια, η εξέλιξη της πορείας περισσότερων του ενός φωτονίων, τα οποία εκπέμπονται μετά από τη διάσπαση ενός πυρήνα και τα οποία ανήκουν στον ίδιο κλάδο διάσπασης του υπόψη ισοτόπου.

<sup>86</sup> Η εργασία παρουσιάστηκε στο “8<sup>th</sup> CHERNE Workshop”, Αθήνα, 28 – 30 Μαΐου 2012 και έχει δημοσιευθεί στο περιοδικό Nuclear Technology & Radiation Protection (Chionis, et al., 2014).

Για να γίνει πιο κατανοητή η νέα έννοια της ιστορίας (shower) στον τροποποιημένο κώδικα, αναφέρεται η περίπτωση του ισότοπου  $^{60}\text{Co}$ , το οποίο εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά, στις ενέργειες 1173.24 keV και 1332.50 keV, με μικρή χρονική διαφορά<sup>87</sup> – πρακτικά ταυτόχρονα. Κατά την προσομοίωση του ισότοπου  $^{60}\text{Co}$  με χρήση του τροποποιημένου κώδικα *penmain*, παρακολουθείται αρχικά η πορεία του πρώτου φωτονίου, ενέργειας 1173.24 keV, και στη συνέχεια προσομοιώνεται και το δεύτερο φωτόνιο, ενέργειας 1332.50 keV. Τα μεγέθη που καταγράφονται στα αρχεία αποτελεσμάτων αναφέρονται στις αλληλεπιδράσεις και των δύο φωτονίων – τα οποία θεωρείται ότι εκπέμπονται ταυτόχρονα – και εντέλει στη διάσπαση ενός πυρήνα  $^{60}\text{Co}$ .

Σημειώνεται ότι για την εισαγωγή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στον κώδικα είναι απαραίτητη η δημιουργία υπορουτινών για κάθε ισότοπο που εξετάζεται. Συνολικά, στο πλαίσιο της Δ.Ε. (Χιώνης, 2011) κατασκευάστηκαν τέσσερις υπορουτίνες οι οποίες προσομοιώνουν τα διαγράμματα διάσπασης των ισότοπων  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{57}\text{Co}$  και  $^{134}\text{Cs}$ . Ως παράδειγμα, στο Σχήμα 5.6 στο τέλος του Κεφαλαίου δίνεται η υπορουτίνα που περιγράφει το σχήμα διάσπασης του  $^{60}\text{Co}$ . Επισημαίνεται ότι λόγω της πολυπλοκότητας ορισμένων σχημάτων διάσπασης είναι σκόπιμο κατά τη συγκρότηση της σχετικής υπορουτίνας να γίνονται και οι απαραίτητες απλοποιήσεις. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εισαγωγή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στον κώδικα *penmain* μπορούν να αναζητηθούν στη Δ.Ε. (Χιώνης, 2011).

### **5.5.1.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με τον τροποποιημένο για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης κώδικα *penmain***

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ως αποτέλεσμα των τροποποιήσεων του κώδικα *penmain* για την εισαγωγή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, επηρεάζεται και η διαδικασία υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής. Καθώς στον νέο κώδικα η έννοια της ιστορίας αναφέρεται πλέον στη διάσπαση του πυρήνα του ισότοπου που προσομοιώνεται και όχι στη μεμονωμένη

---

<sup>87</sup> Το σχήμα διάσπασης του  $^{60}\text{Co}$  δίνεται στο Παράρτημα Β.

εκπομπή ενός φωτονίου, κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης και της αβεβαιότητάς της, πρέπει να συνυπολογίζεται και το ποσοστό εκπομπής (yield) του εξεταζόμενου φωτονίου (Χιώνης, 2011):

$$\text{eff}_{\text{peak}} = \frac{(\sum_n \text{pdf}_i) \cdot \text{dE}}{\text{yield}} \quad \text{Σχέση (5.4)}$$

$$\text{unc}_{\text{eff}_{\text{peak}}} = \frac{\sqrt{\sum_n (\sigma_{\text{pdf}_i}^2) \cdot \text{dE}}}{3 \cdot \text{yield}} \quad \text{Σχέση (5.5)}$$

### 5.5.1.2 Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματική σύμπτωσης με τον τροποποιημένο κώδικα *renmain*

Η αξιολόγηση του τροποποιημένου για το φαινόμενο της πραγματική σύμπτωσης κώδικα *renmain* μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- με άμεση σύγκριση της απόδοσης φωτοκορυφής που εκτιμάται από τα αποτελέσματα του κώδικα, με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα,
- με σύγκριση των συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης που μπορούν να υπολογισθούν μέσω προσομοίωσης, με τιμές που προκύπτουν με άλλες μεθοδολογίες

Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες πειραματικές τιμές της απόδοσης για ορισμένα ισότοπα, η σύγκριση μπορεί να γίνει μόνο με το δεύτερο τρόπο, καθώς υπάρχουν αρκετές μεθοδολογίες για τον ανεξάρτητο υπολογισμό των συντελεστών αυτών. Για τον υπολογισμό συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (True Coincidence Correction factors – T.C.C.) μέσω των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση προσομοιώσεων, τόσο με το πρωτότυπο πρόγραμμα *renmain*, όσο και με το τροποποιημένο. Ο λόγος των αποδόσεων που υπολογίζονται από τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων είναι ουσιαστικά η ποσοτικοποίηση της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και αντιστοιχεί στον συντελεστή διόρθωσης (Χιώνης, 2011):

$$T.C.C._{PENVELOPE} = \frac{(eff_{peak})_{τροποπ}}{(eff_{peak})_{πρωτοτ.}} \quad \text{Σχέση (5.6)}$$

### 5.5.1.3 Αξιολόγηση του τροποποιημένου για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης κώδικα *penmain*

Με σκοπό την αξιολόγηση του τροποποιημένου για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης κώδικα *penmain*, προσομοιώθηκαν διάφορα σενάρια τα οποία καλύπτουν ένα πλήθος συνδυασμών γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή:

- τέσσερις γεωμετρίες: σημειακή πηγή σε επαφή με τον ανιχνευτή και σε απόσταση 73 mm και πηγές γεωμετρίας «2» και «8» σε επαφή,
- δύο ανιχνευτικά συστήματα: HPGe (σχετική απόδοση 33%) και XtRa (σχετική απόδοση 104.5%)
- τέσσερα ισότοπα:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{57}\text{Co}$  και  $^{134}\text{Cs}$

Η αξιολόγηση του τροποποιημένου κώδικα πραγματοποιήθηκε και με τους δύο τρόπους που περιγράφονται στην Παράγραφο 5.5.1.2. Αρχικά, συγκρίθηκε η απόδοση φωτοκορυφής που υπολογίστηκε μέσω προσομοίωσης με την αντίστοιχη πειραματική, για διάφορες γεωμετρίες πηγής – ανιχνευτή, για την περίπτωση του  $^{60}\text{Co}$  όπου υπήρχαν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα (Πίνακες 5.1 και 5.2). Οι αβεβαιότητες που δίνονται είναι ολικές και συμπεριλαμβάνουν τυχαίες και συστηματικές αβεβαιότητες<sup>88</sup>.

Γεωμετρία	Ενέργεια (keV)	$eff_{πειρ.}$	$eff_{προσ.}$	Απόκλιση <sup>89</sup>	U
σημειακή πηγή σε επαφή	1173.24	0.051 ± 4.0%	0.051 ± 3.0%	+0.6%	0.134
	1332.50	0.046 ± 4.0%	0.047 ± 3.0%	+1.7%	0.395
σημειακή πηγή σε απόσταση	1173.24	0.0088 ± 4.0%	0.0095 ± 3.3%	+8.0%	1.717
	1332.50	0.0082 ± 4.0%	0.0081 ± 3.3%	-1.2%	0.267
πηγή γεωμ.«8»	1173.24	0.0346 ± 3.0%	0.035 ± 3.4%	+0.6%	0.153
	1332.50	0.0314 ± 3.0%	0.032 ± 3.4%	+1.0%	0.252
πηγή γεωμ.«2»	1173.24	0.0159 ± 3.0%	0.0165 ± 3.3%	+3.8%	0.996
	1332.50	0.0148 ± 3.0%	0.0151 ± 3.4%	+2.0%	0.533

Πίνακας 5.1: Σύγκριση πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης της απόδοσης για  $^{60}\text{Co}$  στην ανιχνευτική διάταξη XtRa.

<sup>88</sup> Όπου συστηματική αβεβαιότητα για τα πειραματικά δεδομένα αποτελεί η αβεβαιότητα της ενεργότητας της πηγής (3.0%) και για τα δεδομένα της προσομοίωσης η αβεβαιότητα που εισάγει η χρήση του συγκεκριμένου γεωμετρικού μοντέλου (2.9% για HPGe 33% και 2.0% για XtRa).

<sup>89</sup> Όπου απόκλιση εννοείται της τιμής της προσομοίωσης από την αντίστοιχη πειραματική.

Γεωμετρία	Ενέργεια (keV)	$eff_{πειρ.}$	$eff_{προσ.}$	Απόκλιση <sup>90</sup>	U
σημειακή πηγή σε επαφή	1173.24	0.029 ± 3.9%	0.030 ± 3.3%	+3.8%	0.735
	1332.50	0.026 ± 3.9%	0.027 ± 3.3%	+2.7%	0.522
σημειακή πηγή σε απόσταση	1173.24	0.0030 ± 3.9%	0.0031 ± 2.4%	+3.0%	0.653
	1332.50	0.0028 ± 3.9%	0.00276 ± 2.4%	-1.4%	0.315
πηγή γεωμ.«8»	1173.24	0.0155 ± 3.1%	0.0162 ± 2.4%	+4.5%	1.140
	1332.50	0.0138 ± 3.1%	0.0138 ± 2.4%	+0.0%	0.000
πηγή γεωμ.«2»	1173.24	0.0066 ± 3.0%	0.0071 ± 2.3%	+7.6%	1.951
	1332.50	0.0061 ± 3.0%	0.0063 ± 2.4%	+3.3%	0.849

Πίνακας 5.2: Σύγκριση πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης της απόδοσης για <sup>60</sup>Co στην ανιχνευτική διάταξη HPGe 33%.

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.1 και 5.2, κατ' αρχήν παρατηρείται ότι συστηματικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης οδηγούν σε υψηλότερες αποδόσεις φωτοκορυφής, με πιθανότερη αιτία τα συστηματική αβεβαιότητα που εισάγει η χρήση του συγκεκριμένου γεωμετρικού μοντέλου. Όπως διαπιστώθηκε, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφέρουν από τα αντίστοιχα πειραματικά λιγότερο από 4%, απόκλιση που σύμφωνα με τον έλεγχο U, είναι στατιστικά μη σημαντική. Εξάιρεση αποτελούν:

- η σημειακή πηγή <sup>60</sup>Co σε απόσταση 73 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa, όπου η απόκλιση για τα φωτόνια ενέργειας 1173.24 keV είναι της τάξης του 8.0%, όπου όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική
- η πηγή γεωμετρίας «2» σε επαφή με τον ανιχνευτή HPGe, όπου η απόκλιση για τα φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι της τάξης του 7.6%, όπου όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική

Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν οι συντελεστές διόρθωσης T.C.C. που υπολογίζονται από την προσομοίωση με βάση τη Σχέση (5.6), με τους αντίστοιχους συντελεστές που υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc<sup>91</sup> (Sudar, 2002). Σε αυτό το στάδιο της μελέτης λήφθηκαν υπόψη όλα τα ισότοπα για τα οποία είχε κατασκευασθεί αντίστοιχη υπορουτίνα και ήταν δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης από τον τροποποιημένο κώδικα *renmain* (<sup>60</sup>Co, <sup>88</sup>Y, <sup>57</sup>Co και <sup>134</sup>Cs). Στον Πίνακα 5.3 δίνονται συνοπτικά οι παρατηρούμενες αποκλίσεις ανάμεσα στις πειραματικές και τις υπολογιστικές τιμές και τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου U. Τα

<sup>90</sup> Όπου απόκλιση εννοείται της τιμής της προσομοίωσης από την αντίστοιχη πειραματική.

<sup>91</sup> Πρόγραμμα το οποίο διατίθεται δωρεάν από το Δ.Ο.Α.Ε.



αποτελέσματα της σύγκρισης καθώς και περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 5 της Δ.Ε. (Χιώνης, 2011).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστές διόρθωσης T.C.C για τον ανιχνευτή ΧtRa				Συντελεστές διόρθωσης T.C.C για τον ανιχνευτή HPGe 33%			
		σημειακή πηγή σε επαφή		πηγή γεωμ.«2»		σημειακή πηγή σε επαφή		πηγή γεωμ.«2»	
		Απόκλιση <sup>92</sup>	U	Απόκλιση	U	Απόκλιση	U	Απόκλιση	U
<sup>60</sup> Co	1173.24	-2.2%	0.586	+0.1%	0.035	+6.7%	1.732	-1.3%	0.341
	1332.50	-0.8%	0.216	+3.1%	0.776	+4.1%	1.067	+1.8%	0.490
<sup>88</sup> γ	898.04	-3.2%	0.862	-4.0%	0.77	-3.0%	0.998	+0.1%	0.006
	1836.05	-1.4%	0.365	+4.1%	1.075	-2.8%	0.852	+0.8%	0.201
<sup>57</sup> Co	14.41	-2.4%	0.652	+3.5%	0.936	Δ/A <sup>93</sup>			
	122.06	-2.7%	0.747	+4.1%	1.163				
	136.47	+2.1%	0.592	-4.3%	1.150				
<sup>134</sup> Cs	604.72	-0.1%	0.037	-3.9%	0.951	-4.2%	1.438	-3.6%	1.084
	795.85	+0.1%	0.002	-5.0%	1.204	+1.6%	0.540	+4.2%	1.358
	801.95	-3.1%	0.751	-2.6%	0.588	-3.5%	1.142	-2.9%	0.561
	1167.97	+6.2%	1.487	+5.9%	1.231	-29.2%	4.372	-46.1%	3.420
	1365.19	-2.4%	0.582	+5.7%	1.247	-3.8%	0.779	-3.5%	0.425

Πίνακας 5.3: Σύγκριση συντελεστών διόρθωσης T.C.C. υπολογισμένων από τη Σχέση (5.6) και από το πρόγραμμα TrueCoinc.

Από τη σύγκριση προέκυψαν τα εξής:

- <sup>60</sup>Co

Για όλες τις γεωμετρίες πηγής – ανιχνευτή οι τιμές του συντελεστή διόρθωσης T.C.C. όπως υπολογίζεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζουν απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές του προγράμματος TrueCoinc μικρότερη από 4%. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε επαφή με τον ανιχνευτή HPGe 33%, όπου παρατηρείται απόκλιση της τάξεως του 7%, η οποία όμως δεν είναι στατιστικά σημαντική.

- <sup>88</sup>γ

Για τα φωτόνια του <sup>88</sup>γ οι τιμές του συντελεστή διόρθωσης T.C.C., όπως υπολογίζεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρουσιάζουν απόκλιση μικρότερη από 4% από τις αντίστοιχες τιμές του προγράμματος TrueCoinc, η οποία με βάση το στατιστικό έλεγχο δεν είναι στατιστικά σημαντική σε καμία περίπτωση.

<sup>92</sup> Όπου απόκλιση εννοείται η απόκλιση των συντελεστών από τον κώδικα *remain* από εκείνους του προγράμματος TrueCoinc.

<sup>93</sup> Ο ανιχνευτής HPGe 33% διαθέτει παράθυρο από Al που δεν επιτρέπει την ανίχνευση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας 14.41 keV του <sup>57</sup>Co και συνεπώς δεν τίθεται θέμα true coincidence.

- $^{57}\text{Co}$

Στο σενάριο σημειακής πηγής σε επαφή με τον ανιχνευτή XtRa, οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης T.C.C. αποκλίνουν λιγότερο από 3.0%, για όλα τα φωτόνια. Στην περίπτωση πηγής γεωμετρίας «2» σε επαφή με τον ανιχνευτή XtRa, οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης T.C.C. για τα φωτόνια ενέργειας 122.06 keV και 136.47 keV, απέκλιναν περισσότερο του 4%, ενώ ο στατιστικός έλεγχος είναι στην περιοχή αβεβαιότητας. Για την ίδια γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, για τα φωτόνια ενέργειας 14.41 keV, η διαφορά δεν υπερέβη το 4%, στατιστικά μη σημαντική.

- $^{134}\text{Cs}$

Στα περισσότερα σενάρια γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή, δεν υπήρχε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών του συντελεστή διόρθωσης T.C.C. που υπολογίζονται από την προσομοίωση και αυτών που υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc. Εξαίρεση αποτελούν τα φωτόνια ενέργειας 1167.97 keV, για τα οποία παρατηρείται απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών, πιθανότατα εξαιτίας της χρήσης απλοποιημένου σχήματος διάσπασης κατά την προσομοίωση.

Εν γένει, υψηλές διαφορές – συχνά στατιστικά σημαντικές – εμφανίζονται στους συντελεστές διόρθωσης για τον ανιχνευτή HPGe 33% και το ισότοπο  $^{134}\text{Cs}$ . Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε ατελή περιγραφή του ανιχνευτή, ή κακή εκτίμηση της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή που οδηγεί σε ανακριβή εκτίμηση του συντελεστή διόρθωσης με το πρόγραμμα TrueCoinc. Δεν πρέπει ακόμα να παραβλέπεται η πολυπλοκότητα του σχήματος διάσπασης του  $^{134}\text{Cs}$ .

### 5.5.2 Εισαγωγή στον κώδικα χρήστη *penmain* της δυνατότητας προσομοίωσης του συστήματος Compton Suppression

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. ο κώδικας χρήστη *penmain* τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., όταν το σύστημα Compton Suppression είναι σε λειτουργία. Ο νέος κώδικας ονομάστηκε *penmain\_css.f*. Η τροποποίηση έγκειται στην εισαγωγή ενός δευτερεύοντα ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, ο οποίος να μπορεί να επικοινωνεί με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, έτσι ώστε να είναι δυνατό να διαπιστώνεται το κατά πόσον μέσα στο πλαίσιο της ίδιας ιστορίας

αποτίθεται ενέργεια και στους δύο ανιχνευτές. Για το σκοπό αυτό, για την εισαγωγή του δευτερεύοντα ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας στον κώδικα *penmain* χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μεταβλητές δήλωσης από εκείνες του πρωτότυπου κώδικα. Η «επικοινωνία» των δύο ανιχνευτών, πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, πραγματοποιείται μετά το πέρας της προσομοίωσης κάθε ιστορίας, οπότε, εάν έχει καταγραφεί ενέργεια στον δευτερεύοντα εικονικό ανιχνευτή, τότε μηδενίζεται η ενέργεια που έχει καταγραφεί στον πρωτεύοντα εικονικό ανιχνευτή. Σε περίπτωση προσομοίωσης ισότοπου το οποίο εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται μετά το πέρας της προσομοίωσης όλων των φωτονίων που εκπέμφθηκαν κατά την ίδια αποδιέγερση<sup>94</sup>. Το λογικό διάγραμμα του τροποποιημένου κώδικα δίνεται στο Σχήμα 5.8, στο τέλος του Κεφαλαίου.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται λεπτομερής περιγραφή των τροποποιήσεων του κώδικα χρήστη *penmain* οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. με σκοπό την εισαγωγή σε αυτό της ενεργητικής θωράκισης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.<sup>95</sup> και οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής:

- τροποποιήσεις στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*
- τροποποιήσεις στο τμήμα βοηθητικών σχολίων του κώδικα *penmain*
- τροποποιήσεις στο τμήμα δήλωσης μεταβλητών του κώδικα *penmain*
- τροποποιήσεις στο τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης του κώδικα *penmain*
- τροποποιήσεις στο τμήμα τελικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κώδικα *penmain*

### 5.5.2.1 Αλλαγές στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*

Στον πρωτότυπο κώδικα *penmain* η χρήση ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας ορίζεται στο αρχείο εισόδου *.in* μέσω της μεταβλητής `ENDDET` (Εικόνα 5.2α). Η

<sup>94</sup> Παρόλο που δεν συνιστάται η χρήση του suppressed φάσματος για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, για λόγους πληρότητας, ο τροποποιημένος για την ενεργητική θωράκιση κώδικας έχει αυτή τη δυνατότητα για τα ισότοπα για τα οποία έχουν κατασκευασθεί κατάλληλες υπορουτίνες.

<sup>95</sup> Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος XtRa - CSS παρουσιάσθηκαν στο "20<sup>th</sup> International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM), 8–11 Ιουνίου 2015, Vienna " και δημοσιεύθηκαν στο περιοδικό Applied Radiation & Isotopes (Savva, et al., 2016).

ενεργητική θωράκιση (δευτερεύων ανιχνευτής) αποτελεί έναν ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας όπως και ο πρωτεύων ανιχνευτής. Για να είναι δυνατή η διαφοροποίηση των δύο εικονικών ανιχνευτών, στο αρχείο εισόδου τύπου *.in* εισήχθησαν νέες μεταβλητές για το δευτερεύοντα ανιχνευτή. Επιπλέον, για να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των δύο λειτουργιών (*suppressed* και *coincidence*) εισήχθησαν στο αρχείο εισόδου *.in* δύο μεταβλητές: *EGANTI* για λειτουργία αντί-σύμπτωσης (Εικόνα 5.2α) και *EGCOIN* για λειτουργία σύμπτωσης (Εικόνα 5.2β). Ο εικονικός ανιχνευτής που ορίζεται με τη μεταβλητή *ENDDET*, παραμένει και χρησιμοποιείται για τον πρωτεύοντα ανιχνευτή. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που απαιτούνται για τη σωστή χρήση ενός ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας – ενεργειακό φάσμα καταγραφής και ενεργό σώμα του ανιχνευτή – είναι ίδιες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση των μεταβλητών *EGANTI* και *EGCOIN* είναι συμπληρωματική, δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία από τις δύο σε κάθε προσομοίωση, κατ' αντιστοιχία με την πειραματική διάταξη. Επίσης, σε κάθε προσομοίωση με ενεργητική θωράκιση, θα πρέπει να ορίζεται πρώτα ο πρωτεύων εικονικός ανιχνευτής και στη συνέχεια ο δευτερεύων. Ολόκληρο το αρχείο εισόδου τύπου *.in* του κώδικα χρήστη *penmain\_css* δίνεται στο Σχήμα 5.7 στο τέλος του Κεφαλαίου.

```

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET EDEL,EDEU,NCHE      [Energy window and number of channels]
EDBODY KB                  [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
EGANTI EDEL,EDEU,NCHE     [Energy window and number of channels]
EDBODY KB                  [Active body; one line for each body]

```

Εικόνα 5.2α: Εισαγωγή μεταβλητής *EGANTI* στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.

```

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET EDEL,EDEU,NCHE     [Energy window and number of channels]
EDBODY KB                  [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
EGCOIN EDEL,EDEU,NCHE    [Energy window and number of channels]
EDBODY KB                  [Active body; one line for each body]

```

Εικόνα 5.2β: Εισαγωγή μεταβλητής *EGCOIN* στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.

### 5.5.2.2 Αλλαγές στο τμήμα βοηθητικών σχολίων

Στον πρωτότυπο κώδικα *penmain* παρέχεται στον χρήστη ένα τμήμα με βοηθητικά σχόλια σχετικά με τη λειτουργία του κώδικα. Η εισαγωγή της ενεργητικής

θωράκισης προστέθηκε στο τμήμα αυτό (Εικόνα 5.3), ενώ επίσης εισήχθη και κατάλληλη επεξήγηση των μεταβλητών ορισμού της ενεργητικής θωράκισης (Εικόνα 5.4).

```

C          >>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 5).
C  ENDDDET  EDEL,EDEU,NCHE      [Energy window and number of channels]
C  EDSPEC   pm_spc_enddet_#.dat  [Output spectrum file name, 20 chars]
C  EDBODY   KB                    [Active body; one line for each body]
C
C          >>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 5).
C  EGANTI  EDEL,EDEU,NCHE      [Energy window and number of channels]
C  EDSPEC   spc_sup_gdet_#.dat  [Output spectrum file name, 20 chars]
C  EDBODY   KB                    [Active body; one line for each body]
C
C          >>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 5).
C  EGCOIN  EDEL,EDEU,NCHE      [Energy window and number of channels]
C  EDSPEC   spc_coin_gdet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
C  EDBODY   KB                    [Active body; one line for each body]

```

Εικόνα 5.3: Εισαγωγή εικονικών ανιχνευτών ενεργητικής θωράκισης στο εγχειρίδιο χρήστη του κώδικα χρήστη *penmain\_css*.

```

C  EGANTI : Starts the definition of a new energy-deposition
C            detector which is a GUARD detector in ANTI-COINCIDENCE.
C  EGCOIN : Starts the definition of a new energy-deposition
C            detector which is a GUARD detector in COINCIDENCE.

```

Εικόνα 5.4: Εισαγωγή επεξήγησης εικονικών ανιχνευτών ενεργητικής θωράκισης στο εγχειρίδιο χρήστη του κώδικα χρήστη *penmain\_css*.

### 5.5.2.3 Αλλαγές στο τμήμα δήλωσης μεταβλητών

Ο κώδικας *penmain* διαθέτει εκτεταμένο τμήμα δήλωσης μεταβλητών, όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ε. Ορίζονται όλες οι μεταβλητές (εσωτερικές και εξωτερικές), οι παράμετροι καθώς και οι διαστάσεις των πινάκων που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Για την ορθή χρήση των μεταβλητών ορισμού **EGANTI** και **EGCOIN** είναι απαραίτητη η δήλωσή τους στο τμήμα δηλώσεων του κώδικα χρήστη *penmain\_css* καθώς και η δήλωση των αλφαριθμητικών τιμών που τις συνοδεύουν, όπως περιγράφεται αναλυτικά ακολούθως.

- **Εισαγωγή λογικών μεταβλητών **ANTICOIN** και **COINCID****

Για τον καθορισμό του τρόπου λειτουργίας του δευτερεύοντα ανιχνευτή εισήχθησαν οι λογικές μεταβλητές **ANTICOIN** και **COINCID**, οι οποίες λαμβάνουν αληθή τιμή όταν ο δευτερεύων ανιχνευτής λειτουργεί σε αντί-σύμπτωση ή σύμπτωση, αντίστοιχα (Εικόνα 5.5).

LOGICAL ANTCOIN, COINCID

Εικόνα 5.5: Δήλωση λογικών μεταβλητών ANTCOIN και COINCID (τμήμα δηλώσεων μεταβλητών κώδικα χρήστη *penmain\_css*).

- **Εισαγωγή μεταβλητών KWEGAC και KWEGCO**

Κατά την σύνδεση του κώδικα *penmain* με το αρχείο εισόδου τύπου *.in* κάθε μεταβλητή του δεύτερου (π.χ. 'TITLE', 'SKPAR', 'SENERG', 'SISOTO') αντιστοιχίζεται μονοσήμαντα σε μία αλφαριθμητική μεταβλητή (π.χ. 'KWTITL', 'KWKPAR', 'KWSENE', 'KWISOT', αντίστοιχα). Ο χρήστης δύναται να εισάγει τα δεδομένα της προσομοίωσης μέσω 38 τέτοιων αλφαριθμητικών μεταβλητών. Πρέπει να επισημανθεί ότι σε μία προσομοίωση δεν χρησιμοποιούνται όλες οι διαθέσιμες μεταβλητές καθώς ορισμένες από αυτές είναι συμπληρωματικές. Για παράδειγμα, ποτέ στον τροποποιημένο κώδικα χρήστη *penmain\_css* δεν μπορεί να εισάγεται για την ίδια προσομοίωση η ενέργεια μονοενεργειακής πηγής και η ονομασία του ισότοπου που θα προσομοιωθεί, μέσω των μεταβλητών 'SENERG' και 'SISOTO' αντίστοιχα.

Κατά τη διαδικασία ανάγνωσης του αρχείου εισόδου *.in*, ο κώδικας χρήστη *penmain* ελέγχει σειριακά ποια μεταβλητή τύπου 'KW.....' διαθέτει τιμή ορθά ορισμένη με χρήση μίας άλλης βοηθητικής αλφαριθμητικής μεταβλητής που έχει την ονομασία 'KWORD' και αρχικοποιεί την κατάλληλη κάθε φορά μεταβλητή. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή 'KWORD' παίρνει εν σειρά τις ονομασίες 'KWTITL', 'KWKPAR', 'KWSENE' και διαβάζει τις αλφαριθμητικές τιμές που τους αντιστοιχούν 'TITLE', 'KPARP', 'SEO', αντίστοιχα, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 5.1. Αυτή είναι η διαδικασία ανάγνωσης μέχρι να αναγνωστεί ολόκληρο το αρχείο εισόδου *.in*. Για την ανάγνωση του εικονικού ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ενεργητικής θωράκισης εισάγονται στο κώδικα χρήστη *penmain\_css* μεταβλητές τύπου 'KW....': KWEGAC για τη μεταβλητή EGANTI και KWEGCO για τη μεταβλητή EGCOIN (Εικόνα 5.6).

```
CHARACTER*6 KWORD,
1 KWTITL, KWKPAR, KWSENE, KWSPEC, KWSPOS, KWSDIR, KWSAPE, KWPSFN,
...
1 KWDUMP, KWDMP, KWNSIM, KWRSEE, KWTIME, KWCOMM, KWISOT, KWEDEN,
1 KWEGAC, KWEGCO
```

Εικόνα 5.6: Δήλωση αλφαριθμητικών μεταβλητών KWEGAC και KWEGCO (τμήμα δηλώσεων μεταβλητών κώδικα χρήστη *penmain\_css*).

- **Σύνδεση μεταβλητών EGANTI – KWEGAC και EGCOIN – KWEGCO**

Εκτός από τη δήλωση των μεταβλητών τύπου 'KW....', είναι απαραίτητη και η σύνδεσή τους με τις αντίστοιχες κωδικές ονομασίες του αρχείου εισόδου τύπου *.in*. Ακολουθώντας τη λογική με την οποία έχει κατασκευαστεί ο κώδικας, εισάγονται στο συγκεκριμένο τμήμα οι παράμετροι για την ενεργητική θωράκιση (Εικόνα 5.7).

```
PARAMETER (
1  KWTITL='TITLE ', KWKPAR='SKPAR ', KWSENE='SENERG', KWSPEC='SPECTR',
  . . .
1  KWTIME='TIME ', KWCOMM=' ', KWISOT='SISOTO', KWEGAC='EGANTI ',
1  KWEGCO='EGCOIN')
```

Εικόνα 5.7: Σύνδεση μεταβλητών EGANTI – KWEGAC και EGCOIN – KWEGCO  
(τμήμα δηλώσεων μεταβλητών κώδικα χρήστη *penmain\_css*).

- **Εισαγωγή καταμετρητών σωμάτων για τον πρωτεύοντα και το δευτερεύοντα εικονικό ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας**

Η τελευταία αλλαγή του τμήματος δηλώσεων μεταβλητών, αφορά στο πλήθος των σωμάτων που απαρτίζουν τον πρωτεύοντα και το δευτερεύοντα ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Για το σκοπό αυτό εισήχθησαν πίνακες  $GE(i)$  και  $NAI(i)$ , αντίστοιχα, το μέγεθος των οποίων ορίσθηκε ανάλογα με το πλήθος των σωμάτων που αναμένεται να έχουν οι δύο ανιχνευτές. Κρίθηκε ότι ορισμός πινάκων 15 θέσεων ήταν υπέρ-αρκετός. Σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να προσομοιώσει ανιχνευτική διάταξη η οποία να αποτελείται από περισσότερα από 15 σώματα για κάθε ανιχνευτή, τότε θα πρέπει να αλλαχθεί το μέγεθος των πινάκων αυτών στο τμήμα δήλωσης μεταβλητών του κώδικα χρήστη *penmain\_css* (Εικόνα 5.8).

```
DIMENSION GE(15)      !Possible number of Germanium detector bodies
DIMENSION NAI(15)     !Possible number of Guard detector bodies
```

Εικόνα 5.8: Εισαγωγή καταμετρητών σωμάτων πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή  
(τμήμα δηλώσεων μεταβλητών κώδικα χρήστη *penmain\_css*).

#### 5.5.2.4 Αλλαγές στο τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης

Για να είναι δυνατός ο έλεγχος σύμπτωσης ανάμεσα στους δύο εικονικούς ανιχνευτές, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός των σωμάτων που ανήκουν σε κάθε ανιχνευτή. Εισάγοντας κατάλληλους μετρητές,  $KGE$  και  $KNAI$ , αντίστοιχα,

καταγράφεται ο αύξων αριθμός του σώματος του κάθε ανιχνευτή στον αντίστοιχο πίνακα GE (KGE) και NAI (KNAI), αφού πρώτα γίνουν οι σχετικοί έλεγχοι για τη διαπίστωση τυχόν σφάλματος κατά τον ορισμό των δύο ανιχνευτών (Εικόνα 5.9): ελέγχεται εάν ο αριθμός των ενεργών σωμάτων των ανιχνευτών είναι υπαρκτός στο αρχείο γεωμετρίας – αλλιώς εμφανίζεται μήνυμα 'Incorrect body label' - και εάν κάποιο σώμα έχει ορισθεί ως ενεργό σε περισσότερους από έναν ανιχνευτές – αλλιώς εμφανίζεται μήνυμα 'A body cannot be part of two detectors'.

```

IF (KWORD.EQ.KWEDET) THEN
...
  IF (KWORD.EQ.KWEBOD) THEN
    READ (BUFFER, *) KB
    IF (KB.LT.0.OR.KB.GT.NBODY) THEN
      WRITE (26, '(A6,1X,A120)') KWORD,BUFFER
      WRITE (26,*) 'Incorrect body label.'
      STOP 'Incorrect body label.'
    ENDIF
    IF (KBDE (KB) .NE.0) THEN
      WRITE (26, '(A6,1X,A120)') KWORD,BUFFER
      WRITE (26,*) 'A body cannot be part of two detectors.'
      STOP 'A body cannot be part of two detectors.'
    ENDIF
  C ****Primary Detector (HPGe) active bodies definition.
    KGE=KGE+1
    WRITE (26,1652) KB
1652  FORMAT (3X, 'Active body = ',I4)
    GE (KGE) =KB
    KBDE (KB) =NDEDEF
  ENDIF
...
ENDIF
...
C ****Guard Detector (NaI) active bodies definition.
  KNAI=KNAI+1
  WRITE (26,16522) KB
16522  FORMAT (3X, 'Guard detector active body = ',I4)
  NAI (KNAI) =KB
  KBDE (KB) =NDEDEF
ENDIF

```

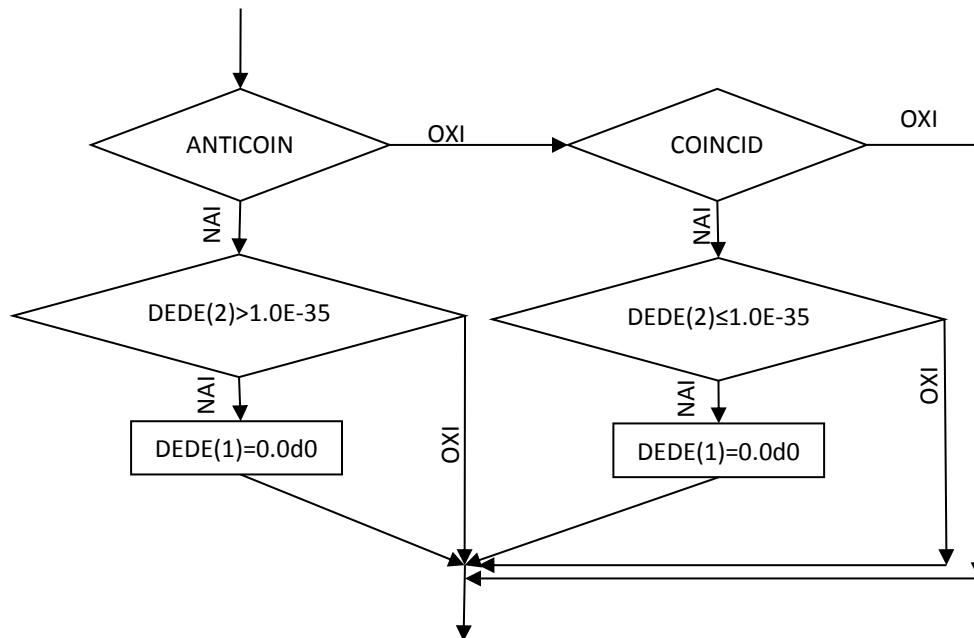
Εικόνα 5.9: Εντοπισμός ενεργών σωμάτων πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή (τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης του κώδικα χρήστη *penmain\_css.f*).

### 5.5.2.5 Αλλαγές στο τμήμα τελικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Για τον υπολογισμό της αποτιθέμενης ενέργειας σε έναν εικονικό ανιχνευτή, στον κώδικα *penmain* χρησιμοποιείται η μεταβλητή *DEDE*. Πρόκειται για έναν πίνακα μίας στήλης ο οποίος σε κάθε γραμμή καταγράφει την ενέργεια που



συνολικά αποτίθεται σε έναν εικονικό ανιχνευτή απόθεσης. Κατά τον ορισμό των εικονικών ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας που προσομοιώνουν μία διάταξη με ενεργητική θωράκιση, η συνολικά αποτιθέμενη ενέργεια στον πρωτεύοντα ανιχνευτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή  $DEDE(1)$ , ενώ η αντίστοιχη του δευτερεύοντα στη μεταβλητή  $DEDE(2)$ . Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε σκόπιμο ο έλεγχος σύμπτωσης να γίνεται κατευθείαν με σύγκριση των μεταβλητών  $DEDE(1)$  και  $DEDE(2)$ . Πιο συγκεκριμένα, εάν το σύστημα λειτουργεί σε αντί-σύμπτωση, τότε εάν το περιεχόμενο της μεταβλητής  $DEDE(2)$  δεν είναι μηδενικό<sup>96</sup> – δηλαδή έχει καταγραφεί κάτι στον δευτερεύοντα ανιχνευτή – τότε μηδενίζεται το περιεχόμενο της μεταβλητής  $DEDE(1)$  – δηλαδή δεν καταγράφεται κάτι στον πρωτεύοντα ανιχνευτή. Αντίστοιχα, εάν το σύστημα λειτουργεί σε σύμπτωση, τότε εάν το περιεχόμενο της μεταβλητής  $DEDE(2)$  είναι μηδενικό – δηλαδή δεν έχει καταγραφεί κάτι στον δευτερεύοντα ανιχνευτή – τότε μηδενίζεται το περιεχόμενο της μεταβλητής  $DEDE(1)$ . Το λογικό διάγραμμα αυτών των ελέγχων δίνεται στην Εικόνα 5.10, ενώ το τμήμα του κώδικα που πραγματοποιείται ο έλεγχος σύμπτωσης δίνεται στην Εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.10: Λογικό διάγραμμα ελέγχου σύμπτωσης.

<sup>96</sup> Στην πραγματικότητα το μηδέν ισοδυναμεί με την τιμή  $10^{-35}$ .

```

C **** Coincidence Gating for anti-coincidence mode (suppressed)
IF (ANTICOIN) THEN
  IF ( (NF.EQ.1) .OR. ( (NF.NE.1) .AND. (NPH.EQ.NF) ) ) THEN
    IF (DEDE (2) .GT.1.0D-35) THEN
      DEDE (1) =1.0D-35
      WGHT=0.0D0
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
C **** Coincidence Gating for coincidence mode
IF (COINCID) THEN
  IF ( (NF.EQ.1) .OR. ( (NF.NE.1) .AND. (NPH.EQ.NF) ) ) THEN
    IF (DEDE (2) .LT.1.0D-35) THEN
      DEDE (1) =1.0D-35
      WGHT=0.0D0
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

Εικόνα 5.11: Έλεγχος σύμπτωσης

(τμήμα τελικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κώδικα χρήστη *penmain\_css*).

## 5.6 Αξιολόγηση του τροποποιημένου κώδικα χρήστη *penmain\_css*

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, η ακριβής γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προβλήματος που προσομοιώνεται είναι εξαιρετικά σημαντική για την ακριβή προσομοίωση του προβλήματος. Τα γεωμετρία χαρακτηριστικά του πρωτεύοντα ανιχνευτή εκτιμήθηκαν μέσω της ημιεμπειρικής μεθόδου που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 5.4 για τη γεωμετρία «2» και δίνονται στον Πίνακα 5.4.

Διάμετρος κρυστάλλου	80.0 mm
Μήκος κρυστάλλου	78.0 mm
Διάμετρος εσωτερικής οπής	16.0 mm
Βάθος εσωτερικής οπής	66.5 mm
Νεκρή ζώνη στην άνω πλευρά (front dead layer)	60.0 μm
Νεκρή ζώνη περιφερειακά (peripheral dead layer)	400.0 μm
Νεκρή ζώνη στην κάτω πλευρά (back dead layer)	400.0 μm

Πίνακας 5.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή XtRa για πηγές όγκου.

Με αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για την περίπτωση του unsuppressed φάσματος, οι αποκλίσεις των τιμών της απόδοσης που εκτιμώνται από την προσομοίωση, από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές δεν υπερβαίνουν το 4.2%

(Πίνακας 5.5), απόκλιση που εισάγει, σύμφωνα με την ορθογωνική κατανομή, συστηματική αβεβαιότητα λόγω χρήσης του εν λόγω μοντέλου που δεν υπερβαίνει το 2.4% (1 $\sigma$ ).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$eff_{πειρ.}$	$eff_{προσ.}$	Απόκλιση <sup>97</sup>	U
<sup>241</sup> Am	59.54	0.0664 $\pm$ 2.8%	0.0654 $\pm$ 0.7%	-1.5%	0.522
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.02598 $\pm$ 0.8%	0.0251 $\pm$ 1.0%	-3.4%	2.700
<sup>60</sup> Co	1173.24	0.0163 $\pm$ 3.2%	0.0164 $\pm$ 0.8%	+0.6%	0.186
	1332.50	0.0151 $\pm$ 2.0%	0.0148 $\pm$ 0.8%	-2.0%	0.925
<sup>40</sup> K	1460.75	0.01506 $\pm$ 1.7%	0.0157 $\pm$ 0.8%	+4.2%	2.244

Πίνακας 5.5: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για το unsuppressed φάσμα.

Για την προσομοίωση του συστήματος σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης και σύμπτωσης είναι απαραίτητη η λεπτομερής περιγραφή των διαστάσεων και του δευτερεύοντος ανιχνευτή, για τον οποίο – όπως φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο<sup>98</sup> – δεν δίνονται όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (όπως π.χ. το πάχος του ανακλαστικού υλικού). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε πάλι η επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δευτερεύοντα ανιχνευτή.

Μία διάσταση του δευτερεύοντα ανιχνευτή η οποία δεν είναι γνωστή είναι η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου NaI(Tl). Αρχικά, η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου θεωρήθηκε ίση με τη διάμετρο της οπής ( $\varnothing$ 112 mm) και στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά για το suppressed φάσμα, εισήχθησαν νεκρές περιοχές στον ανιχνευτή NaI(Tl). Αντίστοιχα, ενώ δίνονται οι διαστάσεις του κρυστάλλου του ανιχνευτή plug δεν δίνεται η σχετική του θέση μέσα στο αλουμινένιο περίβλημα. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι ολόκληρο το περίβλημα από αλουμίνιο εσωκλείει τον ανιχνευτή NaI χωρίς να υπάρχει κενό ή άλλο υλικό ανάμεσά τους, ενώ στη συνέχεια, και μετά από έρευνα στη βιβλιογραφία, εισήχθησαν νεκρές περιοχές για τη ρεαλιστική μοντελοποίηση του ανιχνευτή (Scates, et al., 2006). Στον Πίνακα 5.6 δίνονται οι τιμές των νεκρών περιοχών στις οποίες κατέληξε η παραπάνω διαδικασία. Οι αποκλίσεις των

<sup>97</sup> Όπου απόκλιση εννοείται της απόδοσης μέσω προσομοίωσης από την αντίστοιχη πειραματική.

<sup>98</sup> Σχήμα 2.1 στο τέλος του Κεφαλαίου 2.

αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα αντίστοιχα πειραματικά <sup>99</sup> στο suppressed φάσμα εκτιμήθηκαν σε μικρότερες από 4% (Πίνακας 5.7).

Νεκρή ζώνη plug άνω πλευράς	4 mm
Νεκρή ζώνη plug κάτω πλευράς	4 mm
Νεκρή ζώνη plug περιφερειακά	4 mm
Νεκρή ζώνη δακτυλίου άνω πλευράς	4 mm
Νεκρή ζώνη δακτυλίου κάτω πλευράς	4 mm
Νεκρή ζώνη δακτυλίου περιφερειακά εσωτερικά	4 mm
Νεκρή ζώνη δακτυλίου περιφερειακά εξωτερικά	4 mm

Πίνακας 5.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δευτερεύοντα ανιχνευτή NaI για πηγές όγκου.

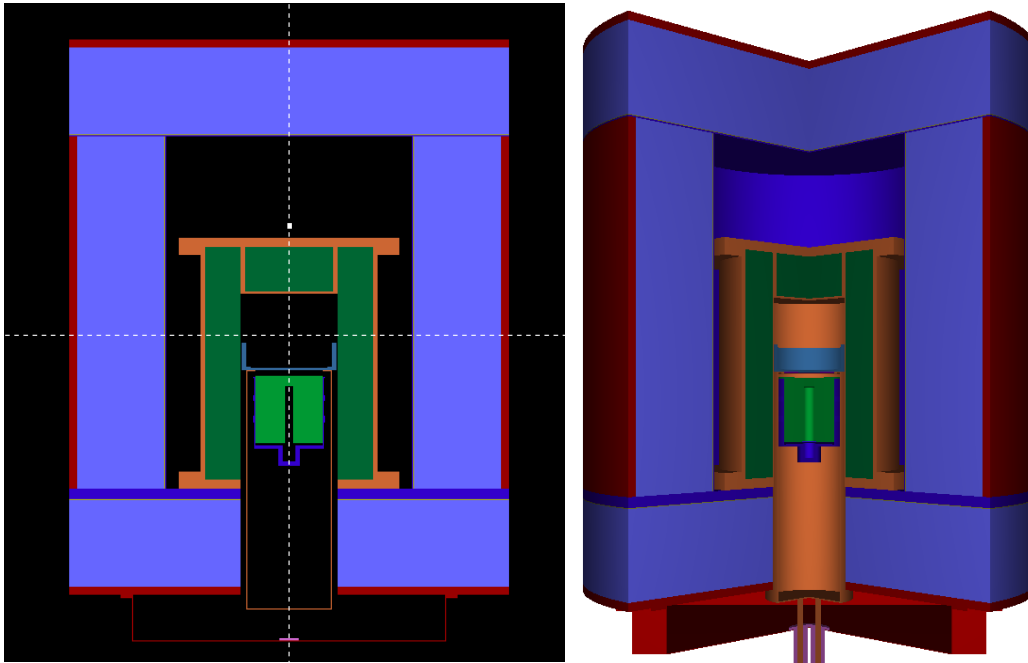
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$eff_{πειρ.}$	$eff_{προσ.}$	Απόκλιση <sup>100</sup>	U
<sup>241</sup> Am	59.54	0.065 ± 2.2%	0.0653 ± 0.9%	+0.5%	0.194
<sup>137</sup> Cs	661.62	0.0259 ± 1.2%	0.0254 ± 1.3%	-1.9%	1.103
<sup>60</sup> Co	1173.24	0.00735 ± 1.1%	0.00737 ± 1.2%	+0.3%	0.167
	1332.50	0.00655 ± 1.2%	0.00657 ± 1.2%	+0.3%	0.180
<sup>40</sup> K	1460.75	0.0150 ± 0.4%	0.0155 ± 1.7%	+3.3%	1.850

Πίνακας 5.7: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για το suppressed φάσμα.

Πρέπει στο σημείο αυτό να τονισθεί ότι για ανιχνευτή NaI δεν έχει νόημα η ύπαρξη dead layers όπως στους ανιχνευτές γερμανίου. Η εισαγωγή τους και η επιλογή του πάχους τους – εκτός του ότι διορθώνει τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή – επιτρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλα φαινόμενα, όπως η ανεπαρκής συλλογή σήματος στον ανιχνευτή και το γεγονός ότι κατά την προσομοίωση τα φωτόνια θεωρείται ότι εκπέμπονται συγχρόνως, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην πράξη. Επισημαίνεται ότι, μετά από τη διάσπαση ενός πυρήνα τα φωτόνια που ακολουθούν τη διάσπαση δεν εκπέμπονται ταυτόχρονα, αλλά διαδοχικά, με χρονική διαφορά της τάξης των ps ή ns. Για το λόγο αυτό στην ανιχνευτική διάταξη, το χρονικό παράθυρο εντός του οποίου γίνεται ο έλεγχος σύμπτωσης σημάτων στους δύο ανιχνευτές έχει ορισθεί στο 1 μsec. Εάν η ρύθμιση του χρονικού παραθύρου στη διάταξη αλλάξει, ενδεχομένως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δευτερεύοντα ανιχνευτή που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση να πρέπει να τροποποιηθούν, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να συγκλίνουν με τα αντίστοιχα πειραματικά. Το γεωμετρικό μοντέλο στο οποίο κατέληξε η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 5.12.

<sup>99</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 130 – 132, 140, 142, 150, 156, 160.

<sup>100</sup> Όπου απόκλιση εννοείται της απόδοσης μέσω προσομοίωσης από την αντίστοιχη πειραματική.



Εικόνα 5.12: Γεωμετρία προσομοίωσης της ανιχνευτικής διάταξη XtRa - CSS (σε τομή) μέσω των απεικονιστικών προγραμμάτων *gview2d* (αριστερά) και *gview3d* (δεξιά).

Στην παράγραφο που ακολουθεί γίνεται η αξιολόγηση του κώδικα *penmain\_css*, αρχικά για λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed mode) και στη συνέχεια για λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode). Η αξιολόγηση γίνεται μέσω της σύγκρισης της τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής που υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα του κώδικα χρήστη *penmain\_css* και της αντίστοιχης πειραματικής, για δύο από τις γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. και για μία σειρά από ισότοπα, συγκεκριμένα:

Για λειτουργία αντί-σύμπτωσης:

- γεωμετρία «8» για τα ισότοπα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  και  $^{40}\text{K}$
- γεωμετρία «2» για το ισότοπο  $^{134}\text{Cs}$

Για λειτουργία σύμπτωσης:

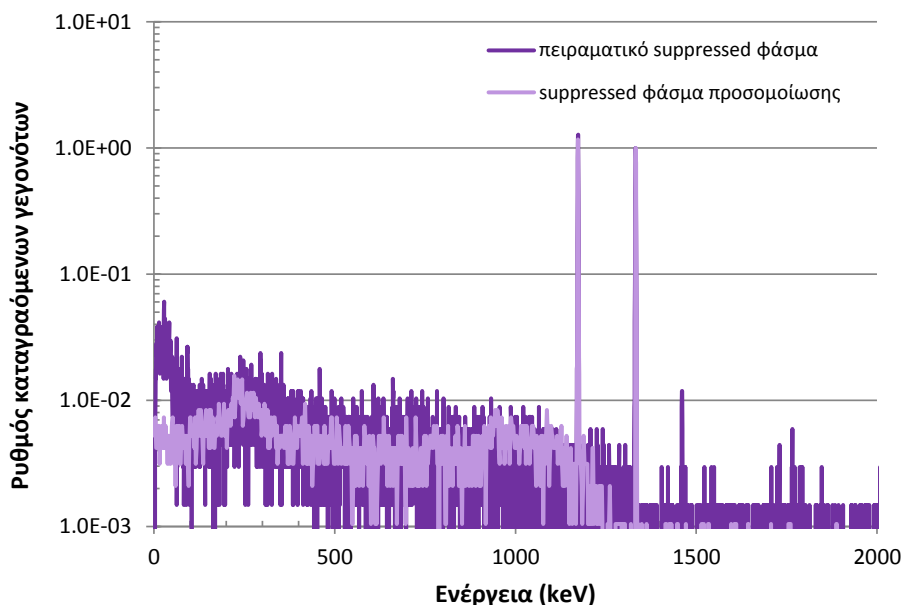
- γεωμετρία «2» για τα ισότοπα  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$

### 5.6.1 Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα)

Η αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για λειτουργία αντί-σύμπτωσης πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια:

- ποιοτικά, μέσω σύγκρισης της απεικόνισης του φάσματος προσομοίωσης με αντίστοιχο πειραματικό για σημειακή πηγή  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση 73 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή
- ποσοτικά, σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής για τις γεωμετρίες «2» και «8» για τις οποίες διατίθεντο κατάλληλες πηγές.

Στην Εικόνα 5.13 φαίνεται το φάσμα προσομοίωσης<sup>101</sup> του  $^{60}\text{Co}$  στο suppressed φάσμα, όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση σημειακή πηγή  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση 73 mm από τον ανιχνευτή, και το αντίστοιχο πειραματικό.



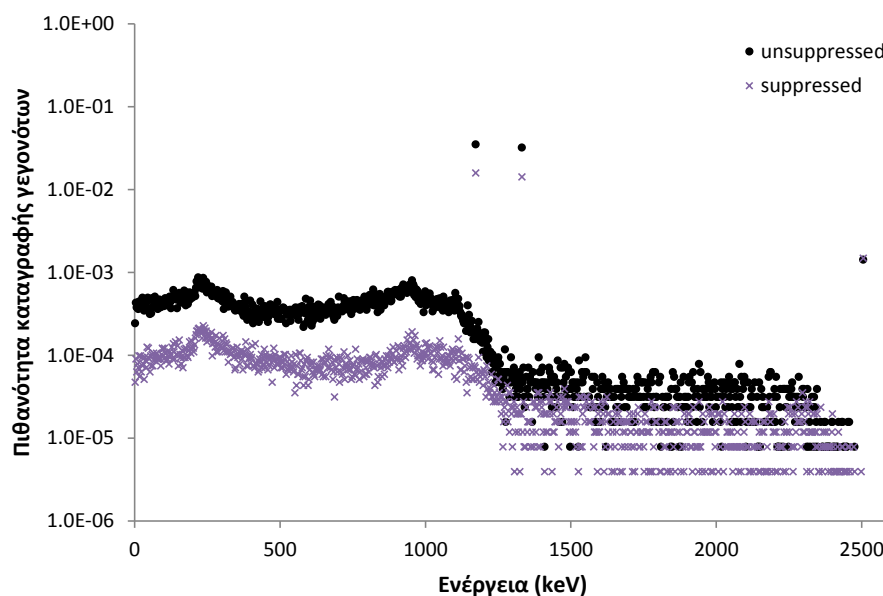
Εικόνα 5.13: Suppressed φάσμα (πειραματικό και μέσω προσομοίωσης) σημειακής πηγής  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση 73 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση και τα δύο φάσματα έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την φωτοκορυφή ενέργειας 1332.50 keV. Είναι εμφανής η αλληλοεπικάλυψη των δύο φασμάτων, γεγονός που δείχνει ότι το suppressed φάσμα προσομοιώνεται ικανοποιητικά με τον κώδικα χρήστη *remain\_css*. Στις υψηλές ενέργειες (> 1332.50 keV) στο πειραματικό φάσμα εμφανίζονται ορισμένες αιχμές φυσικού υποστρώματος, οι οποίες για προφανείς λόγους δεν υπάρχουν στο φάσμα της

<sup>101</sup> Για τη σύγκριση του φάσματος προσομοίωσης με το αντίστοιχο πειραματικό, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *trspec*, για τη μετατροπή των ενεργειακών φασμάτων αποτιθέμενης ενέργειας σε «ρεαλιστικά» φάσματα, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και το εύρος ημίσειας ύψους της ανιχνευτικής διάταξης. Το περιεχόμενο κάθε παραθύρου αρχικά μετατρέπεται σε πλήθος φωτονίων και ακολούθως, η πληροφορία αυτή κατανέμεται στα γειτονικά ενεργειακά παράθυρα υπό κανονική κατανομή. Τελικά, το περιεχόμενο κάθε ενεργειακού παραθύρου διαμορφώνεται από την υπέρθεση των κανονικών κατανομών όλων των ενεργειακών παραθύρων του φάσματος (Καρφόπουλος, 2012).

προσομοίωσης. Επιπλέον, το πειραματικό φάσμα έχει αυξημένο συνεχές υπόβαθρο, λόγω του φυσικού ραδιενεργού υποβάθρου της διάταξης και ακτινοβολίας πέδησης στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.

Στην Εικόνα 5.14 δίνεται το unsuppressed και το suppressed φάσμα όπως προκύπτουν από προσομοίωση με τον κώδικα χρήστη *penmain\_css* για πηγή γεωμετρίας «8». Αρχικά, φαίνεται η ποιοτικά ορθή προσομοίωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, καθώς εμφανίζεται και η αθροιστική φωτοκορυφή του  $^{60}\text{Co}$  στην ενέργεια των 2505 keV. Συγκρίνοντας τα φάσματα που προκύπτουν μέσω προσομοίωσης για συμβατική λειτουργία και αντί-σύμπτωσης, φαίνεται κατ' αρχήν η μείωση του συνεχούς υποστρώματος στο suppressed φάσμα προσομοίωσης για ενέργειες χαμηλότερες από την ενέργεια των φωτονίων του  $^{60}\text{Co}$ . Επίσης, καθώς το ισότοπο αυτό εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά, παρατηρείται ότι οι φωτοκορυφές εμφανίζονται μειωμένες στο suppressed φάσμα προσομοίωσης σε σχέση με το unsuppressed, κάτι που παρατηρείται και στο αντίστοιχο πειραματικό φάσμα. Αντίθετα, η αθροιστική φωτοκορυφή δεν φαίνεται να εμφανίζει διαφορές στα δύο φάσματα, καθώς η ανίχνευσή της δεν επηρεάζεται από την ενεργητική θωράκιση.



Εικόνα 5.14: Φάσμα πηγής  $^{60}\text{Co}$  γεωμετρίας «8» όπως έχει προσομοιωθεί από τον κώδικα χρήστη *penmain\_css*.

Για την ποσοτική αξιολόγηση του κώδικα προσομοίωσης λήφθηκαν υπόψη τόσο μονοενεργειακά ισότοπα, όσο και πολυενεργειακά. Ο υπολογισμός της απόδοσης πλήρους απορρόφησης από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πραγματοποιείται σύμφωνα με τη Σχέση (5.1), για τα μονοενεργειακά ισότοπα, και τη Σχέση (5.4) για

τα πολυενεργειακά ισότοπα. Υπενθυμίζεται ότι η χρήση του suppressed φάσματος δεν ενδείκνυται για την ανάλυση ισοτόπων τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά. Ωστόσο, ακριβώς επειδή η ανίχνευση των ισοτόπων αυτών επηρεάζεται σημαντικά από τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης, θεωρήθηκε σκόπιμη η μελέτη τους, ώστε διαπιστωθεί η πιστή ή μη προσομοίωση του suppressed φάσματος.

### 5.6.1.1 Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για πηγές γεωμετρίας «2»

Για την αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για πηγές γεωμετρίας «2» αναλύθηκαν τα δείγματα WT080, WT081, WT082 (Παράγραφος 4.3.3), WT086 (Παράγραφος 4.3.4) και WT087, WT089 (Παράγραφος 4.3.5). Από τα δείγματα αυτά μελετήθηκε μόνο το  $^{134}\text{Cs}$ , καθώς τα υπόλοιπα ισότοπα είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του γεωμετρικού μοντέλου του ανιχνευτή. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δύο φωτόνια με τα μεγαλύτερα ποσοστά εκπομπής, ενέργειας 604.72 keV και 795.86 keV και τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5.8<sup>102</sup>. Οι αβεβαιότητες είναι ολικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Ως πειραματική τιμή λαμβάνεται η σταθμισμένη μέση τιμή των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$eff_{\text{πειρ.}}$	$eff_{\text{προσ.}}$	Απόκλιση <sup>103</sup>	<i>U</i>
$^{134}\text{Cs}$	604.72	0.0076 ± 3.1%	0.0077 ± 3.5%	+1.3%	0.280
	795.86	0.0062 ± 6.6%	0.0060 ± 3.9%	-3.2%	0.423

Πίνακας 5.8: Σύγκριση τιμών απόδοσης που έχει εκτιμηθεί πειραματικά και μέσω προσομοίωσης με τον κώδικα χρήστη *penmain\_css* για τη γεωμετρία «2».

Οι στατιστικοί δείκτες για την περίπτωση πηγής γεωμετρίας «2» δείχνουν ότι ο κώδικας χρήστη *penmain\_css* προσομοιώνει ικανοποιητικά το σύστημα XtRa - CSS για λειτουργία αντί-σύμπτωσης και για τη συγκεκριμένη γεωμετρία όγκου, καθώς οι αποκλίσεις των υπολογιζόμενων τιμών απόδοσης δεν είναι στατιστικά σημαντικές, ακόμα και για το πολυενεργειακό  $^{134}\text{Cs}$ .

<sup>102</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 130 – 132, 140, 142, 150, 156, 160.

<sup>103</sup> Όπου ως απόκλιση εννοείται της τιμής της προσομοίωση από την αντίστοιχη πειραματική.



### 5.6.1.2 Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για πηγές γεωμετρίας «8»

Για την αξιολόγηση του κώδικα για τη γεωμετρία «8» ( $40.0 \text{ cm}^3$ ) αναλύθηκαν τα δείγματα WT083 (Παράγραφος 4.3.3), και MKCl8 (Παράγραφος 4.3.1) και χρησιμοποιήθηκαν τα ισότοπα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  και  $^{40}\text{K}$ . Για το  $^{134}\text{Cs}$  χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δύο φωτοκορυφές 604.72 keV και 795.86 keV, οι οποίες αντιστοιχούν στα φωτόνια με τα μεγαλύτερα ποσοστά εκπομπής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.9<sup>104</sup>. Οι αβεβαιότητες είναι ολικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$eff_{\text{πειρ.}}$	$eff_{\text{προσ.}}$	Απόκλιση <sup>103</sup>	<i>U</i>
$^{241}\text{Am}$	59.54	0.185 ± 3.3%	0.1771 ± 2.4%	-4.3%	1.067
$^{137}\text{Cs}$	661.62	0.061 ± 1.8%	0.0590 ± 2.4%	-3.3%	1.120
$^{134}\text{Cs}$	604.72	0.0168 ± 4.2%	0.0158 ± 2.8%	-6.0%	1.206
	795.86	0.0135 ± 4.8%	0.0123 ± 2.9%	-8.9%	1.619
$^{60}\text{Co}$	1173.24	0.0158 ± 1.9%	0.0160 ± 2.8%	+1.3%	0.370
	1332.50	0.0141 ± 2.1%	0.0142 ± 2.9%	+0.7%	0.199
$^{40}\text{K}$	1460.75	0.0341 ± 0.7%	0.0347 ± 2.5%	+1.8%	0.672

Πίνακας 5.9: Σύγκριση τιμών απόδοσης που έχει εκτιμηθεί πειραματικά και μέσω προσομοίωσης με τον κώδικα χρήστη *penmain\_css* για τη γεωμετρία «8».

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκλίνουν με τα αντίστοιχα πειραματικά, ακόμα και για τα πολυενεργειακά ισότοπα  $^{60}\text{Co}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , αν και για το δεύτερο οι υπολογιζόμενες αποκλίσεις είναι κάπως υψηλές, χωρίς όμως να παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές. Κατά συνέπεια, θεωρείται ότι ο κώδικας χρήστη *penmain\_css* προσομοιώνει ικανοποιητικά την ανάλυση δείγματος γεωμετρίας «8» με χρήση της ενεργητικής θωράκισης σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης.

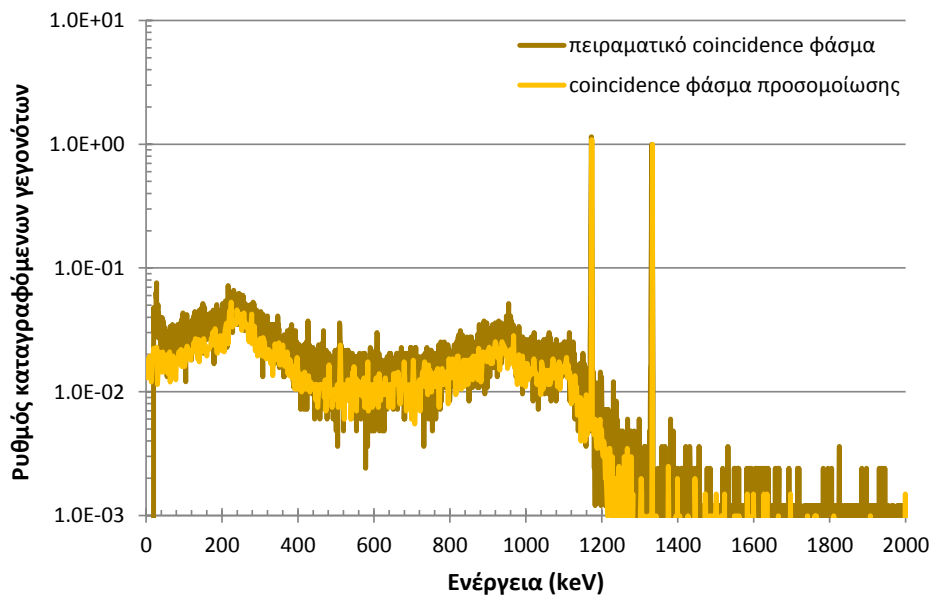
### 5.6.2 Αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode)

Η αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για λειτουργία σύμπτωσης πραγματοποιήθηκε με αντίστοιχο τρόπο, όπως και για τη λειτουργία αντί-σύμπτωσης:

<sup>104</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.3, φάσματα 114, 135, 136.

- ποιοτικά, μέσω σύγκρισης της εικόνας του φάσματος προσομοίωσης με το αντίστοιχο πειραματικό για σημειακή πηγή  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση 73 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή
- ποσοτικά, για τις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου «2» και «8», μόνο για τα πολυενεργειακά ισότοπα  $^{60}\text{Co}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής, όπως υπολογίζεται σύμφωνα τη Σχέση (5.4)

Στην Εικόνα 5.15 παρατίθεται το φάσμα που προκύπτει από την προσομοίωση<sup>105</sup> για λειτουργία σύμπτωσης και το αντίστοιχο πειραματικό, για σημειακή πηγή  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση 73 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή. Για να είναι δυνατή η σύγκριση και τα δύο φάσματα έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την φωτοκορυφή ενέργειας 1332.50 keV. Τα δύο φάσματα επικαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό, γεγονός που δείχνει ότι το φάσμα σε λειτουργία σύμπτωσης προσομοιώνεται ικανοποιητικά με τον κώδικα χρήστη *penmain\_css*.

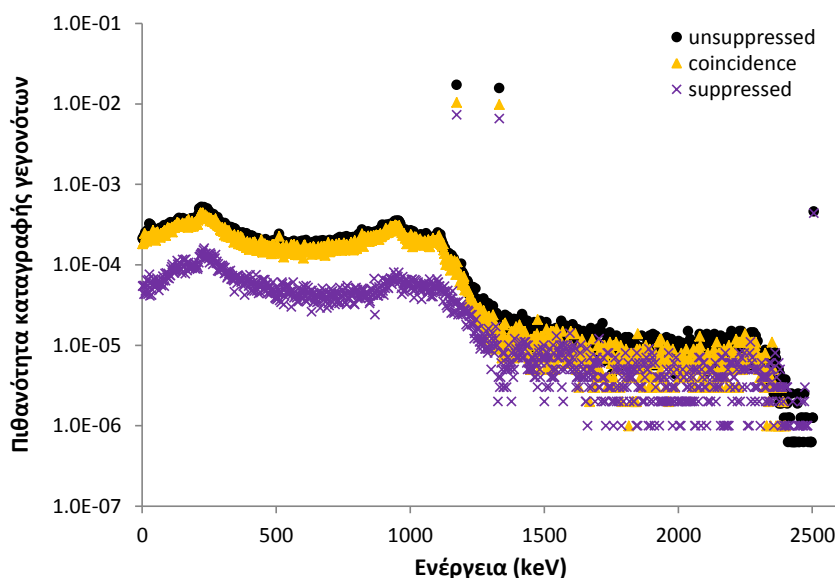


Εικόνα 5.15: Φάσμα σε λειτουργία σύμπτωσης (πειραματικό και μέσω προσομοίωσης) σημειακής πηγής  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση 73 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή.

Στην Εικόνα 5.16 δίνονται τα φάσματα πηγής  $^{60}\text{Co}$  γεωμετρίας «2», όπως αυτά προέκυψαν από την προσομοίωση. Κατ' αρχήν, διαπιστώνεται ότι το συνεχές υπόστρωμα στο φάσμα coincidence παραμένει στα ίδια επίπεδα με το unsuppressed φάσμα, όπως αναμενόταν με βάση τα πειραματικά φάσματα

<sup>105</sup> Για τη σύγκριση του φάσματος προσομοίωσης με το αντίστοιχο πειραματικό, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *trspec*, όπως και στην περίπτωση της λειτουργίας αντί-σύμπτωσης.

υποστρώματος που λήφθηκαν με τους τρεις τρόπους λειτουργίας (Κεφάλαιο 3). Όσον αφορά τις φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης, στο coincidence φάσμα εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με το unsuppressed, αλλά αυξημένες ως προς το suppressed. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι φωτοκορυφές στο coincidence και στο suppressed φάσμα στατιστικά αθροίζουν στις αντίστοιχες φωτοκορυφές του unsuppressed φάσματος. Ως εκ τούτου, αναμένεται οι φωτοκορυφές του  $^{60}\text{Co}$  στο coincidence φάσμα να είναι μικρότερες σε όρους επιφάνειας από ότι στο unsuppressed και μεγαλύτερες από ότι στο suppressed. Χαρακτηριστική είναι και η περίπτωση της αθροιστικής φωτοκορυφής στην ενέργεια 2505 keV, η οποία στο coincidence φάσμα δεν εμφανίζεται καθόλου, καθώς και τα δύο φωτόνια ανιχνεύονται στο πρωτεύοντα ανιχνευτή, χωρίς να υπάρχει σήμα στον δευτερεύοντα.



Εικόνα 5.16: Φάσμα πηγής  $^{60}\text{Co}$  σε γεωμετρία «2» όπως έχουν προσομοιωθεί από τον κώδικα χρήση *penmain\_css*.

### 5.6.2.1 Αξιολόγηση κώδικα χρήστη *penmain\_css* για πηγές γεωμετρίας «2» σε λειτουργία σύμπτωσης

Για την αξιολόγηση του κώδικα χρήστη *penmain\_css* για πηγές γεωμετρίας «2» αναλύθηκαν τα δείγματα WT088 και WT089<sup>106</sup> (Παράγραφος 4.3.5). Από τα περιεχόμενα ισότοπα χρησιμοποιήθηκε το  $^{60}\text{Co}$  από το δείγμα WT088 και το  $^{134}\text{Cs}$

<sup>106</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.4, φάσματα 163 – 164.

από το δείγμα WT089, και πάλι, για το τελευταίο χρησιμοποιούνται μόνο οι φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στα φωτόνια με το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής. Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζεται η σύγκριση της πειραματικής απόδοσης με την αντίστοιχη απόδοση που εκτιμήθηκε μέσω προσομοίωσης, για κάθε ισότοπο. Οι αβεβαιότητες είναι ολικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$eff_{πειρ.}$	$eff_{προσ.}$	Απόκλιση <sup>107</sup>	U
<sup>134</sup> Cs	604.72	0.0169 ± 1.0%	0.0173 ± 2.8%	+2.4%	0.791
	795.85	0.0153 ± 1.3%	0.0157 ± 2.9%	+2.6%	0.813
<sup>60</sup> Co	1173.24	0.0101 ± 1.5%	0.0106 ± 2.5%	+5.0%	1.630
	1332.50	0.0097 ± 1.4%	0.00981 ± 2.5%	+1.1%	0.390

Πίνακας 5.10: Σύγκριση τιμών απόδοσης για τη γεωμετρία «2» που έχουν εκτιμηθεί πειραματικά και μέσω προσομοίωσης με τον κώδικα χρήστη *penmain\_css* για λειτουργία σύμπτωσης.

Όπως φαίνεται, οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής όπως υπολογίζεται με βάση την προσομοίωση και με βάση τα πειραματικά δεδομένα δεν διαφέρουν περισσότερο από 3%, απόκλιση που βρέθηκε στατιστικά μη σημαντική και για τα δύο πολυενεργειακά ισότοπα <sup>134</sup>Cs και <sup>60</sup>Co που εξετάστηκαν. Εξαιρέση αποτελούν μόνο τα φωτόνια του <sup>60</sup>Co ενέργειας 1173.24 keV για τα οποία παρατηρείται υψηλότερη απόκλιση, της τάξεως του 5%, και για την οποία όμως ο στατιστικός έλεγχος δείχνει ότι δεν είναι στατιστικά σημαντική. Εν κατακλείδι, ο κώδικας προσομοιώνει ικανοποιητικά την ανάλυση δείγματος γεωμετρίας «2» σε λειτουργία σύμπτωσης.

## 5.7 Βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS μέσω προσομοίωσης

Μετά την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας του κώδικα χρήστη *penmain\_css*, είναι δυνατή η χρήση του με σκοπό τη βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS. Στο πλαίσιο της Δ.Δ. πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση απόδοσης για τις τρεις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., τόσο χωρίς τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης, όσο και με αυτήν, σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα). Βαθμονόμηση για την περίπτωση λειτουργίας σύμπτωσης δεν πραγματοποιήθηκε, καθώς – όπως

<sup>107</sup> Όπου ως απόκλιση εννοείται της τιμής της προσομοίωση από την αντίστοιχη πειραματική.

αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 – στις συνήθεις εφαρμογές στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. στο σύστημα Compton Suppression επιλέγεται η λειτουργία αντί-σύμπτωσης. Στην περίπτωση βέβαια που απαιτείται η βαθμονόμηση μέσω προσομοίωσης για λειτουργία σύμπτωσης, αυτό είναι δυνατό με χρήση του κώδικα χρήστη *penmain\_css*.

Στους Πίνακες 5.11 και 5.12 δίνονται οι τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής που υπολογίστηκαν με τον κώδικα χρήστη *penmain\_css* για υλικό πηγής 4M HCl. Οι αβεβαιότητες που δίνονται στους Πίνακες είναι οι ολικές, δηλαδή έχει ληφθεί υπόψη και η συστηματική αβεβαιότητα που εισάγεται λόγω της επιλογής των συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, η οποία εκτιμάται περί το 2.4% (1σ). Πρέπει να αναφερθεί ότι για την περίπτωση του suppressed φάσματος (λειτουργία αντί-σύμπτωσης), η επιλογή των ενεργειών για τις οποίες έγινε προσομοίωση ήταν τέτοια ώστε να υπάρχει αντιστοιχία με τις ενέργειες του unsuppressed φάσματος. Έτσι, προσομοιώθηκαν φωτόνια τα οποία ενώ στην πραγματικότητα ενδεχομένως εκπέμπονται σε σειρά με άλλα (π.χ. τα φωτόνια του  $^{60}\text{Co}$ ), κατά την προσομοίωση θεωρήθηκαν ως μοναδικά εκπεμπόμενα. Άλλωστε, η καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης στην περίπτωση λειτουργίας σε αντί-σύμπτωση έχει νόημα μόνο για μονοενεργειακά ισότοπα, ενώ για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά η απόκριση του συστήματος πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση και κατά ισότοπο.

<b>Αποδόσεις φωτοκορυφής unsuppressed φάσματος</b>			
<b>Ενέργεια (keV)</b>	<b>γεωμετρία «2»</b>	<b>γεωμετρία «5»</b>	<b>γεωμετρία «8»</b>
59.54	0.0599 ± 2.4%	0.1281 ± 2.4%	0.1722 ± 2.3%
88.03	0.0644 ± 2.4%	0.1347 ± 2.4%	0.1777 ± 2.3%
122.06	0.0614 ± 2.4%	0.1276 ± 2.4%	0.1667 ± 2.3%
165.85	0.0560 ± 2.4%	0.1152 ± 2.4%	0.1489 ± 2.3%
279.19	0.0430 ± 2.5%	0.0833 ± 2.4%	0.1063 ± 2.4%
391.69	0.0347 ± 2.6%	0.0659 ± 2.4%	0.0836 ± 2.4%
514.00	0.0289 ± 2.5%	0.0555 ± 2.4%	0.0696 ± 2.4%
661.62	0.0246 ± 2.5%	0.0474 ± 2.4%	0.0588 ± 2.4%
898.07	0.0207 ± 2.7%	0.0383 ± 2.5%	0.0478 ± 2.4%
1173.24	0.0182 ± 2.5%	0.0326 ± 2.5%	0.0409 ± 2.4%
1332.50	0.0165 ± 2.6%	0.0303 ± 2.5%	0.0370 ± 2.4%
1460.75	0.0159 ± 2.8%	0.0286 ± 2.5%	0.0349 ± 2.4%
1836.08	0.0135 ± 2.5%	0.0239 ± 2.5%	0.0296 ± 2.4%

**Πίνακας 5.11:** Αποδόσεις φωτοκορυφής unsuppressed φάσματος που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης για υλικό 4M HCl.

Αποδόσεις φωτοκορυφής <i>suppressed</i> φάσματος			
Ενέργεια (keV)	γεωμετρία «2»	γεωμετρία «5»	γεωμετρία «8»
59.54	0.0601 ± 2.5%	0.1281 ± 2.4%	0.1719 ± 2.3%
88.03	0.0642 ± 2.5%	0.1355 ± 2.4%	0.1776 ± 2.3%
122.06	0.0618 ± 2.5%	0.1280 ± 2.4%	0.1676 ± 2.3%
165.85	0.0562 ± 2.5%	0.1138 ± 2.4%	0.1490 ± 2.3%
279.19	0.0430 ± 2.5%	0.0838 ± 2.4%	0.1070 ± 2.4%
391.69	0.0340 ± 2.5%	0.0656 ± 2.4%	0.0837 ± 2.4%
514.00	0.0282 ± 2.6%	0.0553 ± 2.4%	0.0692 ± 2.4%
661.62	0.0244 ± 2.6%	0.0467 ± 2.4%	0.0585 ± 2.4%
898.07	0.0206 ± 2.8%	0.0386 ± 2.4%	0.0481 ± 2.4%
1173.24	0.0178 ± 2.9%	0.0323 ± 2.4%	0.0406 ± 2.5%
1332.50	0.0168 ± 2.9%	0.0301 ± 2.4%	0.0373 ± 2.5%
1460.75	0.0155 ± 2.9%	0.0282 ± 2.4%	0.0352 ± 2.5%
1836.08	0.0135 ± 2.5%	0.0238 ± 2.4%	0.0298 ± 2.5%

Πίνακας 5.12: Αποδόσεις φωτοκορυφής *suppressed* φάσματος που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης για υλικό 4M HCl).

Οι τιμές των αποδόσεων που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης (για το *unsuppressed* φάσμα και το *suppressed* φάσμα) δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους για κάθε ενέργεια, κάτι που άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Στις τιμές των αποδόσεων που υπολογίστηκαν μέσω του κώδικα χρήστη *remain\_css* προσαρμόστηκαν δύο καμπύλες δευτέρου βαθμού, της μορφής  $\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(E) + \alpha_2 \cdot \ln(E)^2$ , που καλύπτουν αντίστοιχα τις ενεργειακές περιοχές 50.0 – 279.19 keV και 279.19 – 2000 keV<sup>108</sup> (Πίνακας 5.13).

Απόδοση φωτοκορυφής											
	Γεωμ.	$E < 279.19 \text{ keV}$					$E > 279.19 \text{ keV}$				
		$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	RMS	$R^2$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	RMS	$R^2$
<i>unsuppressed</i>	«2»	-8.89102	2.72877	-0.30353	1.2%	0.9960	1.22497	-0.90710	0.02313	1.5%	0.9987
	«5»	-8.64586	2.98768	-0.33630	0.5%	0.9996	1.14905	-0.64360	-0.00052	1.1%	0.9994
	«8»	-7.99385	2.86099	-0.32665	0.4%	0.9998	1.78212	-0.74892	0.00596	0.8%	0.9997
<i>suppressed</i>	«2»	-8.94734	2.75390	-0.30619	0.8%	0.9979	1.71315	-1.06295	0.03520	1.5%	0.9987
	«5»	-8.43654	2.90092	-0.32738	1.1%	0.9978	1.35438	-0.70190	0.00347	1.0%	0.9995
	«8»	-8.04140	2.87661	-0.32775	0.3%	0.9998	2.31132	-0.91343	0.01866	0.8%	0.9997

Πίνακας 5.13: Παράμετροι καμπυλών βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS μέσω προσομοίωσης (4M HCl).

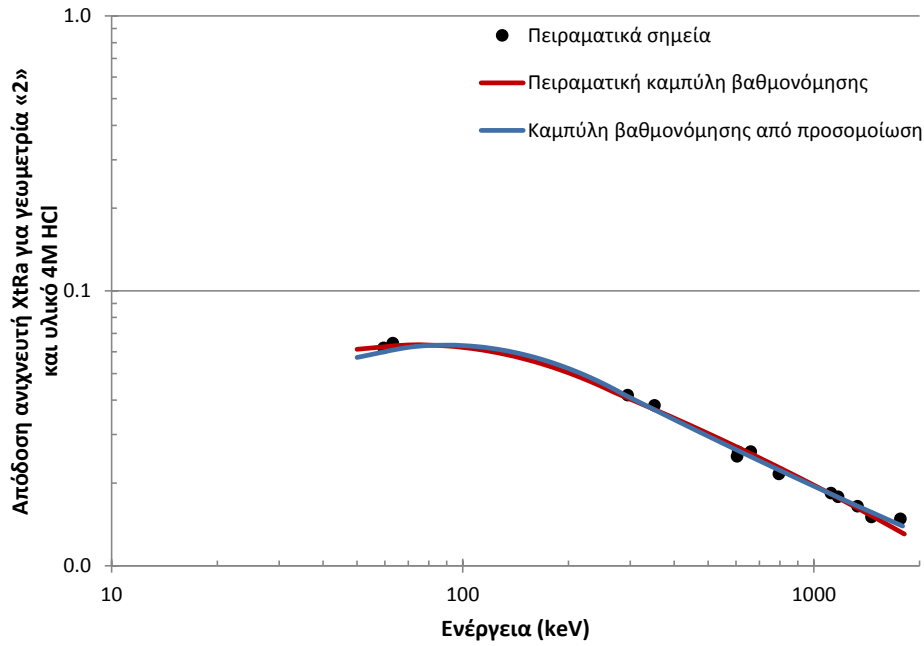
<sup>108</sup> Η επιλογή της ενέργειας 279.19 keV ως διαχωριστικό σημείο των δύο καμπυλών (midpoint) έγινε διότι όπως έχει προκύψει από μακροχρόνια εμπειρία στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., οι καμπύλες στις δύο ενεργειακές περιοχές που προκύπτουν προσαρμόζονται πολύ ικανοποιητικά στα διαθέσιμα σημεία.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι ενώ οι αποδόσεις φωτοκορυφής στο unsuppressed και στο suppressed φάσμα δεν διαφέρουν, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τις ολικές αποδόσεις. Για τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης λαμβάνεται υπόψη ολόκληρο το ενεργειακό φάσμα, το οποίο στο suppressed φάσμα είναι σημαντικά μικρότερο από ότι στο unsuppressed. Ο προσδιορισμός των καμπυλών ολικής απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης, είναι απαραίτητος και για την πραγματοποίηση διορθώσεων ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) με το πρόγραμμα TrueCoinc. Δεδομένου ότι για τα δύο φάσματα unsuppressed και suppressed η ολική απόδοση είναι διαφορετική, πρέπει να προσδιοριστούν και για τα δύο φάσματα καμπύλες του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση φωτοκορυφής. Στις τιμές του λόγου των αποδόσεων που υπολογίστηκαν μέσω του κώδικα *penmain\_css* προσαρμόστηκαν καμπύλες δευτέρου βαθμού, της μορφής  $\ln(\text{efficiency}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(E) + \alpha_2 \cdot \ln(E)^2$ , που καλύπτουν την ενεργειακή περιοχή 50.0 – 2000 keV (Πίνακας 5.14).

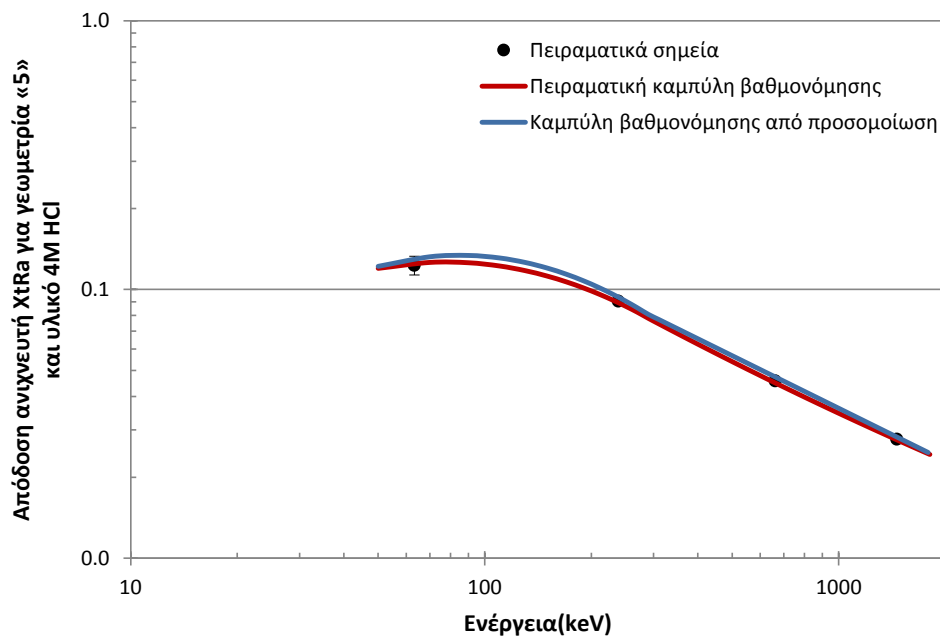
<b>Παράμετροι καμπυλών <math>tpr=f(E)</math></b>						
<b>Φάσμα</b>	<b>Γεωμετρία</b>	<b><math>\alpha_0</math></b>	<b><math>\alpha_1</math></b>	<b><math>\alpha_2</math></b>	<b>RMS</b>	<b><math>R^2</math></b>
<i>unsuppressed</i>	«2»	-0.21383	0.00408	0.03441	3.5%	0.9950
	«5»	0.21931	-0.19512	0.05138	3.9%	0.9936
	«8»	0.21570	-0.23324	0.05578	4.3%	0.9927
<i>suppressed</i>	«2»	0.41600	-0.07636	0.01924	1.8%	0.9899
	«5»	0.43259	-0.14186	0.02880	0.8%	0.9988
	«8»	0.58817	-0.23237	0.03701	0.6%	0.9994

Πίνακας 5.14: Παράμετροι καμπυλών του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS μέσω προσομοίωσης (4M HCl).

Για λόγους σύγκρισης, στις παρακάτω Εικόνες 5.17, 5.18 και 5.19 δίνονται σε μορφή διαγράμματος οι καμπύλες απόδοσης φωτοκορυφής που προσδιορίστηκαν μέσω προσομοίωσης, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα και τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες που προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Όπως φαίνεται, οι καμπύλες που προσδιορίστηκαν μέσω προσομοίωσης συγκλίνουν με τις αντίστοιχες που προσδιορίστηκαν πειραματικά. Παρατηρείται πολύ καλή σύμπτωση για την περιοχή υψηλών ενεργειών, ενώ στην περιοχή χαμηλών ενεργειών (< 200 keV) η σύμπτωση είναι εν γένει ικανοποιητική, με εξαίρεση στις ενέργειες κάτω από τα ~50 keV, όπου φαίνεται ότι οι καμπύλες δεν συγκλίνουν ιδιαίτερα ικανοποιητικά.



Εικόνα 5.17: Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή ΧtRa για γεωμετρία «2» και υλικό  $4M HCl^{109}$ .

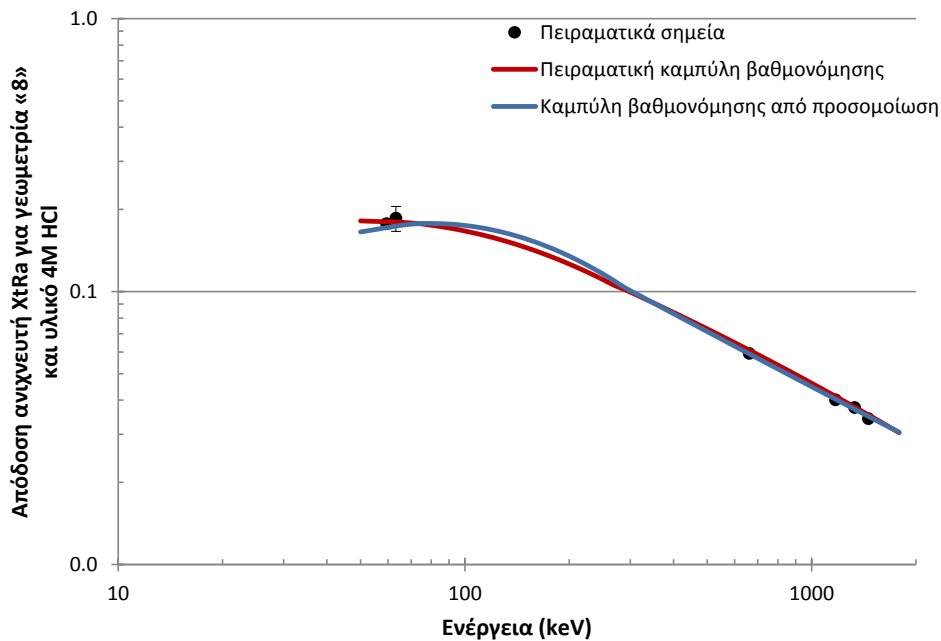


Εικόνα 5.18: Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή ΧtRa για γεωμετρία «5» και υλικό  $4M HCl^{110}$ .

<sup>109</sup> Μέση απόκλιση καμπύλης προσομοίωσης από πειραματική καμπύλη:  
1.1% για  $E < 200$  keV, -1.0% για  $E: 200 - 1000$  keV, 2.5% για  $E > 1000$  keV

<sup>110</sup> Μέση απόκλιση καμπύλης προσομοίωσης από πειραματική καμπύλη:  
5.5% για  $E < 200$  keV, 4.8% για  $E: 200 - 1000$  keV, 2.7% για  $E > 1000$  keV

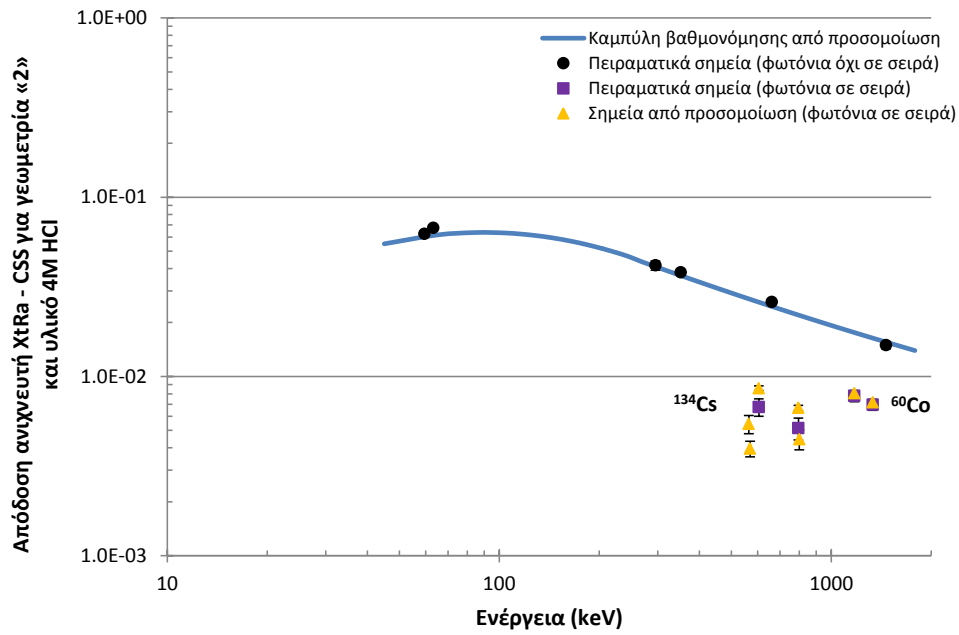




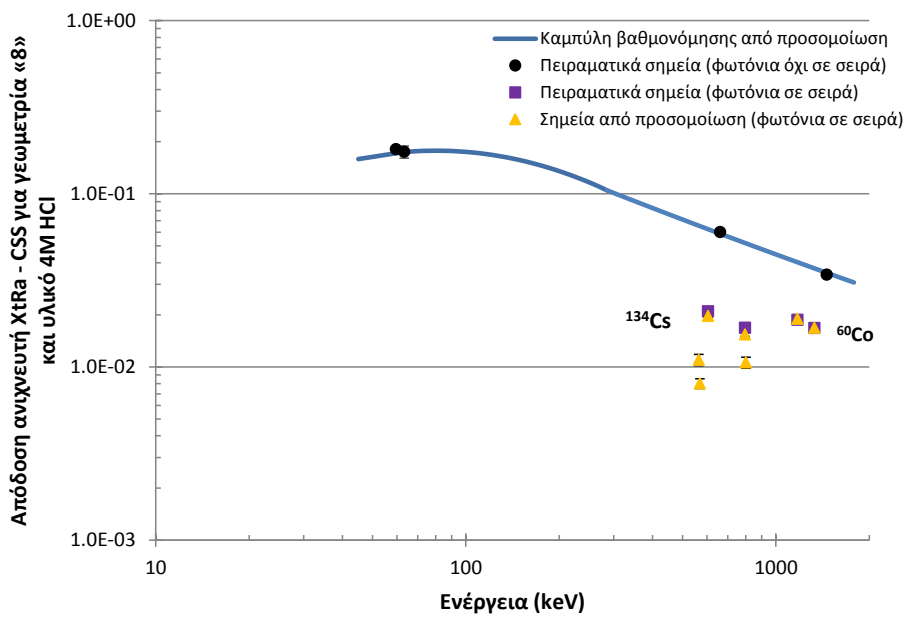
Εικόνα 5.19: Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή ΧtRa για γεωμετρία «8» και υλικό 4M HCl<sup>111</sup>.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνιση της απόδοσης φωτοκορυφής, για φωτόνια πολυενεργειακών ισοτόπων στο suppressed φάσμα, σε σχέση με την καμπύλη βαθμονόμησης για το suppressed φάσμα, η οποία υπενθυμίζεται ότι πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για την περίπτωση φωτονίων που δεν εκπέμπονται σε σειρά. Για τη σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι αποδόσεις των πολυενεργειακών ισοτόπων  $^{60}\text{Co}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα πειραματικά σημεία για τις γεωμετρίες «2» και «8». Στην Εικόνα 5.20 παρατίθενται οι τιμές της απόδοσης για τη γεωμετρία «2» και στην Εικόνα 5.21 για τη γεωμετρία «8». Είναι εμφανές ότι η χρήση της εν λόγω καμπύλης βαθμονόμησης δεν ενδείκνυται για την περίπτωση ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, καθώς η απόδοση φωτοκορυφής για τέτοια ισότοπα – όταν το σύστημα Compton Suppression λειτουργεί σε αντί-σύμπτωση – αποκλίνει κατά πολύ από την καμπύλη. Οι αποδόσεις για τις ενέργειες φωτονίων που εκπέμπονται σε σειρά δεν φαίνεται να ακολουθούν κάποια καμπύλη (αν και τα σημεία είναι πολύ λίγα), καθώς εξαρτώνται από το σχήμα διάσπασης του ισοτόπου και όχι μόνον από την ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων.

<sup>111</sup> Μέση απόκλιση καμπύλης προσομοίωσης από πειραματική καμπύλη:  
3.4% για  $E < 200$  keV, -1.5% για  $E: 200 - 1000$  keV, -1.5% για  $E > 1000$  keV



Εικόνα 5.20: Απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa - CSS σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης, για γεωμετρία «2» και υλικό 4M HCl.



Εικόνα 5.21: Απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa - CSS σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης, για γεωμετρία «8» και υλικό 4M HCl.

# ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

```

TITLE Title of the job, up to 120 characters.

>>>>>> Source definition.
SKPAR KPAR [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG SE0 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPECTR Ei, Pi [E bin: lower-end and total probability]
SPOSIT SX0, SY0, SZ0 [Coordinates of the source]
SDIREC STHETA, SPHI [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT SALPHA [Beam aperture, in deg]

>>>>>> Input phase-space file (psf).
IPSFN psf_filename.ext [Input psf name, 20 characters]
IPSPLI NSPLIT [Splitting number]
EPMAX EPMAX [Maximum energy of particles in the psf]

>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT NMAT [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR M, EABS(1:3,M), C1,C2,WCC,WCR [Sim. parameters for material M]
PFNAME mat_filename.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN geo_filename.geo [Geometry definition file, 20 chars]
DSMAX IBODY, DSMAX(IBODY) [IB, maximum step length (cm) in body IB]

>>>>>> Interaction forcing.
IFORCE KB, KPAR, ICOL, FORCER, WLOW, WHIG [Interaction forcing]

>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE EMIN, EMAX, NBE [E-interval and no. of energy bins]
NBTH NBTH [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH NBPH [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>> Impact detectors (up to 5 different detectors).
IMPDET EDIL, EDIU, NCHI, IPSF [Energy window, no. of channels and IPSF]
IDPSF pm_psf_impdet_#.dat [Output psf file name, 20 chars]
IDSPC pm_spc_impdet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
IDBODY KB [Active body; one line for each body]
IDKPAR KPAR [Kind of detected particles, one line each]

>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE EMIN, EMAX, NBE [E-interval and no. of energy bins]
NBTH NBTH [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH NBPH [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>> Impact detectors (up to 5 different detectors).
IMPDET EDIL, EDIU, NCHI, IPSF [Energy window, no. of channels and IPSF]
IDPSF pm_psf_impdet_#.dat [Output psf file name, 20 chars]
IDSPC pm_spc_impdet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
IDBODY KB [Active body; one line for each body]
IDKPAR KPAR [Kind of detected particles, one line each]

>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 5).
ENDDET EDEL, EDEU, NCHE [Energy window and number of channels]
EDSPC pm_spc_enddet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY KB [Active body; one line for each body]

>>>>>> Dose distribution.
GRIDX XL, XU [X coordinates of the enclosure vertices]
GRIDY YL, YU [Y coordinates of the enclosure vertices]
GRIDZ ZL, ZU [Z coordinates of the enclosure vertices]
GRIDBN NX, NY, NZ [Numbers of bins]

>>>>>> Job properties.
RESUME dumpfile_1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dumpfile_2.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP DUMPP [Dumping period, in sec]

NSIMSH DSHN [Desired number of simulated showers]
RSEED ISEED1, ISEED2 [Seeds of the random number generator]
TIME TIMEA [Allotted simulation time, in sec]

```

Σχήμα 5.1: Το αρχείο εισόδου τύπου *.in* του κώδικα χρήστη *penmain.f*.



```

*****
** Program PENMAIN. Input data file. **
*****

Date and time: 12th Feb 2013. 13:42:47

XtRa detector, CSS, cation resin box geometry for Be-7.

-----
>>>>> Source description.
Primary particles: photons
Initial energy = 4.776000E+05 eV
Coordinates of centre: SX0 = 0.000000E+00 cm
                      SY0 = 0.000000E+00 cm
                      SZ0 = 0.000000E+00 cm
Beam direction angles: THETA = 0.000000E+00 deg
                      PHI = 0.000000E+00 deg
Beam aperture:        ALPHA = 1.800000E+02 deg

-----
>>>>> Material data and simulation parameters.
Number of different materials = 1

**** 1st material
Electron absorption energy = 4.800000E+03 eV
Photon absorption energy = 4.800000E+02 eV
Positron absorption energy = 4.800000E+03 eV
Electron-positron simulation parameters:
C1 = 1.000000E-01, C2 = 1.000000E-01
Wcc = 1.000000E+04 eV, Wcr = 1.000000E+03 eV

PENELOPE's material definition file: css_resin.mat

...

PENGEOm's geometry definition file: css_resin.geo

-----
>>>>> Maximum allowed step lengths of electrons and positrons.
* Body = 1, DSMAX = 1.000000E+20 cm

-----
>>>>> Energy and angular distributions of emerging particles.
E: NBE = 100, EMIN = 1.000000E+03 eV, EMAX = 4.780000E+05 eV
Theta: NBTH = 45
Phi: NBPH = 18

-----
>>>>> Energy-deposition detector # 1
Energy window = ( 1.000000E+03, 4.780000E+05) eV, no. of channels = 1000
Output spectrum: pm_spc_enddet_1.dat
Active body = 15
Active body = 16

-----
>>>>> Job characteristics.
Resume simulation from previous dump file: dump1.dat
Write final counter values on the dump file: dump1.dat
Dumping period: DUMPP = 6.000000E+02

Number of showers to be simulated = 1.000000E+09
Computation time available = 5.000000E+15 sec

...

```

Σχήμα 5.3: Το πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου δεδομένων *penmain.dat*.

```

...
*****
**   Program PENMAIN. Results.   **
*****

Simulation time ..... 1.861359E+03 sec
Simulation speed ..... 1.582870E+02 showers/sec

Simulated primary showers ..... 2.946290E+05

Transmitted primary particles ..... 2.000000E+00
Backscattered primary particles ..... 4.290000E+02
Absorbed primary particles ..... 2.941980E+05

Fractional transmission ..... 6.788198E-06 +- 1.4E-05
Fractional backscattering ..... 1.466251E-03 +- 2.3E-04
Fractional absorption ..... 9.985371E-01 +- 2.1E-04

Secondary-particle generation probabilities:
-----
|           | electrons | photons | positrons |
-----|-----|-----|-----|
| transmitted | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
|           | +- 0.0E+00 | +- 0.0E+00 | +- 0.0E+00 |
-----|-----|-----|-----|
| backscattered | 6.788198E-06 | 1.018230E-05 | 0.000000E+00 |
|           | +- 2.0E-05 | +- 1.8E-05 | +- 0.0E+00 |
-----|-----|-----|-----|
| absorbed | 6.920330E+00 | 1.785778E+00 | 0.000000E+00 |
|           | +- 1.1E-02 | +- 6.9E-03 | +- 0.0E+00 |
-----|-----|-----|-----|

Average deposited energies (bodies):
  Body   1 ..... 9.919702E+02 +- 7.6E+01 eV   (effic. = 8.19E-01)

Average deposited energies (energy detectors):
  Detector # 1 ... 6.678925E+04 +- 8.2E+02 eV   (effic. = 3.23E+01)

Last random seeds = 1258694131 , 910358370
-----

```

Σχήμα 5.4: Το δεύτερο μέρος του αρχείου εξόδου δεδομένων *penmain.dat* του κώδικα χρήστη *penmain.f*.

```

# Results from PENMAIN. Output from energy-deposition detector # nn
# WARNING: May be strongly biased if interaction forcing is used!
# 1st column: deposited energy (eV).
# 2nd column: probability density (1/(eV*particle)).
# 3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).

7.510001E+02 3.229292E-08 1.563947E-09
2.251000E+03 4.437856E-08 1.833374E-09
3.751000E+03 4.451322E-08 1.836154E-09
5.251001E+03 4.235026E-08 1.790990E-09
6.751001E+03 4.476571E-08 1.841353E-09
8.251001E+03 4.540534E-08 1.854461E-09
9.751001E+03 5.159965E-08 1.976904E-09
1.125100E+04 4.784603E-08 1.903647E-09
1.275100E+04 4.706333E-08 1.888013E-09
1.425100E+04 4.653311E-08 1.877348E-09
1.575100E+04 4.638162E-08 1.874290E-09
1.725100E+04 4.739156E-08 1.894585E-09
1.875100E+04 4.809010E-08 1.908496E-09
2.025100E+04 4.623854E-08 1.871397E-09
2.175100E+04 4.681084E-08 1.882942E-09
2.325100E+04 4.682767E-08 1.883281E-09
2.475100E+04 4.618804E-08 1.870375E-09
2.625100E+04 4.585981E-08 1.863718E-09
2.775100E+04 4.682767E-08 1.883281E-09
2.925100E+04 4.739156E-08 1.894585E-09
.....

```

Σχήμα 5.5: Το αρχείο εξόδου *pm\_spc\_enddet\_nn.dat* του κώδικα χρήστη *penmain.f*.

```
      SUBROUTINE SUBISOTOPECo60 (RA,NF,E1,E2)
C
C This subroutine reads one random number, simulates a decay scheme
C and gives the number of photons emitted and their energies
C respectively.
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER*4 (I-N)
C
      EXTERNAL RAND
C
      NF=0
      E1=1173.240*1000.0D0 ! The energy of the 1st photon of Co-60
      E2=1332.508*1000.0D0 ! The energy of the 2nd photon of Co-60
C
      IF (RA.LE.0.9988D0) THEN
          NF=2      ! No of photons to be simulated in the disintegration
      ELSE
          NF=1
          E1=0      ! Only one photon is emitted
      ENDIF
      RETURN
      END
```

Σχήμα 5.6: Υπορουτίνα προσομοίωσης του σχήματος διάσπασης  $^{60}\text{Co}$ .

```

TITLE Title of the job, up to 120 characters.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR KPARP [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG SEO [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPECTR Ei,Pi [E bin: lower-end and total probability]
SISOTO SISOTOPE [Isotope]
SPOSIT SX0,SY0,SZ0 [Coordinates of the source]
SDIREC STHETA,SPHI [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT SALPHA [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Input phase-space file (psf).
IPSFN psf_filename.ext [Input psf name, 20 characters]
IPSPLI NSPLIT [Splitting number]
EPMAX EPMAX [Maximum energy of particles in the psf]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT NMAT [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR M,EABS(1:3,M),C1,C2,WCC,WCR [Sim. parameters for material M]
PFNAME mat_filename.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN geo_filename.geo [Geometry definition file, 20 chars]
DSMAX IBODY,DSMAX(IBODY) [IB, maximum step length (cm) in body IB]

>>>>>>> Interaction forcing.
IFORCE KB,KPAR,ICOL,FORCER,WLOW,WHIG [Interaction forcing]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE EMIN,EMAX,NBE [E-interval and no. of energy bins]
NBTH NBTH [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH NBPH [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Impact detectors (up to 5 different detectors).
IMPDET EDIL,EDIU,NCHI,IPSF [Energy window, no. of channels and IPSF]
IDPSF pm_psf_impdet_#.dat [Output psf file name, 20 chars]
IDSPC pm_spc_impdet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
IDBODY KB [Active body; one line for each body]
IDKPAR KPAR [Kind of detected particles, one line each]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE EMIN,EMAX,NBE [E-interval and no. of energy bins]
NBTH NBTH [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH NBPH [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Impact detectors (up to 5 different detectors).
IMPDET EDIL,EDIU,NCHI,IPSF [Energy window, no. of channels and IPSF]
IDPSF pm_psf_impdet_#.dat [Output psf file name, 20 chars]
IDSPC pm_spc_impdet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
IDBODY KB [Active body; one line for each body]
IDKPAR KPAR [Kind of detected particles, one line each]

>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 5).
ENDDDET EDEL,EDEU,NCHE [Energy window and number of channels]
EDSPC pm_spc_enddet_#.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY KB [Active body; one line for each body]

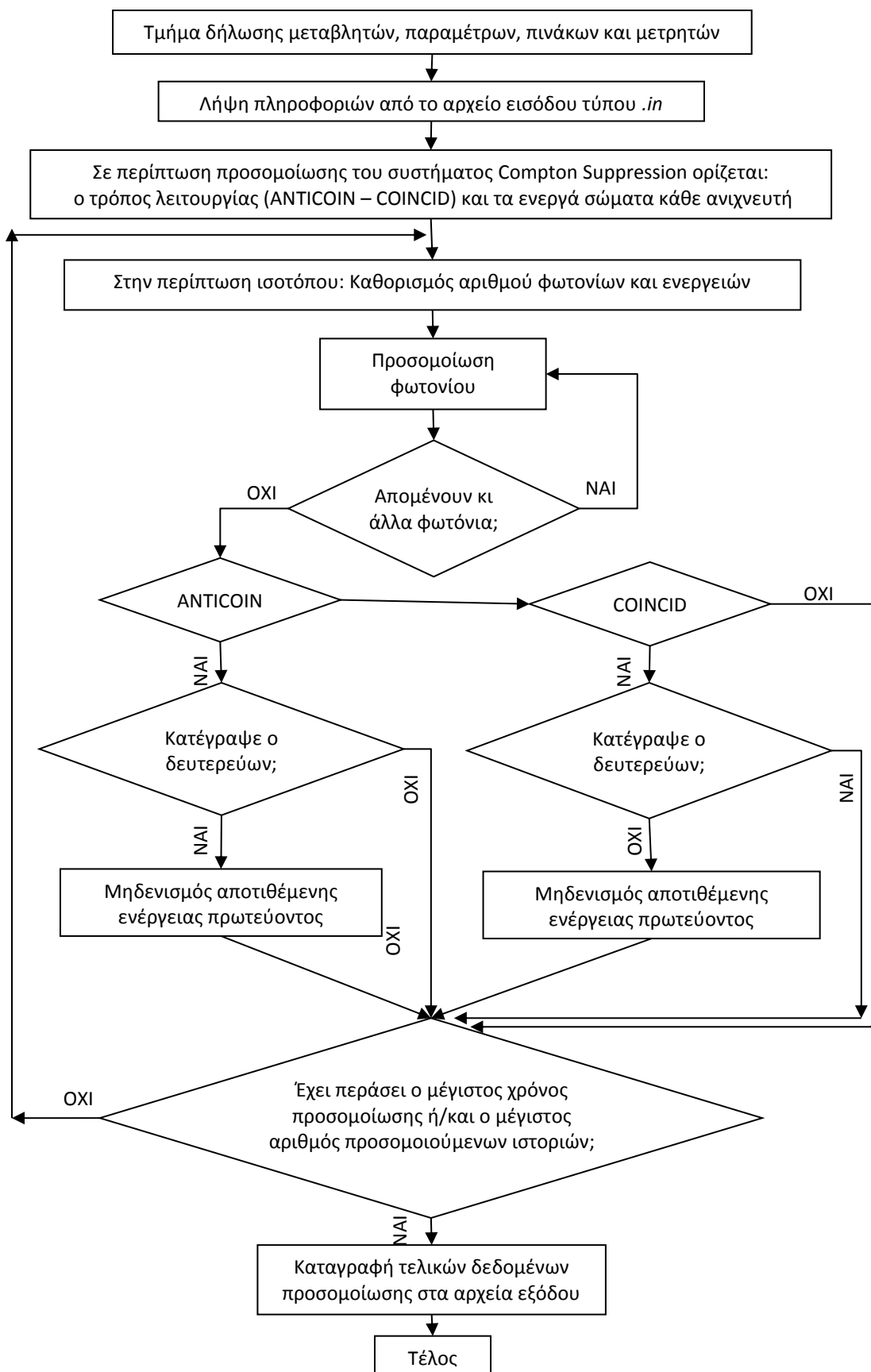
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
EGANTI EDEL,EDEU,NCHE [Energy window and number of channels]
EDBODY KB [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
EGCOIN EDEL,EDEU,NCHE [Energy window and number of channels]
EDBODY KB [Active body; one line for each body]

```

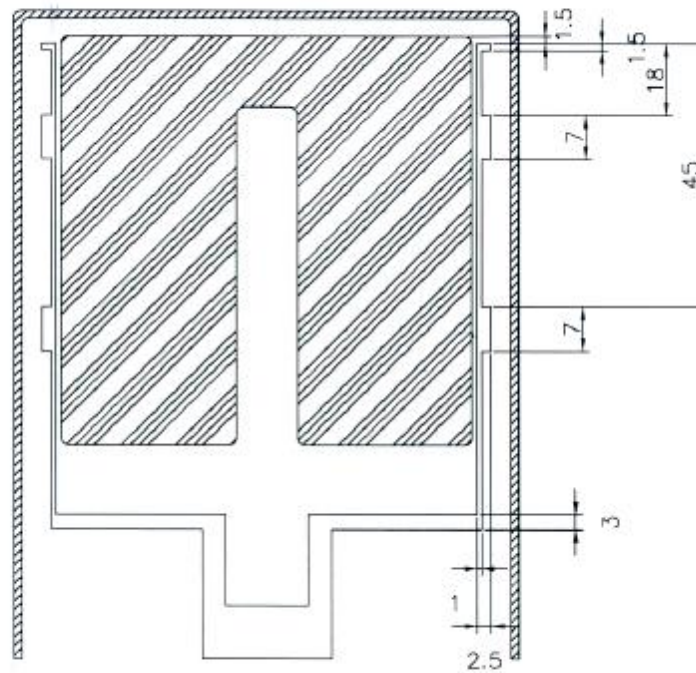
Σχήμα 5.7: Το αρχείο εισόδου τύπου *.in* του κώδικα χρήστη *penmain\_css.f*.





Σχήμα 5.8: Λογικό διάγραμμα κώδικα χρήστη *penmain\_css.f*.

S/N 00078



### Ge Crystal Details

Entrance Window Thickness: 0.4  $\mu\text{m}$  eq. Ge  
 Outer Electrode Thickness: 0.75 mm estimated  
 Inner Electrode Thickness: 0.3  $\mu\text{m}$   
 Crystal Diameter: 80 mm  
 Crystal Length: 78 mm  
 Core Hole Diameter: 11 mm  
 Core Hole Depth: 66.5 mm

### Detector Chamber Material Details

Ge front to inside of endcap distance: 5 mm  
 Cryostat Window Material: Carbon Epoxy Thickness: 0.5 mm  
 Endcap Material: Al Thickness: 1.5 mm  
 Crystal Holder Material: Al

**Σχήμα 5.9:** Κατασκευαστικό σχέδιο του ανιχνευτή XtRa.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## *Προσδιορισμός πολύ χαμηλών επιπέδων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα*

---

### **6.1 Εισαγωγή**

Από τους βασικούς στόχους της Δ.Δ. είναι η ανίχνευση και ο ποσοτικός προσδιορισμός ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις σε περιβαλλοντικά δείγματα. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για την ανάλυση δειγμάτων που περιέχουν τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, όπως δείγματα τα οποία έχουν ρυπανθεί από τα πυρηνικά ατυχήματα στο Chernobyl και στη Fukushima, καθώς και δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια επεισοδίων εμφάνισης υψηλών επιπέδων αιθαλομίχλης στην περιοχή της Αττικής.

Όπως είναι γνωστό, ραδιενεργοί ρύποι εξ αιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl της Ουκρανίας το 1986 έφτασαν μέχρι την Ελλάδα. Αμέσως μετά το ατύχημα έγινε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. μία μεγάλης έκτασης δειγματοληψία χώματος, η οποία κάλυψε ολόκληρη τη χώρα και επέτρεψε την ανίχνευση και τη χαρτογράφηση μίας σειράς ραδιενεργών ισοτόπων (Simopoulos, 1989), (Petrooulos, et al., 1996). Στο πλαίσιο της Δ.Δ. αναλύθηκε εκ νέου με τη διάταξη XtRa - CSS μία σειρά από δείγματα τα οποία είχαν συλλεχθεί κατά την παραπάνω δειγματοληψία. Στόχος των αναλύσεων αυτών ήταν ο προσδιορισμός του <sup>241</sup>Am, το οποίο τεκμηριωμένα είχε έλθει στην

Ελλάδα με το ραδιενεργό νέφος (Simopoulos, 1989), αλλά δεν είχε ανιχνευθεί στα δείγματα χώματος που αναλύθηκαν στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., με δύο εξαιρέσεις.

Κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ. έγινε και το ατύχημα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες της Fukushima στην Ιαπωνία. Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π, κατά την περίοδο του ατυχήματος πραγματοποιήθηκαν συστηματικές αναλύσεις, εφαρμόζοντας τεχνικές δειγματοληψίας και ανάλυσης που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ., με αποτέλεσμα τον ποσοτικό προσδιορισμό πολύ χαμηλών επιπέδων των τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{137}\text{Cs}$ , τόσο σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ, όσο και σε δείγματα υγρών κατακρημνίσεων. Σημαντικό ρόλο στην ανίχνευσή τους έπαιξε η χρήση της διάταξης XtRa - CSS.

Τέλος, στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο της Αττικής, καθώς και τα αποτελέσματα από αναλύσεις ενδεικτικών δειγμάτων τέφρας μετά από καύση ξύλων σε τζάκια. Καθώς τα τελευταία χρόνια κατά τους χειμερινούς μήνες έχει διαπιστωθεί αυξημένη χρήση τζακιών και γενικότερα καύση προϊόντων ξύλου για οικιακή θέρμανση, η μελέτη ενδεχόμενων ραδιοβιολογικών επιπτώσεων από τα αυξημένα σε ορισμένες περιπτώσεις επίπεδα αιθαλομίχλης στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει ενδιαφέρον.

## **6.2 Ανάλυση δειγμάτων που έχουν ρυπανθεί από το ατύχημα του Chernobyl**

Στις 26 Απριλίου του 1986, στη Μονάδα 4 του πυρηνικού εργοστασίου στο Chernobyl της Ουκρανίας, κατά τη διάρκεια πειράματος και εν μέρει και ως συνέπεια λανθασμένων χειρισμών έγινε το μεγαλύτερο – ως εκείνη τη στιγμή – πυρηνικό ατύχημα παγκοσμίως. Αποτέλεσμα του ατυχήματος ήταν η απελευθέρωση τεραστίων ποσοτήτων ραδιενεργών ισοτόπων, με συνέπεια τη σημαντική ρύπανση μεγάλων περιοχών κυρίως της ευρωπαϊκής ηπείρου.

Τον Ιούνιο του 1986, έγιναν οι πρώτες εκτιμήσεις για την ποσότητα των ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία είχαν εκλυθεί λόγω του ατυχήματος του Chernobyl (International Nuclear Safety Group (INSAG), 1986). Έκτοτε έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες και επανεκτιμήσεις, λαμβάνοντας υπόψη – εκτός των άλλων – και την απόθεση εκτός των συνόρων της πρώην Σοβιετικής Ένωσης (Belyaev, et al.,

1991), (Boronov, 1992), (Buzulukon, et al., 1993), (OECD, 1995). Οι αναθεωρημένες εκτιμήσεις, για τις οποίες διαπιστώνεται ευρέως σύγκλιση, δίνονται στον Πίνακα 6.1. Σημειώνεται ότι οι αναθεωρημένες τιμές για την ολική έκλυση  $^{131}\text{I}$  και  $^{137}\text{Cs}$  είναι διπλάσιες από την αρχική εκτίμηση του 1986 (Dreicer, et al., 1996).

Ραδιοϊσότοπο	Έκλυση τον Απρίλιο 1986 (PBq)	Παραμένουσα ραδιενέργεια στο περιβάλλον το 1996 (PBq)	Παραμένουσα ραδιενέργεια στο περιβάλλον το 2056 (PBq)
$^{131}\text{I}$	1200-1700	0	0
$^{90}\text{Sr}$	8	6	1.5
$^{134}\text{Cs}$	44-48	1.6	0
$^{137}\text{Cs}$	74-85	68	17
$^{238}\text{Pu}$	0.03	0.03	0.02
$^{240}\text{Pu}$	0.03	0.03	0.03
$^{241}\text{Pu}$	5.9	3.6	0.2
$^{241}\text{Am}$	0.005	0.08	0.2 <sup>112</sup>

Πίνακας 6.1: Εκτίμηση της παραμένουσας ποσότητας ραδιενεργών ισοτόπων στο περιβάλλον εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl (Dreicer, et al., 1996).

Περί το 85% των συνολικών εκλύσεων ραδιενέργειας αποτελείτο από ισότοπα με χρόνους ημιζωής περί τον ένα μήνα, το 13% ήταν ισότοπα με χρόνους ημιζωής της τάξης των μερικών μηνών, περίπου 1% των ισοτόπων είχαν χρόνους ημιζωής περί τα 30 έτη, ενώ περίπου 0.001% είχε χρόνο ημιζωής άνω των 50 ετών. Ως εκ τούτου, η συνολική ποσότητα ραδιενεργών υλικών που υπήρχε στο περιβάλλον λόγω του ατυχήματος 10 χρόνια μετά (1996) ήταν μόνο το ~1% της ποσότητας που εκλύθηκε αρχικά.

Το μοτίβο της ατμοσφαιρικής διασποράς και απόθεσης των ραδιενεργών ισοτόπων που εκλύθηκαν από τον Π.Α.Ι. του Chernobyl ήταν πολύπλοκο, καθώς η έκλυση διήρκεσε αρκετές μέρες και παρουσίασε σημαντική χρονική κύμανση, αλλά και λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών. Παράδειγμα της πορείας του ραδιενεργού νέφους λόγω του ατυχήματος σε έξι διαφορετικές χρονικές στιγμές δίνεται στη δημοσίευση (Borzilov, et al., 1993). Σχεδόν το 45% της συνολικής ποσότητας  $^{137}\text{Cs}$  αποτέθηκε εντός των ορίων της πρώην Σοβιετικής Ένωσης (κυρίως στη Λευκορωσία, την Ουκρανία και τμήμα της Ρωσίας), 39% στην υπόλοιπη Ευρώπη, 8% στην Ασία, 7% στους ωκεανούς και το υπόλοιπο περίπου 1% σε άλλες περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου (UNSCEAR, 1988). Σημειώνεται ότι δεν έχει

<sup>112</sup> Η συγκέντρωση του  $^{241}\text{Am}$  δίνεται αυξημένη τις χρονιές 1996 και 2056 σε σχέση με το 1986, καθώς το  $^{241}\text{Am}$  είναι θυγατρικό ισότοπο του  $^{241}\text{Pu}$ , το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 14 χρόνια.

αναφερθεί απόθεση ραδιενεργών υλικών από το ατύχημα στο Chernobyl στο νότιο ημισφαίριο.

### 6.2.1 Ραδιενεργός ρύπανση του Ελλαδικού χώρου από το ατύχημα στο Chernobyl

Ραδιενεργά προϊόντα από το ατύχημα στο Chernobyl στον Ελλαδικό χώρο έχουν αναφερθεί και δημοσιευθεί από διάφορα εργαστήρια (DEMO 86/3 G, 1986), (Σιμόπουλος, 1987), (Simopoulos, 1989). Το ραδιενεργό νέφος που πέρασε από την Ελλάδα έφθασε σε μέγιστο στις 3 Μαΐου 1986 (DEMO 86/3 G, 1986), (Σιμόπουλος, 1986).

Οι περιοχές στον Ελλαδικό χώρο που επηρεάστηκαν περισσότερο από την απόθεση ραδιενεργών ισοτόπων εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl είναι εκείνες στις οποίες σημειώθηκαν βροχοπτώσεις κατά τη διέλευση του νέφους. Η συσχέτιση της απόθεσης ραδιενέργειας στον Ελλαδικό χώρο με την ποσότητα της κατά τόπους βροχόπτωσης τις ημέρες διέλευσης του ραδιενεργού νέφους πάνω από τη χώρα, έχει μελετηθεί από το Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Michelaraki, et al., 2002).

Για τη μελέτη της ραδιενεργού απόθεσης στο έδαφος εν γένει χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι:

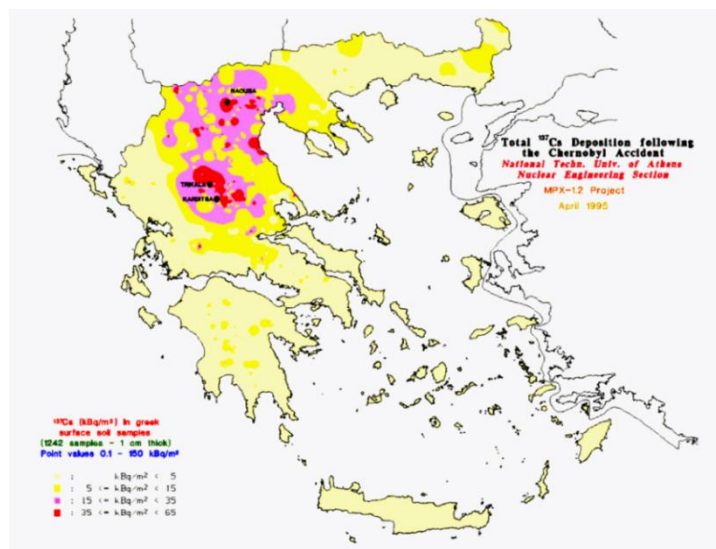
- η δειγματοληψία χώματος και στη συνέχεια ανάλυση στο εργαστήριο, συνήθως με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας
- η in-situ γ-φασματοσκοπία, η οποία πραγματοποιείται στο πεδίο

Από τις δύο παραπάνω μεθόδους, η δειγματοληψία εδάφους και η ανάλυση στο εργαστήριο οδηγεί σε ακριβέστερες εκτιμήσεις της απόθεσης και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. για την μελέτη της απόθεσης στην Ελλάδα των ραδιενεργών ισοτόπων από το ατύχημα στο Chernobyl (Simopoulos, 1989).

Η απόθεση των ραδιενεργών εκλύσεων από το ατύχημα στο Chernobyl καταγράφηκε επιτυχώς στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. από τις πρώτες μέρες μετά την άφιξη του ραδιενεργού νέφους στο ελληνικό έδαφος (Simopoulos, 1989). Κατά την περίοδο Μαΐου – Νοεμβρίου 1986 συλλέχθηκε ένα σύνολο από 1242 δείγματα – κατά το δυνατόν αδιατάρακτου – επιφανειακού χώματος (πάχος 1 cm) καλύπτοντας το σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας. Τα δείγματα αυτά αναλύθηκαν αρχικά με χρήση ανιχνευτή NaI, με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$ , και στη

συνέχεια αναλύθηκαν με ανιχνευτές γερμανίου. Η δεύτερη σειρά αναλύσεων επέτρεψε την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό – πέραν του  $^{137}\text{Cs}$  – και μίας σειράς άλλων ραδιενεργών ισοτόπων, όπως:  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  και  $^{144}\text{Ce}$  (Petropoulos, et al., 1996), ενώ σε συγκριτικά μικρότερες ποσότητες ανιχνεύθηκαν και  $^{154}\text{Eu}$  (10 – 100 Bq/kg) καθώς και υπερουράνια ισότοπα όπως  $^{241}\text{Am}$  και  $^{257}\text{Fm}$  σε ελάχιστα δείγματα. Ειδικά για το  $^{241}\text{Am}$  πρέπει να σημειωθεί ότι ανιχνεύθηκε στο χώμα σε δύο μόνο δείγματα, τα οποία συλλέχθηκαν στην ίδια περιοχή στα Γεράνια όρη, όπου η επίπτωση λόγω του Chernobyl ήταν πολύ χαμηλή, κάτι που δημιουργεί εύλογους προβληματισμούς. Όσον αφορά στην παρουσία του  $^{241}\text{Am}$  στο νέφος που έφτασε στην Ελλάδα, αυτή επιβεβαιώνεται από την ανίχνευσή του σε φίλτρα αέρα που λήφθηκαν το Μάιο του 1986 στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Simopoulos, 1989), με μέγιστη συγκέντρωση στα  $8 \text{ mBq/m}^3 \pm 47\%$ .

Άλλες δειματοληψίες χώματος που ακολούθησαν τα επόμενα μετά το ατύχημα χρόνια επέτρεψαν τη λεπτομερέστερη καταγραφή της επίπτωσης (fallout) στον ελλαδικό χώρο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των παραπάνω δειγμάτων έδειξαν μια αξιοσημείωτη γεωγραφική στατιστική διασπορά. Η αποτιμώμενη ραδιενέργεια λόγω της απόθεσης του  $^{137}\text{Cs}$  στο έδαφος κυμάνθηκε μεταξύ 0.01 και  $137 \text{ kBq/m}^2$ . Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας χαρτογραφήθηκαν για πρώτη φορά στο πλαίσιο του προγράμματος της CEC (Commission of the European Communities) με την ονομασία «CORINE» (COoRdination of INformation on the Environment) (CEC, 1992). Μεταγενέστερα, ακολούθησε χαρτογράφηση της απόθεσης τόσο του  $^{137}\text{Cs}$ , όσο και των άλλων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων ( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  και  $^{144}\text{Ce}$ ) που ανιχνεύθηκαν στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., με μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Χίνης, 1995), αναδεικνύοντας τις περιοχές της Ελλάδας στις οποίες η επίπτωση ήταν σημαντικότερη (Petropoulos, et al., 1996). Ενδεικτικά, στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται η απόθεση του  $^{137}\text{Cs}$  στον ελλαδικό χώρο, όπως προέκυψε από τις χαρτογραφήσεις αυτές, ενώ οι αντίστοιχοι χάρτες για τα υπόλοιπα ισότοπα μπορούν να αναζητηθούν στην ιστοσελίδα του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ([arcas.nuclear.ntua.gr](http://arcas.nuclear.ntua.gr)).



Εικόνα 6.1: Συνολική απόθεση  $^{137}\text{Cs}$  στην Ελλάδα μετά το ατύχημα του Chernobyl (Petrooulos, et al., 1996).

## 6.2.2 Ανάλυση δειγμάτων χώματος με το σύστημα Compton Suppression

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. επιλέχθηκαν και αναλύθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS και την ανιχνευτική διάταξη LEGe ορισμένα από τα δείγματα χώματος που είχαν συλλεχθεί και αναλυθεί στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. μετά το ατύχημα του Chernobyl. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν να αναλυθούν 52 επιβαρυμένα με  $^{137}\text{Cs}$  δείγματα χώματος<sup>113</sup> κυρίως από την περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων. Κατά τις αναλύσεις των δειγμάτων αυτών που είχαν γίνει στο παρελθόν σε ανιχνευτή HPGe στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π, δεν είχε ποτέ ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$ . Στόχος της νέας ανάλυσης των δειγμάτων ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας ανίχνευσης του  $^{241}\text{Am}$ , τρεις δεκαετίες περίπου μετά το ατύχημα. Αρκετοί είναι οι λόγοι για τους οποίους θα μπορούσε να ανιχνεύεται  $^{241}\text{Am}$  στα δείγματα αυτά, ενώ δεν είχε ανιχνευθεί στις αρχικές αναλύσεις:

- Η συνολική ραδιενέργεια των δειγμάτων – και κατά συνέπεια και το συνεχές υπόστρωμα Compton – έχει σημαντικά μειωθεί, λόγω της απομείωσης ή και ολοκληρωτικής εξαφάνισης των πλέον βραχύβιων ισotόπων. Ως αποτέλεσμα, είναι ευκολότερη η ανίχνευση ασθενών φωτοκορυφών πάνω στο υπόστρωμα.

<sup>113</sup> Στο Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.5, δίνονται οι κωδικοί των δειγμάτων αυτών και η θέση δειγματοληψία.



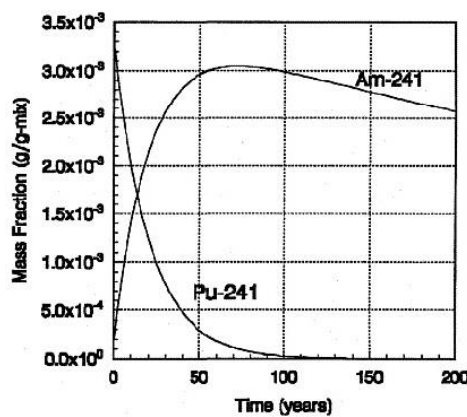
- Καθώς το ραδιενεργό νέφος περιείχε εκτός από  $^{241}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 432.6$  χρόνια) και  $^{241}\text{Pu}$  ( $T_{1/2} = 14.33$  χρόνια) (Dreicer, et al., 1996), το οποίο διασπάται σε  $^{241}\text{Am}^{114}$ , αναμένεται ότι σε περιβαλλοντικά δείγματα, όπως το χώμα, που έχουν ρυπανθεί, η ραδιενέργεια του  $^{241}\text{Am}$  αυξάνεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα μετά το ατύχημα. Χαρακτηριστικά, στην Εικόνα 6.2 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των επιπέδων ραδιενέργειας  $^{241}\text{Am}$  και  $^{241}\text{Pu}$  σε ένα δείγμα στο οποίο την αρχική στιγμή υπήρχε μόνον  $^{241}\text{Pu}$ . Η συγκέντρωση του  $^{241}\text{Am}$  κάθε στιγμή εκτιμάται από την εξής Σχέση (Kathren, 1984):

$$R_{\text{Am}}(t) = \frac{\lambda_{\text{Am}} \cdot \lambda_{\text{Pu}} \cdot N_{\text{Pu}}}{\lambda_{\text{Am}} - \lambda_{\text{Pu}}} (e^{-\lambda_{\text{Pu}} \cdot t} - e^{-\lambda_{\text{Am}} \cdot t}) \quad \text{Σχέση (6.1)}$$

απ' όπου προκύπτει ότι λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της κατά τη χρονική στιγμή που υπολογίζεται από τη Σχέση:

$$t_{\text{max}} = \frac{1}{\lambda_{\text{Am}} - \lambda_{\text{Pu}}} \ln \left( \frac{\lambda_{\text{Am}}}{\lambda_{\text{Pu}}} \right) \quad \text{Σχέση (6.2)}$$

δηλαδή σε  $\sim 73$  χρόνια. Κατά συνέπεια, τη χρονική περίοδο 2011 – 2016 οπότε έγιναν οι αναλύσεις – περίπου 25 – 30 χρόνια μετά το ατύχημα στο Chernobyl – τα δείγματα πλησιάζουν στο  $\sim 85\%$  της μέγιστης τιμής της ραδιενέργειας  $^{241}\text{Am}$  που παράγεται από τη διάσπαση του  $^{241}\text{Pu}$ , αλλά και συνολικά της μέγιστης τιμής του  $^{241}\text{Am}$  στο χώμα<sup>115</sup>.



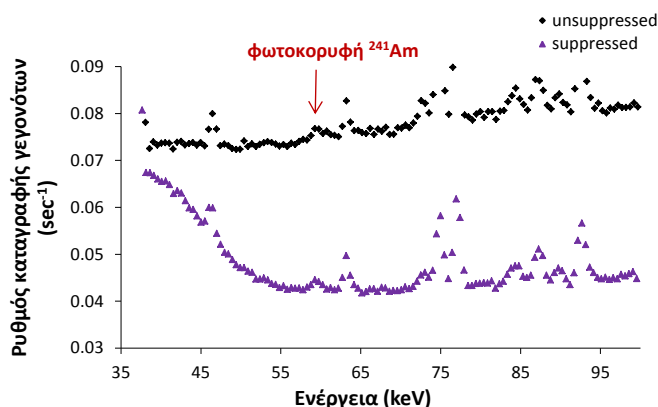
Εικόνα 6.2: Καμπύλες παραγωγής  $^{241}\text{Am}$  και απομείωσης  $^{241}\text{Pu}$  συναρτήσει του χρόνου.

- Η ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS δημιουργεί καλύτερες συνθήκες ανίχνευσης του  $^{241}\text{Am}$  λόγω της μείωσης του συνεχούς υποστρώματος Compton. Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.3 τμήματα τυπικών φασμάτων

<sup>114</sup> Η ραδιενεργός σειρά του  $^{241}\text{Pu}$  δίνεται στο Σχήμα 6.1, στο τέλος του Κεφαλαίου.

<sup>115</sup> Λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου ημιζωής του  $^{241}\text{Am}$ , η απομείωση της ραδιενέργειας του  $^{241}\text{Am}$  που είχε αρχικά πέσει μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

(suppressed και unsuppressed) δείγματος χώματος που λήφθηκε την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ., όπου σημειώνεται η φωτοκορυφή του  $^{241}\text{Am}$ .



Εικόνα 6.3: Φωτοκορυφή  $^{241}\text{Am}$  σε τυπικό δείγμα χώματος που έχει ρυπανθεί από το ατύχημα στο Chernobyl.

Τα δείγματα χώματος αναλύθηκαν στο σύστημα XtRa - CSS (συλλέχθηκε το unsuppressed και το suppressed φάσμα) και στον ανιχνευτή LEGe για διάρκεια τουλάχιστον 216 000 sec (2.5 ημέρες), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η διάρκεια ανάλυσης έφτανε τις 8 ημέρες. Για την ανάλυση των φασμάτων<sup>116</sup> χρησιμοποιήθηκε τόσο ο κώδικας SPUNAL όσο και το πρόγραμμα ANGES.

Ο κώδικας SPUNAL, έχει αναπτυχθεί εξ ολοκλήρου στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Σιμόπουλος, 1987) και έχει περιγραφεί στην εργασία (Anagnostakis, et al., 1994), και τις Δ.Δ. (Αναγνωστάκης, 1998), (Καρφόπουλος, 2012). Ο κώδικας έχει δυνατότητα ανάλυσης πολύπλοκων φασμάτων και ανίχνευσης απλών και πολλαπλών φωτοκορυφών. Με χρήση κατάλληλων κριτηρίων μπορεί να διακρίνει μεταξύ των πραγματικών φωτοκορυφών του φάσματος και της κύμανσης του υποστρώματος (ψευδοκορυφές). Ένα τέτοιο κριτήριο βασίζεται στη μεταβλητή  $\rho_{\text{sig}}$ :

$$\rho_{\text{sig}} = \frac{\text{area}}{\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^u c_i}} \quad \text{Σχέση (6.3)}$$

όπου:

area: είναι η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής

n : είναι το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή

$c_i$  : είναι το περιεχόμενο του καναλιού i

l : είναι κάτω όριο της φωτοκορυφής

u : είναι το άνω όριο της φωτοκορυφής

<sup>116</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.5, φάσματα 165 – 267.

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, μία φωτοκορυφή θεωρείται σημαντική εφόσον

$$p_{\text{sig}} \geq \text{sigma unit} \quad \text{Σχέση (6.4)}$$

όπου η τιμή **sigma unit** καθορίζεται από το χρήστη. Η εμπειρία έχει δείξει ότι, για τιμή sigma unit ίση με 1 επιτυγχάνεται η ανάλυση των περισσότερων σημαντικών φωτοκορυφών, ενώ περιορίζεται και η ανίχνευση ψευδοκορυφών. Για την ανίχνευση πολύ ασθενών φωτοκορυφών είναι δυνατή η μείωση της τιμής της παραμέτρου, η οποία όμως πρέπει να γίνεται με προσοχή από το χρήστη. Μείωση της τιμής της κάτω από 0.5 οδηγεί στην ανίχνευση πολλών ψευδοκορυφών που οφείλονται στην κύμανση του υποστρώματος. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν δύο τιμές και συγκεκριμένα 1.0 και 0.7. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι, μόνο σε μία περίπτωση η επιλογή του χαμηλότερου ορίου (0.7) βελτίωσε την ανίχνευση του  $^{241}\text{Am}$ . Συνεπώς, προτείνεται ότι για αυτού του είδους τις αναλύσεις πρέπει να επιλέγεται η τιμή sigma unit = 1.0.

Το πρόγραμμα ANGES έχει αναπτυχθεί από το Institute of Nuclear Research and Nuclear Energy της Βουλγαρίας, υπό την αιγίδα του Δ.Ο.Α.Ε., παρέχεται δωρεάν από αυτόν (IAEA-TECDOC-1275, 2002) και έχει μελετηθεί εκτενώς σε άλλη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα εξαναγκασμένης ανάλυσης (forced analysis), όπου ο χρήστης εισάγει μία ενέργεια στην οποία αναμένει να ανιχνεύεται μία φωτοκορυφή, ακόμα και αν το πρόγραμμα δεν την έχει ανιχνεύσει αρχικά. Η χρήση του προγράμματος ANGES δεν οδήγησε σε σημαντική αύξηση των δειγμάτων στα οποία αναλύεται η φωτοκορυφή του  $^{241}\text{Am}$ . Στον Πίνακα 6.2 δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης των  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  που προέκυψαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. από τις αναλύσεις με τον κώδικα SPUNAL, μόνο για τα δείγματα στα οποία ανιχνεύθηκε  $^{241}\text{Am}$ . Οι αβεβαιότητες που δίνονται είναι ολικές (1σ), δηλαδή έχει συνυπολογιστεί η αβεβαιότητα φωτοκορυφής, που αποτελεί και την κυρίαρχη συνιστώσα, η αβεβαιότητα βαθμονόμησης, ίση με 0.8%<sup>117</sup> και η αβεβαιότητα λόγω αυτοαπορρόφησης, ίση με 2%. Όπως διαπιστώνεται, σε δείγματα με συγκεντρώσεις  $^{137}\text{Cs}$  μικρότερες από ~ 2 kBq/kg, δεν ανιχνεύθηκε  $^{241}\text{Am}$ .

<sup>117</sup> Ως αποδόσεις φωτοκορυφής για τη διάταξη XtRa - CSS έχουν χρησιμοποιηθεί οι πειραματικές τιμές που προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Όσον αφορά στα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης του  $^{241}\text{Am}$  υπό τις συνθήκες υπό τις οποίες αναλύθηκαν τα δείγματα, εκτιμάται ότι για την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS και για συγκέντρωση  $^{137}\text{Cs}$  της τάξεως των 1300 Bq/kg, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια είναι 0.5 Bq/kg για το unsuppressed φάσμα και 0.4 Bq/kg για το suppressed φάσμα, ενώ για τον ανιχνευτή LEGe εκτιμάται περί τα 0.8 Bq/kg. Πρέπει να επισημανθεί ότι οι ελάχιστες ανιχνεύσιμες ραδιενέργειες αυτές είναι αρκετά υψηλότερες από την αντίστοιχη τιμή των 0.2 Bq/kg που έχει εκτιμηθεί για τη διάταξη XtRa και για παρόμοιες συνθήκες ανάλυσης, για δείγμα χώματος με συνήθεις τιμές φυσικής ραδιενέργειας και χαμηλά επίπεδα  $^{137}\text{Cs}$ .

Κωδικός δείγματος	$^{241}\text{Am}$ (Bq/kg)				$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
	XtRa - CSS unsuppressed	XtRa - CSS suppressed	LEGe	Σταθμισμένη μέση τιμή	XtRa - CSS <sup>118</sup>
X0727	< 0.5	0.36 ± 76%	< 0.8	0.4 ± 76% <sup>119</sup>	2320 ± 0.8%
X0736	2.99 ± 28%	2.22 ± 43%	3.60 ± 34%	2.9 ± 20%	11139 ± 0.8%
X0737	< 0.5	2.86 ± 32%	1.90 ± 55%	2.5 ± 28%	8747 ± 0.8%
X0738	1.29 ± 71%	0.87 <sup>120</sup> ± 80%	1.80 ± 50%	1.5 ± 41%	7305 ± 0.8%
X0739	3.87 ± 25%	3.73 ± 18%	3.80 ± 29%	3.8 ± 13%	10027 ± 0.8%
X0740	2.10 ± 51%	2.43 ± 20%	1.60 ± 64%	2.2 ± 18%	8952 ± 0.8%
X0741	1.41 ± 63%	1.47 ± 24%	1.40 ± 60%	1.5 ± 21%	6245 ± 0.8%
X0742	1.88 ± 51%	1.23 ± 59%	1.80 ± 52%	1.6 ± 32%	7865 ± 0.8%
X0743	< 0.5	3.52 ± 27%	2.50 ± 49%	3.1 ± 24%	12132 ± 0.8%
X0744	2.53 ± 49%	3.01 ± 22%	2.90 ± 42%	2.9 ± 18%	10542 ± 0.8%
X0745	2.97 ± 42%	2.22 ± 42%	1.40 ± 83%	2.2 ± 29%	12357 ± 0.8%
X0746	3.70 ± 25%	2.57 ± 36%	3.70 ± 32%	3.3 ± 17%	11706 ± 0.8%
X0747	0.93 ± 66%	0.81 ± 58%	< 0.8	0.9 ± 44%	5126 ± 0.8%
X0749	< 0.5	0.87 ± 63%	1.20 ± 60%	1.0 ± 44%	5709 ± 0.8%
X0751	Δ/A <sup>121</sup>	Δ/A	0.53 ± 67%	0.53 ± 67%	2217 ± 0.1%
X0752	Δ/A	Δ/A	1.02 ± 40%	1.02 ± 40%	3676 ± 0.1%
X0761	Δ/A	Δ/A	1.86 ± 32%	1.86 ± 32%	8317 ± 0.1%
X0762	1.72 ± 32%	1.45 ± 13%	Δ/A	1.48 ± 12%	3437 ± 0.8%
X0763	Δ/A	Δ/A	0.47 ± 63%	0.47 ± 63%	2257 ± 0.1%
X0766	Δ/A	Δ/A	1.93 ± 14%	1.93 ± 14%	6340 ± 0.1%
X0782	Δ/A	Δ/A	0.68 ± 38%	0.68 ± 38%	2845 ± 0.1%
X0786	Δ/A	Δ/A	1.69 ± 26%	1.69 ± 26%	5009 ± 0.1%
X0790	Δ/A	Δ/A	0.70 ± 58%	0.70 ± 58%	4737 ± 0.1%

Πίνακας 6.2: Ειδική ραδιενέργεια  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  σε δείγματα επιφανειακού χώματος εξαιτίας του ατυχήματος στο Chernobyl (κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ.).

<sup>118</sup> Στον Πίνακα δίνονται οι τιμές της συγκέντρωσης  $^{137}\text{Cs}$  με βάση τις αναλύσεις του suppressed φάσματος, οι οποίες δεν διαφέρουν στατιστικά από τις αναλύσεις του unsuppressed φάσματος.

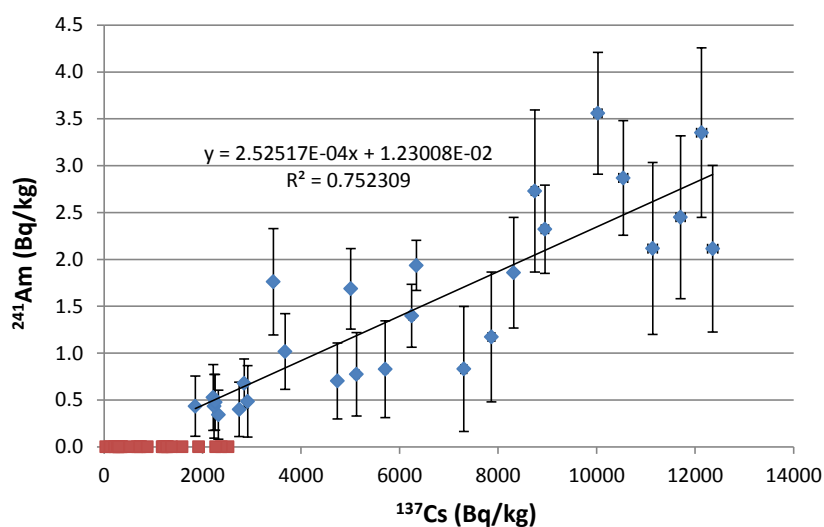
<sup>119</sup> Ως αβεβαιότητα δίνεται η μέγιστη από την εσωτερική και εξωτερική αβεβαιότητα των μετρήσεων.

<sup>120</sup> Η ανάλυση της φωτοκορυφής έγινε με τιμή της μεταβλητής sigma units ίση με 0.7.

<sup>121</sup> Όπου Δ/A σημαίνει ότι το δείγμα δεν αναλύθηκε στην εκάστοτε ανιχνευτική διάταξη.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων διαπιστώνεται ότι σε αρκετές περιπτώσεις το  $^{241}\text{Am}$  ανιχνεύεται και στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed) αλλά και στα φάσματα του ανιχνευτή LEGe, αν και συνήθως με υψηλότερη αβεβαιότητα. Μάλιστα, οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, κυρίως λόγω των υψηλών αβεβαιοτήτων. Όσον αφορά στις αβεβαιότητες των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, παρατηρείται ότι συνήθως η χαμηλότερη αβεβαιότητα διαπιστώνεται στο suppressed φάσμα του ανιχνευτή XtRa, ο οποίος φαίνεται να είναι ο πιο αποτελεσματικός ανιχνευτής για αυτού του είδους τις αναλύσεις.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνιση σε μορφή διαγράμματος της συσχέτισης της ειδικής ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$ , όπως προσδιορίζεται από τις αναλύσεις όλων των δειγμάτων από την περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων (Εικόνα 6.4). Για το  $^{241}\text{Am}$  λήφθηκε η σταθμισμένη μέση τιμή κάθε δείγματος, ενώ για το  $^{137}\text{Cs}$  οι τιμές που λαμβάνονται με βάση το suppressed φάσμα. Όπως φαίνεται υπάρχει ισχυρή θετική συσχέτιση των δύο μεγεθών, δηλαδή η συγκέντρωση του  $^{241}\text{Am}$  αυξάνει όσο αυξάνει η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$ , κάτι που είναι αναμενόμενο. Ας σημειωθεί ότι σύμφωνα με τη δημοσίευση (Reisch, 1987), ο λόγος  $^{241}\text{Am}/^{137}\text{Cs}$  στον αέρα είχε εκτιμηθεί στη Σουηδία κατά την περίοδο του ατυχήματος σε  $1.4 \times 10^{-4}$ , τιμή που είναι συμβατή με την τιμή  $2.5 \times 10^{-4}$  που εκτιμάται για το χώμα στην παρούσα Δ.Δ.



Εικόνα 6.4: Συσχέτιση της ειδικής ραδιενέργειας  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  στα δείγματα χώματος (με κόκκινο τα δείγματα όπου η ειδική ραδιενέργεια  $^{241}\text{Am}$  είναι κάτω από το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης)

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένα δείγματα χώματος, τα οποία είχαν συλλεχθεί αμέσως μετά το ατύχημα στο Chernobyl, είχε ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$  και στο παρελθόν. Συγκεκριμένα,  $^{241}\text{Am}$  είχε ανιχνευθεί σε δύο δείγματα από το Όρος Πατέρας του νομού Αττικής (Χ0013 και Χ0015) τα οποία είχαν αναλυθεί το 1986 στην ανιχνευτική διάταξη HPGe-33% (Σιμόπουλος, 1987). Τα ίδια δείγματα αναλύθηκαν το 1995 στην ανιχνευτική διάταξη LEGe στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Αναγνωστάκης, 1998), ενώ στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. αναλύθηκαν πάλι στην ανιχνευτική διάταξη LEGe. Στον Πίνακα 6.3 δίνονται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{241}\text{Am}$ , όπως προέκυψαν από όλες τις παραπάνω αναλύσεις, καθώς και του  $^{137}\text{Cs}$ , όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ.

Κωδικός δείγματος	$^{241}\text{Am}$ (Bq/kg) 1986	$^{241}\text{Am}$ (Bq/kg) 1995	$^{241}\text{Am}$ (Bq/kg) 2017	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg) 2017
Χ0013	110 ± 100%	29 ± 13%	38 ± 5%	926 ± 2%
Χ0015	29 ± 86%	29 ± 14%	36 ± 5%	809 ± 2%

Πίνακας 6.3: Συγκεντρώσεις  $^{241}\text{Am}$  σε δείγματα ρυπασμένου χώματος.

Επισημαίνεται ότι η τιμή της απόδοσης που έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{241}\text{Am}$  το 1995<sup>122</sup> είναι κατά 12% υψηλότερη σε σχέση με την τιμή της απόδοσης που χρησιμοποιείται την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Δ., κάτι που σε μεγάλο βαθμό ερμηνεύει τη διαφορά στις τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του Πίνακα ανάμεσα στο 1995 και το 2017.

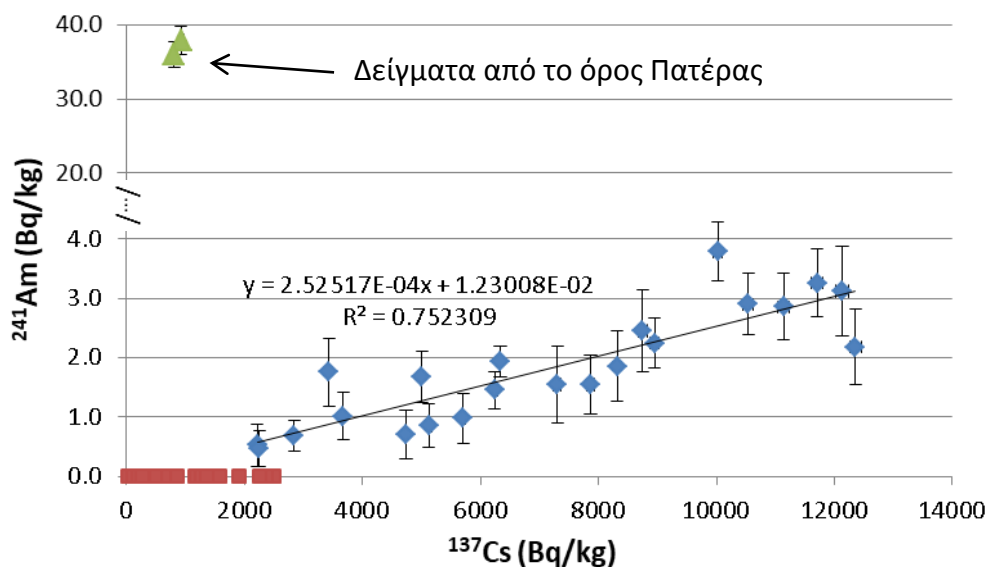
Στην Εικόνα 6.5 δίνονται υπό μορφή διαγράμματος οι συγκεντρώσεις των παραπάνω δειγμάτων σε σχέση με την συσχέτιση που προέκυψε από τα δείγματα χώματος της περιοχής της Καρδίτσας και των Τρικάλων, που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. Όπως φαίνεται, η συγκέντρωση  $^{241}\text{Am}$  που ανιχνεύεται στα δείγματα από το Όρος Πατέρας, αποκλίνει σημαντικά από τα υπόλοιπα δείγματα. Η απόκλιση αυτή θα μπορούσε να οφείλεται σε διάφορες αιτίες:

- Το  $^{241}\text{Am}$  που ανιχνεύεται στα δείγματα από το όρος Πατέρας έφθασε και αποτέθηκε στην Ελλάδα σε διαφορετική χρονική στιγμή, από ότι σε άλλες περιοχές της χώρας. Θα μπορούσε, για παράδειγμα, να προέρχεται από την αστοχία δεξαμενής εξαντλημένου πυρηνικού καυσίμου στο Chernobyl, που

<sup>122</sup> Η ανάλυση των δειγμάτων το 1995 είχε πραγματοποιηθεί με τη διάταξη LEGe να είναι βαθμονομημένη στην ενεργειακή περιοχή 0 – 200 keV (ανιχνευτής «6»).

αναφέρεται αρκετές ημέρες μετά την έναρξη του ατυχήματος, ενώ δεν μπορεί να αποκλειστεί εντελώς και το ενδεχόμενο να ανιχνεύονται στα δείγματα αυτά hot particles.

- Η σχετικά υψηλή συγκέντρωση που ανιχνεύθηκε στα δείγματα από το Όρος Πατέρας θα μπορούσε να οφείλεται σε τοπική ρύπανση ανεξάρτητη από το ατύχημα του Chernobyl, ενδεχομένως λόγω αστοχίας αλεξικέραυτου με κεφαλή  $^{241}\text{Am}$ . Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι φαινόμενα ρύπανσης επιφανειακού χώματος από  $^{241}\text{Am}$ , εξαιτίας διαρροής από αλεξικέραυτο έχουν εντοπισθεί και μελετηθεί από το Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Karforoulou, et al., 2004).
- Τέλος, καθώς τα δείγματα από το όρος Πατέρας λήφθηκαν αμέσως μετά το ατύχημα, σε αντίθεση με τα περισσότερα δείγματα από την ηπειρωτική χώρα τα οποία λήφθηκαν μερικούς μήνες αργότερα, δεν μπορεί να αποκλειστεί η πιθανότητα να έχει παίξει κάποιο ρόλο η κινητική του  $^{241}\text{Am}$  στο χώμα στο μεσοδιάστημα.



Εικόνα 6.5: Συγκεντρώσεις  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  σε δείγματα χώματος από την περιοχή Καρδίτσας-Τρικάλων και το όρος Πατέρας.

### 6.3 Ανάλυση δειγμάτων που έχουν ρυπανθεί από το ατύχημα της Fukushima

Στις 11 Μαρτίου 2011, καταστροφικό τσουνάμι συνεπεία ισχυρότατου σεισμού έπληξε τον πυρηνικό σταθμό Dai-chi στην περιοχή της Fukushima, περίπου 200 km βορειοανατολικά του Τόκιο, και προκάλεσε απώλεια ισχύος και αστοχία στο

σύστημα ψύξης των δεξαμενών φύλαξης του χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου. Τις επόμενες ημέρες, λόγω σειράς εκρήξεων υδρογόνου, προκλήθηκαν σοβαρότατες ζημιές στο σταθμό και εκλύθηκαν στο περιβάλλον σημαντικές ποσότητες ραδιενεργών ισοτόπων προϊόντων σχάσης. Το ατύχημα είχε ως αποτέλεσμα την έκλυση τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στους ωκεανούς 73 ραδιενεργών ισοτόπων, ενώ εάν συνυπολογιστούν και τα θυγατρικά τους ο αριθμός ανεβαίνει στα 135 (IRSN, 2012). Στα σημαντικότερα ισότοπα που απελευθερώθηκαν περιλαμβάνονται το  $^{131}\text{I}$  και τα δύο ισότοπα του καισίου  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{137}\text{Cs}$ . Εκτιμάται ότι μέχρι το Φεβρουάριο του 2012, 3.52 PBq  $^{134}\text{Cs}$  και 3.55 PBq  $^{137}\text{Cs}$  είχαν διαρρεύσει στον ωκεανό (Povines, et al., 2013).

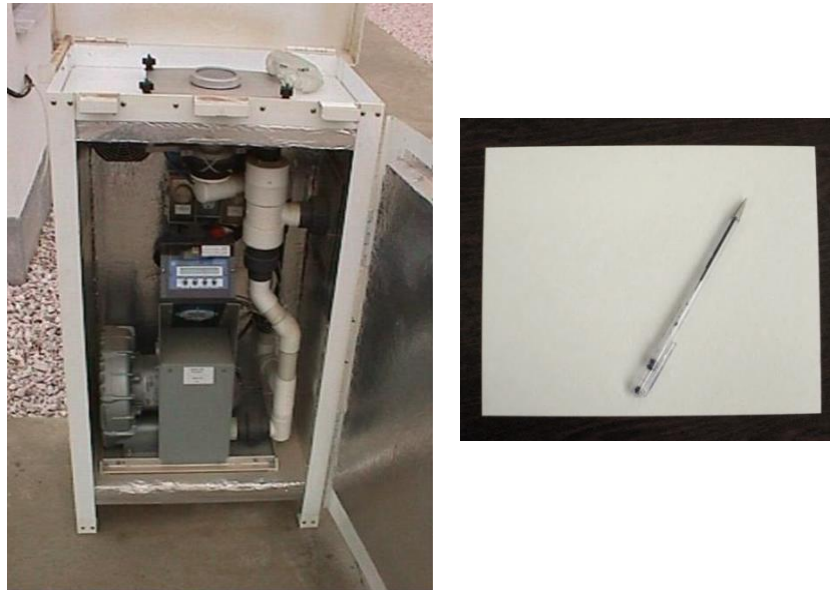
Ως αποτέλεσμα του ατυχήματος, οι ραδιενεργοί ρύποι διασκορπίστηκαν σταδιακά στο βόρειο ημισφαίριο. Πέντε ημέρες μετά το ατύχημα, στις 15 Μαρτίου 2011, ίχνη  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{137}\text{Cs}$  ανιχνεύθηκαν στη Φλόριντα των Η.Π.Α. (Biegalski, et al., 2012), ενώ δύο μέρες αργότερα καταγράφηκε η άφιξη των αερίων προϊόντων σχάσης στο Σιάτλ των Η.Π.Α. (Diaz Leon, et al., 2011). Στην Ευρώπη, ίχνη  $^{131}\text{I}$  ανιχνεύθηκαν πρώτα στην Ισλανδία, μεταξύ 19 και 21 Μαρτίου 2011 (Masson, et al., 2011). Στις νότιες και νοτιοδυτικές περιοχές της Ευρώπης τα ραδιενεργά ίχνη του ατυχήματος ανιχνεύθηκαν για πρώτη φορά μεταξύ 24 και 26 Μαρτίου 2011 (Ioannidou, et al., 2012), (Barsanti, et al., 2012), (Bikit, et al., 2012), (Cosma, et al., 2012), (Potiriadis, et al., 2013) και παρέμειναν ανιχνεύσιμα μέχρι και το τέλος του Απριλίου. Πρέπει να επισημανθεί πάντως ότι οι ποσότητες των παραπάνω ισοτόπων που έφθασαν στην Ευρώπη μέσω μεταφοράς αέριων μαζών ήταν τόσο χαμηλές, ώστε να μην αποτελούν κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου (Masson, et al., 2011).

### **6.3.1 Δειγματοληψίες και αναλύσεις ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.**

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωγραφική θέση της Ελλάδας σε σχέση με την Ιαπωνία καθώς και το μοτίβο ατμοσφαιρικής διασποράς, αναμενόταν να είναι μικρή η συγκέντρωση των ραδιενεργών ρύπων που θα φτάσει στη χώρα. Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. μόλις διαπιστώθηκε η έκταση του ατυχήματος και εκτιμήθηκε ότι ραδιενεργοί ρύποι θα μπορούσαν να φτάσουν στη χώρα ξεκίνησαν συστηματικές δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ, οι οποίες συνεχίστηκαν με μειωμένη συχνότητα μέχρι το



Νοέμβριο του 2011<sup>123</sup>. Για τη δειγματοληψία χρησιμοποιήθηκε αντλία αέρα υψηλής παροχής τύπου DH-50810E της εταιρείας F&J Specialty Products Inc, η οποία είναι εγκαταστημένη στο δώμα του Ε.Π.Τ - Ε.Μ.Π, σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 6.6). Η συλλογή του ατμοσφαιρικού αεροζόλ έγινε σε φίλτρα από ίνες γυαλιού (glass-fiber), τυποποιημένων διαστάσεων 8 x 10" τύπου FR810M της εταιρείας F&J Specialty Products Inc. (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Η αντλία αέρα τύπου DH-50810E (αριστερά) και φίλτρο από ίνες γυαλιού (δεξιά) της εταιρείας F&J Specialty Products Inc.

Μετά τη δειγματοληψία τα φίλτρα διαστάσεων 8 x 10" διπλώνονται σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου διαστάσεων 64 x 52 mm και πάχους ~ 9 mm (Εικόνα 6.7), γεωμετρία η οποία έχει λάβει την κωδική ονομασία «10». Η βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa για τη γεωμετρία αυτή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo<sup>124</sup>.

Στο πλαίσιο των συστηματικών δειγματοληψιών συλλέχθηκαν συνολικά 42 φίλτρα<sup>125</sup>, με διάρκεια δειγματοληψίας κυμαινόμενη από 6 έως 15 ώρες, η οποία αντιστοιχεί σε όγκους από ~ 500 έως ~ 1100 m<sup>3</sup>.

<sup>123</sup> Στη δημοσίευση (Potiriadis, et al., 2013) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών και των αναλύσεων που έγιναν στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., μαζί με τα αποτελέσματα άλλων Ελληνικών Εργαστηρίων.

<sup>124</sup> Λεπτομέρειες για τη βαθμονόμηση αυτή δίδονται στο Παράρτημα ΣΤ.

<sup>125</sup> Λεπτομερής περιγραφή των στοιχείων δειγματοληψίας παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ζ.



Εικόνα 6.7: Φίλτρο από ίνες γυαλιού 8×10" διπλωμένο σε γεωμετρία 10.

Προκειμένου να βελτιωθούν τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης, όλα τα φίλτρα αναλύονταν τουλάχιστον 2 ώρες μετά το πέρας της δειγματοληψίας, ώστε να υπάρχει επαρκής απομείωση των βραχύβιων θυγατρικών ισοτόπων του ραδονίου, τα οποία έχουν κατακαθίσει στο φίλτρο. Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων πραγματοποιήθηκε στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη συλλογή δύο φασμάτων (suppressed και unsuppressed). Η διάρκεια της ανάλυσης κυμάνθηκε από 12 έως 24 ώρες, ανάλογα με τα επίπεδα ραδιενέργειας του φίλτρου, ενώ όπου κρίθηκε απαραίτητο τα φίλτρα αναλύθηκαν και δεύτερη φορά για μεγαλύτερο χρόνο. Τα ισότοπα τα οποία ανιχνεύθηκαν ήταν:

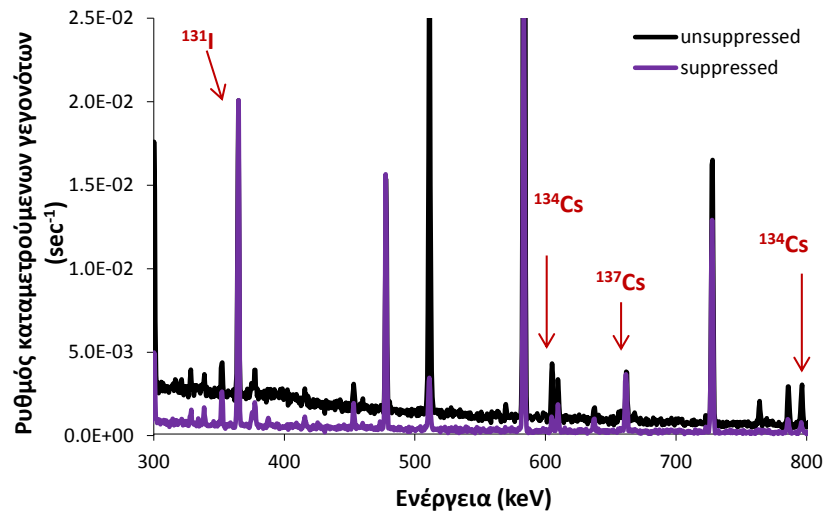
- το μονοενεργειακό  $^{131}\text{I}$ , μέσω της φωτοκορυφής του στα 364.50 keV
- το μονοενεργειακό  $^{137}\text{Cs}$  μέσω της φωτοκορυφής του στα 661.62 keV
- το πολυενεργειακό  $^{134}\text{Cs}$ , από τις φωτοκορυφές του στις ενέργειες 604.72 keV και 795.86 keV<sup>126</sup>

Στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζεται τμήμα τυπικού φάσματος φίλτρου στο οποίο διακρίνονται οι φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στα παραπάνω ισότοπα, ενώ στον Πίνακα 6.4 δίνεται η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (M.D.A.) των ισοτόπων αυτών για διάφορα σενάρια δειγματοληψίας και ανάλυσης.

Διάρκεια δειγμ/ψίας (h)	Διάρκεια ανάλυσης (h)	$^{131}\text{I}$ ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )	$^{137}\text{Cs}$ ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )	$^{134}\text{Cs}$ ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )
6	6	74	90	150
	12	50	60	105
	24	30	30	44
12	6	40	46	80
	24	15	15	30

Πίνακας 6.4: Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (M.D.A.) της διάταξης XtRa - CSS για τη γεωμετρία «10» για τα ισότοπα που ανιχνεύονται από το ατύχημα της Fukushima.

<sup>126</sup> Για αυτή τη φωτοκορυφή του  $^{134}\text{Cs}$  πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των φωτονίων του  $^{228}\text{Ac}$  ενέργειας 794.94 keV.



Εικόνα 6.8: Τμήμα τυπικού φάσματος φίλτρου αέρα όπου ανιχνεύονται οι φωτοκορυφές των ισοτόπων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ .

Στον Πίνακα 6.5 δίνονται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας των ισοτόπων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , όπως αυτές υπολογίστηκαν με χρήση του κώδικα SPUNAL<sup>127</sup>. Για κάθε φίλτρο δίνεται η ειδική ραδιενέργεια κάθε ισοτόπου, όπως προσδιορίζεται στο suppressed και στο unsuppressed φάσμα, συνοδευόμενη από την ολική αβεβαιότητα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα της επιφάνειας φωτοκορυφής και της βαθμονόμησης μέσω προσομοίωσης (2.4%).

Σημειώνεται ότι, το γεγονός ότι σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρονται τιμές ειδικής ραδιενέργειας χαμηλότερες από την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια του Πίνακα 6.4 οφείλεται στο ότι ορισμένα φίλτρα αναλύθηκαν για δεύτερη φορά και για μεγαλύτερο χρόνο. Για τα φίλτρα τα οποία αναλύθηκαν περισσότερες από μία φορές δίνεται η σταθμισμένη μέση τιμή.

<sup>127</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.5, φάσματα 268 – 413.

Κωδικός φίλτρου	<sup>131</sup> I (μBq/m <sup>3</sup> )		<sup>137</sup> Cs (μBq/m <sup>3</sup> )		<sup>134</sup> Cs (μBq/m <sup>3</sup> )	
	unsuppressed φάσμα	suppressed φάσμα	unsuppressed φάσμα	suppressed φάσμα	unsuppressed φάσμα	suppressed φάσμα
A0410	--	--	--	--	--	--
A0411	94 ± 37%	112 ± 11%	--	--	81 ± 45%	--
A0412	--	99 ± 42%	--	--	--	--
A0413	188 ± 30%	130 ± 22%	--	--	--	--
A0414	150 ± 23%	124 ± 14%	--	--	--	--
A0415	186 ± 21%	175 ± 13%	--	--	--	--
A0416	267 ± 11%	233 ± 8%	--	--	--	--
A0417	238 ± 12%	246 ± 7%	71 ± 43%	116 ± 15%	137 ± 13%	--
A0418	86 ± 33%	85 ± 18%	--	--	--	--
A0419	105 ± 31%	114 ± 15%	--	--	--	--
A0420	75 ± 54%	44 ± 47%	--	12 ± 38%	--	--
A0421	138 ± 25%	169 ± 12%	--	--	--	--
A0422	230 ± 16%	252 ± 8%	--	--	--	--
A0423	336 ± 10%	335 ± 6%	--	--	--	--
A0424	178 ± 20%	201 ± 10%	--	13 ± 38%	--	--
A0425	357 ± 9%	347 ± 6%	--	9 ± 67%	--	--
A0426	442 ± 5%	444 ± 4%	--	11 ± 45%	--	--
A0427	83 ± 18%	77 ± 12%	--	--	--	--
A0428	156 ± 10%	156 ± 6%	--	--	--	--
A0429	360 ± 6%	359 ± 4%	46 ± 19%	50 ± 11%	53 ± 11%	--
A0430	634 ± 4%	622 ± 3%	178 ± 9%	166 ± 8%	168 ± 10%	44 ± 10%
A0431	558 ± 4%	555 ± 3%	235 ± 5%	245 ± 4%	238 ± 6%	67 ± 7%
A0432	400 ± 5%	392 ± 4%	69 ± 25%	78 ± 8%	74 ± 10%	20 ± 14%
A0433	498 ± 4%	493 ± 3%	46 ± 22%	39 ± 15%	41 ± 11%	--
A0434	223 ± 9%	225 ± 6%	26 ± 30%	30 ± 14%	26 ± 12%	--
A0435	151 ± 14%	137 ± 9%	17 ± 51%	25 ± 18%	20 ± 15%	--
A0436	230 ± 9%	225 ± 6%	--	12 ± 38%	--	--
A0437	201 ± 9%	196 ± 6%	27 ± 36%	28 ± 16%	20 ± 15%	--
A0438	161 ± 11%	162 ± 7%	36 ± 28%	33 ± 15%	--	--
A0439	75 ± 23%	88 ± 11%	--	13 ± 38%	--	--
A0440	66 ± 24%	54 ± 16%	--	19 ± 28%	--	--
A0441	35 ± 55%	45 ± 22%	--	14 ± 37%	24 ± 70%	--
A0442	48 ± 24%	49 ± 20%	--	8 ± 58%	--	--
A0443	34 ± 44%	23 ± 36%	--	--	14 ± 62%	--
A0444	--	15 ± 54%	--	--	--	--
A0445	55 ± 31%	52 ± 17%	16 ± 62%	20 ± 27%	--	--
A0446	57 ± 15%	53 ± 9%	--	15 ± 21%	--	--
A0447	--	7 ± 67%	--	--	--	--
A0448	--	--	--	--	--	--
A0449	--	--	--	--	--	--
A0450	--	--	--	--	--	--
A0451	--	--	--	--	--	--

Πίνακας 6.5: Ειδική ραδιενέργεια των προϊόντων σχάσης από το ατύχημα της Fukushima στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

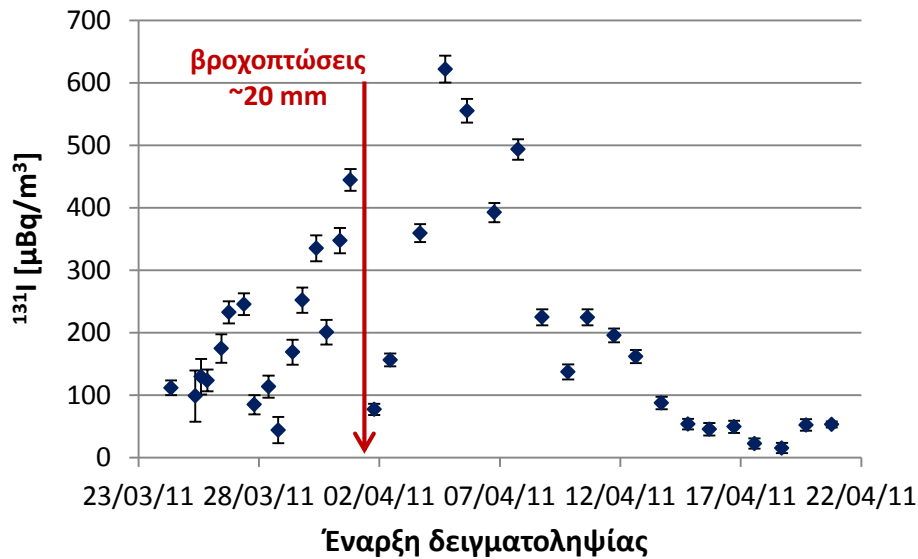
Σχεδόν σε όλα τα φίλτρα που συλλέχθηκαν την περίοδο που το ραδιενεργό νέφος από την Fukushima βρισκόταν πάνω από την Αθήνα ανιχνεύθηκε <sup>131</sup>I με τιμές

που κυμαίνονται από 7  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  έως και 622  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκέντρωσή του ήταν αυξανόμενη από την ημέρα της πρώτης ανίχνευσής του, στις 24 Μαρτίου 2011, και έφθασε σε ένα μέγιστο το βράδυ 31 Μαρτίου προς 1 Απριλίου 2011 (φίλτρο A0426), ημέρα μετά την οποία πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της Αττικής βροχοπτώσεις (Εικόνα 6.9). Λόγω των βροχοπτώσεων η συγκέντρωση του  $^{131}\text{I}$  στον ατμοσφαιρικό αέρα μειώθηκε, αλλά άρχισε να αυξάνεται πάλι μετά το πέρας τους, φθάνοντας στη μέγιστη τιμή της στις 4 Απριλίου 2011 (φίλτρο A0430). Στις επόμενες εβδομάδες η συγκέντρωση του ισοτόπου μειώθηκε σταδιακά μέχρι που έπαψε να είναι ανιχνεύσιμο. Η κύμανση αυτή της συγκέντρωσης του  $^{131}\text{I}$  είναι σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις και άλλων Ελληνικών εργαστηρίων (Manolopoulou, et al., 2011), (Manolopoulou, et al., 2012), (Kritidis, et al., 2012).

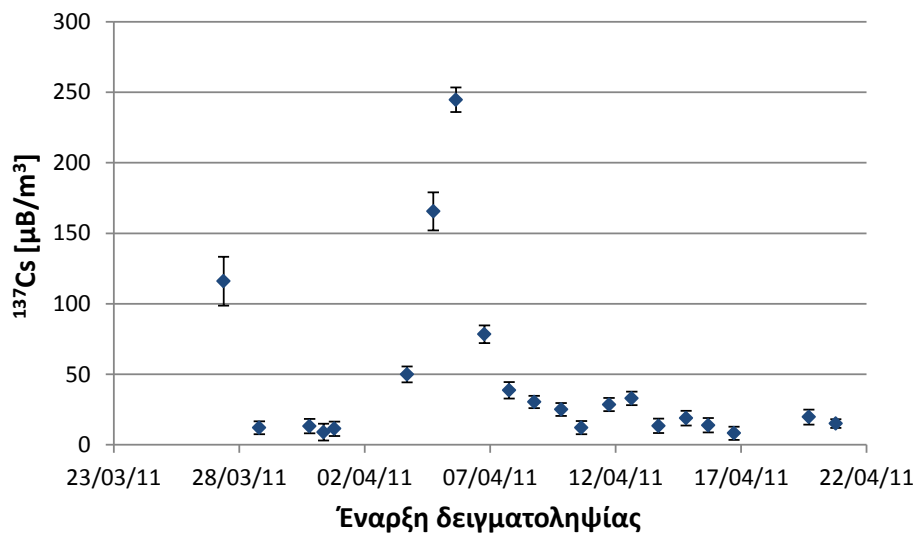
Παρόμοια συμπεριφορά ακολούθησαν και τα δύο ισότοπα του καισίου, τα οποία όμως ανιχνεύθηκαν σε λιγότερα δείγματα και οι συγκεντρώσεις τους κυμάνθηκαν από 8  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  έως 245  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  για το  $^{137}\text{Cs}$  και από 15  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  έως 234  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  για το  $^{134}\text{Cs}$  (Εικόνες 6.10 και 6.11, αντίστοιχα).

Το πλεονέκτημα το οποίο εισάγει η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για τις αναλύσεις αυτών των δειγμάτων, είναι ότι επέτρεψε την ανίχνευση του  $^{137}\text{Cs}$  κυρίως, αλλά και του  $^{131}\text{I}$ , σε περιπτώσεις που αυτά δεν ανιχνεύονταν στο unsuppressed φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, στα φίλτρα A0420, A0424, A0425, A0426 και A0446 η ανίχνευση του  $^{137}\text{Cs}$  έγινε μόνο στο suppressed φάσμα, ακόμα και όταν τα φίλτρα αναλύθηκαν για χρόνους της τάξης των 2 ημερών.

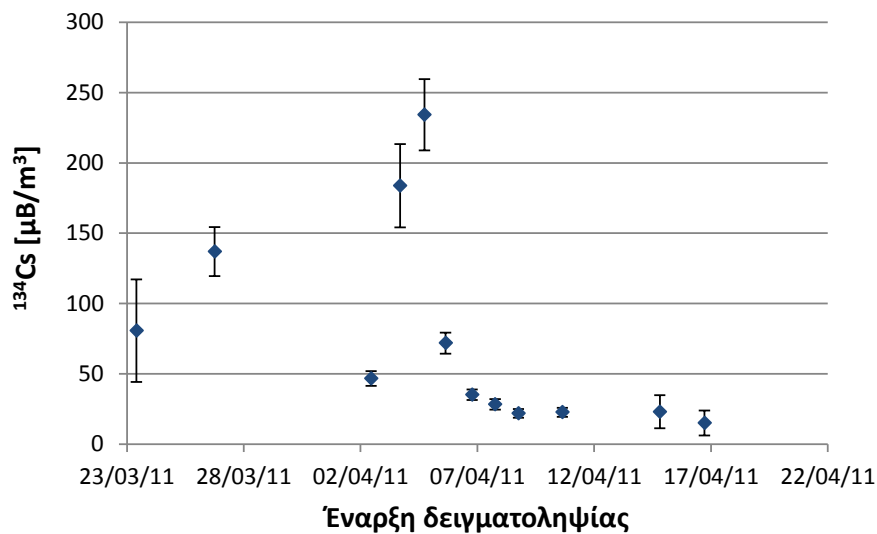
Από την άλλη πλευρά, από τα αποτελέσματα των αναλύσεων του  $^{134}\text{Cs}$  στο suppressed φάσμα καταδεικνύεται ότι, η ανίχνευση του ισοτόπου με χρήση της ενεργητικής θωράκισης είναι δυσκολότερη έως και αδύνατη – δεδομένης και της ιδιαίτερα χαμηλής συγκέντρωσής του στα εν λόγω δείγματα, ενώ στις λίγες περιπτώσεις που το  $^{134}\text{Cs}$  ανιχνεύεται στο suppressed φάσμα, οι τιμές της συγκέντρωσής του προκύπτουν αισθητά μειωμένες.



Εικόνα 6.9: Κύμανση της ειδικής ραδιενέργειας  $^{131}\text{I}$  από το ατύχημα της Fukushima.

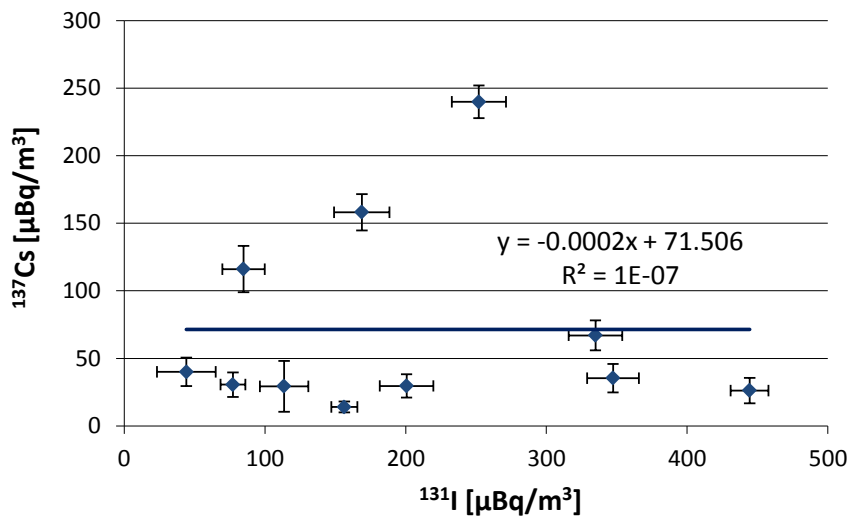


Εικόνα 6.10: Κύμανση της ειδικής ραδιενέργειας  $^{137}\text{Cs}$  από το ατύχημα της Fukushima.

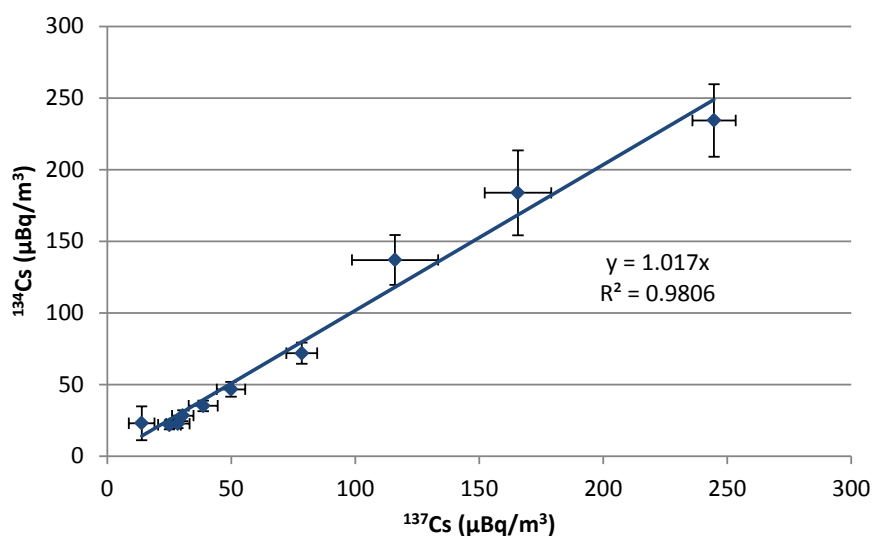


Εικόνα 6.11: Κύμανση της ειδικής ραδιενέργειας  $^{134}\text{Cs}$  από το ατύχημα της Fukushima.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συσχέτιση της ειδικής ραδιενέργειας των ανιχνευόμενων ισotόπων. Στην Εικόνα 6.12 δίνεται σε μορφή διαγράμματος η ανιχνεύσιμη ειδική ραδιενέργεια  $^{131}\text{I}$  και  $^{137}\text{Cs}$ , όπου παρατηρείται ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Το αντίστοιχο διάγραμμα για τα δύο ισotόπα του καισίου δίνεται στην Εικόνα 6.13, όπου φαίνεται ότι υπάρχει υψηλή θετική συσχέτιση – κάτι που άλλωστε αναμένεται – με την τιμή του λόγου της ειδικής ραδιενέργειας των δύο ισotόπων του καισίου ( $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ) να εκτιμάται σε  $1.0 \pm 12\%(1\sigma)$ , τιμή που δεν διαφέρει από αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας (Masson, et al., 2011), (Biegalski, et al., 2012), (Ioannidou, et al., 2012), (Potiriadis, et al., 2013).



Εικόνα 6.12: Συσχέτιση ειδικής ραδιενέργειας  $^{131}\text{I}$  και  $^{137}\text{Cs}$  από το ατύχημα της Fukushima



Εικόνα 6.13: Συσχέτιση ειδικής ραδιενέργειας των ισotόπων του Καισίου από το ατύχημα της Fukushima.

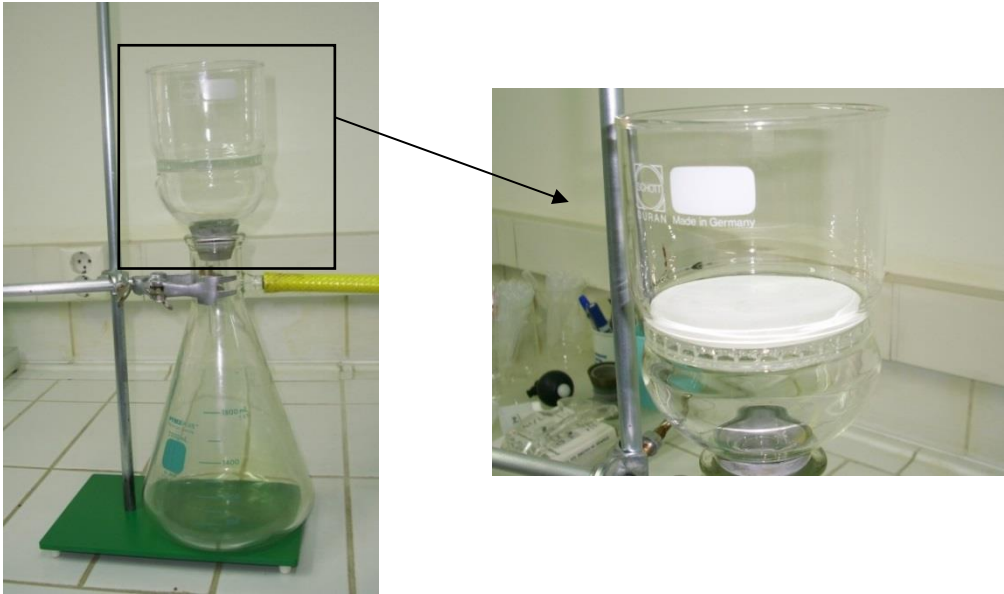
### 6.3.2 Δειγματοληψίες και αναλύσεις νερού βροχής στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διαδικασία δειγματοληψίας υγρών κατακρημνίσεων που ακολουθήθηκε κατά την περίοδο μετά το ατύχημα στη Fukushima έχει περιγραφεί σε παλαιότερη Δ.Ε. (Σάββα, 2009). Συνοπτικά, αναφέρεται ότι για τη συλλογή χρησιμοποιούνται δοχεία, διαστάσεων  $55 \times 30 \times 20$  cm και συνολικής επιφάνειας  $\sim 1$  m<sup>2</sup>, τα οποία είναι μόνιμα τοποθετημένα στο δώμα του κτηρίου του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Μετά από κάθε δειγματοληψία το νερό της βροχής συσκευάζεται σε πλαστικά δοχεία χωρητικότητας ενός λίτρου και τα δοχεία δειγματοληψίας ξεπλένονται με αραιό HNO<sub>3</sub>, προσθέτοντας το ξέπλυμα στο δείγμα. Τα πλαστικά δοχεία αποθήκευσης σφραγίζονται μέχρι την ανάλυση του δείγματος.

Η διαδικασία ανάλυσης του νερού βροχής είναι πιο πολύπλοκη από εκείνη που ακολουθείται για τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η παρουσία στα δείγματα του νερού αδιάλυτων σωματιδίων μπορεί να δημιουργεί πρόβλημα κατά την ανάλυση, εξαιτίας του σχηματισμού ιζήματος. Ως εκ τούτου, τα δείγματα υγρών κατακρημνίσεων αρχικά αναλύονται ως έχουν, με σκοπό να γίνει μία πρώτη εκτίμηση των ισοτόπων που περιέχονται στο δείγμα και της ειδικής ραδιενέργειάς τους. Στη συνέχεια, το νερό φιλτράρεται μέσα από χάρτινα φίλτρα<sup>128</sup> (Whatman no. 42) με διάμετρο 90 mm και πάχος 0.2 mm υπό κενό, σε δοχεία με κατάλληλη διαμόρφωση (Εικόνα 6.14). Αφού φιλτραριστεί ολόκληρη η ποσότητα του νερού, το φίλτρο αφήνεται να στεγνώσει και στη συνέχεια συσκευάζεται με χρήση κοινής μεμβράνης, ώστε να αναλυθεί με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας (Εικόνα 6.15). Η βαθμονόμηση απόδοσης του φίλτρου διαμέτρου 90 mm έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενη Δ.Ε. με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo (Σάββα, 2009).

<sup>128</sup> Στην περίπτωση που η διαθέσιμη ποσότητα νερού είναι επαρκής, ένα μέρος του νερού συσκευάζεται ενώ το υπόλοιπο φιλτράρεται.





Εικόνα 6.14: Η διάταξη φιλτραρίσματος νερού βροχής στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.



Εικόνα 6.15: Χρησιμοποιημένο και συσκευασμένο φίλτρο νερού βροχής.

Όπως προαναφέρθηκε στην Παράγραφο 6.3.1, κατά την περίοδο που το ραδιενεργό νέφος από τη Fukushima βρισκόταν στην περιοχή της Αθήνας πραγματοποιήθηκαν αρκετές βροχοπτώσεις. Συνολικά συλλέχθηκαν 6 δείγματα νερού βροχής. Στον Πίνακα 6.6 δίνονται τα στοιχεία κάθε βροχόπτωσης: η ημερομηνία έναρξης δειγματοληψίας, η διάρκειά της, το ύψος βροχής και η συνολική μάζα νερού που συλλέχθηκε. Σημειώνεται ότι η ημερομηνία και ώρα έναρξης της δειγματοληψίας δεν συμπίπτει απαραίτητα με την ημερομηνία και ώρα έναρξης της βροχόπτωσης.

Από κάθε συμβάν βροχόπτωσης συσκευάσθηκε χωρίς καμία επεξεργασία ένα δείγμα γεωμετρίας «2», όγκου  $282.0 \text{ cm}^3$ . Στις περιπτώσεις όπου η ποσότητα του νερού που συλλέχθηκε ήταν αρκετή, το υπόλοιπο νερό υπέστη επεξεργασία (φιλτράρισμα). Τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων που προέκυψαν από κάθε δειγματοληψία δίνονται στις τελευταίες στήλες του Πίνακα 6.6.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Ύψος βροχής (mm)	Επιφάνεια συλλογής (m <sup>2</sup> )	Μάζα νερού (L)	Κωδικός δείγματος	Τύπος δείγματος – γεωμετρία
29/03/2011 15:00 29/03/2011 16:10	~1.0	0.3672	0.265	R0054	νερό - γεωμετρία «2»
30/03/2011 19:00 31/03/2011 08:47	7.4	0.1836	2.044	R0055	νερό - γεωμετρία «2»
				AW016	φίλτρο
				R0057	φιλτραρισμένο νερό - γεωμετρία «2»
31/03/2011 08:47 01/04/2011 13:20	12.0	0.1836	2.230	R0058	νερό - γεωμετρία «2»
				AW017	φίλτρο
				R0059	φιλτραρισμένο νερό - γεωμετρία «2»
01/04/2011 19:00 03/04/2011 10:00	1.4	0.1836	0.278	R0060	νερό - γεωμετρία «2»
15/04/2011 17:00 17/04/2011 12:00	3.6	0.1836	1.264	R0061	νερό - γεωμετρία «2»
17/04/2011 12:00 18/04/2011 16:15	11.0	0.1836	2.084	R0062	νερό - γεωμετρία «2»

Πίνακας 6.6: Δειγματοληψίες νερού βροχής κατά την περίοδο του ατυχήματος της Fukushima.

Τα δείγματα γεωμετρίας «2» τα οποία δεν είχαν υποστεί καμία επεξεργασία αναλύθηκαν για ~ 2 ημέρες <sup>129</sup> και τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7, τόσο σε μονάδες ειδικής ραδιενέργειας (Bq/L) όσο και σε μονάδες απόθεσης (Bq/m<sup>2</sup>). Το μόνο ισότοπο σχάσης που ανιχνεύθηκε στο νερό της βροχής ήταν το <sup>131</sup>I και ήταν ανιχνεύσιμο μέχρι την 1<sup>η</sup> Απριλίου 2011. Η απόθεσή του κυμάνθηκε από < 1 Bq/m<sup>2</sup> έως και 19 Bq/m<sup>2</sup>. Τα αποτελέσματα από τα επεξεργασμένα δείγματα <sup>130</sup> παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	<sup>131</sup> I (Bq/L)	<sup>131</sup> I (Bq/m <sup>2</sup> )
29/03/2011 15:00	0.7 ± 44%	0.5 ± 44%
30/03/2011 19:00	1.0 ± 22%	11 ± 22%
31/03/2011 08:47	1.6 ± 20%	19 ± 20%
01/04/2011 19:00	1.7 ± 19%	2.5 ± 19%
15/04/2011 17:00	< 0.42	< 0.64
17/04/2011 12:00	< 0.42	< 0.64

Πίνακας 6.7: Ειδική ραδιενέργεια <sup>131</sup>I σε δείγματα νερού βροχής χωρίς επεξεργασία.

Ημερομηνία δειγματοληψίας	Τύπος δείγματος	<sup>131</sup> I (Bq/L)	<sup>131</sup> I (Bq/m <sup>2</sup> )
30/03/2011 19:00	φίλτρο	0.02 ± 50%	0.3 ± 50%
	φιλτραρισμένο νερό	0.6 ± 35%	7 ± 35%
	συνολικά	0.6 ± 35%	7 ± 35%
31/03/2011 08:47	φίλτρο	0.05 ± 36%	0.6 ± 36%
	φιλτραρισμένο νερό	1 ± 59%	11 ± 59%
	συνολικά	1.1 ± 54%	12 ± 54%

Πίνακας 6.8: Ειδική ραδιενέργεια <sup>131</sup>I σε δείγματα νερού βροχής μετά από επεξεργασία.

<sup>129</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.5, φάσματα 414 – 419.

<sup>130</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.5, φάσματα 420 – 425.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με και χωρίς επεξεργασία (Πίνακας 6.9) προκύπτει ότι, όταν τα δείγματα αναλύονται χωρίς καμία επεξεργασία, η ειδική ραδιενέργεια του  $^{131}\text{I}$  που εκτιμάται είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των τιμών της ειδικής ραδιενέργειας που υπολογίζεται για τα επιμέρους δείγματα (φίλτρο και φιλτραρισμένο νερό). Βέβαια οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές αυτές είναι αρκετά υψηλές ώστε στατιστικά να μην διαφέρουν και να μην μπορεί να επιβεβαιωθεί αυτή η τάση. Η παρατηρούμενη διαφορά ενδεχομένως είναι αποτέλεσμα της χρησιμοποιούμενης γεωμετρίας κατά την ανάλυση χωρίς επεξεργασία, καθώς υπάρχει ενδεχόμενο ένα ποσοστό από τα αιωρούμενα σωματίδια τελικά να κατακάθεται εντός του δείγματος, δημιουργώντας ίζημα και ανομοιογενές δείγμα. Στην περίπτωση αυτή η πραγματική απόδοση ανίχνευσης θα είναι μεγαλύτερη, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης του ισοτόπου. Η υπερεκτίμηση αυτή της ραδιενέργειας του δείγματος πάντως είναι προς την ασφαλή κατεύθυνση, στην περίπτωση που απαιτείται γρήγορη ανάλυση του νερού χωρίς επεξεργασία και χωρίς απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας.

Ημερομηνία βροχόπτωσης	Τύπος δείγματος	χωρίς επεξεργασία	με επεξεργασία	U
30/03/2011 19:00	$^{131}\text{I}$ (Bq/L)	1.0 ± 22%	0.6 ± 34%	1.333
	$^{131}\text{I}$ (Bq/m <sup>2</sup> )	12 ± 22%	7 ± 34%	1.407
31/03/2011 08:47	$^{131}\text{I}$ (Bq/L)	1.6 ± 20%	1.1 ± 56%	0.720
	$^{131}\text{I}$ (Bq/m <sup>2</sup> )	19 ± 20%	12 ± 56%	0.907

Πίνακας 6.9: Σύγκριση ειδικής ραδιενέργειας  $^{131}\text{I}$  σε δείγματα νερού βροχής με και χωρίς επεξεργασία.

Για τα ισότοπα του καισίου τα οποία δεν ανιχνεύθηκαν σε κανένα δείγμα νερού βροχής δίνεται στον Πίνακα 6.10 η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια, M.D.A., σε όρους συγκέντρωσης (Bq/L). Στον ίδιο Πίνακα δίνεται η αντίστοιχη τιμή και για το  $^{131}\text{I}$ . Υπενθυμίζεται ότι η ανίχνευση των μονοενεργειακών ισοτόπων  $^{131}\text{I}$  και  $^{137}\text{Cs}$  γίνεται στο suppressed φάσμα, ενώ του  $^{134}\text{Cs}$  γίνεται στο unsuppressed φάσμα.

Είδος δείγματος	Διάρκεια ανάλυσης	M.D.A. $^{131}\text{I}$ (Bq/L)	M.D.A. $^{137}\text{Cs}$ (Bq/L)	M.D.A. $^{134}\text{Cs}$ (Bq/L)
νερό γεωμετρίας «2»	2 ημέρες	0.42	0.73	0.37
φίλτρο	4 ώρες	0.02	0.02	0.03

Πίνακας 6.10: M.D.A. της διάταξης XtRa - CSS για τις γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των δειγμάτων νερού.

## 6.4 Ανίχνευση $^{137}\text{Cs}$ κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο της Αττικής

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ανιχνεύονται συστηματικά στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ θυγατρικά ισότοπα του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ), καθώς και το κοσμικής προέλευσης  $^7\text{Be}$ , όπως θα αναλυθεί λεπτομερώς στο επόμενο Κεφάλαιο. Τεχνητά ισότοπα, όπως το  $^{137}\text{Cs}$ , δεν ανιχνεύονται εν γένει, με εξαίρεση την περίοδο του ατυχήματος στο πυρηνικό εργοστάσιο της Fukushima, που παρουσιάστηκε παραπάνω. Ωστόσο, σε ορισμένα από τα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που λήφθηκαν από το 2013 και μετά, ανιχνεύθηκαν ίχνη  $^{137}\text{Cs}$  κατά τους χειμερινούς μήνες. Η ύπαρξη  $^{137}\text{Cs}$  στον αέρα θα πρέπει πρωτίστως να αποδίδεται στην καύση ξύλου και γενικότερα βιομάζας για οικιακή θέρμανση, μία τάση που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, ως αποτέλεσμα της οικονομικής κρίσης που πλήττει την Ελλάδα από το 2009. Σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Αρχή, η κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης το διάστημα Οκτωβρίου – Φεβρουάριου για τις χρονιές 2011 – 2012 και 2012 – 2013 παρουσίασε μείωση κατά 68.7%<sup>131</sup>, ενώ την ίδια περίοδο για την οικιακή θέρμανση αυξήθηκε πολύ η χρήση ξύλου και προϊόντων ξύλου. Η καύση ξύλου<sup>132</sup> και άλλων ειδών βιομάζας είναι μία από τις κύριες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων, οργανικών ενώσεων και σχηματισμού αεροζόλ σε αστικές περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Johansson, et al., 2004), (Holden, et al., 2011). Ανάμεσα στους ρύπους που εκπέμπονται κατά την καύση βιομάζας είναι και το  $^{137}\text{Cs}$  (Bourcier, et al., 2010), το οποίο εισήλθε στην ατμόσφαιρα και ρύπανε το δασικό οικοσύστημα κυρίως λόγω του ατυχήματος στο Chernobyl το 1986 (Fogh, et al., 2001), (Clouvas, et al., 2005). Η ίδια η ρυπασμένη βιομάζα δεν αποτελεί κίνδυνο, ωστόσο η εισπνοή του καπνού και του λεπτόκοκκου αεροζόλ που παράγεται κατά την καύση της μπορεί να έχει επίδραση στην υγεία του ανθρώπου (Bolling, et al., 2009).

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο των συστηματικών δειγματοληψιών ατμοσφαιρικού αεροζόλ, λήφθηκαν φίλτρα αέρα και κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο Αττικής. Στον Πίνακα 6.11 δίνονται οι

<sup>131</sup> <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SDE15/2016>

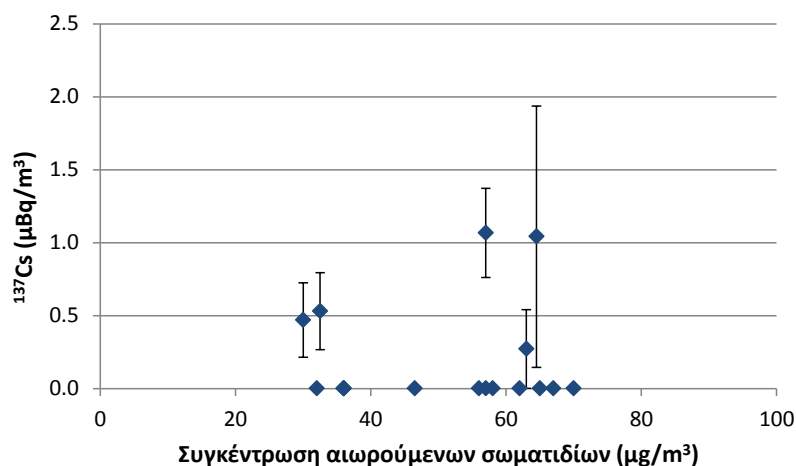
<sup>132</sup> Συμπεριλαμβανομένου και του επεξεργασμένου ξύλου υπό μορφή pellet.

κωδικοί των φίλτρων που λήφθηκαν σε χειμερινές περιόδους, η χρονική στιγμή έναρξης της δειγματοληψίας και η διάρκειά της. Σημειώνεται ότι πρόκειται για δειγματοληψίες πολύ μεγαλύτερης διάρκειας, σε σχέση με τα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που παρουσιάσθηκαν στην Παράγραφο 6.3.1, ενώ και τα αντίστοιχα δείγματα αναλύθηκαν για πολύ μεγαλύτερη διάρκεια (της τάξεως των 500 000 sec). Τα δείγματα αναλύθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη ΧtRa - CSS<sup>133</sup> και τα αποτελέσματα σε όρους ειδικής ραδιενέργειας <sup>137</sup>Cs δίνονται στον ίδιο Πίνακα. Στις δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα δίνονται η ελάχιστη και η μέγιστη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων την ημέρα της δειγματοληψίας, σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής – ΥΠΕΚΑ (<http://env.ypeka.gr/deltia/arheio/>). Στην Εικόνα 6.16 δίνεται υπό μορφή διαγράμματος η συσχέτιση της ανιχνευόμενης ειδικής ραδιενέργειας <sup>137</sup>Cs συναρτήσει της μέγιστης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στην Αττική.

Κωδικός φίλτρου	Ημερ/νία δειγμ/ληψίας	Διάρκεια δειγμ/ληψίας (h)	<sup>137</sup> Cs (μBq/m <sup>3</sup> )		Αιωρούμενα σωματίδια (μg/m <sup>3</sup> )	
			unsuppressed φάσμα	suppressed φάσμα	min	max
A0486	19/02/2013	67.6	--	--	12	67
A0487	22/02/2013	72.0	--	1 ± 86.0%	31	65
A0489	10/10/2014	161.0	--	0.5 ± 49.7%	9	33
A0490	18/11/2014	168.0	--	--	27	56
A0492	19/12/2014	168.0	--	--	10	47
A0493	19/01/2015	168.0	--	--	16	36
A0494	20/02/2015	168.0	--	0.5 ± 54.4%	16	30
A0495	16/03/2015	120.0	--	--	41	57
A0504	29/10/2015	120.0	--	--	12	32
A0505	15/11/2015	120.0	--	--	20	65
A0506	09/12/2015	120.0	--	--	16	62
A0507	13/01/2016	168.0	--	--	12	36
A0508	31/01/2016	168.0	--	--	22	70
A0509	21/03/2016	168.0	0.8 ± 65.2%	1 ± 28.6%	25	57
A0516	26/10/2016	168.0	--	--	13	36
A0517	06/11/2016	168.0	--	--	13	58
A0518	18/12/2016	168.0	--	0.3 ± 99.6%	9	63

Πίνακας 6.11: Ειδική ραδιενέργεια <sup>137</sup>Cs σε περιόδους αυξημένης αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο Αττικής.

<sup>133</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.6.



Εικόνα 6.16: Συσχέτιση ανιχνευόμενης ειδικής ραδιενέργειας <sup>137</sup>Cs και συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στο λεκανοπέδιο Αττικής.

Από τις αναλύσεις των δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ, διαπιστώθηκε η ανίχνευση <sup>137</sup>Cs κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, όπου η καύση ξύλων για θέρμανση ήταν αυξημένη. Οι συγκεντρώσεις που ανιχνεύθηκαν είναι ιδιαίτερα χαμηλές και δεν υπερβαίνουν το 1 µBq/m<sup>3</sup>, ενώ συνοδεύονται και από πολύ υψηλές αβεβαιότητες. Συγκριτικά με τα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα τις ημέρες που λήφθηκαν τα δείγματα, δεν διαπιστώθηκε μία συγκεκριμένη τάση, καθώς, αφενός μεν τα δείγματα στα οποία ανιχνεύθηκε το <sup>137</sup>Cs ήταν λίγα, αφετέρου δεν ανιχνεύθηκε <sup>137</sup>Cs σε ημέρες που η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν στα υψηλότερα επίπεδα (π.χ. Φεβρουάριος 2013 και Ιανουάριος 2016).

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη χειμερινή περίοδο του 2013, συγκεντρώσεις <sup>137</sup>Cs στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ ανιχνεύονταν και στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (Stoulos, et al., 2014), όπου αναφέρονται ότι κυμάνθηκαν μέχρι και 10.5 µBq/m<sup>3</sup>, ενώ οι συγκριτικά υψηλότερες τιμές (> 5 µBq/m<sup>3</sup>) ανιχνεύονταν κατά τη διάρκεια των Σαββατοκύριακων ή των αργιών όπου ενδεχομένως γινόταν μεγαλύτερη χρήση ξύλων για θέρμανση σε τζάκια.

Δεδομένης της ανίχνευσης <sup>137</sup>Cs στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ, αποφασίσθηκε να αναλυθούν και ορισμένα δείγματα τέφρας μετά από καύση ξύλων σε τζάκι. Συνολικά αναλύθηκαν τρία δείγματα τέφρας, από τρία διαφορετικά τζάκια. Πληροφορίες για τα δείγματα που προέκυψαν δίνονται στον Πίνακα 6.12, όπου

δίνεται και η ειδική ραδιενέργεια  $^{137}\text{Cs}$  που ανιχνεύθηκε<sup>134</sup>. Επιπλέον, δίνονται η ειδική ραδιενέργεια  $^7\text{Be}$  και  $^{40}\text{K}$  που επίσης ανιχνεύθηκαν στα δείγματα τέφρας. Το  $^{40}\text{K}$  είναι ένα ισότοπο που αναμένεται να ανιχνεύεται σε δείγματα βιομάζας. Αντίθετα, η ανίχνευση  $^7\text{Be}$  προκαλεί εντύπωση καθώς πρόκειται για ένα ισότοπο κοσμικής προέλευσης με συγκριτικά μικρό χρόνο ημιζωής (53.44 ημέρες). Το  $^7\text{Be}$  επικάθεται μεν στα ξύλα, εφόσον αυτά είναι εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα, αλλά λόγω και του χαμηλού χρόνου ημιζωής του δεν αναμένεται να ανιχνεύεται σε αυτά σε αξιόλογες συγκεντρώσεις. Η προέλευση του  $^7\text{Be}$  στην τέφρα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Τύπων ξύλων	Κωδικός δείγματος	Μάζα δείγματος (gr)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^7\text{Be}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (kBq/kg)
ελιά	MS639	23.2	3.1 ± 55.8%	206 ± 4.8%	2.91 ± 3.2%
άγνωστο	MS640	47.0	122 ± 1.3%	23 ± 31.4%	3.36 ± 3.1%
ελιά, οξιά, δρυς	MS641	178.7	52.7 ± 1.3%	9.7 ± 24.7%	9.33 ± 3.0%

Πίνακας 6.12: Ραδιενέργεια δειγμάτων τέφρας από καύση ξύλου σε τζάκι.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των αναλύσεων οι συγκεντρώσεις των τριών παραπάνω ισοτόπων παρουσιάζει μεγάλη κύμανση. Βέβαια, το πλήθος των δειγμάτων είναι πολύ μικρό ώστε να μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα. Σε άλλη μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί στον Ελλαδικό χώρο (Stoulos, et al., 2014), όπου μελετήθηκε η ραδιενέργεια σε διάφορα είδη ξύλου και δείγματα από pellets, βρέθηκαν συγκεντρώσεις στις τέφρες από καύση εισαγόμενων ξύλων από Βαλκανικές χώρες που κυμαίνονται από 31 έως 64 Bq/kg. Μεγαλύτερη κύμανση παρουσίασε η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$  στις τέφρες από καύση εγχώριων ξύλων: 25 – 500 Bq/kg.

## 6.5 Συμπεράσματα από τη χρήση του συστήματος Compton Suppression για τον προσδιορισμό πολύ χαμηλών επιπέδων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι αναλύσεις μίας ποικιλίας περιβαλλοντικών δειγμάτων που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ., κυρίως με την ανιχνευτική διάταξη

<sup>134</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.5, φάσματα 426 – 430.

XtRa - CSS, με στόχο την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό πολύ χαμηλών επιπέδων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. επιλέχθηκαν και αναλύθηκαν στις ανιχνευτικές διατάξεις XtRa - CSS και LEGe του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. ορισμένα από τα πλέον επιβαρυμένα σε  $^{137}\text{Cs}$  δείγματα χώματος, τα οποία είχαν συλλεχθεί αμέσως μετά το ατύχημα στο Chernobyl από τις περιοχές της Καρδίτσας και των Τρικάλων. Στα δείγματα αυτά δεν είχε ποτέ ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$  κατά τις αναλύσεις που είχαν γίνει στο παρελθόν. Κατά την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ. η ειδική ραδιενέργεια του  $^{241}\text{Am}$  στα δείγματα αναμένεται να είναι υψηλότερη λόγω και της παραγωγής  $^{241}\text{Am}$  από την απομείωση του  $^{241}\text{Pu}$  που επίσης είχε πέσει στο χώμα. Επιπλέον, το χαμηλότερο συνεχές υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της φασματοσκοπικής ανάλυσης, εξαιτίας της απομείωσης των συγκριτικά βραχύβιων ισοτόπων, σε συνδυασμό με τη χρήση του συστήματος Compton Suppression δημιουργεί ευνοϊκότερες συνθήκες ανίχνευσης ισοτόπων που βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, όπως το  $^{241}\text{Am}$ . Όπως διαπιστώθηκε από τις αναλύσεις,  $^{241}\text{Am}$  ανιχνεύθηκε σε αρκετές περιπτώσεις και στα δύο φάσματα της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS (unsuppressed και suppressed) αλλά και σε φάσματα του ανιχνευτή LEGe. Η ειδική ραδιενέργεια του ισοτόπου κυμαίνεται από  $0.4 \text{ Bq/kg} \pm 76\%(1\sigma)$  έως  $3.8 \text{ Bq/kg} \pm 13\%(1\sigma)$ , ενώ επιπλέον διαπιστώθηκε πολύ υψηλή θετική συσχέτιση ανάμεσα στην ειδική ραδιενέργεια των ισοτόπων  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$ .

Από την απεικόνιση της συσχέτισης των ειδικών ραδιενεργειών των δύο ισοτόπων, στα δείγματα χώματος από την περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων που αναλύθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ., καθώς και σε δύο δείγματα χώματος από άλλη περιοχή που είχαν παλαιότερα αναλυθεί στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. και στα οποία είχε τότε ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$ , προκύπτει ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα. Τα δύο δείγματα που προέρχονται από άλλη περιοχή, εμφανίζονται να έχουν πολύ υψηλότερη τιμή ειδικής ραδιενέργειας  $^{241}\text{Am}$ , από όση θα δικαιολογούσε η αντίστοιχη ειδική ραδιενέργεια του  $^{137}\text{Cs}$ . Πρόκειται για δύο δείγματα επιφανειακού χώματος τα οποία είχαν συλλεχθεί από το όρος Πατέρας του Ν. Αττικής, αμέσως μετά το ατύχημα στο Chernobyl, και τα οποία ήταν τα μοναδικά στα οποία είχε ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$  κατά τις αναλύσεις που έγιναν αμέσως μετά το ατύχημα. Η διαπίστωση αυτή



δημιουργεί τον εύλογο προβληματισμό για το κατά πόσον η πηγή του  $^{241}\text{Am}$  ήταν η ίδια και η απόθεσή του στις δύο περιοχές έγινε την ίδια χρονική στιγμή.

Καθώς η περίοδος εκπόνησης της Δ.Δ. συνέπεσε με την εξέλιξη του πυρηνικού ατυχήματος στον πυρηνικό σταθμό Dai-chi της Fukushima, οι τεχνικές δειγματοληψίας και αναλύσεων με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS που είχαν αναπτυχθεί στο πλαίσιο της Δ.Δ. εφαρμόσθηκαν για την ανίχνευση των ραδιενεργών ρύπων που έφτασαν στην Ελλάδα κατά την περίοδο του ατυχήματος, αν και η συγκέντρωσή τους αναμενόταν να είναι μικρή λόγω της γεωγραφικής θέσης της χώρας. Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. πραγματοποιήθηκαν συστηματικές δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων από την πρώτη στιγμή που διαπιστώθηκε η έκταση του ατυχήματος. Όλα τα δείγματα αναλύθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS, η οποία έδωσε τη δυνατότητα ανίχνευσης πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , κάτω από  $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  στον ατμοσφαιρικό αέρα, ικανότητα η οποία δεν υπήρχε μέχρι τότε, με τις συμβατικές γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. και τη μεθοδολογία που ακολουθείτο.

Πιο συγκεκριμένα, στα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ ανιχνεύθηκε  $^{131}\text{I}$  από τις 24 Μαρτίου 2011 έως και τις 17 Απριλίου 2011 με συγκεντρώσεις που κυμάνθηκαν από  $7 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  έως  $622 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  και την υψηλότερη συγκέντρωσή να καταγράφεται το βράδυ 31 Μαρτίου προς 1 Απριλίου 2011.

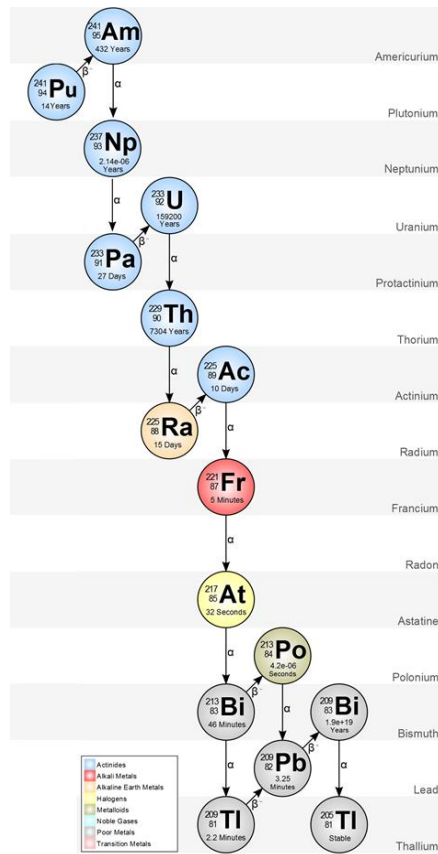
Η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS και συγκεκριμένα του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης, οδήγησε στην επιτυχή ανίχνευση των ισοτόπων σχάσεως από το ατύχημα της Fukushima σε ορισμένα δείγματα, όταν στο αντίστοιχο unsuppressed φάσμα αυτά δεν ήταν ανιχνεύσιμα. Επίσης, υπήρξαν δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ τα οποία ενώ στις πρώτες συγκριτικά σύντομες αναλύσεις δεν έδειξαν ίχνη ισοτόπων καισίου σε κανένα από τα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed), σε αναλύσεις μεγαλύτερης διάρκειας που ακολούθησαν, ανιχνεύθηκε  $^{137}\text{Cs}$  στο suppressed φάσμα με σχετικά ικανοποιητική αβεβαιότητες ( $< 50\%$ ,  $1\sigma$ ). Σε ορισμένα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ ανιχνεύθηκαν και τα δύο ισότοπα του καισίου,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , με συγκεντρώσεις που κυμάνθηκαν από  $8 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  έως  $245 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  για το πρώτο και

από  $15 \text{ Bq/m}^3$  έως  $234 \text{ Bq/m}^3$  για το δεύτερο. Μάλιστα, εκτιμήθηκε ο λόγος της συγκέντρωσης των δύο αυτών ισοτόπων στον αέρα ίσος με  $1.0 \pm 12\%(1\sigma)$ .

Για την ανίχνευση των ισοτόπων της επίπτωσης από το ατύχημα σε υγρές κατακρημνίσεις αναπτύχθηκε μεθοδολογία επεξεργασίας και ανάλυσης δειγμάτων νερού της βροχής. Από τα δείγματα υγρών κατακρημνίσεων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια αυτών των βροχοπτώσεων διαπιστώθηκε ότι η απόθεση  $^{131}\text{I}$  κυμάνθηκε από  $\sim 0.5 \text{ Bq/m}^2$  έως και  $19 \text{ Bq/m}^2$ . Στα δείγματα νερού βροχής που συλλέχθηκαν την περίοδο εκείνη δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση των ισοτόπων του καισίου.

Τέλος, πέρα από τις συστηματικές δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ που γίνονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., λήφθηκαν φίλτρα αέρα και κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης αιθαλομίχλης στο λεκανοπέδιο Αττικής, μετά το 2013. Σε ορισμένα από τα δείγματα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια χειμερινών μηνών, ανιχνεύθηκε  $^{137}\text{Cs}$  σε συγκεντρώσεις που δεν ξεπερνούν το  $1 \text{ Bq/m}^3$  και συνοδεύονται από πολύ υψηλές αβεβαιότητες. Δεν παρατηρήθηκε συσχέτιση με τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα την ίδια περίοδο, ενώ δεν ανιχνεύθηκε  $^{137}\text{Cs}$  απαραίτητα σε ημέρες που η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν στα υψηλότερα επίπεδα. Το  $^{137}\text{Cs}$  ανιχνεύθηκε σε συγκεντρώσεις που παρουσιάζουν σημαντική κύμανση και σε λίγα δείγματα τέφρας από τζάκι που αναλύθηκαν. Αυτό όμως που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ότι σε δείγματα τέφρας που αναλύθηκαν ανιχνεύθηκε και  $^7\text{Be}$ , η προέλευση του οποίου χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

# ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6



Σχήμα 6.1: Η ραδιενεργός σειρά του  $^{241}\text{Pu}$ .



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## Προσδιορισμός φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και στις υγρές κατακρημνίσεις

---

### 7.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η συστηματική δειγματοληψία και ανάλυση ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ., με στόχο την ανίχνευση των περιεχομένων σε αυτό φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων. Στο προηγούμενο Κεφάλαιο – μεταξύ άλλων – παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του προσδιορισμού τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ για συγκεκριμένες περιόδους όπου υπήρχε ενδιαφέρον. Στο Κεφάλαιο αυτό, στο επίκεντρο είναι τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα: ισότοπα κοσμικής προέλευσης ( $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ) και ισότοπα γήινης προέλευσης ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$ ). Λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης, και ειδικότερα για το ισότοπο  $^7\text{Be}$ , έχει πραγματοποιηθεί σε άλλες εργασίες - Δ.Ε. (Παπανδρέου, 2009), (Σάββα, 2009), Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012). Στο πλαίσιο της Δ.Δ. η μεθοδολογία δειγματοληψίας και ανάλυσης που είχαν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ τροποποιήθηκε, με σκοπό την ανίχνευση και άλλων ισοτόπων ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$ ).

Αρχικά, στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη αναφορά στους μηχανισμούς παραγωγής και απόθεσης στη Γη των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης και στους

λόγους για τους οποίους ανιχνεύονται φυσικά ραδιενεργά ισότοπα – θυγατρικά της σειράς του  $^{238}\text{U}$  – στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και στις υγρές κατακρημνίσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το πρωτόκολλο δειγματοληψίας και ανάλυσης που ακολουθείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. με σκοπό την ανίχνευση των παραπάνω ισοτόπων. Τέλος, παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. στον ατμοσφαιρικό αέρα και στις υγρές κατακρημνίσεις στο διάστημα Ιούλιος 2014 – Δεκέμβριος 2016. Παρόλο που οι αναλύσεις υγρών κατακρημνίσεων που παρουσιάζονται στο πλαίσιο της Δ.Δ. αφορούν μόνο στο νερό της βροχής, η όλη μεθοδολογία που παρουσιάζεται είναι εφαρμόσιμη για κάθε είδους υγρές κατακρημνίσεις.

## 7.2 Ισότοπα κοσμικής προέλευσης

Οι αλληλεπιδράσεις της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας <sup>135</sup> με την ατμόσφαιρα της Γης έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή μίας σειράς από δευτερογενή σωματίδια και μία ποικιλία ισοτόπων, τα οποία χαρακτηρίζονται ως κοσμογενή ισότοπα ή ισότοπα κοσμικής προέλευσης. Υπεύθυνα για την παραγωγή των ισοτόπων αυτών είναι κυρίως τα πρωτόνια και τα νετρόνια, αλλά και τα π-μεσόνια και τα Κ-μεσόνια (Lal, et al., 1958). Η συνεισφορά των φωτονίων κοσμικής προέλευσης στο σχηματισμό ισοτόπων είναι αμελητέα, με εξαίρεση ορισμένα ισότοπα τα οποία παράγονται με αντιδράσεις ( $\gamma$ -n) και ( $\gamma$ -p) (Lal, et al., 1958).

Ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης κυμαίνεται από μερικά λεπτά (ή και λιγότερο) έως αρκετά εκατομμύρια χρόνια. Με την ανάπτυξη επαρκώς ευαίσθητων συστημάτων που επέτρεψαν την ανίχνευση των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης, κατέστη δυνατή η χρήση τους ως ιχνηλάτες (tracers) για μετεωρολογικές, γεωφυσικές και άλλες διεργασίες (Perkins, et al., 1965a). Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν αρκετές εργασίες, τόσο για την ανίχνευση ισοτόπων κοσμικής προέλευσης και το ρυθμό παραγωγής τους, όσο και για τη χρήση τους ως ιχνηλάτες, κατά τη μελέτη και τη χρονολόγηση γεωφυσικών

<sup>135</sup> Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από δύο συνιστώσες: (α) τη γαλαξιακή, που αποτελεί την κυρίαρχη συνιστώσα, και (β) την ηλιακή. Η σύσταση της γαλαξιακής ακτινοβολίας είναι 87% πρωτόνια, 12% σωματίδια-α και 1% βαρύτερα σωματίδια με ατομικούς αριθμούς 3 – 90 (Simpson J.A., 1983). Την ηλιακή ακτινοβολία αποτελούν τα solar energetic particles που είναι πρωτόνια υψηλής ενέργειας, ηλεκτρόνια και ιόντα υψηλού ατομικού αριθμού (Ryan, et al., 2000).

διεργασιών (Libby, 1952), (Lal, et al., 1962), (Haxel, et al., 1962), (Junge, 1963), (Lal, 1963). Τα κοσμογενή ισότοπα με χρόνους ημιζωής μεγαλύτερους από δύο εβδομάδες χρησιμοποιούνται ευρέως για μελέτες διεργασιών υγρής απόθεσης (Wogman, et al., 1968), (Perkins, et al., 1970), ρυθμού ανάμιξης της ατμόσφαιρας και χρόνους παραμονής στην στρατόσφαιρα και την τροπόσφαιρα (Lal, et al., 1962), (Martell, 1970), μεταφοράς αεροζόλ από τον ατμοσφαιρικό αέρα στη θάλασσα (Silker, et al., 1968), (Broecker, et al., 1974), (Young, et al., 1974), (Broecker, et al., 1980) ή ταχύτητας απόθεσης του αεροζόλ (Lal, et al., 1967), (Young, et al., 1980), (Crecelius, 1981).

Στον Πίνακα 7.1 δίνονται με σειρά μειούμενου χρόνου ημιζωής τα πλέον σημαντικά ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης και η κύρια ακτινοβολία που εκπέμπουν, σύμφωνα με τους (Perkins, et al., 1965a) και (Jasiulionis, et al., 2005). Στον ίδιο Πίνακα δίνεται και ο λόγος (όπου είναι διαθέσιμος) του πλήθους των πυρήνων του εκάστοτε ισοτόπου προς το αντίστοιχο πλήθος πυρήνων του  $^7\text{Be}$ .

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής	Κύρια ακτινοβολία	Πυρήνες ισοτόπου προς πυρήνες $^7\text{Be}$ (Jasiulionis, et al., 2005)	Αναφορά
$^{10}\text{Be}$	$1.51 \times 10^6$ γ	$\beta^-$		(Arnold, 1956)
$^{26}\text{Al}$	$7.17 \times 10^5$ γ	$\beta^+$	0.0012	(Nishiizumi, et al., 1989)
$^{36}\text{Cl}$	$3.02 \times 10^5$ γ	$\beta^-$	0.017	(Schaeffer, et al., 1955)
$^{14}\text{C}$	5700 γ	$\beta^-$		(Libby, 1952)
$^{32}\text{Si}$	172 γ	$\beta^-$	0.0022	(Lal, et al., 1960)
$^3\text{H}$	12.312 γ	$\beta^-$		(von Faltings, et al., 1950)
$^{22}\text{Na}$	2.6029 γ	$\beta^+, \gamma$	0.00069	(Marquez, et al., 1957)
$^{35}\text{S}$	87.25 d	$\beta^-$	0.021	(Goel, 1956)
$^7\text{Be}$	53.22 d	$\gamma$	1	(Arnold, et al., 1955)
$^{33}\text{P}$	25.383 d	$\beta^-$	0.0093	(Lal, et al., 1957)
$^{32}\text{P}$	14.284 d	$\beta^-$	0.011	(Marquez, et al., 1955)
$^{24}\text{Na}$	14.958 h	$\beta^-, \gamma$		(Roedel, 1963)
$^{38}\text{S}$	2.838 h	$\beta^-$		(Perkins, et al., 1965b)
$^{39}\text{Cl}$	55.6 min	$\beta^-, \gamma$		(Winsberg, 1956)
$^{38}\text{Cl}$	37.24 min	$\beta^-, \gamma$		(Perkins, et al., 1965b)

Πίνακας 7.1: Τα σημαντικότερα ισότοπα κοσμικής προέλευσης (Perkins, et al., 1965a).

Τα ισότοπα  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  και  $^7\text{Be}$  σχηματίζονται κυρίως κατά την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με τους πυρήνες Αζώτου και Οξυγόνου της ατμόσφαιρας, ενώ τα ισότοπα  $^{35}\text{S}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{33}\text{P}$  και  $^{32}\text{P}$  παράγονται από αντιδράσεις με πυρήνες Αργού της ατμόσφαιρας (Lal, et al., 1958).

Μετά την παραγωγή τους, τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης υπόκεινται σε διαφορετικές διεργασίες, ανάλογα με τις χημικές τους ιδιότητες. Για παράδειγμα, ο  $^{14}\text{C}$  οξειδώνεται σε  $\text{CO}_2$ , ενώ το  $^{10}\text{Be}$  προσκολλάται στα αερολύματα (αεροζόλ). Στη συνέχεια, απομακρύνονται από το σημείο δημιουργίας τους και ανακατανέμονται στην ατμόσφαιρα, ακολουθώντας την πορεία των αερίων μαζών (Masarik, et al., 1999). Κάθε ισότοπο, ανάλογα με τη συμπεριφορά του, χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές. Στον Πίνακα 7.2 δίνονται οι κυριότερες εφαρμογές των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης σύμφωνα με τη δημοσίευση (Lal, 1987).

Ισότοπο	Εφαρμογή
$^{14}\text{C}$	αρχαιολογία, παλαιοβοτανολογία
$^{22}\text{Na}$ , $^{35}\text{S}$ , $^7\text{Be}$ , $^{33}\text{P}$ , $^{32}\text{P}$ , $^{28}\text{Mg}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{38}\text{S}$ , $^{31}\text{Si}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{39}\text{Cl}$ , $^{38}\text{Cl}$ , $^{34\text{m}}\text{Cl}$	μετεωρολογία, φυσική των νεφών, δομή της ατμόσφαιρας, παραγωγή και κυκλοφορία αερίων μαζών
$^{10}\text{Be}$ , $^{36}\text{Cl}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{32}\text{Si}$ , $^{39}\text{Ar}$ , $^3\text{H}$	μελέτη υδάτων και παγετώνων, χρονολόγηση υπόγειων υδάτων, ιζημάτων λιμνών και παγετώνων
$^{10}\text{Be}$ , $^{81}\text{Kr}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{39}\text{Ar}$ , $^{32}\text{Si}$ , $^{36}\text{Cl}$	ωκεανογραφία και καταγραφή θαλάσσιων ιζημάτων, μετακινήσεις μεταξύ αέρα και θάλασσας γεωχημικοί και βιολογικοί κύκλοι, χρονολόγηση ιζημάτων, καταγραφή παλαιομαγνητικών μεταθέσεων, προϊστορία κοσμικής ακτινοβολίας

Πίνακας 7.2: Εφαρμογές των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης (Lal, 1987).

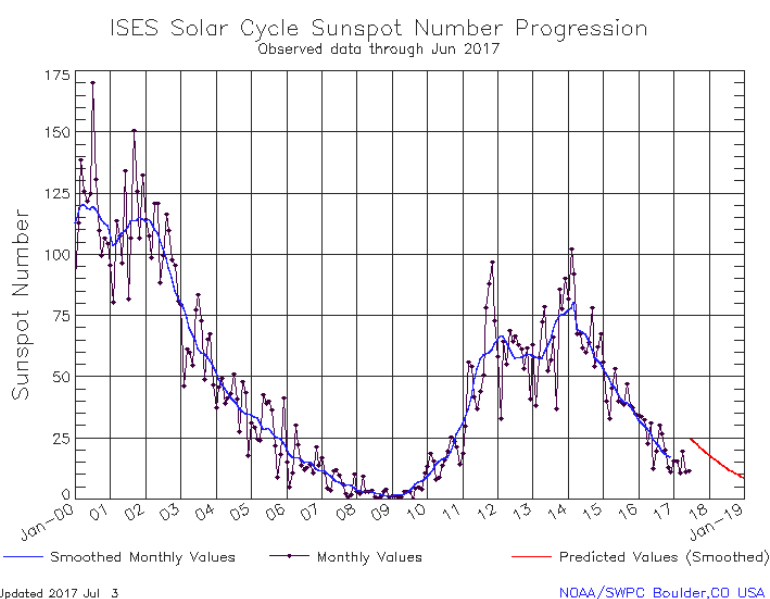
Ο ρυθμός παραγωγής των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης εξαρτάται από την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γης, μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος και παρουσιάζει χρονικές διακυμάνσεις κυρίως λόγω:

- Των διακυμάνσεων της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου της Γης (Masarik, et al., 1999), καθώς τα εισερχόμενα στο γεωμαγνητικό πεδίο της Γης σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας είναι δυνατό να αποκλίνουν της πορείας τους, υπό την επίδραση του πεδίου. Η όποια κύμανση του πεδίου, επηρεάζει τη ροή της κοσμικής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια την παραγωγή κοσμικής προέλευσης ισοτόπων.
- Της ηλιακής δραστηριότητας, κυρίως λόγω της δημιουργίας ηλιακών κηλίδων, οι οποίες επιδρούν σημαντικά στο μαγνητικό πεδίο της Γης, που λειτουργεί ως ασπίδα έναντι της κοσμικής ακτινοβολίας, κυρίως γαλαξιακής προέλευσης.



Ειδικότερα, τα ακόλουθα φαινόμενα της ηλιακής δραστηριότητας επηρεάζουν σημαντικά την παραγωγή των κοσμογενών ισοτόπων:

- Οι ηλιακές κηλίδες και ο ενδεκαετής κύκλος του ήλιου. Οι ηλιακές κηλίδες είναι σκοτεινοί σχηματισμοί στο εσωτερικό στρώμα της ηλιακής ατμόσφαιρας, οι οποίοι έχουν θερμοκρασία χαμηλότερη από τις γειτονικές τους περιοχές και δημιουργούν ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο (χιλιάδες φορές μεγαλύτερο από το μαγνητικό πεδίο του ήλιου). Το φαινόμενο των ηλιακών κηλίδων είναι περιοδικό και το πλήθος τους κυμαίνεται μεταξύ ενός μεγίστου αριθμού και της σχεδόν πλήρους εξαφάνισής τους. Η μέση περίοδος του φαινομένου διαρκεί 11 χρόνια και αποτελεί τον ηλιακό κύκλο. Στην Εικόνα 7.1 παρουσιάζεται το πλήθος των ηλιακών κηλίδων για το διάστημα Ιανουάριος 2000 έως Ιούλιος 2017 σύμφωνα με το Space Weather Prediction Centre των Η.Π.Α. (<http://www.swpc.noaa.gov>). Κατά την περίοδο όπου οι ηλιακές κηλίδες είναι στο μέγιστο κατά το πλήθος αλλά και την ένταση, το ηλιακό μαγνητικό πεδίο γίνεται ισχυρότερο, με αποτέλεσμα να «προστατεύεται» η Γη από την κοσμική ακτινοβολία γαλαξιακής προέλευσης. Συνεπώς, η παραγωγή των κοσμογενών ισοτόπων επηρεάζεται κατά αντίστροφο τρόπο από την ηλιακή δραστηριότητα, δηλαδή κατά τις περιόδους όπου οι ηλιακές κηλίδες φθάνουν στο μέγιστό τους, η παραγωγή κοσμογενών ισοτόπων είναι ελάχιστη, γεγονός που έχει μελετηθεί και πειραματικά (Hotzl, et al., 1991), (Cannizzaro, et al., 2004).



Εικόνα 7.1: Πλήθος ηλιακών κηλίδων για την περίοδο 2000-2019 (<http://www.swpc.noaa.gov>).

- Ο ηλιακός άνεμος. Μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ηλιακή σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται κυρίως από πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Μετά από έναν έντονο τέτοιο άνεμο μπορεί να παρατηρηθούν χαμηλές συγκεντρώσεις ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στον αέρα στο επίπεδο του εδάφους (Papastefanou, et al., 2004).
- Οι μαγνητικές καταιγίδες. Προκαλούνται από τη σύγκρουση νεφών ηλιακού πλάσματος με τη μαγνητόσφαιρα της Γης και μπορεί να προκαλέσουν κυμάνσεις στο μαγνητικό πεδίο της Γης, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του ρυθμού παραγωγής των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης (Lal, et al., 1967).
- Οι ηλιακές εκλάμψεις. Πρόκειται για βίαιες εκρήξεις στην ατμόσφαιρα του Ήλιου οι οποίες απελευθερώνουν τεράστια ποσότητα ενέργειας, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και φορτισμένα σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας. Αποτέλεσμα των ηλιακών εκλάμψεων είναι η αύξηση της παραγωγής στην ατμόσφαιρα των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης. Επειδή οι ηλιακές εκλάμψεις είναι σχετικά σπάνια γεγονότα και διαρκούν μόνο λίγες ώρες, εκτιμάται ότι δεν μπορούν να επηρεάσουν το μέσο ρυθμό παραγωγής των ισοτόπων αυτών (Lal, et al., 1958), (Lal, et al., 1967).

### 7.2.1 Το ισότοπο κοσμικής προέλευσης $^7\text{Be}$

Το στοιχείο Βηρύλλιο έχει ατομικό αριθμό 4 και ατομικό βάρος 9.012 amu. Υπάρχουν δώδεκα ισότοπα του Βηρυλλίου, από τα οποία δύο μόνο είναι ραδιενεργά: το  $^7\text{Be}$  και το  $^{10}\text{Be}$ . Το  $^7\text{Be}$  έχει χρόνο ημιζωής 53.44 ημέρες και αποδιεγείρεται με σύλληψη ηλεκτρονίου (Electron Capture) σε  $^7\text{Li}$ , εκπέμποντας φωτόνια ενέργειας 477.60 keV με ποσοστό εκπομπής 10.44% (Be, et al., 2004).

Το  $^7\text{Be}$  παράγεται κυρίως στη στρατόσφαιρα (~70%) και δευτερευόντως στην ανώτερη τροπόσφαιρα (~30%), από τον κατακερματισμό (spallation) ελαφρών ατμοσφαιρικών πυρήνων (C, N και O) από πρωτόνια και νετρόνια της κοσμικής ακτινοβολίας (Lal, et al., 1958), (Rindi, et al., 1967). Η παραμονή του  $^7\text{Be}$  στην τροπόσφαιρα έχει εκτιμηθεί σε 28.2 ημέρες (Papastefanou, 2006), ενώ στην στρατόσφαιρα ~1-2 χρόνια. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι μόλις το 1% της παραγόμενης ποσότητας του ισοτόπου ανιχνεύεται στην επιφάνεια της Γης (Yoshimori, 2005a), (Yoshimori, 2005b), (Yoshimori, 2005c).

Εκτός από την κύμανση του ρυθμού παραγωγής των κοσμογενών ισοτόπων, η συγκέντρωση του  ${}^7\text{Be}$  στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει και εποχιακές μεταβολές (Duenas, et al., 2003), (Azahra, et al., 2003). Οι μεταβολές αυτές συσχετίζονται και με μία σειρά από μετεωρολογικά μεγέθη, όπως η θερμοκρασία (Azahra, et al., 2003), η ατμοσφαιρική πίεση (Likuku, 2006), η σχετική υγρασία (Meresona, 2008), η βροχόπτωση (Al-Azmi, et al., 2001), η χιονόπτωση (Ioannidou, et al., 2006), η νέφωση (Durana, et al., 1996), ενώ σύμφωνα με τους (Feely, et al., 1989) οι μεταβολές αυτές μπορούν να αποδοθούν και στους παρακάτω μηχανισμούς:

- ανταλλαγή και ανάμιξη αερίων μαζών μεταξύ τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας,
- κατακόρυφη ανάμιξη αερίων μαζών εντός της τροπόσφαιρας,
- κίνηση αερίων τροποσφαιρικών μαζών από μέσα γεωγραφικά πλάτη σε υψηλότερα και
- καθαρισμός (scavenging) του ατμοσφαιρικού αέρα μέσω των μηχανισμών υγρής (rainout και washout effects) και ξηρής απόθεσης.

Το άλλο κοσμογενές ισότοπο του Βηρυλλίου, το  ${}^{10}\text{Be}$ , έχει χρόνο ημιζωής  $1.51 \times 10^6$  χρόνια, αποδιεγείρεται με διάσπαση  $\beta^-$  σε  ${}^{10}\text{B}$  και απαντάται στην ατμόσφαιρα σε εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις, απαιτώντας για την ανίχνευσή του τεχνολογίες όπως Accelerator Mass Spectrometry (AMS) (Aldahan, et al., 2001), (Leppanen, et al., 2012).

### 7.2.2 Το ισότοπο κοσμικής προέλευσης ${}^{22}\text{Na}$

Το στοιχείο Νάτριο έχει ατομικό αριθμό 11 και ατομικό βάρος 22.990 amu. Υπάρχουν είκοσι ισότοπα του Νατρίου, από τα οποία το μοναδικό σταθερό είναι το  ${}^{23}\text{Na}$ , ενώ δύο είναι κοσμικής προέλευσης: το  ${}^{22}\text{Na}$  και το  ${}^{24}\text{Na}$ . Το  ${}^{22}\text{Na}$  έχει χρόνο ημιζωής 2.6 χρόνια και αποδιεγείρεται με  $\beta^+$  διάσπαση σε  ${}^{22}\text{Ne}$ , εκπέμποντας φωτόνιο ενέργειας 1274.6 keV.

Το κοσμικής προέλευσης  ${}^{22}\text{Na}$  παράγεται κατά τον κατακερματισμό πυρήνων Ar της ατμόσφαιρας (Tokuyama, et al., 1998). Ο μέσος χρόνος παραμονής του  ${}^{22}\text{Na}$  στην στρατόσφαιρα έχει εκτιμηθεί σε 1 – 3 χρόνια (Cigna, et al., 1970). Το  ${}^{22}\text{Na}$  παράγεται και κατά τις ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές (Tokuyama, et al., 1998), (Fleishman, 2008). Μάλιστα, ο ρυθμός παραγωγής του από πυρηνικές δοκιμές

μπορεί να υπερβεί το ρυθμό παραγωγής λόγω κοσμικής ακτινοβολίας (Perkins, et al., 1965a), (Roedel, 1965). Το  $^{22}\text{Na}$  ανιχνεύθηκε πρώτη φορά στο νερό της βροχής το 1957 (Marquez, et al., 1957), ενώ μελέτη του  $^{22}\text{Na}$  στην ατμόσφαιρα και στις τροφές έχει πραγματοποιηθεί εκτενώς ήδη στην αρχή της δεκαετίας του 1970 (Rama, et al., 1961), (Bhandari, et al., 1963), (Cigna, et al., 1965), (Roedel, 1965), (Bortoli, et al., 1966), (Cigna, et al., 1970), (Luyanas, et al., 1970), (Mattsson, 1972). Το  $^{22}\text{Na}$  είναι κατάλληλο ως ατμοσφαιρικός ιχνηλάτης (tracer) για δύο λόγους. Πρώτον, προσκολλάται στα αερολύματα της ατμόσφαιρας σε αντίθεση με τα μακρόβια ισότοπα  $^{14}\text{C}$  και  $^3\text{H}$ , και δεύτερον ο χρόνος ημιζωής του είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μέσο χρόνο παραμονής των αερολυμάτων στην στρατόσφαιρα (Tokuyama, et al., 1998). Το  $^{22}\text{Na}$  παρουσιάζει εποχιακές μεταβολές (seasonal variations), όπως και το  $^7\text{Be}$ , και ο εποχιακός κύκλος της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα έχει μελετηθεί τόσο μέσω δειγμάτων αεροζόλ όσο και μέσω μηνιαίων μετρήσεων υγρών κατακρημνίσεων (Tokuyama, et al., 1998), (Rulik, et al., 2009), (Leppanen, et al., 2012).

Τα δύο ισότοπα  $^{22}\text{Na}$  και  $^7\text{Be}$  παράγονται ταυτόχρονα στην ατμόσφαιρα και έχουν στη συνέχεια παρόμοια συμπεριφορά, ενώ και τα δύο εκπέμπουν φωτόνια, οπότε μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας. Ωστόσο, η χρήση του λόγου των συγκεντρώσεων των δύο αυτών ισωτόπων ως ατμοσφαιρικός ιχνηλάτης δεν απαντάται συχνά στη βιβλιογραφία. Η αιτία είναι η χαμηλή συγκέντρωση του  $^{22}\text{Na}$  στον ατμοσφαιρικό αέρα, η οποία είναι περί τις 4 τάξεις μεγέθους μικρότερη από εκείνη του  $^7\text{Be}$  (Tokuyama, et al., 1998), (Jasiulionis, et al., 2005). Ως εκ τούτου, για την ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  συνήθως δεν επαρκούν κλασικές διατάξεις γ-φασματοσκοπίας, αλλά απαιτούνται συστήματα υψηλής ευαισθησίας. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι οι (Konki, et al., 2012) και (Zhang, et al., 2014) χρησιμοποιούν τη μέθοδο των σύμπτωσης φωτονίων (γ-γ coincidence method) με σκοπό να ανιχνεύσουν τα δύο φωτόνια ενέργειας 511 keV που εκπέμπονται μετά την εξαΰλωση του σωματιδίου  $\beta^+$  που εκπέμπει το  $^{22}\text{Na}$ , καθώς και το φωτόνιο ενέργειας 1274.6 keV.

### 7.3 Ισότοπα γήινης προέλευσης

Για αρκετές δεκαετίες το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) και τα θυγατρικά του (κυρίως  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  και  $^{210}\text{Po}$ ) έχουν αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη ατμοσφαιρικών διεργασιών όπως: α) ο εντοπισμός της προέλευσης αέριων μαζών, β) η κατακόρυφη μετακίνηση αέριων μαζών, γ) οι χρόνοι παραμονής αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα και δ) οι ρυθμοί απόθεσης αερολυμάτων (Baskaran, 2011). Πάνω από το 99% του  $^{222}\text{Rn}$  που υπάρχει στην ατμόσφαιρα προέρχεται από τις ηπειρωτικές περιοχές. Όταν το  $^{222}\text{Rn}$  παραχθεί από το πατρικό του ισότοπο  $^{226}\text{Ra}$  στο έδαφος, όντας αέριο, διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα. Καθώς το  $^{222}\text{Rn}$  είναι ευγενές αέριο, δεν υπόκειται σε χημικές ή φυσικές διεργασίες, με αποτέλεσμα η βασική διεργασία απομάκρυνσης του ραδονίου από τον ατμοσφαιρικό αέρα να είναι η ραδιενεργός απομείωσή του (Baskaran, 2011), η οποία οδηγεί στην παραγωγή – εκτός των άλλων – και του μακρόβιου θυγατρικού του ισότοπου  $^{210}\text{Pb}$ . Ο  $^{210}\text{Pb}$  συχνά μελετάται σε συνδυασμό με τα κοσμικής προέλευσης ισότοπα  $^7\text{Be}$  και  $^{22}\text{Na}$ , καθώς έχουν την ίδια συμπεριφορά. Μόλις σχηματισθούν προσκολλούνται στα σωματίδια της ατμόσφαιρας και αποτελούν ιχνηλάτες των μη-ραδιενεργών αερολυμάτων (Lal, et al., 1979), (Bondietti, et al., 1988), (Sato, et al., 1994), (Tokieda, et al., 1996), (Todorovic, et al., 2000), (Daish, et al., 2005), (Duenas, et al., 2003), (Ioannidou, et al., 2005), (Likuku, 2006), (Heinrich, et al., 2007). Ο  $^{210}\text{Pb}$  που παράγεται στην ατμόσφαιρα από τη διάσπαση του  $^{222}\text{Rn}$  – ο οποίος συνήθως χαρακτηρίζεται ως «excess», «atmospheric» ή «unsupported»  $^{210}\text{Pb}$  – αποτίθεται στην επιφάνεια της Γης, όπως και τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης, μέσω των μηχανισμών ξηρής και υγρής απόθεσης, με τον ένα μηχανισμό να υπερισχύει του άλλου, ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες (Winkler, et al., 2000). Η συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}$  στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιείται ευρέως για μελέτες ατμοσφαιρικής απόθεσης και ανθρωπογενούς ρύπανσης (Shotyk, et al., 2002), (Kaste, et al., 2003), διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας ιζημάτων (Robbins, et al., 1975), (DeMaster, et al., 1991), (Roberts, et al., 1997) και χρονολόγησης ιζημάτων (Koide, et al., 1972), (Sanchez-Cabeza, et al., 1999), καθώς επίσης και ως ιχνηλάτης μεταφοράς μεγάλου εύρους χημικών συστατικών από ηπειρωτικές πηγές στους ωκεανούς (Turekian, et al., 1989).

Παρόλο που ο  $^{210}\text{Pb}$  αποτελεί έναν ιδανικό ιχνηλάτη για τις αέριες μάζες που προέρχονται από τις ηπειρωτικές περιοχές<sup>136</sup>, ο ρυθμός εκροής  $^{222}\text{Rn}$  στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει σημαντική χωρική και χρονική κύμανση, καθώς εξαρτάται από τη συγκέντρωση του πατρικού  $^{226}\text{Ra}$  στο χώμα, το πορώδες του εδάφους και τις μετεωρολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής (Joshi, et al., 1969), (Feichter, et al., 1991). Ακόμα, η συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}$  στο περιβάλλον εξαρτάται, αν και σε μικρό ποσοστό (< 1%), και από ανθρωπογενείς πηγές, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Duenas, et al., 2005).

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του  $^{210}\text{Pb}$  συχνά γίνεται μέσω του  $\beta^-$  ραδιενεργού θυγατρικού του ισότοπου  $^{210}\text{Bi}$ , με χρόνο ημιζωής 5.01 ημέρες, ή μέσω του  $\alpha$ -ραδιενεργού θυγατρικού του  $^{210}\text{Po}$ , με χρόνο ημιζωής 138.4 ημέρες (Cannizzaro, et al., 1999). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις απαιτείται ραδιοχημική επεξεργασία του δείγματος και μεγάλοι χρόνοι αναμονής, ώστε να εξασφαλισθεί η ισορροπία ανάμεσα στο πατρικό ισότοπο και το εκάστοτε θυγατρικό του (Nevissi, 1991), (Sheets, et al., 1992), (Boo-Rabee, et al., 1995). Μια άλλη μέθοδος, ταχύτερη και μη-καταστροφική, για τον ποσοτικό προσδιορισμό του  $^{210}\text{Pb}$  είναι η  $\gamma$ -φασματοσκοπία, μέσω των φωτονίων ενέργειας 46.52 keV που εκπέμπει. Η  $\gamma$ -φασματοσκοπία δεν απαιτεί μεν χημική επεξεργασία του δείγματος, ωστόσο, περιορίζεται από το χαμηλό ποσοστό εκπομπής (4.25%) των φωτονίων του  $^{210}\text{Pb}$  και την αυτοαπορρόφηση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας που εκπέμπει, στο προς ανάλυση δείγμα (Cutshall, et al., 1983), (Ishikawa, et al., 1994).

#### 7.4 Ανίχνευση ραδιενεργών ισωτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ

Η διαδικασία προσδιορισμού της συγκέντρωσης ραδιενεργών ισωτόπων κοσμικής ή γήινης προέλευσης στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ συνήθως συνίσταται σε δύο κύρια στάδια: τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αεροζόλ και την ανάλυσή του. Για τον προσδιορισμό των ισωτόπων  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , στα οποία επικεντρώνεται η παρούσα Δ.Δ., συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος της  $\gamma$ -φασματοσκοπίας. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να προσδιορισθεί η ειδική ραδιενέργεια των ισωτόπων αυτών,

<sup>136</sup> Δεδομένης της συγκριτικά αμελητέας εκπομπής  $^{222}\text{Rn}$  στους ωκεανούς και στις λίμνες (Turekian, et al., 1977), (Balkanski, et al., 1993).

η οποία μπορεί να οδηγήσει και στον αντίστοιχο υπολογισμό της συγκέντρωσής τους. Στη βιβλιογραφία, τόσο οι χρόνοι και η συχνότητα δειγματοληψίας, όσο και η διάρκεια της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης κυμαίνονται και δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο σχετικό πρωτόκολλο που να ακολουθείται. Ενδελεχής μελέτη σχετικά με το  $^7\text{Be}$  έχει πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο άλλων εργασιών του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., τόσο Διπλωματικών (Παπανδρέου, 2009), όσο και Διδακτορικών (Καρφόπουλος, 2012). Στον Πίνακα 7.3 παρατίθενται ενδεικτικές τιμές από τη βιβλιογραφία, για τη διάρκεια δειγματοληψίας και ανάλυσης, τον όγκο του συλλεγόμενου αέρα και στοιχεία για την αβεβαιότητα που συνοδεύουν τις μετρήσεις του  $^7\text{Be}$ , όπου αυτά είναι διαθέσιμα. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα, η διάρκεια δειγματοληψίας που συνήθως επιλέγεται είναι της τάξης των 1-7 d, ενώ τα αποτελέσματα τα οποία συνήθως δίδονται είναι η μέση εβδομαδιαία ή μέση μηνιαία ειδική ραδιενέργεια.

Εργασία/Χώρα	Διάρκεια δειγματοληψίας	Διάρκεια ανάλυσης	Παροχή αντλίας ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$^7\text{Be}$ ( $\text{mBq}/\text{m}^3$ )	Αβεβαιότητα $^7\text{Be}$ (1σ)
(Papastefanou, et al., 1995) Θεσσαλονίκη, Ελλάδα	7 d	--	1.7	3.2 – 9.5	(10 – 20)%
(Aldahan, et al., 2001) 7 πόλεις στη Σουηδία	(2-7) d	(2-7) d	(1000 – 5000)	1.6 – 5.5	<10%
(Yu, et al., 2002) Χονγκ Κονγκ, Κίνα	(23 – 72) h	(1 – 3) d	68	--	--
(Azahra, et al., 2003) Γρανάδα, Ισπανία	7 d	25 h	1.8	1.5 – 7.5	--
(Cannizzaro, et al., 2004) Παλέρμο, Ιταλία	14 h	22 h	900	0.3 – 15.3	--
(Papastefanou, et al., 2004) Θεσσαλονίκη, Ελλάδα	24 h	--	120	1.3 – 7.1	<8.5%
(Daish, et al., 2005) <sup>137</sup> Τσίλτον, Η.Β.	7 d	--	337.5	1.0 – 3.6	(1 – 56)%
(Ioannidou, et al., 2005) Θεσσαλονίκη, Ελλάδα	24 h	(22 – 55) h	(102 – 115)	2.8 – 7.3	~8%
(Kulan, 2006) 4 πόλεις στη Σουηδία	--	--	3000	0.6 – 9.0	< 1%

Πίνακας 7.3: Βιβλιογραφικά στοιχεία αναφορικά με την ανίχνευση  $^7\text{Be}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. έγινε αντίστοιχη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με την ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  στον αέρα. Στον Πίνακα 7.4 δίνονται ενδεικτικές τιμές που αφορούν σε μετρήσεις  $^{22}\text{Na}$  στον ατμοσφαιρικό αέρα, εύκολα διαπιστώνεται ότι η διάρκεια δειγματοληψίας και ο συνολικός όγκος αέρα αυξάνεται κατά πολύ, σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη για την ανίχνευση  $^7\text{Be}$ . Επιπλέον, στις περισσότερες

<sup>137</sup> Χημική επεξεργασία του δείγματος

εργασίες η αβεβαιότητα εκτίμησης της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{22}\text{Na}$  είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του  $^7\text{Be}$  (> 10%).

Τέλος, βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε για την ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  που ανιχνεύεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, έδωσε τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.5. Καθώς το εν λόγω ισότοπο προέρχεται από τη διάσπαση του  $^{226}\text{Ra}$  στο έδαφος, η ειδική του ραδιενέργεια στον αέρα εξαρτάται σημαντικά και από ειδική ραδιενέργεια του  $^{226}\text{Ra}$  στο έδαφος, και ως εκ τούτου στη βιβλιογραφία δίνονται τιμές που καλύπτουν μεγάλο εύρος.

Εργασία/Χώρα	Διάρκεια δειγματοληψίας	Διάρκεια ανάλυσης	Συνολικός όγκος αέρα ( $\text{m}^3$ )	$^{22}\text{Na}$ ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Αβεβαιότητα $^{22}\text{Na}$ (1σ)
(Bhandari, et al., 1963) <sup>138</sup> Βόρειος Ειρηνικός Ωκεανός	--	--	283– 28 300	0.6 – 270.8 <sup>139</sup>	~20%
(Roedel, 1965) <sup>138</sup> Χαϊδελβέργη, Γερμανία	--	--	10 000 – 30 000	2.3 – 19.8	~25%
(Grabowska, et al., 2003) Κρακοβία, Πολωνία	1 γ	2 – 7 d	30 000 – 80 000	0.10 – 0.37	6 – 50%
(Rulik, et al., 2009) Πράγα, Τσεχία	1 d	500 000 sec	~150 000	0.35 <sup>140</sup>	20%
(Leppanen, et al., 2012) 4 πόλεις στη Φινλανδία	7 d	2 – 70 h	23 000 – 190 000	0.05 – 1.63	5 – 20%
(Dlugosz-Lisiecka, et al., 2012) Λοτζ, Πολωνία	7 d	--	~50 000	0.18 – 0.93	--
(Steinmann, et al., 2013) 5 πόλεις στην Ελβετία	7 d	1 – 2 d	90 000 – 100 000	0.2 – 0.5	--
(Wershofen, 2013) <sup>141</sup> Μπράουνσβαϊγκ, Γερμανία	7 d	--	120 000 – 140 000	0.08 – 1.01	3.1 – 34%
(Blazej, et al., 2014) Κρακοβία, Πολωνία	7 d	7 d	100 000 – 150 000	0.1 – 0.75	20 – 50% <sup>142</sup>

Πίνακας 7.4: Βιβλιογραφικά στοιχεία αναφορικά με την ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

Εργασία	Διάρκεια δειγματοληψίας	Διάρκεια ανάλυσης	Συνολικός όγκος αέρα ( $\text{m}^3$ )	$^{210}\text{Pb}$ ( $\text{mBq}/\text{m}^3$ )	Αβεβαιότητα $^{210}\text{Pb}$ (1σ)
(Sato, et al., 1994) Τσουκούμπα, Ιαπωνία	--	2.8 h – 2.3 d	--	0.2 – 0.8	--
(Cannizzaro, et al., 1999) Παλέρμο, Ιταλία	14 h	80 000 sec	8 600	0.13 – 3.39	1.7 – 20%
(Todorovic, et al., 2000) Βελιγράδι, Σερβία	24 h	150 – 250 000 sec	480	0.3 – 3.2	< 25%
(McNeary, et al., 2003) <sup>143</sup> Ντιτρόιτ, Η.Π.Α.	1 – 3 d	24 h	1 525 – 6 636	0.30 – 4.22	--
(Ioannidou, et al., 2005) Θεσσαλονίκη, Ελλάδα	24 h	200 000 sec	~2 500	0.48 – 0.93	~10%

Πίνακας 7.5: Βιβλιογραφικά στοιχεία αναφορικά με την ανίχνευση  $^{210}\text{Pb}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

<sup>138</sup> Χημική επεξεργασία του δείγματος

<sup>139</sup> Πρόκειται για μετρήσεις μέχρι και 20 km πάνω από το επίπεδο της Γης (στρατόσφαιρα).

<sup>140</sup> Πρόκειται για ετήσια μέση τιμή.

<sup>141</sup> Τα φίλτρα μετατρέπονται σε στάχτη σε φούρνο και στη συνέχεια συμπιέζονται σε pellets.

<sup>142</sup> Οι τιμές αποτελούν εκτίμηση της αβεβαιότητας από αντίστοιχο διάγραμμα της δημοσίευσης.

<sup>143</sup> Χημική επεξεργασία του δείγματος



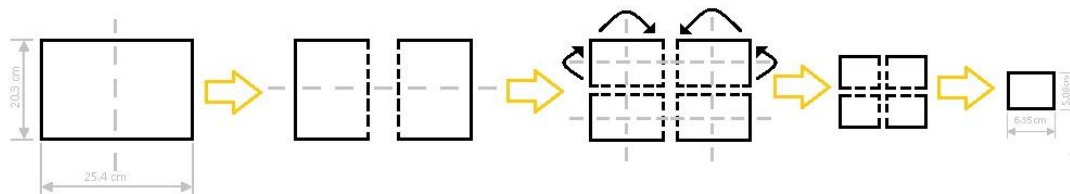
### 7.4.1 Μετρήσεις ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. πραγματοποιούνται μετρήσεις με σκοπό τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του ατμοσφαιρικού αεροζόλ για περισσότερα από 30 χρόνια. Αρχικά, οι μετρήσεις αυτές εστίαζαν στον προσδιορισμό των βραχύβιων θυγατρικών ισοτόπων του Ραδονίου,  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$ , ενώ αργότερα επεκτάθηκαν και στην ανίχνευση του  $^7\text{Be}$ . Σήμερα, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κυρίως η αντλία υψηλής παροχής DH-50810E και φίλτρα FP810M διαστάσεων 8 x 10" (Εικόνα 6.6). Η ανάπτυξη πρωτοκόλλου για τη δειγματοληψία και ανάλυση ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., με στόχο την ανίχνευση και τον προσδιορισμό του  $^7\text{Be}$  αποτέλεσε αντικείμενο παλαιότερων εργασιών (Παπανδρέου, 2009), (Σάββα, 2009), (Καρφόπουλος, 2012). Το πρωτόκολλο αυτό αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Το φίλτρο τοποθετείται στον δειγματολήπτη και ακολουθεί η δειγματοληψία του ατμοσφαιρικού αεροζόλ για προεπιλεγμένο χρόνο – συνήθως 5-10 ημέρες αν ενδιαφέρει η ανίχνευση και του  $^{22}\text{Na}$ .
- Μετά το πέρας της δειγματοληψίας, το φίλτρο απομακρύνεται από την αντλία, διπλώνεται στα μέσα των πλευρών του (γεωμετρία «12») και αναλύεται με στόχο τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας των βραχύβιων θυγατρικών του  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$ . Η διάρκεια της ανάλυσης είναι 2 h, διάστημα κατά το οποίο πρακτικά ολοκληρώνεται η ραδιενεργός διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών ισοτόπων του  $^{222}\text{Rn}^{144}$ . Επισημαίνεται ότι μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression δεν είναι δυνατή η ανάλυση φίλτρων αυτής της γεωμετρίας στον ανιχνευτή XtRa.
- Μετά το πέρας της ανάλυσης, το φίλτρο απομακρύνεται από τον ανιχνευτή, διπλώνεται στη μέσα των μέσων των πλευρών του, ώστε η τελική ακμή να είναι ίση με το  $\frac{1}{4}$  της αρχικής διάστασης (γεωμετρία «10»), και αναλύεται στο ανιχνευτικό σύστημα XtRa - CSS. Στην Εικόνα 7.2 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο διπλώνεται το φίλτρο με σκοπό το σχηματισμό της γεωμετρίας «10», ενώ στην Εικόνα 7.3 δίνεται το σχετικό μέγεθος των δύο χρησιμοποιούμενων γεωμετριών φίλτρου.

<sup>144</sup> Η γεωμετρία «12» επιλέγεται καθώς ο σχηματισμός της είναι πολύ ευκολότερος και ταχύτερος από την τελική γεωμετρία ανάλυσης του φίλτρου (γεωμετρία «10»).

- Η διάρκεια ανάλυσης του φίλτρου εξαρτάται από τη διάρκεια δειγματοληψίας και το ισότοπο του οποίου ενδιαφέρει ο προσδιορισμός και είναι της τάξης των 10 h για το  $^7\text{Be}$  και των 7 ημερών για το  $^{22}\text{Na}$ . Για τον προσδιορισμό του  $^7\text{Be}$  χρησιμοποιείται το suppressed φάσμα, ενώ για τον προσδιορισμό του  $^{22}\text{Na}$  το unsuppressed.



Εικόνα 7.2: Δίπλωση φίλτρου FP810M 8 x 10" για το σχηματισμό της γεωμετρίας «10».



Εικόνα 7.3: Φίλτρο FP810M σε γεωμετρία «12» (αριστερά) και γεωμετρία «10» (δεξιά)

Εφαρμόζοντας το παραπάνω πρωτόκολλο, πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. πλήθος δειγματοληψιών ατμοσφαιρικού αεροζόλ, τα λεπτομερή στοιχεία των οποίων δίνονται στο Παράρτημα Ζ. Στην Εικόνα 7.4 παρουσιάζεται ένα φίλτρο FP810M διαστάσεων 8 x 10" μετά από μία τυπική δειγματοληψία 5 ημερών.

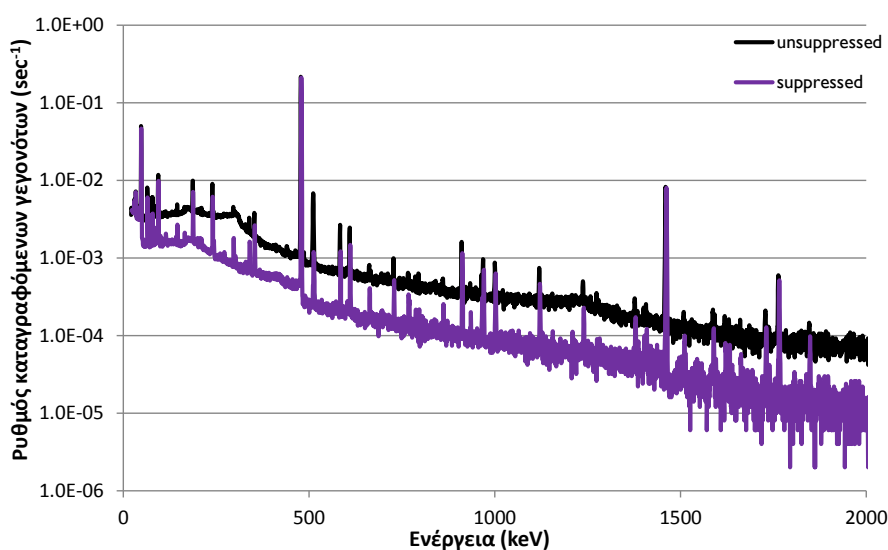


Εικόνα 7.4: Φίλτρο FP810M 8 x 10" μετά από δειγματοληψία 5 ημερών (120 h).

Τα φίλτρα που προέκυψαν από τις παραπάνω δειγματοληψίες αναλύθηκαν<sup>145</sup> με σκοπό την ανίχνευση μόνο των κοσμικών ισotόπων  $^7\text{Be}$  και  $^{22}\text{Na}$ , ενώ δεν

<sup>145</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.6, φάσματα 431 – 490.

πραγματοποιήθηκαν οι δίωρες αρχικές αναλύσεις σε γεωμετρία «12» για τον προσδιορισμό των βραχύβιων θυγατρικών του  $^{222}\text{Rn}$ . Πάντως, σε κάθε περίπτωση η ανάλυση των φίλτρων άρχιζε πάντα μετά από καθυστέρηση τουλάχιστον 2 h από τη λήξη της δειγματοληψίας, ώστε να απομειωθούν τα βραχύβια θυγατρικά του  $^{222}\text{Rn}$ . Η διάρκεια της ανάλυσης ήταν τουλάχιστον 500 000 sec, λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης του  $^{22}\text{Na}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ. Τυπικό φάσμα διάρκειας 500 000 sec παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.5. Κατά την ανάλυση των δειγμάτων αεροζόλ που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ., επιπλέον των  $^7\text{Be}$  και  $^{22}\text{Na}$ , διερευνήθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης και των ισοτόπων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{40}\text{K}$ . Ειδικά για το γήινης προέλευσης  $^{40}\text{K}$  πρέπει να αναφερθεί ότι απαντάται στη βιβλιογραφία σε μελέτες επαναιώρησης σωματιδίων, σε επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την Αφρικανική ήπειρο, καθώς και σε μελέτες που αφορούν σε δάση (Hernandez, et al., 2005), (Karadeniz, et al., 2007) (Karlsson, et al., 2008). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αιχμή Compton εξαιτίας των φωτονίων ενέργειας 1460.75 keV του  $^{40}\text{K}$ , κείται στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης του φωτονίου ενέργειας 1274.6 keV του  $^{22}\text{Na}$ .



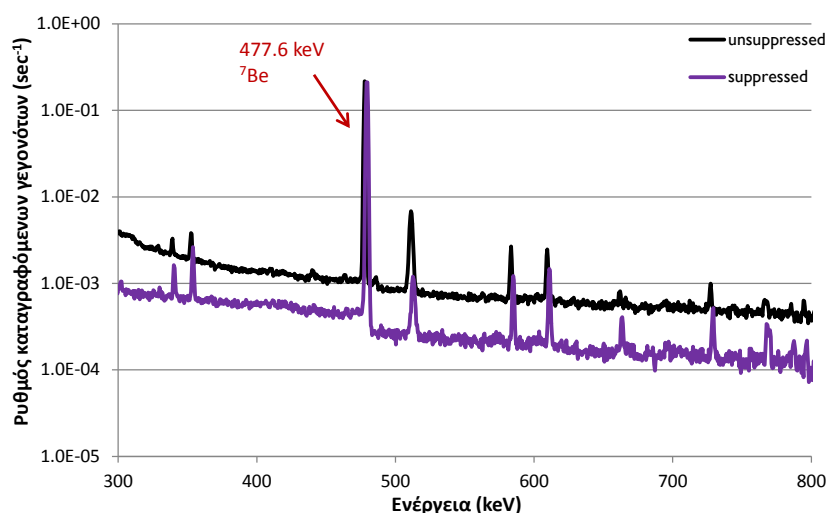
Εικόνα 7.5: Τυπικό φάσμα φίλτρου ατμοσφαιρικού αεροζόλ.

Σημειώνεται ότι, τόσο για τον ποσοτικό προσδιορισμό, όσο και για τον προσδιορισμό του κατωτέρου επιπέδου ανίχνευσης των ισοτόπων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{40}\text{K}$  θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το διακριτό υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης. Για το λόγο αυτό λήφθηκαν φάσματα υποστρώματος με ένα καθαρό

φίλτρο γεωμετρίας «10»<sup>146</sup> και χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα αυτής της ανάλυσης ως υπόστρωμα. Η βαθμονόμηση απόδοσης για τη γεωμετρία «10» πραγματοποιήθηκε με μεθόδους προσομοίωσης Monte Carlo, με χρήση του γεωμετρικού μοντέλου που προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 (Παράρτημα ΣΤ).

#### 7.4.1.1 Ειδική ραδιενέργεια του <sup>7</sup>Be στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ

Σε όλα τα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που λήφθηκαν, ανιχνεύθηκε <sup>7</sup>Be. Τυπικό φάσμα όπου φαίνεται η φωτοκορυφή του <sup>7</sup>Be δίνεται στην Εικόνα 7.6. Εν γένει, η φωτοκορυφή του <sup>7</sup>Be ανιχνεύεται και στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed), αν και με καλύτερη στατιστική στο suppressed φάσμα. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε όρους ειδικής ραδιενέργειας (Πίνακας 7.6) δίνονται με βάση το suppressed φάσμα.



Εικόνα 7.6: Φωτοκορυφή <sup>7</sup>Be σε τυπικό φάσμα ατμοσφαιρικού αεροζόλ.

Η ειδική ραδιενέργεια του <sup>7</sup>Be κυμαίνεται από 2.5 mBq/m<sup>3</sup> ± 3.5% (1σ) το Φεβρουάριο του 2013, έως 9.2 mBq/m<sup>3</sup> ± 3.8% (1σ) τον Απρίλιο του 2016. Παρατηρείται ότι οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας κατά την ψυχρή περίοδο του έτους (Οκτώβριος – Μάρτιος) είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες της θερμής περιόδου (Απρίλιος – Σεπτέμβριος).

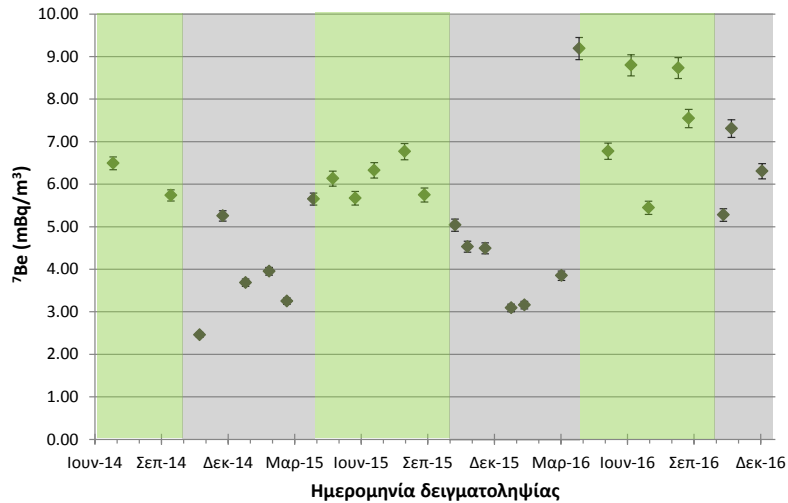
<sup>146</sup> Το φίλτρο υποστρώματος έχει κωδική ονομασία A0491

Φίλτρο	Ημερομηνία	<sup>7</sup> Be [mBq/m <sup>3</sup> ]
A0486	Φεβ-2013	2.5 ± 3.5%
A0487	Φεβ-2013	3.8 ± 3.5%
A0488	Ιουλ-2014	6.5 ± 3.4%
A0489	Οκτ-2014	5.7 ± 3.4%
A0490	Νοε-2014	2.5 ± 3.4%
A0492	Δεκ-2014	5.3 ± 3.4%
A0493	Ιαν-2015	3.7 ± 3.4%
A0494	Φεβ-2015	3.9 ± 3.4%
A0495	Μαρ-2015	3.1 ± 3.5%
A0496	Απρ-2015	5.8 ± 3.4%
A0499	Μαΐ-2015	6.0 ± 3.4%
A0500	Ιουν-2015	5.7 ± 3.8%
A0501	Ιουλ-2015	6.3 ± 3.8%
A0502	Αυγ-2015	6.8 ± 3.8%
A0503	Σεπ-2015	5.8 ± 3.8%
A0504	Οκτ-2015	5.0 ± 3.8%
A0505	Νοε-2015	4.5 ± 3.8%
A0506	Δεκ-2015	4.5 ± 3.8%
A0507	Ιαν-2016	3.1 ± 3.8%
A0508	Φεβ-2016	3.2 ± 3.8%
A0509	Μαρ-2016	3.9 ± 3.8%
A0510	Απρ-2016	9.2 ± 3.8%
A0511	Μαΐ-2016	6.8 ± 3.8%
A0512	Ιουν-2016	8.8 ± 3.8%
A0513	Ιουλ-2016	5.5 ± 3.8%
A0514	Αυγ-2016	8.7 ± 3.8%
A0515	Σεπ-2016	7.6 ± 3.8%
A0516	Οκτ-2016	5.3 ± 3.8%
A0517	Νοε-2016	7.3 ± 3.8%
A0518	Δεκ-2016	6.3 ± 3.8%

Πίνακας 7.6: Ειδική ραδιενέργεια του <sup>7</sup>Be στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ<sup>147</sup>.

Στην Εικόνα 7.7 παρατίθενται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του <sup>7</sup>Be σε μορφή διαγράμματος, όπου έχει γίνει διαχωρισμός των δύο περιόδων (γκρι και πράσινο χρώμα, αντίστοιχα). Η μέση τιμή της ειδικής ραδιενέργειας κατά τη ψυχρή περίοδο εκτιμάται σε 4.5 mBq/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη θερμή περίοδο εκτιμάται σε 6.9 mBq/m<sup>3</sup>. Η εικόνα αυτή βρίσκεται σε συμφωνία τόσο με προηγούμενες μελέτες της κύμανσης της ειδικής ραδιενέργειας του <sup>7</sup>Be στον ατμοσφαιρικό αέρα που έχουν πραγματοποιηθεί στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Καρφόπουλος, 2012), όσο και με εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας, όπου αναφέρονται τιμές που κυμαίνονται από 0.32 έως 15.3 mBq/m<sup>3</sup> (Feely, et al., 1989), (Azahra, et al., 2003), (Duenas, et al., 2003), (Cannizzaro, et al., 2004), (Meresova, 2008).

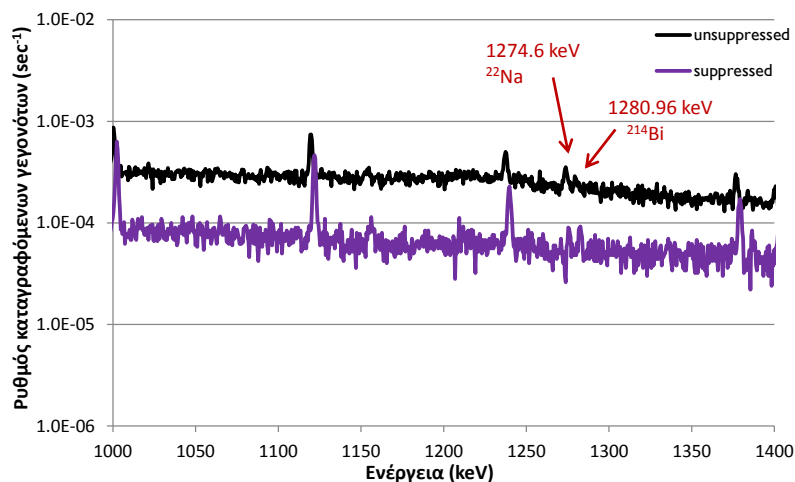
<sup>147</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα της φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα της παροχής (2.5%).



Εικόνα 7.7: Ειδική ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ  
(γκρι: ψυχρή περίοδος, πράσινο: θερμή περίοδος).

#### 7.4.1.2 Ειδική ραδιενέργεια του $^{22}\text{Na}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ

Όσον αφορά το  $^{22}\text{Na}$ , υπενθυμίζεται ότι είναι  $\beta^+$  ραδιενεργό ισότοπο, επομένως η πιθανότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης του φωτονίου του ενέργειας 1274.6 keV με κάποιο από τα φωτόνια εξαΰλωσης είναι υψηλή. Ως εκ τούτου, για την ανίχνευσή του επιλέγεται το unsuppressed φάσμα. Η ανίχνευση της φωτοκορυφής του  $^{22}\text{Na}$  ενέχει δυσκολίες για δύο λόγους: α) η συγκέντρωση του ισότοπου στο περιβάλλον είναι εξαιρετικά χαμηλή, γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό πολύ μικρής φωτοκορυφής και β) ακριβώς δίπλα στη φωτοκορυφή σχηματίζεται μία εξίσου μικρή φωτοκορυφή του  $^{214}\text{Bi}$  στην ενέργεια 1280.96 keV (Εικόνα 7.8), που θα μπορούσε να δυσκολέψει την ανάλυση της φωτοκορυφής του  $^{22}\text{Na}$ .



Εικόνα 7.8: Φωτοκορυφή  $^{22}\text{Na}$  σε τυπικό φάσμα ατμοσφαιρικού αεροζόλ.

Για την ανάλυση της φωτοκορυφής του  $^{22}\text{Na}$  στα φάσματα που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκε τόσο ο κώδικας SPUNAL όσο και το πρόγραμμα ANGES. Στον Πίνακα 7.7 δίνεται για κάθε φίλτρο που λήφθηκε η ημερομηνία έναρξης της δειγματοληψίας, η διάρκεια δειγματοληψίας, η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  (σε  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ) και η ανιχνευόμενη ειδική ραδιενέργεια του ισοτόπου, όπως εκτιμήθηκε από τα δύο πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν. Η διάρκεια λήψης όλων των φασμάτων ήταν 500 000 sec. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα δεν είναι κατάλληλα στρογγυλοποιημένα, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε άλλους υπολογισμούς και στατιστικά τεστ.

Δεδομένου ότι η φωτοκορυφή του  $^{22}\text{Na}$  είναι στα όρια ανίχνευσης, σε ορισμένες περιπτώσεις φίλτρων ήταν αναγκαία η μείωση της τιμής της μεταβλητής sigma units σε 0.7 στον κώδικα SPUNAL, ή η επέμβαση του χρήστη κατά την ανάλυση των φωτοκορυφών στο πρόγραμμα ANGES (forced analysis). Βέβαια, σημειώνεται ότι η διαδικασία αυτή ενδεχομένως οδηγεί στην ανίχνευση ψευδο-φωτοκορυφών, δηλαδή απλά της κύμανσης του υποστρώματος. Ειδικά για το πρόγραμμα ANGES, η επέμβαση του χρήστη στην ανάλυση πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν είναι πάντα αξιόπιστα, όπως έχει μελετηθεί εκτενώς στη Δ.Δ. (Καρφόπουλος, 2012). Οι περιπτώσεις όπου για να καταστεί δυνατή η ανάλυση της φωτοκορυφής του  $^{22}\text{Na}$ , χρειάστηκε να μειωθεί η τιμή της μεταβλητής sigma units στον κώδικα SPUNAL ή/και επέμβαση στην ανάλυση του προγράμματος ANGES σημειώνονται στον Πίνακα 7.7 με αντίστοιχη υποσημείωση.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των φίλτρων ατμοσφαιρικού αεροζόλ με τον κώδικα SPUNAL προκύπτει ότι, με το συνδυασμό διάρκειας δειγματοληψίας και διάρκειας ανάλυσης που μελετήθηκε, δεν καθίσταται δυνατή η ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$  στον αέρα κατά ψυχρή περίοδο. Ωστόσο, τους μήνες Μάιος, Ιούνιος και Ιούλιος του 2015 παρατηρείται συστηματική ανίχνευσή του, αν και με υψηλές αβεβαιότητες. Η ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  κυμαίνεται από  $1.03 \mu\text{Bq}/\text{m}^3 \pm 53.4\% (1\sigma)$ , τον Μάιο του 2015, έως  $1.82 \mu\text{Bq}/\text{m}^3 \pm 71.1\% (1\sigma)$ , τον Ιούνιο του 2015. Με μείωση της ευαισθησίας του κώδικα κατέστη δυνατή η ανίχνευση του ισοτόπου σε περισσότερα φίλτρα, αν και με αβεβαιότητες της τάξης του 90% ( $1\sigma$ ).

Με το πρόγραμμα ANGES η φωτοκορυφή του  $^{22}\text{Na}$  ανιχνεύθηκε στα περισσότερα φίλτρα, αν και στα μισά φίλτρα η ανίχνευση κατέστη δυνατή μόνο

μετά από επέμβαση του χρήστη (forced analysis). Η ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  κυμαίνεται από  $0.20 \mu\text{Bq}/\text{m}^3 \pm 50.3\%$  (1 $\sigma$ ) τον Ιανουάριο του 2015, έως  $2.25 \mu\text{Bq}/\text{m}^3 \pm 10.7\%$  (1 $\sigma$ ) τον Απρίλιο του 2016. Γενικά, όταν η φωτοκορυφή του  $^{22}\text{Na}$  ανιχνεύεται και με τον κώδικα SPUNAL και με το πρόγραμμα ANGES, οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Ιδιαίτερα πρέπει να σχολιασθεί ότι, στις περιπτώσεις που η φωτοκορυφή ανιχνεύεται μόνο από το πρόγραμμα ANGES, παρατηρείται ότι οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του ισότοπου είναι εν γένει χαμηλότερες από την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια, γεγονός που καθιστά τις τιμές αυτές αμφισβητήσιμες.

Φίλτρο	Ημερομηνία	Διάρκεια δειγματοληψίας (h)	M.D.A. [ $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{22}\text{Na}$ [ $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ] SPUNAL <sup>148</sup>	$^{22}\text{Na}$ [ $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ] ANGES <sup>148</sup>
A0486	19/02/2013	67.6	1.37	< M.D.A.	< M.D.A.
A0487	22/02/2013	72.0	1.26	< M.D.A.	< M.D.A.
A0488	24/07/2014	96.4	1.68	$2.72^{149} \pm 93.3\%$	$1.50 \pm 18.8\%$
A0489	10/10/2014	161.0	0.80	< M.D.A.	$0.42^{150} \pm 57.0\%$
A0490	18/11/2014	168.0	0.77	< M.D.A.	< M.D.A.
A0492	19/12/2014	168.0	0.79	< M.D.A.	$0.52^{150} \pm 48.6\%$
A0493	19/01/2015	168.0	0.92	< M.D.A.	$0.20^{150} \pm 50.3\%$
A0494	20/02/2015	168.0	0.77	< M.D.A.	< M.D.A.
A0495	16/03/2015	120.0	0.99	< M.D.A.	< M.D.A.
A0496	21/04/2015	220.2	0.61	< M.D.A.	$0.41^{150} \pm 52.4\%$
A0499	17/05/2015	240.0	0.54	$1.03 \pm 53.6\%$	$0.97 \pm 20.5\%$
A0500	16/06/2015	240.0	0.55	$1.82 \pm 71.2\%$	$1.02 \pm 17.1\%$
A0501	12/07/2015	240.0	0.75	$1.36 \pm 41.3\%$	$1.03 \pm 19.5\%$
A0502	12/08/2015	192.6	0.68	< M.D.A.	$0.65^{150} \pm 30.7\%$
A0503	18/09/2015	240.0	0.54	< M.D.A.	< M.D.A.
A0504	29/10/2015	120.0	1.04	< M.D.A.	< M.D.A.
A0505	15/11/2015	120.0	1.07	< M.D.A.	< M.D.A.
A0506	09/12/2015	120.0	0.76	< M.D.A.	< M.D.A.
A0507	13/01/2016	168.0	0.68	< M.D.A.	< M.D.A.
A0508	31/01/2016	168.0	0.58	< M.D.A.	< M.D.A.
A0509	21/03/2016	168.0	0.90	< M.D.A.	$0.65^{150} \pm 38.3\%$
A0510	14/04/2016	166.8	0.94	$2.42^{149} \pm 91.2\%$	$2.25 \pm 10.7\%$
A0511	23/05/2016	167.0	0.87	< M.D.A.	$0.78 \pm 27.1\%$
A0512	23/06/2016	168.0	0.92	< M.D.A.	$1.08 \pm 21.4\%$
A0513	17/07/2016	168.0	0.88	< M.D.A.	$0.59^{150} \pm 38.5\%$
A0514	26/08/2016	168.0	0.88	$2.22^{149} \pm 93.8\%$	$1.28 \pm 21.3\%$
A0515	09/09/2016	168.0	0.88	< M.D.A.	$0.72^{150} \pm 51.2\%$
A0516	26/10/2016	168.0	0.84	< M.D.A.	$0.49^{150} \pm 38.7\%$
A0517	06/11/2016	168.0	0.85	< M.D.A.	$0.99 \pm 25.8\%$
A0518	18/12/2016	168.0	0.80	< M.D.A.	< M.D.A.

Πίνακας 7.7: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

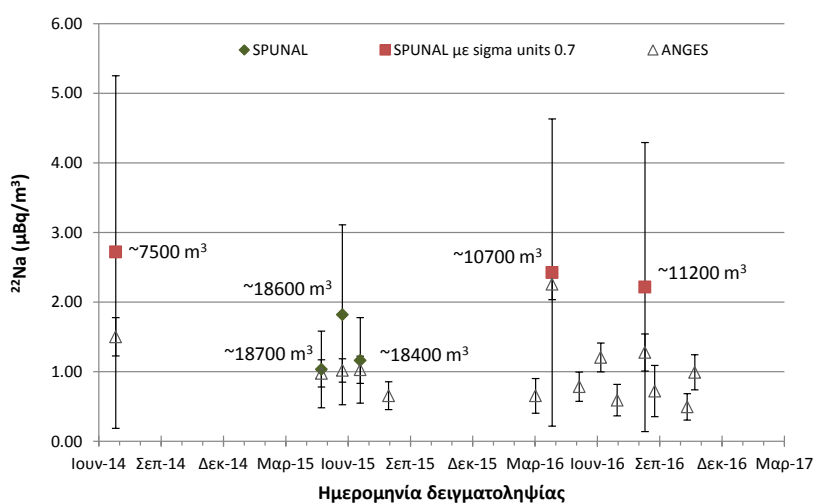
<sup>148</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει: τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%), παροχής (2.5%) και διόρθωσης για το φαινόμενο true coincidence (2%).

<sup>149</sup> Αποτέλεσμα μετά από μείωση της τιμής της μεταβλητής sigma units σε 0.7.

<sup>150</sup> Αποτέλεσμα μετά από επέμβαση του χρήστη στην ανάλυση του προγράμματος (forced analysis).



Τα αποτελέσματα υπό μορφή διαγράμματος δίνονται στην Εικόνα 7.9, μαζί με τον όγκο του αέρα κάθε δειγματοληψίας. Από το διάγραμμα, προκύπτει εύκολα ότι στα φίλτρα όπου ο όγκος δειγματοληψίας ήταν επαρκώς μεγάλος ( $\sim 19\,000\text{ m}^3$ ), ανιχνεύτηκε  $^{22}\text{Na}$  χωρίς τροποποίηση της τιμής της μεταβλητής sigma units, αν και με υψηλή αβεβαιότητα ( $> 50\%$ ,  $1\sigma$ ). Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι ένας από τους λόγους που δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  στα υπόλοιπα φίλτρα είναι ο σχετικά μικρός όγκος δειγματοληψίας. Άλλωστε, στη βιβλιογραφία (Πίνακας 7.4) οι όγκοι δειγματοληψίας αέρα με σκοπό την ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$  είναι μεγαλύτεροι από  $\sim 30\,000\text{ m}^3$ , συχνά μάλιστα μεγαλύτεροι από  $\sim 100\,000\text{ m}^3$ .



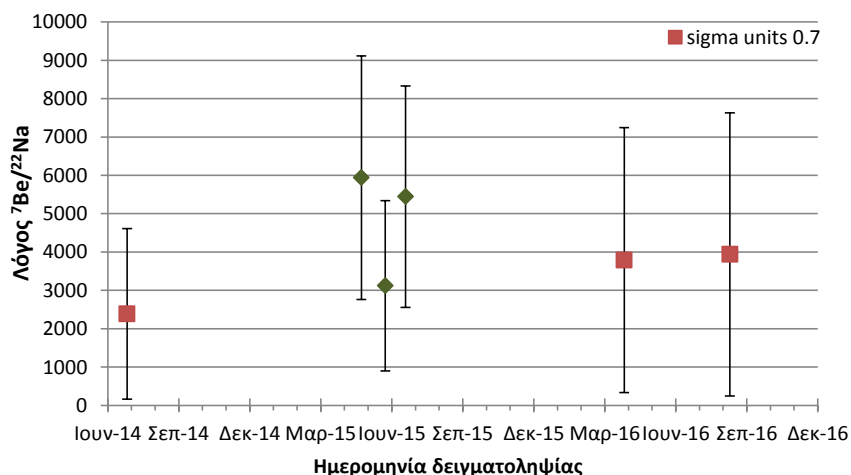
Εικόνα 7.9: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

Άμεση σύγκριση των τιμών της συγκέντρωσης του  $^{22}\text{Na}$  με τιμές της βιβλιογραφίας δεν μπορεί να γίνει, καθώς η ανίχνευση του ισοτόπου γενικά δεν είναι εύκολη και δεν διατίθενται πολλά δεδομένα στη βιβλιογραφία, ειδικά σε παρόμοιο γεωγραφικό πλάτος. Ωστόσο, σε μελέτες για άλλα γεωγραφικά πλάτη αναφέρονται σε ειδικές ραδιενέργειες που κυμαίνονται από  $0.08$  έως  $1.63\text{ μBq/m}^3$  (Leppanen, et al., 2012), (Steinmann, et al., 2013), (Wershofen, 2013).

Για τα φίλτρα όπου ανιχνεύθηκε  $^{22}\text{Na}$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός του λόγου των ειδικών ραδιενεργειών των δύο ισοτόπων κοσμικής προέλευσης  $^7\text{Be}/^{22}\text{Na}$ . Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις με τον κώδικα SPUNAL. Οι τιμές του λόγου δίνονται στον Πίνακα 7.8, ενώ παρουσιάζονται με τη μορφή διαγράμματος στην Εικόνα 7.10. Οι περιπτώσεις όπου ήταν απαραίτητη η τροποποίηση της τιμής της μεταβλητής sigma units από τον χρήστη για την ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  σημειώνονται με διαφορετικό χρώμα (κόκκινο).

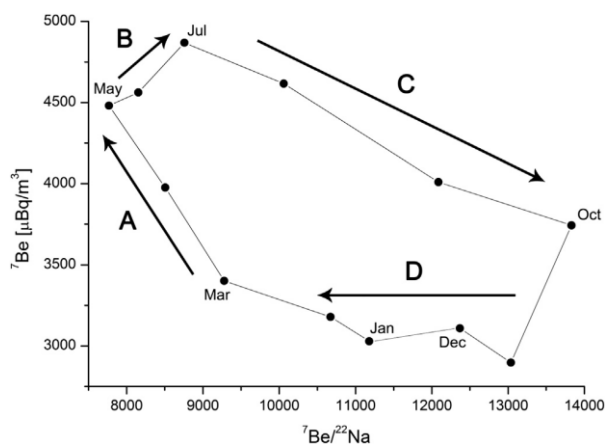
Φίλτρο	Ημερομηνία	${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$
A0488	Ιουλ-2014	2388 ± 93%
A0499	Μαϊ-2015	5939 ± 54%
A0500	Ιουν-2015	3120 ± 71%
A0501	Ιουλ-2015	5445 ± 53%
A0510	Απρ-2016	3790 ± 91%
A0513	Ιουλ-2016	3939 ± 94%

Πίνακας 7.8: Λόγος ειδικών ραδιενεργειών  ${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$  στον αέρα.



Εικόνα 7.10: Λόγος ειδικών ραδιενεργειών  ${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$  στον αέρα.

Ο λόγος των ειδικών ραδιενεργειών των δύο ισοτόπων  ${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$ , σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Εικόνα 7.11) ακολουθεί ετήσια κύμανση, με υψηλές τιμές κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου/χειμώνα και χαμηλές τιμές κατά τη διάρκεια της περιόδου άνοιξης/καλοκαιριού (Steinmann, et al., 2013), (Blazej, et al., 2014). Ωστόσο, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 7.10, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης δεν κατέστη δυνατή η παρατήρηση της ετήσιας κύμανσης, κυρίως λόγω του σχετικά μικρού πλήθους αποτελεσμάτων για το  ${}^{22}\text{Na}$ , αλλά και λόγω των υψηλών αβεβαιοτήτων, στις περιπτώσεις που αυτό ανιχνεύθηκε.



Εικόνα 7.11: Ειδική ραδιενέργεια του  ${}^7\text{Be}$  και λόγος  ${}^7\text{Be}/{}^{22}\text{Na}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ την περίοδο 2000 – 2011 (Steinmann, et al., 2013).

#### 7.4.1.2.1 Ειδική ραδιενέργεια του $^{22}\text{Na}$ για τρίμηνες περιόδους

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των φίλτρων για το  $^{22}\text{Na}$ , ο σχετικά μικρός όγκος δειγματοληψίας είναι από τους σημαντικούς παράγοντες για τη μη-ανίχνευση του ισοτόπου. Ως εκ τούτου, αποφασίσθηκε τα φίλτρα να συνδυασθούν ανά τρία και να αναλυθούν ως ένα δείγμα, με σκοπό μία εκτίμηση της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{22}\text{Na}$  για μία τρίμηνη περίοδο. Στην Εικόνα 7.12 παρουσιάζεται η σύνθεση των φίλτρων, ενώ στον Πίνακα 7.9 δίνονται τα στοιχεία των φίλτρων που συνδυάστηκαν και ο συνολικός όγκος αέρα στον οποίο αντιστοιχούν.



Εικόνα 7.12: Συσκευασία τρίμηνων φίλτρων

Εξυπακούεται ότι αυτού του είδους η ανάλυση προϋποθέτει μία σειρά από παραδοχές, όπως:

- Το δείγμα το οποίο προκύπτει από τη σύνθεση των τριών φίλτρων είναι ομοιογενές και το  $^{22}\text{Na}$  είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε αυτό. Αυτό μπορεί να ισχύει μόνο εφόσον η διάρκεια δειγματοληψίας για τα τρία φίλτρα είναι η ίδια και τα επίπεδα της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{22}\text{Na}$  είναι τα ίδια και κατά τις τρεις επιμέρους δειγματοληψίες.
- Η απομείωση του  $^{22}\text{Na}$  λόγω ραδιενεργού διάσπασης είναι παρόμοια για τα τρία φίλτρα.

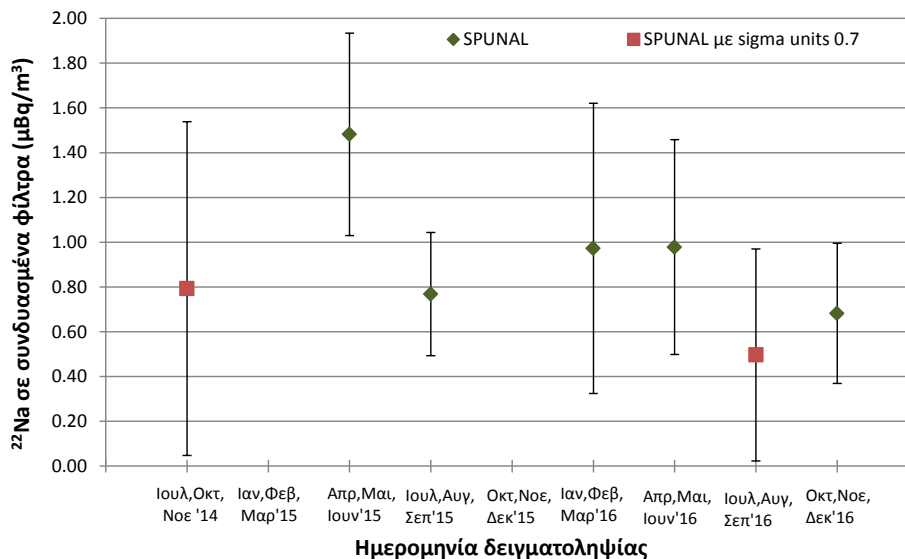
Τα φίλτρα αναλύθηκαν για 500 000 sec στην ανιχνευτή διάταξη XtRa - CSS<sup>151</sup> και τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε όρους ειδικής ραδιενέργειας  $^{22}\text{Na}$  δίνονται στον Πίνακα 7.9. Η βαθμονόμηση απόδοσης της γεωμετρίας των τριών φίλτρων πραγματοποιήθηκε με μεθόδους προσομοίωσης Monte Carlo, με το γεωμετρικό

<sup>151</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος, Α.6, φάσματα 491 – 509.

μοντέλο που προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 και παρουσιάζεται στο Παράρτημα ΣΤ<sup>152</sup>. Προφανώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι περιορισμένη.

Κωδική ονομασία <sup>153</sup>	Ημερομηνίες δειγματοληψίας	Συνολικός όγκος (m <sup>3</sup> )	<sup>22</sup> Na [μBq/m <sup>3</sup> ] SPUNAL	<sup>22</sup> Na [μBq/m <sup>3</sup> ] ANGES
A0488-490	Ιουλ,Οκτ,Νοε-2014	33547.10	0.79 <sup>154</sup> ± 94.0%	0.38 <sup>155</sup> ± 22.1%
A0493-495	Ιαν,Φεβ,Μαρ-2015	36159.50	< 0.5	0.25 <sup>155</sup> ± 30.3%
A0496-500	Απρ,Μαι,Ιουν-2015	35180.60	1.48 ± 30.5%	1.32 ± 9.9%
A0501-503	Ιουλ,Αυγ,Σεπ-2015	51965.50	0.77 ± 35.8%	0.80 ± 14.7%
A0504-506	Οκτ,Νοε,Δεκ-2015	32243.10	< 0.5	0.27 ± 31.5%
A0507-509	Ιαν,Φεβ,Μαρ-2016	35292.00	0.66 ± 66.6%	< 0.5
A0510-512	Απρ,Μαι,Ιουν-2016	32768.00	0.98 ± 49.1%	1.08 ± 11.8%
A0513-515	Ιουλ,Αυγ,Σεπ-2016	33377.00	0.74 <sup>154</sup> ± 95.4%	0.68 ± 19.8%
A0516-518	Οκτ,Νοε,Δεκ-2016	35431.00	0.68 ± 45.9%	0.56 ± 17.7%

Πίνακας 7.9: Ειδική ραδιενέργεια του <sup>22</sup>Na στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ για τρίμηνες περιόδους.



Εικόνα 7.13: Ειδική ραδιενέργεια του <sup>22</sup>Na στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ για τρίμηνες περιόδους

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των τρίμηνων φίλτρων προκύπτει ότι η φωτοκορυφή του <sup>22</sup>Na ανιχνεύεται μόνον όταν προηγουμένως έχει ανιχνευθεί σε κάποιο – ή κάποια – από τα επιμέρους φίλτρα. Μόνο σε μία περίπτωση, αυτή των φίλτρων A0507-509 στα οποία δεν είχε ανιχνευθεί <sup>22</sup>Na στα μεμονωμένα φίλτρα, στο αντίστοιχο τριμηνιαίο φίλτρο ανιχνεύθηκε και μάλιστα χωρίς επέμβαση στον κώδικα κατά την ανάλυση. Συμπερασματικά, η σύνθεση των φίλτρων σε τρίμηνα δείγματα δεν φαίνεται να βελτιώνει ιδιαίτερα τις δυνατότητες ανίχνευσης <sup>22</sup>Na.

<sup>152</sup> Σημειώνεται ότι η βαθμονόμηση αυτή δεν έχει καταχωρηθεί στον κώδικα SPUNAL.

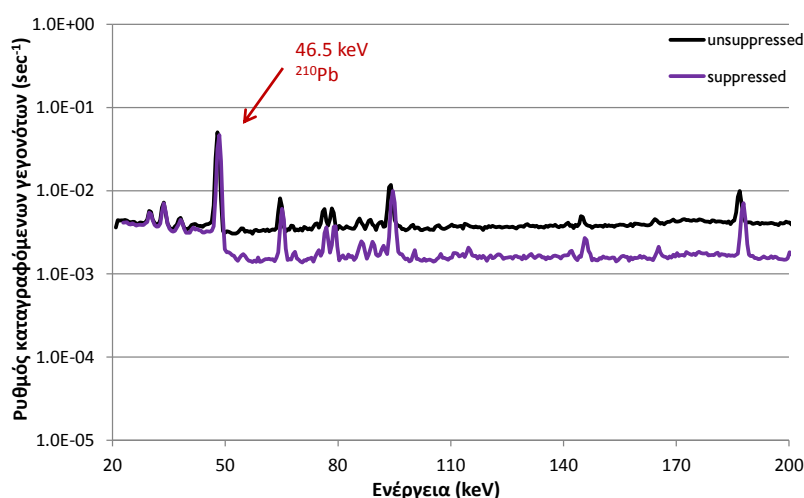
<sup>153</sup> Στην κωδική ονομασία δίνεται το πρώτο και το τελευταίο φίλτρο της τριάδας.

<sup>154</sup> Αποτέλεσμα μετά από μείωση της τιμής της μεταβλητής sigma units σε 0.7.

<sup>155</sup> Αποτέλεσμα μετά από επέμβαση του χρήστη στην ανάλυση του προγράμματος (forced analysis).

### 7.4.1.3 Ειδική ραδιενέργεια του $^{210}\text{Pb}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ

Στα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που μελετήθηκαν διαπιστώθηκε συστηματικά ανίχνευση και του  $^{210}\text{Pb}$ . Τυπικό φάσμα δείγματος ατμοσφαιρικού αεροζόλ στο οποίο φαίνεται η φωτοκορυφή του  $^{210}\text{Pb}$  δίνεται στην Εικόνα 7.14. Η φωτοκορυφή του ισοτόπου ανιχνεύεται και στο suppressed και στο unsuppressed φάσμα, αν και στο suppressed φάσμα η επιφάνειά της προσδιορίζεται με χαμηλότερη αβεβαιότητα. Στον Πίνακα 7.10 δίνονται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{210}\text{Pb}$  με βάση το suppressed φάσμα<sup>156</sup>.

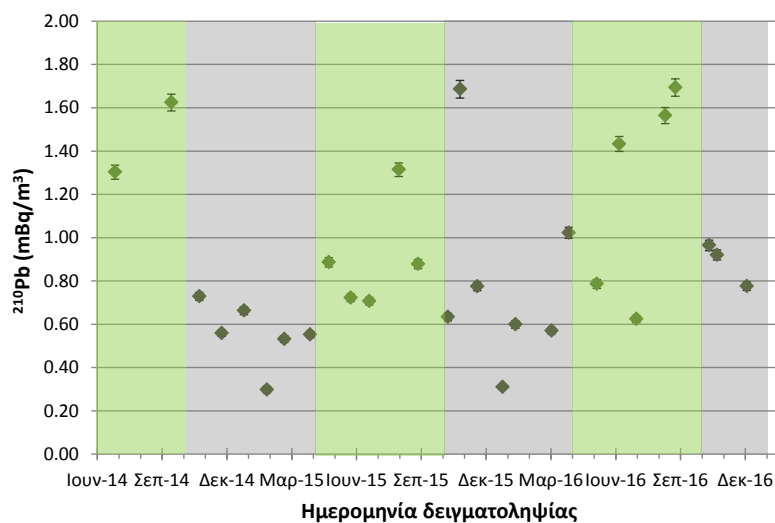


Εικόνα 7.14: Φωτοκορυφή του  $^{210}\text{Pb}$  σε τυπικό φάσμα ατμοσφαιρικού αεροζόλ.

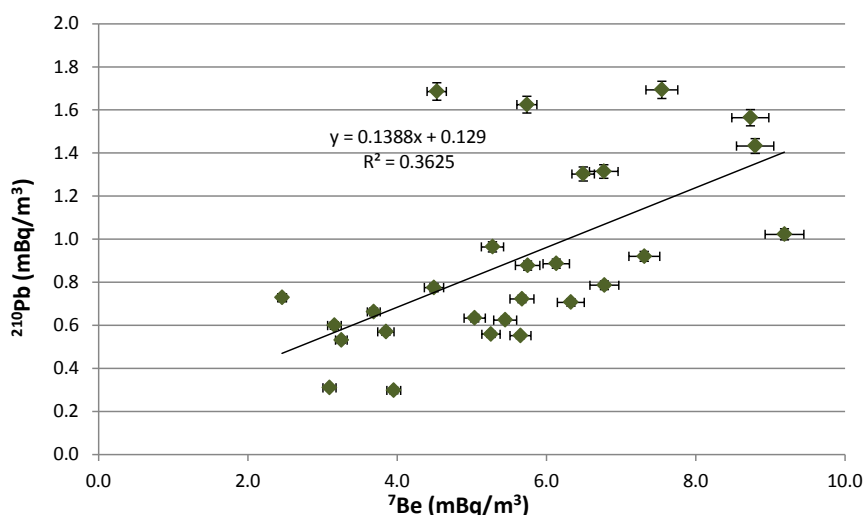
Η ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  κυμαίνεται από  $0.27 \text{ mBq/m}^3 \pm 4.1\% (1\sigma)$  το Φεβρουάριο του 2015, έως  $1.69 \text{ mBq/m}^3 \pm 3.5\% (1\sigma)$  το Νοέμβριο του 2015 και το Σεπτέμβριο του 2016. Η συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}$  κατά τη διάρκεια του έτους ακολουθεί την ίδια κύμανση με το  $^7\text{Be}$  και ως εκ τούτου αναμένονται χαμηλές συγκεντρώσεις την ψυχρή περίοδο του χρόνου και υψηλότερες κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου (Baskaran, 2011). Στην Εικόνα 7.15 παρατίθενται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας  $^{210}\text{Pb}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ, με χρωματικό διαχωρισμό ανάλογα με την περίοδο του χρόνου (γκρι: ψυχρή περίοδος, πράσινο: θερμή περίοδος).

<sup>156</sup> Στην αβεβαιότητα περιλαμβάνονται: τυχαία αβεβαιότητα της φωτοκορυφής του δείγματος, τυχαία αβεβαιότητα της φωτοκορυφής υποστρώματος (17%), συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και συστηματική αβεβαιότητα της παροχής (2.5%).

Φίλτρο	Ημερομηνία	$^{210}\text{Pb}$ [mBq/m <sup>3</sup> ]
A0486	Φεβ-2013	0.38 ± 5.8%
A0487	Φεβ-2013	0.57 ± 4.6%
A0488	Ιουλ-2014	1.30 ± 3.5%
A0489	Οκτ-2014	1.62 ± 3.5%
A0490	Νοε-2014	0.73 ± 3.5%
A0492	Δεκ-2014	0.56 ± 3.6%
A0493	Ιαν-2015	0.66 ± 3.7%
A0494	Φεβ-2015	0.27 ± 4.1%
A0495	Μαρ-2015	0.53 ± 3.8%
A0496	Απρ-2015	0.55 ± 3.5%
A0499	Μαϊ-2015	0.89 ± 3.5%
A0500	Ιουν-2015	0.72 ± 3.5%
A0501	Ιουλ-2015	0.71 ± 3.5%
A0502	Αυγ-2015	1.31 ± 3.5%
A0503	Σεπ-2015	0.88 ± 3.5%
A0504	Οκτ-2015	0.63 ± 3.7%
A0505	Νοε-2015	1.69 ± 3.5%
A0506	Δεκ-2015	0.77 ± 3.5%
A0507	Ιαν-2016	0.31 ± 4.1%
A0508	Φεβ-2016	0.60 ± 3.8%
A0509	Μαρ-2016	0.57 ± 3.7%
A0510	Απρ-2016	1.02 ± 3.5%
A0511	Μαϊ-2016	0.79 ± 3.5%
A0512	Ιουν-2016	1.43 ± 3.5%
A0513	Ιουλ-2016	0.62 ± 3.6%
A0514	Αυγ-2016	1.56 ± 3.5%
A0515	Σεπ-2016	1.69 ± 3.5%
A0516	Οκτ-2016	0.97 ± 3.5%
A0517	Νοε-2016	0.92 ± 3.5%
A0518	Δεκ-2016	0.78 ± 3.5%

Πίνακας 7.10: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.Εικόνα 7.15: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ (γκρι: ψυχρή περίοδος, πράσινο: θερμή περίοδος).

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας, όπου η ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  κυμαίνεται από 0.108 έως 3.390  $\text{mBq/m}^3$  (Cannizzaro, et al., 1999), (Ioannidou, et al., 2005), (Dueñas, et al., 2009). Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.16, υπάρχει συσχέτιση ( $t_0 = 3.76$ ) της ειδικής ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$  με την ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$ .



Εικόνα 7.16: Συσχέτιση ειδικής ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$  και του  $^{210}\text{Pb}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.

#### 7.4.1.4 Ειδική ραδιενέργεια του $^{40}\text{K}$ στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ

Όσον αφορά στην ανίχνευση του  $^{40}\text{K}$  στα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ, αυτή δεν κατέστη δυνατή, πιθανότατα εξαιτίας του υψηλού υποστρώματος  $^{40}\text{K}$  τόσο της διάταξης XtRa - CSS, όσο και του ίδιου του φίλτρου (blank φίλτρο). Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι η συγκέντρωση του ίδιου του φίλτρου σε  $^{40}\text{K}$ , μετά την αφαίρεση της συνεισφοράς του φυσικού υποστρώματος, ανέρχεται στα  $2.77 \text{ Bq} \pm 4.1\% (1\sigma)$ .

Η επιφάνεια της φωτοκορυφής του  $^{40}\text{K}$  σε όλα τα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που λήφθηκαν δεν διέφερε στατιστικά από την αντίστοιχη επιφάνεια φωτοκορυφής κατά την ανάλυση του καθαρού φίλτρου (blank φίλτρο). Επομένως, υπολογίστηκε το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης της φωτοκορυφής του  $^{40}\text{K}$  στο suppressed φάσμα, σύμφωνα με τη Σχέση (3.4) για το blank φίλτρο, σε  $L_D = 700$ , το οποίο για τυπική δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αεροζόλ όγκου  $13\,000 \text{ m}^3$ ,

αντιστοιχεί σε ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια M.D.A. = 30  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Σημειώνεται ότι, στη βιβλιογραφία αναφέρονται αντίστοιχες τιμές ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας, όπως 13  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (Karlsson, et al., 2008), ενώ αναφέρονται τιμές ανιχνευόμενων συγκεντρώσεων  $^{40}\text{K}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ μεταξύ 3.3  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  και 342  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (Hernandez, et al., 2005), (Karlsson, et al., 2008).

## 7.5 Προσδιορισμός φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό της βροχής

Τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης αποτίθενται στη Γη είτε άμεσα μέσω της βαρύτητας (ξηρή απόθεση – dry deposition) είτε έμμεσα μέσω των υγρών κατακρημνίσεων (υγρή απόθεση – wet deposition). Προσδιορισμός της συγκέντρωσης τέτοιων ισοτόπων στο νερό της βροχής πραγματοποιείται συστηματικά σε διάφορα ερευνητικά κέντρα, καθώς και από κρατικούς φορείς σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο, με σκοπό την παρακολούθηση της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος (Kimura, et al., 1978). Η ραδιενέργεια των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στις υγρές και τις ξηρές κατακρημνίσεις μελετάται για τους ίδιους λόγους που μελετάται η ραδιενέργειά τους και στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ, αλλά και σε άλλες εφαρμογές. Για παράδειγμα, η γνώση της συγκέντρωσης του  $^7\text{Be}$  στο νερό της βροχής είναι πολύ σημαντική παράμετρος, όταν πρόκειται να μελετηθεί η διάβρωση του εδάφους σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης (Sepulveda, et al., 2008) και η συσχέτιση της απόθεσης του ισοτόπου με τη βροχόπτωση (Rodenas, et al., 1997). Επίσης, είναι απαραίτητη στην περίπτωση που μελετάται η προέλευση των αέριων μαζών που προκάλεσαν το επεισόδιο κατακρήμνισης, καθώς και ο χρόνος παραμονής τους πάνω από θαλάσσιες ή χερσαίες περιοχές (Likuku, 2006).

Δεδομένου ότι τα ισότοπα που ενδιαφέρουν στο νερό της βροχής εκπέμπουν φωτόνια, η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον ποσοτικό προσδιορισμό τους είναι η  $\gamma$ -φασματοσκοπία. Η συνήθης διαδικασία περιλαμβάνει τη συγκέντρωση ικανού όγκου νερού της βροχής και στη συνέχεια την ήπια εξάτμισή του μέχρι ορισμένου όγκου, με προσοχή ώστε να μην υπάρχει απώλεια των ραδιενεργών ισοτόπων που ενδιαφέρουν. Μία άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δειγμάτων υγρών κατακρημνίσεων είναι η χρήση ρητίνης ανταλλαγής ιόντων [HASL Procedures Manual, HASL-300, B-06-44]. Για παράδειγμα



αναφέρεται ότι σχεδόν ολόκληρη η ποσότητα Ce, Zr, και Nb που βρίσκεται στο νερό της βροχής και ένα μέρος των Cs, Be και Ru συλλέγεται με τη χρήση χάρτινου φίλτρου, ενώ ότι απομένει στο νερό από τα Cs, Be και Ru μπορεί να συλληχθεί με χρήση ρητινών (Kimura, et al., 1980). Επομένως, η επεξεργασία του νερού της βροχής με χάρτινα φίλτρα, σε συνδυασμό με τη χρήση κατάλληλης ρητίνης μπορεί να οδηγήσει στην ολοκληρωτική συλλογή ισοτόπων από το νερό (Kimura, et al., 1978). Μάλιστα, οι (Matsuura, et al., 1983) εκτίμησαν ότι η συνδυασμένη χρήση δύο ρητινών (ανιόντων και κατιόντων) μπορεί να συλλέξει περισσότερο από το 99% των ιόντων στο νερό της βροχής (Tokuyama, et al., 1998).

Στον Πίνακα 7.11 δίνονται πληροφορίες από τη βιβλιογραφία σχετικά με τη δειγματοληψία και την επεξεργασία νερού, με σκοπό την ανίχνευση κοσμογενών ισοτόπων. Σημειώνεται ότι οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι ανεξάρτητες από την προέλευση του νερού (βροχή ή νερό λίμνης).

Δημοσίευση	Διάρκεια δειγμ/ληψίας	Ποσότητα νερού (L)	Μέθοδος επεξεργασίας
(Marquez, et al., 1957)	--	2.5 – 4.0	ρητίνη κατιόντων Amberlite IR-120
(Kimura, et al., 1978)	--	3	μείγμα ρητίνης ανιόντων και κατιόντων POWDEX
(Lal, et al., 1979)	1 μήνας	200 – 400	χημική επεξεργασία
(Hasebe, et al., 1981)	1 – 2 μήνες	--	πλήρης εξάτμιση
(Tokuyama, et al., 1993)	1 μήνας <sup>157</sup>	1000 <sup>157</sup>	μείγμα ρητίνης ανιόντων και κατιόντων POWDEX
(Tokieda, et al., 1996)	1 μήνας	20 – 230	μείγμα ρητίνης ανιόντων POWDEX και κατιόντων BioRad
(Tokuyama, et al., 1998)	1 μήνας	70 – 310	μείγμα ρητίνης ανιόντων και κατιόντων POWDEX
(Sakaguchi, et al., 2003) <sup>158</sup>	--	~0.5	μείγμα ρητίνης ανιόντων και κατιόντων Amberlite
(Komura, et al., 2007)	~30 min	~50	μείγμα ρητίνης ανιόντων και κατιόντων POWDEX
(Jungck, et al., 2009)		50 – 150	μείγμα ρητίνης ανιόντων και κατιόντων POWDEX

**Πίνακας 7.11: Τεχνικές δειγματοληψίας και προετοιμασίας δείγματος για την ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό.**

Όπως φαίνεται οι περισσότεροι ερευνητές επιλέγουν τη χρήση ρητίνης για τη συλλογή των ισοτόπων ενδιαφέροντος, καθώς αποτελεί μία γρήγορη και σχετικά εύκολη διαδικασία, η οποία δεν απαιτεί ιδιαίτερη χημική επεξεργασία του δείγματος. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής αυτής της τεχνικής και στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

<sup>157</sup> Κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 12 μηνιαία δείγματα ενός έτους, συνολικού όγκου 1000 L.

<sup>158</sup> Η μελέτη στη δημοσίευση αυτή αναφέρεται σε νερό λίμνης.

### 7.5.1 Μεθοδολογία προσδιορισμού φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο νερό της βροχής

Η δειγματοληψία και ανάλυση δειγμάτων υγρών κατακρημνίσεων – πρωτίστως του νερού της βροχής – μελετήθηκε σε παλαιότερες Δ.Ε. του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. (Σάββα, 2009), (Μπασιάς, 2013). Για τη μελέτη των υγρών κατακρημνίσεων είναι τοποθετημένα, στο δώμα του κτηρίου Κ του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., ορθογώνια δοχεία συλλογής, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.

Η πιο απλή μέθοδος επεξεργασίας ενός δείγματος υγρών κατακρημνίσεων είναι η συσκευασία του δείγματος σε πλαστικό δοχείο χωρίς καμία επεξεργασία και η γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του, μία τεχνική που εφαρμόστηκε σε δείγματα νερού της βροχής κατά την περίοδο αμέσως μετά από το ατύχημα στη Fukushima. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτητά της, καθώς ένα δείγμα υγρών κατακρημνίσεων μπορεί να συσκευαστεί και να αναλυθεί εντός λίγων λεπτών από το πέρας της δειγματοληψίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι αναμενόμενες συγκεντρώσεις των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στο νερό της βροχής είναι χαμηλές – της τάξης των 1 – 2 Bq/L για το  $^7\text{Be}$  – η ανάλυση του δείγματος χωρίς επεξεργασία οδηγεί σε αυξημένες αβεβαιότητες και ενδεχομένως στη μη-ανίχνευσή τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αβεβαιότητα της ανίχνευσης του  $^7\text{Be}$  στο νερό της βροχής, μετά από 48 ώρες γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης είναι της τάξης του 20% (1σ).

Η μεθοδολογία που εισήχθη στη Δ.Ε. (Σάββα, 2009) ήταν ένα βήμα προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της ανίχνευσης του  $^7\text{Be}$  στο νερό της βροχής. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, το νερό που συλλέγεται φιλτράρεται, με τη βοήθεια χάρτινων κυκλικών φίλτρων Whatman διαμέτρου 90 mm και πάχους 0.2 mm (Catalogue Number: 1442 090), με σκοπό την κατακράτηση των σωματιδίων που υπάρχουν στο νερό. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε και σε δείγματα νερού βροχής κατά την περίοδο μετά το ατύχημα στη Fukushima. Ωστόσο, η τεχνική έχει περιθώρια βελτίωσης, καθώς – όπως φάνηκε στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 – αφενός η ανάλυση των χάρτινων φίλτρων οδηγεί σε χαμηλές τιμές της ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$  και μέτρια στατιστική και γεννάει υποψίες για προβλήματα στη μεθοδολογία ανάλυσης και αφετέρου, κατά την εξάτμιση του φιλτραρισμένου

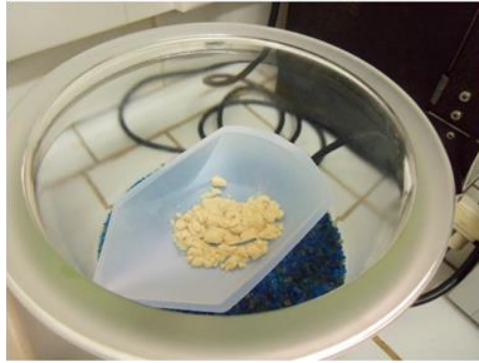
νερού μπορεί να χαθούν έως και τα δύο τρίτα του  $^7\text{Be}$ , όπως αναφέρεται στη δημοσίευση (Jungck, et al., 2009).

Στο πλαίσιο της Δ.Ε. (Μπασιάς, 2013), η οποία εκπονήθηκε παράλληλα με την παρούσα Δ.Δ., αναζητήθηκε καλύτερη μεθοδολογία επεξεργασίας των δειγμάτων υγρών κατακρημνίσεων, η οποία να οδηγεί στον ακριβέστερο προσδιορισμό της συγκέντρωσης κοσμικών ισοτόπων σε αυτό. Όπως φαίνεται από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του Πίνακα 7.11, μία ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία περιλαμβάνει τη χρήση ρητίνης ανταλλαγής ιόντων, για την απομόνωση των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ανταλλαγή ιόντων ανάμεσα στο νερό και τη ρητίνη, με αποτέλεσμα ιόντα που βρίσκονται στο νερό παγιδούνται στα μόρια της ρητίνης. Δεδομένου ότι τα ισότοπα  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{40}\text{K}$  που εξετάζονται σε αυτό το Κεφάλαιο απαντώνται ως κατιόντα, η χρησιμοποιούμενη ρητίνη θα έπρεπε να είναι ρητίνη κατιόντων.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου δειγματοληψίας υγρών κατακρημνίσεων και επεξεργασίας τους με χρήση ρητίνης κατιόντων είναι τα εξής:

- δειγματοληψία των υγρών κατακρημνίσεων σύμφωνα με τις προηγούμενες παραγράφους,
- ρύθμιση του pH του δείγματος  $\approx 5.0$ , ώστε να αποφεύγεται η υδρόλυση των κατιόντων μετάλλων,
- προσθήκη 1 gr ρητίνης κατιόντων τύπου DOWEX® 50WX8 ανά 1 L δείγματος – με ελάχιστη ποσότητα 20 gr ρητίνης για δείγματα έως 20 L, με σκοπό την τυποποίηση της γεωμετρίας ανάλυσης,
- ανάδευση του δείγματος με τη ρητίνη για  $\sim 1$  h,
- φιλτράρισμα του διαλύματος δείγματος – ρητίνης με σκοπό την κατακράτηση της ρητίνης,
- ξήρανση της ρητίνης<sup>159</sup> με τοποθέτησή της σε δοχείο που περιέχει Silica Gel (Εικόνα 7.17) για επαρκές χρονικό διάστημα (το διάστημα καθορίζεται με συστηματική ζύγιση του δείγματος),

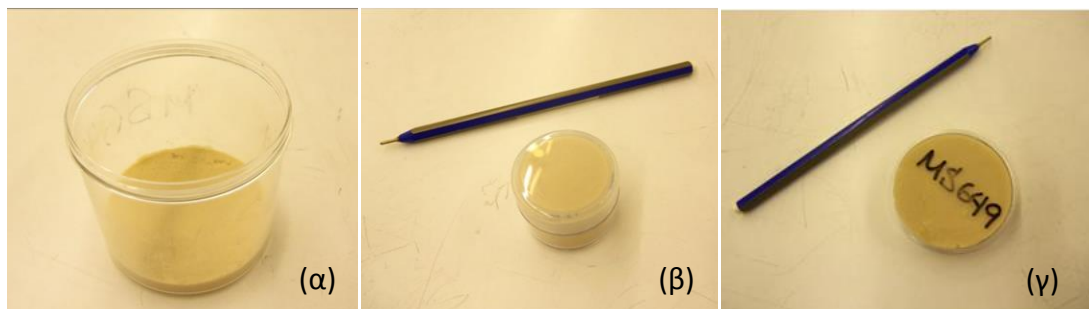
<sup>159</sup> Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης απομακρύνεται η υγρασία που προκύπτει από την επεξεργασία του νερού της βροχής αλλά και η ίδια η υγρασία της ρητίνης.



Εικόνα 7.17: Δοχείο με Silica Gel για την ξήρανση της ρητίνης κατιόντων.

- συσκευασία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση της ρητίνης για τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης σε αυτήν και κατ' επέκταση στο νερό,
- τέλος, από το φιλτραρισμένο νερό συσκευάζεται δείγμα γεωμετρίας «2» με σκοπό την ανίχνευση ενδεχομένως απομένουσας ραδιενέργειας σε αυτό.

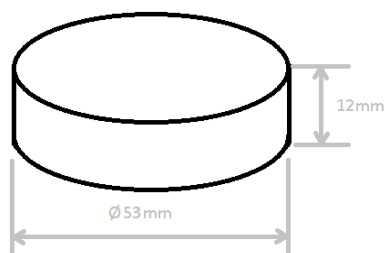
Με σκοπό την εύρεση της καλύτερης γεωμετρίας ανάλυσης, η οποία να δίνει τη μεγαλύτερη απόδοση κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, μελετήθηκαν οι τρεις γεωμετρίες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.18.



Εικόνα 7.18: Γεωμετρίες φασματοσκοπικής ανάλυσης δειγμάτων ρητίνης

Από τη μελέτη που είχε πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της Δ.Ε. (Μπασιάς, 2013) είχε διαπιστωθεί ότι η γεωμετρία (γ), η οποία αντιστοιχεί σε τριβλίο (petri), πλεονεκτεί έναντι των άλλων<sup>160</sup> και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε για την ανάλυση των δειγμάτων ρητίνης. Οι εσωτερικές διαστάσεις του τριβλίου παρατίθενται στην Εικόνα 7.19. Παρόλα αυτά, σε περίπτωση που η ποσότητα νερού και κατά συνέπεια η ποσότητα της ρητίνης που χρησιμοποιείται είναι μεγάλη, χρησιμοποιούνται και οι γεωμετρίες «8» και «5».

<sup>160</sup> Η γεωμετρία (α) έχει μεγαλύτερο όγκο, με συνέπεια να μην είναι εξασφαλισμένη πάντα η πλήρωσή της, ενώ η γεωμετρία (β) παρουσιάζει μικρότερη απόδοση φωτοκορυφής.



Εικόνα 7.19: Διαστάσεις τριβλίου (petri) που επιλέχθηκε για τη συσκευασία της ρητίνης κατιόντων.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας υγρών κατακρημνίσεων με χρήση ρητίνης κατιόντων, στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. πραγματοποιήθηκε πλήθος μηνιαίων δειγματοληψιών υγρών κατακρημνίσεων – σε κάθε περίπτωση επρόκειτο για βροχή – από το Σεπτέμβριο του 2014 έως τον Ιούνιο του 2015, με σκοπό τον προσδιορισμό των ισοτόπων  $^7\text{Be}$  και  $^{22}\text{Na}$ . Για κάθε δείγμα νερού προέκυψε ένα δείγμα ρητίνης και ένα δείγμα φιλτραρισμένου νερού. Στον Πίνακα 7.12 δίνονται οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης κάθε δειγματοληψίας, η επιφάνεια δειγματοληψίας και η συνολική μάζα νερού που συλλέχθηκε. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία δειγματοληψίας που ακολουθήθηκε δεν διακρίνει την υγρή από την ξηρή απόθεση. Έτσι, στις μεν δειγματοληψίες μικρής διάρκειας, οι οποίες έγιναν κατά τη διάρκεια επεισοδίων βροχόπτωσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι η ξηρή απόθεση είναι αμελητέα, ενώ σε μεγαλύτερης διάρκειας δειγματοληψίες που καλύπτουν και περιόδους ανομβρίας, η ξηρή απόθεση δεν μπορεί να αμεληθεί. Σε κάθε περίπτωση πάντως, θεωρείται ότι για τις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. η υγρή απόθεση κυριαρχεί και για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα ανάγονται και σε Bq/L νερού της βροχής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι το Δεκέμβριο του 2014 για την επεξεργασία των δειγμάτων χρησιμοποιείτο η ρητίνη κατιόντων της εταιρείας Eichrom, ενώ στη συνέχεια η ρητίνη κατιόντων της εταιρείας Sigma Aldrich. Με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η διαφορετική προέλευση της ρητίνης, στον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$ , το δείγμα νερού βροχής που λήφθηκε για την περίοδο 31/10/2014 - 01/12/2014 διαιρέθηκε σε δύο μέρη, τα οποία αναλύθηκαν με τις δύο ρητίνες. Στον Πίνακα 7.13 δίνονται για κάθε δειγματοληψία η ποσότητα και ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε, η κωδική ονομασία του δείγματος ρητίνης που προέκυψε και η γεωμετρία στην οποία συσκευάστηκε, καθώς επίσης και η κωδική ονομασία του δείγματος φιλτραρισμένου νερού γεωμετρίας «2».

Σημειώνεται ότι σε κανένα από τα δείγματα φιλτραρισμένου νερού<sup>161</sup> δεν ανιχνεύτηκαν ισότοπα κοσμικής προέλευσης.

Ημερομηνία έναρξης	Ημερομηνία λήξης	Επιφάνεια δειγματοληψίας (m <sup>2</sup> )	Μάζα νερού (kg)
05/09/2014 13:00	08/09/2014 12:10	0.75	6.03
08/09/2014 12:30	16/09/2014 10:00	0.75	9.94
16/09/2014 10:00	01/10/2014 10:25	0.37	15.19
01/10/2014 10:30	31/10/2014 13:00	0.37	9.23
31/10/2014 13:00	01/12/2014 10:15	0.75	17.62
		0.75	15.98
01/12/2014 10:15 <sup>162</sup>	05/01/2015 10:20	0.75	56.13
		0.37	35.20
05/01/2015 10:20	02/02/2015 10:30	0.75	25.47
02/02/2015 10:30	02/03/2015 10:40	0.75	41.72
02/03/2015 10:40	01/04/2015 11:20	0.75	64.56

Πίνακας 7.12: Στοιχεία δειγματοληψιών υγρών κατακρημνίσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ.

Ημερομηνίες έναρξης	Μάζα ρητίνης (gr) <sup>163</sup>	Δείγμα ρητίνης			Κωδική ονομασία δείγματος φιλτραρισμένου νερού
		Εταιρεία	Κωδική ονομασία	Γεωμετρία	
05/09/2014 13:00	15.5	Eichrom	MS665	τριβλίο	WRC024
08/09/2014 12:30	45.1	Eichrom	MS666	«8»	WRC025
16/09/2014 10:00	46.7	Eichrom	MS667	«8»	WRC026
01/10/2014 10:30	46.4	Eichrom	MS669	«8»	WRC027
31/10/2014 13:00	15.0	Eichrom	MS670	τριβλίο	WRC028
	24.0	Sigma Aldrich	MS671	τριβλίο	WRC029
01/12/2014 10:15	38.8	Sigma Aldrich	MS713	«8»	WRC030
	22.3	Sigma Aldrich	MS714	τριβλίο	WRC031
05/01/2015 10:20	28.0	Sigma Aldrich	MS739	τριβλίο	WRC032
02/02/2015 10:30	38.8	Sigma Aldrich	MS740	τριβλίο	WRC033
02/03/2015 10:40	73.6	Sigma Aldrich	MS765	«5»	WRC034

Πίνακας 7.13: Επεξεργασία δειγμάτων νερού βροχής που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ.

Όλα τα δείγματα ρητίνης αναλύθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS<sup>164</sup> για χρονική διάρκεια ~500 000 sec. Η βαθμονόμηση απόδοσης για όλες τις γεωμετρίες στις οποίες συσκευάστηκαν τα δείγματα ρητίνης (γεωμετρίες «8» και «5» και τριβλίο) πραγματοποιήθηκε με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo,

<sup>161</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.6, φάσματα 510 – 524.

<sup>162</sup> Η δειγματοληψία διαιρέθηκε σε δύο τμήματα λόγω του μεγάλου όγκου κατακρημνίσεων.

<sup>163</sup> Μάζα μετά από την ξήρανση.

<sup>164</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.6, φάσματα 525 – 548.

για υλικό πολυστυρένιο, το οποίο προσομοιώνει επαρκώς το υλικό της ρητίνης<sup>165</sup>. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που επιλέχθηκε στο Κεφάλαιο 5. Ειδικότερα η διαδικασία βαθμονόμησης για τη γεωμετρία τριβλίου περιγράφεται στο Παράρτημα ΣΤ<sup>166</sup>. Για τον προσδιορισμό του υποστρώματος της διάταξης κατά την ανάλυση των δειγμάτων ρητίνης, συσκευάστηκε και αναλύθηκε δείγμα ρητίνης που δεν είχε χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία νερού (blank δείγμα – κωδική ονομασία MS668) στη γεωμετρία τριβλίου. Από τις αναλύσεις<sup>167</sup> προέκυψε ότι η ρητίνη δεν συνεισφέρει στην αύξηση του φυσικού υποστρώματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ένα σχόλιο σχετικά με τις δύο ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δείγματα ρητίνης MS670 και MS671, τα οποία προέρχονται από το ίδιο αρχικό δείγμα νερού, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί διαφορετική ρητίνη κατιόντων, παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές της ειδικής ραδιενέργειας που εκτιμήθηκαν για το  $^7\text{Be}$  και τον  $^{210}\text{Pb}$  (Πίνακας 7.14). Για το λόγο αυτό, σε ένα άλλο επεισόδιο βροχόπτωσης όπου συλλέχθηκε μεγάλη ποσότητα νερού, παρασκευάστηκαν και αναλύθηκαν δύο δείγματα ρητίνης – MS713 και MS714 – με χρήση της ίδιας ρητίνης (Sigma Aldrich). Και στην περίπτωση αυτή διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές της ειδικής ραδιενέργειας που εκτιμήθηκαν για το  $^7\text{Be}$  και τον  $^{210}\text{Pb}$  (Πίνακας 7.15). Κατά συνέπεια, δεν μπορεί να τεκμηριωθεί με τις υπάρχουσες μετρήσεις σε ποιο βαθμό επιδρά στα τελικά αποτελέσματα των αναλύσεων η χρήση συγκεκριμένης ρητίνης, η διαδικασία διαχωρισμού του αρχικού δείγματος στα επιμέρους και η διαδικασία επεξεργασίας των δειγμάτων νερού. Για το λόγο αυτό θα ήταν χρήσιμο η διερεύνηση αυτή να επαναληφθεί με μεγαλύτερο μέγεθος δείγματος και ενδεχομένως με χρήση ειδικού ιχνηλάτη (tracer) της χημικής συμπεριφοράς των κατιόντων όταν αλληλεπιδρούν με τη ρητίνη. Προκειμένου μάλιστα να διαπιστωθεί με ασφάλεια ποια από τις δύο ρητίνες είναι πιο αποτελεσματική στην κατακράτηση των κατιόντων, πρέπει να πραγματοποιηθούν συγκριτικά πειράματα με γνωστές συγκεντρώσεις ιχνηλατών (tracer) για διάφορους όγκους δείγματος.

<sup>165</sup> Οι ρητίνες κατιόντων του εμπορίου συνήθως είναι Polystyrene sulfonate (de Dardel, et al., 2008).

<sup>166</sup> Σημειώνεται ότι η βαθμονόμηση αυτή δεν έχει καταχωρηθεί στον κώδικα SPUNAL.

<sup>167</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.6, φάσματα 531 – 532.

Δείγμα ρητίνης	$^7\text{Be}$ [mBq/L] <sup>168</sup>	$^{210}\text{Pb}$ [mBq/L] <sup>169</sup>	$^{40}\text{K}$ [mBq/L] <sup>170</sup>
MS670	0.67 ± 3.5%	22.4 ± 21.7%	13.5 ± 42%
MS671	0.89 ± 3.5%	33.6 ± 7.5%	10.4 ± 75%
U-test	5.64	2.05	0.32

Πίνακας 7.14: Αποτελέσματα σύγκρισης των δύο διαφορετικών ρητίνων κατιόντων.

Δείγμα ρητίνης	$^7\text{Be}$ [mBq/L] <sup>168</sup>	$^{210}\text{Pb}$ [mBq/L] <sup>169</sup>
MS713	0.79 ± 3.4%	37.8 ± 5.4%
MS714	0.94 ± 3.4%	31.4 ± 7.7%
U-test	3.59	2.02

Πίνακας 7.15: Αποτελέσματα σύγκρισης των δύο διαφορετικών δειγμάτων από το ίδιο επεισόδιο βροχόπτωσης με χρήση της ίδιας ρητίνης κατιόντων.

### 7.5.1.1 Ειδική ραδιενέργεια του $^7\text{Be}$ στο νερό της βροχής

Στα δείγματα νερού της βροχής που μελετήθηκαν ανιχνεύθηκε σε κάθε περίπτωση  $^7\text{Be}$ , τόσο στο unsuppressed, όσο και στο suppressed φάσμα. Στον Πίνακα 7.16 δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, με βάση το suppressed φάσμα, το οποίο οδηγεί σε χαμηλότερες αβεβαιότητες.

Δείγμα ρητίνης	$^7\text{Be}$ [mBq/L] <sup>171</sup>
MS665	2.21 ± 3.4%
MS666	0.80 ± 3.5%
MS667	0.59 ± 3.5%
MS669	0.68 ± 3.6%
MS670	0.67 ± 3.5%
MS671	0.89 ± 3.5%
MS713	0.79 ± 3.4%
MS714	0.94 ± 3.4%
MS739	1.36 ± 3.5%
MS740	0.77 ± 3.6%
MS765	1.00 ± 3.5%

Πίνακας 7.16: Ειδική ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  στα δείγματα νερού της βροχής.

<sup>168</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα ζύγισης (1.0%).

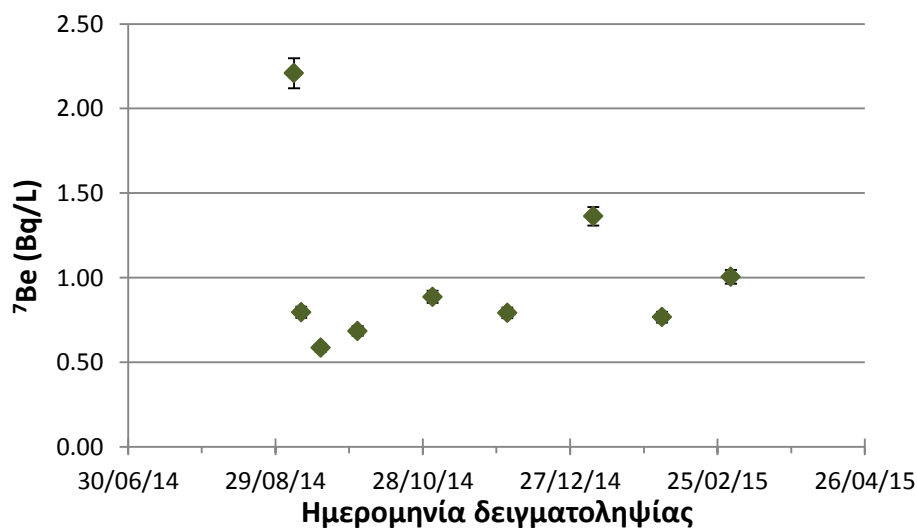
<sup>169</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα της φωτοκορυφής υποστρώματος (16.4%), τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα ζύγισης (1.0%).

<sup>170</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα της φωτοκορυφής υποστρώματος (1.2%), τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα ζύγισης (1.0%).

<sup>171</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα ζύγισης (1.0%).



Η κύμανση της ειδικής ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$  κατά την ημερομηνία έναρξης της δειγματοληψίας υπό μορφή διαγράμματος δίνεται στην Εικόνα 7.20. Σημειώνεται ότι σε όλες τις μετρήσεις έχουν γίνει κατάλληλες διορθώσεις για την απομείωση του  $^7\text{Be}$  κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, τη διάρκεια της ανάλυσης και τη διάρκεια ανάμεσα στο πέρας της δειγματοληψίας και την έναρξη της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης.



Εικόνα 7.20: Ειδική ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  στο νερό της βροχής.

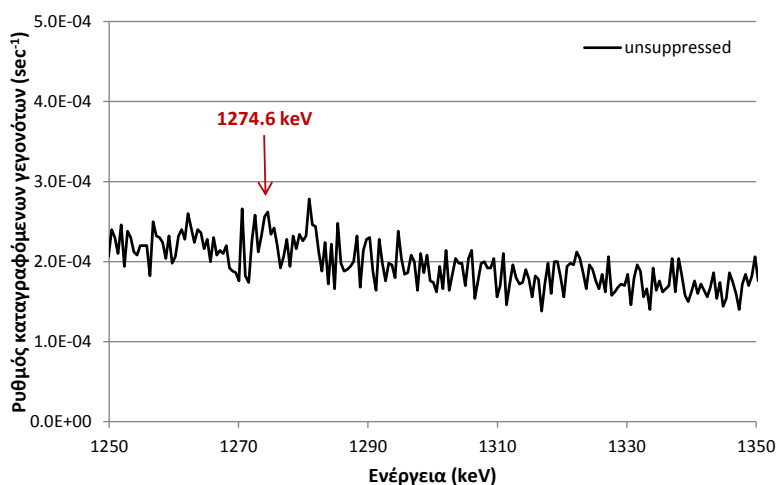
Στις δειγματοληψίες του Σεπτεμβρίου του 2014 (δείγματα ρητίνης MS665, MS666 και MS667), όπου τα δείγματα είχαν ληφθεί διαδοχικά σε μία περίοδο έντονων βροχοπτώσεων, παρατηρείται ότι σε κάθε δείγμα η ειδική ραδιενέργεια είναι χαμηλότερη από ότι στο αμέσως προηγούμενο. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι σταγόνες της βροχής παρασύρουν τους πυρήνες του  $^7\text{Be}$  που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα (washout), με αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου να μειώνεται το πλήθος των πυρήνων που παραμένουν σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα. Αυτό συνάδει και με αντίστοιχη εργασία της βιβλιογραφίας (Ishikawa, et al., 1995), όπου διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη τιμή της ειδικής ραδιενέργειας  $^7\text{Be}$  σε χιονόνερο παρουσιάζεται κατά το πρώτο τετράωρο της χιονόπτωσης (~ 4 Bq/L), ενώ στη συνέχεια αυτή μειώθηκε σε 1 – 2 Bq/L.

Οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του  $^7\text{Be}$  στο νερό της βροχής που εκτιμήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. βρίσκονται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας, οι οποίες κυμαίνονται από 0.73 έως 5.05 Bq/L (Rodenas, et al., 1997), (Juri Ayub, et al., 2009). Η ειδική ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  στο νερό της βροχής αναμένεται να ακολουθεί αντίστοιχη ετήσια κύμανση όπως και στο ατμοσφαιρικό

αεροζόλ, με υψηλότερες τιμές τους θερμούς μήνες και χαμηλότερες τους ψυχρούς. Ωστόσο, η κύμανση αυτή δεν ήταν εμφανής στις μετρήσεις της παρούσας μελέτης, κυρίως λόγω έλλειψης δεδομένων (βροχοπτώσεων) κατά τους θερινούς μήνες.

### 7.5.1.2 Ειδική ραδιενέργεια του $^{22}\text{Na}$ στο νερό της βροχής

Ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$  στο νερό της βροχής δεν κατέστη δυνατή με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα των αναλύσεων του unsuppressed φάσματος (Πίνακας 7.17). Στην Εικόνα 7.21 παρουσιάζεται τυπικό φάσμα από τις αναλύσεις ρητίνης κατιόντων μετά από επεξεργασία νερού της βροχής.



Εικόνα 7.21: Τμήμα τυπικού φάσματος ρητίνης κατιόντων στην περιοχή ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$ .

Δείγμα ρητίνης	$^{22}\text{Na}$ [ $\mu\text{Bq/L}$ ] SPUNAL	$^{22}\text{Na}$ [ $\mu\text{Bq/L}$ ] ANGES
MS665	--	--
MS666	--	--
MS667	--	--
MS669	--	--
MS670	--	--
MS671	--	--
MS713	--	$0.08^{172} \pm 40\%$
MS714	--	$0.13^{172} \pm 49\%$
MS739	--	--
MS740	--	--
MS765	--	$0.15^{172} \pm 40\%$

Πίνακας 7.17: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  στο νερό της βροχής<sup>173</sup>.

<sup>172</sup> Αποτέλεσμα μετά από επέμβαση του χρήστη στην ανάλυση του προγράμματος (forced analysis).

<sup>173</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει: τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%), παροχής (2.5%) και για το  $^{22}\text{Na}$  λόγω διόρθωσης για το φαινόμενο true coincidence (2%).

Μόνο με το πρόγραμμα ANGES και μόνο μετά από παρέμβαση του χρήστη (forced analysis), αποδόθηκε σε τρεις περιπτώσεις επιφάνεια στην φωτοκορυφή του ισοτόπου. Όπως αναφέρθηκε, ωστόσο, και στην περίπτωση των αναλύσεων των δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ (Παράγραφος 7.4.1), τα αποτελέσματα τέτοιων αναλύσεων δεν μπορούν να θεωρούνται αξιόπιστα, παρόλο που είναι συμβατά με τιμές της βιβλιογραφίας – 0.05 έως 0.12 mBq/L (Tokuyama, et al., 1993) – όπως φαίνεται και από το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης του ισοτόπου που υπολογίζεται στη συνέχεια.

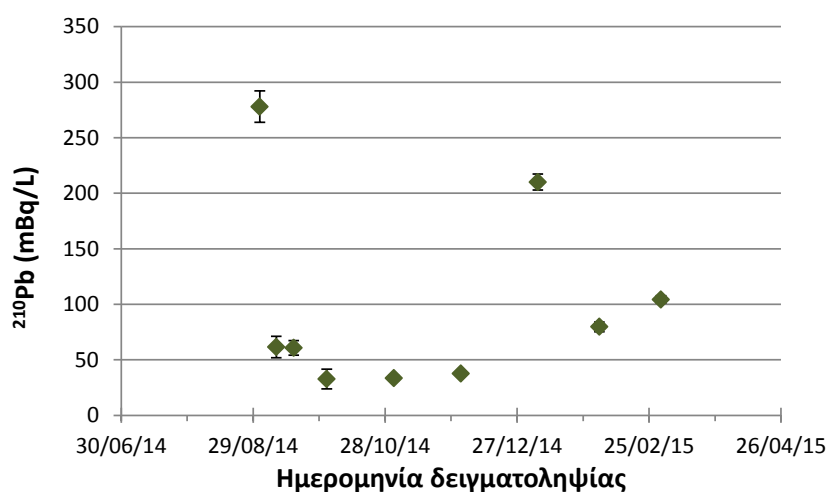
Το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης του  $^{22}\text{Na}$  για δείγματα υγρών κατακρημνίσεων εξαρτάται – εκτός των άλλων – και από την ποσότητα του νερού που έχει συλλεχθεί και την ποσότητα ρητίνης που χρησιμοποιείται. Για ένα τυπικό δείγμα ρητίνης (MS739), υπολογίστηκε από το unsuppressed φάσμα το κατώτερο όριο ανίχνευσης ίσο με  $L_D = 315$  κρούσεις και η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (M.D.A.) που αντιστοιχεί ίση με 0.018 Bq. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στην εν λόγω δειγματοληψία η συνολική μάζα του νερού που είχε συλλεχθεί ήταν 25.472 L, τελικά υπολογίστηκε για τη συγκεκριμένη περίπτωση M.D.A. = 0.70 mBq/L. Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 7.18 η ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  που έχει εκτιμηθεί σε κάθε περίπτωση είναι πολύ χαμηλότερη του κατωτέρου επιπέδου ανίχνευσης.

### 7.5.1.3 Ειδική ραδιενέργεια του $^{210}\text{Pb}$ στο νερό της βροχής

Ο  $^{210}\text{Pb}$ , ανιχνεύεται σε όλα τα δείγματα νερού βροχής που εξετάσθηκαν και στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed). Στον Πίνακα 7.18 δίνονται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο suppressed φάσμα, όπου η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας της φωτοκορυφή είναι χαμηλότερη. Η κύμανση της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{210}\text{Pb}$  υπό μορφή διαγράμματος απεικονίζεται στην Εικόνα 7.22.

Δείγμα ρητίνης	$^{210}\text{Pb}$ [mBq/L] <sup>174</sup>
MS665	278.0 ± 5.1%
MS666	61.6 ± 15.9%
MS667	60.8 ± 10.8%
MS669	32.9 ± 26.9%
MS670	22.4 ± 21.7%
MS671	33.6 ± 7.5%
MS713	37.8 ± 5.4%
MS714	31.4 ± 7.7%
MS739	210.1 ± 3.4%
MS740	79.7 ± 5.5%
MS765	104.4 ± 3.3%

Πίνακας 7.18: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  στα δείγματα νερού της βροχής.

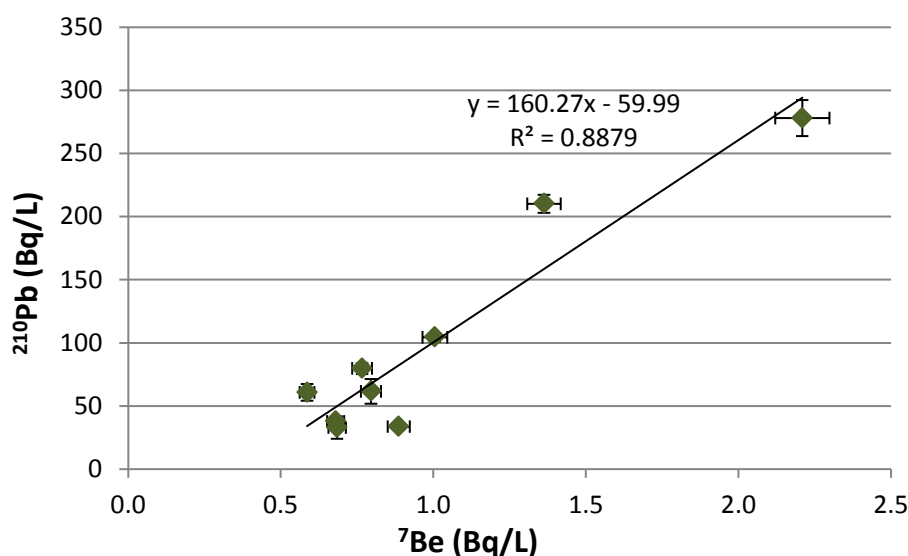


Εικόνα 7.22: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  στο νερό της βροχής.

Όμοια με το  $^7\text{Be}$ , παρατηρείται ότι στις διαδοχικές δειγματοληψίες του Σεπτεμβρίου του 2014 (δείγματα ρητίνης MS665, MS666 και MS667), η ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  βαίνει φθίνουσα, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι σε βροχοπτώσεις μικρής διάρκειας το φαινόμενο washout κυριαρχεί σε σχέση με το φαινόμενο rainout (Caillet, et al., 2001). Κατά τις μηνιαίες δειγματοληψίες, από τον Οκτώβριο του 2014 και μετά, η ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  κυμαίνεται από  $22.4 \pm 21.7\%$ (1σ) το Νοέμβριο του 2014, έως  $210.1 \pm 3.4\%$ (1σ) τον Ιανουάριο του 2015. Οι τιμές αυτές είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας, όπου η συγκέντρωση του  $^{210}\text{Pb}$  κυμαίνεται από 9 έως 1500 mBq/L (Lal, et al., 1979), (McNeary, et al., 2003), (Garcia-Orellana, et al., 2006), (Ugur, et al., 2011).

<sup>174</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα της φωτοκορυφής υποστρώματος (16.4%), τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα ζύγισης (1.0%).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συσχέτιση μεταξύ των ειδικών ραδιενεργειών του  $^7\text{Be}$  και του  $^{210}\text{Pb}$  (Εικόνα 7.23). Τα δύο ισότοπα παράγονται με διαφορετικό τρόπο, ωστόσο παρατηρείται ότι η ειδική ραδιενέργειά τους στο νερό της βροχής ακολουθεί την ίδια τάση, κάτι που υποδηλώνει ότι τα δύο ισότοπα φαίνεται να παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά κατά τις υγρές κατακρημνίσεις (Olsen, et al., 1985), (Caillet, et al., 2001). Με άλλα λόγια, το φαινόμενο washout φαίνεται να είναι το κυρίαρχο κατά την απομάκρυνση των πυρήνων των δύο ισοτόπων από τον ατμοσφαιρικό αέρα, συγκριτικά με το φαινόμενο rainout.



Εικόνα 7.23: Συσχέτιση ειδικών ραδιενεργειών των  $^7\text{Be}$  και  $^{210}\text{Pb}$  στο νερό της βροχής.

#### 7.5.1.4 Ειδική ραδιενέργεια του $^{40}\text{K}$ στο νερό της βροχής

Στα δείγματα νερού της βροχής που αναλύθηκαν το  $^{40}\text{K}$  ανιχνεύθηκε μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με βάση το suppressed φάσμα δίνονται στον Πίνακα 7.19. Σε κάθε περίπτωση η ειδική ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  συνοδεύεται από υψηλή αβεβαιότητα, καθώς το υψηλό υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS δυσκολεύει την ανίχνευση του.

Στα διαδοχικά δείγματα του Σεπτεμβρίου του 2014,  $^{40}\text{K}$  ανιχνεύθηκε μόνο στο πρώτο δείγμα. Κατά τις μηνιαίες δειγματοληψίες, από τον Οκτώβριο του 2014 και μετά,  $^{40}\text{K}$  ανιχνεύθηκε στα έξι από τα έντεκα δείγματα, με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από  $10.4 \text{ mBq/L} \pm 75\%(1\sigma)$  το Νοέμβριο του 2014, έως  $138.3 \text{ mBq/L} \pm 24\%(1\sigma)$  τον Φεβρουάριο του 2015, τιμές οι οποίες είναι σε

συμφωνία με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας: 0.075 – 0.84 Bq/L (Duenas, et al., 2011). Δεδομένου ότι το πλήθος των δεδομένων είναι αρκετά περιορισμένο, δεν είναι δυνατή η παρατήρηση κάποιας τάσης ή η εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος για τη συγκέντρωση του  $^{40}\text{K}$  στο νερό της βροχής.

Δείγμα ρητίνης	$^{40}\text{K}$ [mBq/L] <sup>175</sup>
MS665	27.6 ± 55%
MS666	< 6
MS667	< 6
MS669	< 6
MS670	13.5 ± 42%
MS671	10.4 ± 75%
MS713	< 6
MS714	< 6
MS739	125.7 ± 24%
MS740	138.3 ± 24%
MS765	16.3 ± 38%

Πίνακας 7.19: Ειδική ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  στα δείγματα νερού της βροχής.

## 7.6 Ανάλυση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ και νερού της βροχής στη διάταξη XtRa - CSS σε λειτουργία σύμπτωσης

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 7.2.2, στη βιβλιογραφία αναφέρεται η ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  με μεθόδους γ-γ σύμπτωσης. Καθώς τη  $\beta^+$  διάσπαση του  $^{22}\text{Na}$  ακολουθεί και εκπομπή του φωτονίου ενέργειας 1274.6 keV, τελικά μετά και την εξαΰλωση του  $\beta^+$ , εκπέμπονται συνολικά συγχρόνως τρία φωτόνια<sup>176</sup>. Η ταυτόχρονη ανίχνευση τουλάχιστον δύο από τα παραπάνω τρία φωτόνια σε δύο ανιχνευτές ονομάζεται μέθοδος γ-γ σύμπτωσης (γ-γ coincidence). Μέθοδοι γ-γ σύμπτωσης για την ανίχνευση  $\beta^+$  ραδιενεργών ισοτόπων χρησιμοποιούνται αρκετά σε έρευνες πυρηνικής φυσικής (Beausang, et al., 1996), ανάλυση πυρηνικών αποβλήτων και προϊόντων νετρονικής ενεργοποίησης (Oshima, et al., 2008), καθώς και σε ιατρικές εφαρμογές όπου απαιτούνται δείγματα αναφοράς  $\beta^+$  ισοτόπων (Nahle, et al., 2008), (de Oliveira, et al., 2012). Τέλος, έχει εφαρμοστεί και σε περιβαλλοντικές μελέτες

<sup>175</sup> Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει την τυχαία αβεβαιότητα φωτοκορυφής, τη συστηματική αβεβαιότητα της φωτοκορυφής υποστρώματος (1.2%), τη συστηματική αβεβαιότητα βαθμονόμησης (2.3%) και τη συστηματική αβεβαιότητα ζύγισης (1.0%).

<sup>176</sup> Τα δύο φωτόνια ενέργειας 511 keV έκαστο που εκπέμπονται αντιδιαμετρικά, και το φωτόνιο ενέργειας 1274.6 keV.

για την ανίχνευση του κοσμικού ισοτόπου  $^{22}\text{Na}$  (Fleishman, 2008), (Konki, et al., 2012), (Zhang, et al., 2014). Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η μείωση του συνεχούς υποστρώματος, με αποτέλεσμα να μειώνεται επίσης το κατώτερο όριο ανίχνευσης για το  $^{22}\text{Na}$ . Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τεχνικής είναι το γεγονός ότι, για ανιχνευτές γερμανίου η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων εξαΰλωσης (511 keV) είναι υψηλότερη από την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 1274.6 keV. Μάλιστα, οι (Zhang, et al., 2010) διαπίστωσαν ότι η απόδοση σύμπτωσης είναι υψηλότερη από την απόδοση ανίχνευσης συμβατικής  $\gamma$ -ανιχνευτικής διάταξης. Από την άλλη πλευρά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η σύμπτωση μεταξύ των φωτονίων 1274.6 keV και ενός από τα φωτόνια εξαΰλωσης. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται να ελέγχεται η σύμπτωση φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας και όχι απλά η σύμπτωση δύο γεγονότων που καταγράφονται στους δύο ανιχνευτές. Ωστόσο, η διάταξη XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. είναι συγκροτημένη κατά τρόπον ώστε να ελέγχεται η σύμπτωση δύο φωτονίων οποιασδήποτε ενέργειας που ανιχνεύονται στους δύο ανιχνευτές (πρωτεύων και δευτερεύων) και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει στην παραπάνω λογική της  $\gamma$ -σύμπτωσης, παρά μόνον μετά από τροποποιήσεις.

Με σκοπό τη μελέτη της δυνατότητας χρήσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., όπως είναι εγκατεστημένο και λειτουργεί, σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence mode), για την ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$ , επιλέχθηκε να αναλυθούν ορισμένα δείγματα (φίλτρα και ρητίνες). Συνολικά αναλύθηκαν δύο μηνιαία φίλτρα ατμοσφαιρικού αεροζόλ (A0488 και A0493), ένα συνδυασμένο τρίμηνο φίλτρο ατμοσφαιρικού αεροζόλ (A0488-490) και ένα δείγμα ρητίνης (MS714). Ωστόσο, σε καμία από τις αναλύσεις αυτές<sup>177</sup> δεν ανιχνεύτηκε η φωτοκορυφή του  $^{22}\text{Na}$  στην ενέργεια των 1274.6 keV. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη λειτουργία του συστήματος Compton Suppression σε σύμπτωση, για να καταγραφεί ένα φωτόνιο ενέργειας 1274.6 keV στον πρωτεύοντα ανιχνευτή, πρέπει επιπλέον να ανιχνευθεί συγχρόνως στον δευτερεύοντα ανιχνευτή και ένα από τα δύο φωτόνια της εξαΰλωσης. Με άλλα λόγια, για να καταστεί δυνατή η ανίχνευση του φωτονίου ενέργειας 1274.6 keV εισάγεται άλλη μία συνθήκη, η οποία δεν

---

<sup>177</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.6, φάσματα 436, 443, 492, 542.

ικανοποιείται πάντα. Κατά συνέπεια, οι καλύτερες συνθήκες ανίχνευσης του  $^{22}\text{Na}$  με τη διάταξη XtRa - CSS όπως είναι συγκροτημένη και λειτουργεί επιτυχάνονται στη συμβατική λειτουργία της (unsuppressed φάσμα).

## 7.7 Συμπεράσματα από τη χρήση της διάταξης XtRa - CSS για τον προσδιορισμό φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και το νερό της βροχής

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι συστηματικές δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ και νερού της βροχής που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. με σκοπό την ανίχνευση φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων.

### Αναλύσεις δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ

Πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες διάρκειας 4 έως 10 ημερών το μήνα για χρονικό διάστημα ίσο με περίπου 2.5 χρόνια. Τα φίλτρα αναλύθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για μεγάλη διάρκεια (500 000 sec) με σκοπό να καταστεί δυνατή η ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$ , εξαιτίας της εξαιρετικά χαμηλής του συγκέντρωσης στον αέρα.

Σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν ανιχνεύθηκε  $^7\text{Be}$  και  $^{210}\text{Pb}$  με αβεβαιότητες μικρότερες από 4% (1σ) και 6% (1σ), αντίστοιχα. Η ειδική ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  κυμάνθηκε από  $2.5 \text{ mBq/m}^3 \pm 3.5\% (1\sigma)$  έως  $9.2 \text{ mBq/m}^3 \pm 3.8\% (1\sigma)$ , τιμές που είναι σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία: 0.32 έως  $15.3 \text{ mBq/m}^3$  (Feely, et al., 1989), (Azahra, et al., 2003), (Duenas, et al., 2003), (Cannizzaro, et al., 2004), (Meresova, 2008). Η ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  κυμάνθηκε από  $0.27 \text{ mBq/m}^3 \pm 4.1\% (1\sigma)$  έως  $1.69 \text{ mBq/m}^3 \pm 3.5\% (1\sigma)$ , τιμές που βρίσκονται εντός των ορίων που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία: 0.108 έως  $3.390 \text{ mBq/m}^3$  (Cannizzaro, et al., 1999), (Ioannidou, et al., 2005), (Dueñas, et al., 2009). Και τα δύο ισότοπα ακολούθησαν την ίδια κύμανση κατά τη διάρκεια του έτους, δηλαδή εν γένει χαμηλή ειδική ραδιενέργεια την ψυχρή περίοδο του χρόνου και υψηλότερη κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου. Μάλιστα βρέθηκε θετική συσχέτιση ανάμεσα στις ειδικές ραδιενέργειες των δύο ισοτόπων.

Αναφορικά με το  $^{40}\text{K}$ , δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευσή του στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ. Κύριος λόγος αποτέλεσε το σχετικά υψηλό υπόστρωμα  $^{40}\text{K}$ , τόσο εξαιτίας



του υλικού του δευτερεύοντα ανιχνευτή του συστήματος, όσο και εξαιτίας της φυσικής ραδιενέργειας των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Εκτιμήθηκε το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης για το suppressed φάσμα σε  $L_D = 700$  κρούσεις, επιφάνεια η οποία, για τυπική δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αεροζόλ όγκου  $13\,000\text{ m}^3$ , αντιστοιχεί σε κατώτερη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια  $30\text{ μBq/m}^3$ .

Για την ανάλυση των φασμάτων, εκτός από τον κώδικα SPUNAL που συστηματικά χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα ANGES για να διερευνηθεί η ικανότητά του να ανιχνεύσει το  $^{22}\text{Na}$ . Με τον κώδικα SPUNAL το  $^{22}\text{Na}$ , ανιχνεύθηκε μόνο σε 6 από τα 30 δείγματα, με την ειδική ραδιενέργεια να κυμαίνεται από  $1.03\text{ μBq/m}^3 \pm 53.6\% (1\sigma)$  έως  $2.72\text{ μBq/m}^3 \pm 93.3\% (1\sigma)$ . Άμεση σύγκριση των τιμών αυτών με τιμές της βιβλιογραφίας δεν μπορεί να γίνει καθώς δεν διατίθενται πολλά δεδομένα, ειδικά σε παρόμοιο γεωγραφικό πλάτος. Ωστόσο, σε μελέτες για άλλα γεωγραφικά πλάτη αναφέρονται τιμές που κυμαίνονται από  $0.08$  έως  $1.63\text{ μBq/m}^3$  (Leppanen, et al., 2012), (Steinmann, et al., 2013), (Wershofen, 2013). Οι αναλύσεις που έγιναν με το πρόγραμμα ANGES έδωσαν αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις που δεν έδωσε το πρόγραμμα SPUNAL, χωρίς όμως τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων να μπορούν να θεωρηθούν πάντα αξιόπιστα, καθώς η ειδική ραδιενέργεια που προέκυψε είναι εν γένει χαμηλότερη από την αντίστοιχη ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια.

Με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας ανίχνευσης  $^{22}\text{Na}$ , τα φίλτρα συνδυάστηκαν ανά τρία και αναλύθηκαν ως ένα τρίμηνο δείγμα. Από τη διερεύνηση αυτή προέκυψε ότι ανίχνευση της φωτοκορυφής του  $^{22}\text{Na}$  πραγματοποιείται εν γένει μόνο στις περιπτώσεις όπου σε κάποιο – ή κάποια – από τα επιμέρους φίλτρα έχει ανιχνευθεί  $^{22}\text{Na}$ . Ωστόσο, υπήρξαν και συνδυασμοί φίλτρων όπου, ενώ τα επιμέρους δείγματα όταν αναλύθηκαν μεμονωμένα δεν οδήγησαν στην ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$ , μετά το συνδυασμό τους, ανιχνεύθηκε η φωτοκορυφή του ισοτόπου, αν και με υψηλή αβεβαιότητα, χωρίς να είναι απαραίτητη η επέμβαση του χρήστη στον κώδικα ανάλυσης του φάσματος. Μάλιστα, τα δείγματα αυτά προέρχονταν από δειγματοληψίες κατά τους χειμερινούς μήνες του 2016, δηλαδή από περιόδους του χρόνου που η συγκέντρωση των κοσμογενών ισοτόπων είναι συγκριτικά χαμηλότερη.

Συμπερασματικά, η σύνθεση των φίλτρων δεν φαίνεται να επιδρά τόσο στην δυνατότητα ανίχνευσης της φωτοκορυφής του ισοτόπου. Βέβαια, δεδομένου ότι την περίοδο εκπόνησης της Δ.Δ. ο 11ετής κύκλος του Ήλιου βρίσκεται στο ζενίθ, η συγκέντρωση του ισοτόπου είναι ιδιαίτερα χαμηλή, καθιστώντας την ανίχνευσή του ακόμα πιο δύσκολη. Ίσως σε μεταγενέστερη φάση του κύκλου του Ήλιου όπου η ειδική ραδιενέργεια του  $^{22}\text{Na}$  θα είναι υψηλότερη, ο συνδυασμός δειγματοληψίας – ανάλυσης που ακολουθήθηκε να είναι επαρκής για τη συστηματική ανίχνευσή του.

#### Αναλύσεις δειγμάτων νερού της βροχής

Για χρονικό διάστημα 6 μηνών πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες δειγματοληψίες, ενώ συλλέχθηκαν και δείγματα από μεμονωμένα επεισόδια έντονης βροχόπτωσης. Τα δείγματα υπέστησαν επεξεργασία με χρήση ρητίνης κατιόντων με σκοπό την απομόνωση των ισοτόπων ενδιαφέροντος. Με τη μέθοδο αυτή ήταν δυνατή η συστηματική ανίχνευση  $^7\text{Be}$  και  $^{210}\text{Pb}$ , με αβεβαιότητες της τάξης του 3.5% για το πρώτο και έως 30% για το δεύτερο. Η ειδική ραδιενέργεια του  $^7\text{Be}$  κατά τις μηνιαίες δειγματοληψίες κυμαίνεται από  $0.67 \text{ mBq/m}^3 \pm 3.5\%(1\sigma)$  έως  $1.36 \text{ mBq/m}^3 \pm 3.5\%(1\sigma)$ , τιμές που βρίσκονται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας: 0.7 έως 5.05 Bq/L (Rodenas, et al., 1997), (Juri Ayub, et al., 2009). Η ειδική ραδιενέργεια του  $^{210}\text{Pb}$  κατά τις μηνιαίες δειγματοληψίες κυμαίνεται από  $22.4 \pm 21.7\%(1\sigma)$  έως  $210.1 \pm 3.4\%(1\sigma)$ , τιμές που επίσης είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας: 9 – 1500 mBq/L (Lal, et al., 1979), (McNear, et al., 2003), (Garcia-Orellana, et al., 2006), (Ugur, et al., 2011).

Αναφορικά με το  $^{40}\text{K}$ , ανιχνεύθηκε σε 6 από τα 11 δείγματα και με υψηλές αβεβαιότητες, κυρίως εξαιτίας του υψηλού υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS. Οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας κυμάνθηκαν από  $10.4 \text{ mBq/L} \pm 75\%(1\sigma)$  έως  $138.3 \text{ mBq/L} \pm 24\%(1\sigma)$ , και είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας: 0.075 – 0.84 Bq/L (Duenas, et al., 2011).

Η ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  δεν κατέστη δυνατή με την παραπάνω μέθοδο, παρά μόνο σε τρεις περιπτώσεις και μετά παρέμβαση του χρήστη στο λογισμικό γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, κάτι που καθιστά τα αποτελέσματα αμφισβητήσιμα. Η κατώτερη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια για δείγμα νερού ~ 25 L, ρητίνη κατιόντων, και γ-φασματοσκοπική ανάλυση διάρκειας 500 000 s, εκτιμήθηκε σε 0.70 mBq/L.

Γενικά οι τεχνικές δειγματοληψίας και ανάλυσης που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν με στόχο τον ποσοτικό προσδιορισμό φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων – κυρίως κοσμικής προέλευσης – στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και το νερό της βροχής, θεωρείται ότι δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, συμβατά με αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές και μπορούν να χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις ρουτίνας, αν και φυσικά θα μπορούσαν να βελτιωθούν περαιτέρω, κυρίως όσον αφορά τις μετρήσεις στο νερό της βροχής.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## Εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS

---

### 8.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εφαρμογή τεχνικών νετρονικής ενεργοποίησης με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Πρέπει να σημειωθεί ότι νετρονική ενεργοποίηση είναι μία αναλυτική μέθοδος στην οποία συχνά χρησιμοποιούνται συστήματα Compton Suppression. Αρχικά, στο Κεφάλαιο αυτό δίνονται οι βασικές αρχές της μεθόδου και παρουσιάζεται η διάταξη που είναι εγκατεστημένη στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. για την εφαρμογή της με θερμικά νετρόνια. Ακολούθως, δίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή των συστημάτων Compton Suppression που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την εν λόγω μέθοδο, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειράματα νετρονικής ενεργοποίησης με θερμικά νετρόνια που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. και οι σχετικές αναλύσεις που έγιναν με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS.

### 8.2 Η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης

Η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης (Neutron Activation Analysis – N.A.A.) βασίζεται στην ακτινοβόληση με νετρόνια ενός δείγματος, με αποτέλεσμα, ορισμένοι μη ραδιενεργοί πυρήνες που περιέχονται στο δείγμα να καθίστανται ραδιενεργοί<sup>178</sup>. Η εν συνεχεία ανάλυση των δειγμάτων με τεχνικές γ-

---

<sup>178</sup> Ο όρος ενεργοποίηση χρησιμοποιείται ακριβώς για να περιγράψει ότι μη-ραδιενεργοί πυρήνες καθίστανται ραδιενεργοί εξαιτίας της ακτινοβόλησης με νετρόνια.

φασματοσκοπίας μπορεί να οδηγήσει στην ταυτότητα των πυρήνων οι οποίοι έχουν υποστεί την ενεργοποίηση. Η Ν.Α.Α. στηρίζεται στην πυρηνική αντίδραση κατά την οποία ένα νετρόνιο αλληλεπιδρά με έναν πυρήνα, με συνέπεια την ενσωμάτωση του νετρονίου σε αυτόν και τη δημιουργία νέου πυρήνα, ο οποίος ενδέχεται να είναι ραδιενεργός. Το προϊόν της πυρηνικής αντίδρασης ενεργοποίησης για συγκεκριμένο πυρήνα – στόχο εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων, ενώ το πλήθος των πυρήνων που ενεργοποιούνται εξαρτάται από το είδος και το πλήθος των πυρήνων – στόχων και από τη ροή των νετρονίων.

Τα νετρόνια, ως μη φορτισμένα σωματίδια, συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά από τα φορτισμένα σωματίδια ή τις φωτονιακές ακτινοβολίες και αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες των ατόμων της ύλης, μόνο όταν βρεθούν μέσα σε ακτίνα δράσης των πυρηνικών δυνάμεων, της τάξης των  $10^{-13}$  cm, με αποτέλεσμα τις λεγόμενες πυρηνικές αντιδράσεις. Η πιθανότητα πραγματοποίησης ορισμένου τύπου αντίδρασης χαρακτηρίζεται από το μέγεθος της μικροσκοπικής ενεργού διατομής,  $\sigma$ , για τη συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων, τα οποία διαιρούνται στις εξής κατηγορίες:

- τα θερμικά νετρόνια ( $0 < E < 0.4$  eV)
- τα επιθερμικά νετρόνια ( $0.4 < E < 1000$  eV)
- τα νετρόνια ενδιάμεσης ενέργειας ( $1$  keV  $< E < 500$  keV) και
- τα ταχέα νετρόνια ( $0.5$  MeV  $< E < 18$  MeV).

Στην περίπτωση που τα ισότοπα που παράγονται από την νετρονική ενεργοποίηση είναι ραδιενεργά και εκπέμπουν φωτόνια, τότε αυτά μπορούν να ανιχνευθούν με τεχνικές γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και να ταυτοποιηθεί με αυτό τον τρόπο ο αρχικός πυρήνας – στόχος. Από την φυσική ισοτοπική αναλογία του πυρήνα – στόχου μπορεί να προσδιορισθεί τελικά η συγκέντρωση του αντίστοιχου στοιχείου στο συγκεκριμένο δείγμα. Επισημαίνεται η δυνατότητα ισοτοπικού προσδιορισμού, που παρέχει η μέθοδος αυτή, κάτι που θεωρείται σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων.

Η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης χρησιμοποιείται κυρίως σε εργαστήρια που διαθέτουν γεννήτριες νετρονίων που παράγουν ισχυρές ροές νετρονίων ή έχουν πρόσβαση σε πυρηνικό αντιδραστήρα. Υπάρχουν, ωστόσο, και

εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης με διμερείς ισοτοπικές πηγές νετρονίων. Το βασικό πλεονέκτημα που παρέχει η ενεργοποίηση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες είναι οι υψηλές ροές νετρονίων της τάξης των  $10^{14} - 10^{18}$  n/(cm<sup>2</sup>·sec), έναντι των ισοτοπικών πηγών νετρονίων, οι οποίες έχουν σαφώς περιορισμένες δυνατότητες, εκπέμποντας περί τα  $10^6 - 10^7$  n/(sec·Ci). Υψηλή ροή νετρονίων οδηγεί σε υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας των προϊόντων ενεργοποίησης και συνεπώς σε καλύτερες δυνατότητες ανίχνευσης. Από την άλλη πλευρά, το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης ισοτοπικών πηγών νετρονίων (Instrumental Neutron Activation Analysis – I.N.A.A.) είναι η σταθερή ροή των νετρονίων. Επιπλέον, με τη χρήση πηγών νετρονίων αποφεύγεται η καταστροφή του δείγματος που συχνά παρατηρείται σε ακτινοβολήσεις με υψηλές ροές και γίνεται εφικτή η εφαρμογή της μεθόδου σε απλούστερες εγκαταστάσεις με μικρότερες απαιτήσεις θωράκισης.

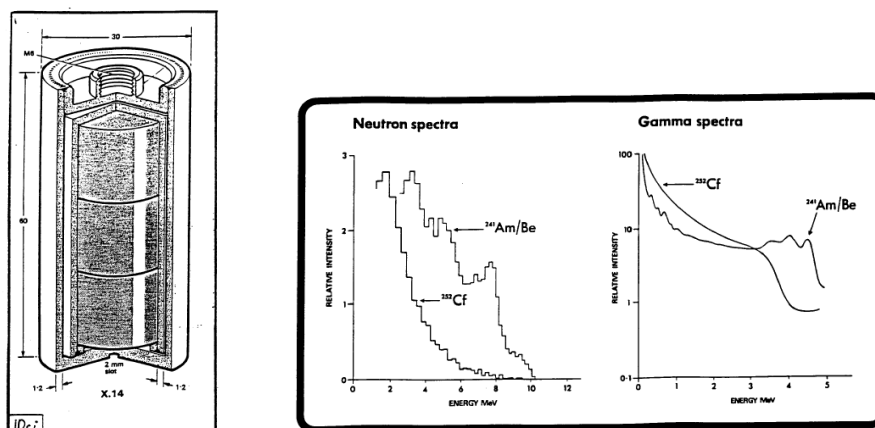
Σε ορισμένες περιπτώσεις, με σκοπό τη βελτίωση των κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης των ιχνοστοιχείων, η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης συνδυάζεται με χημικές διεργασίες για την απομόνωση ή τον εμπλουτισμό του στοιχείου που ενδιαφέρει. Η χημική επεξεργασία μπορεί να προηγείται της ενεργοποίησης (Sun, et al., 1999), ή να έπεται (Schwarzer, et al., 2000). Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως «Ανάλυση με Ραδιοχημική Νετρονική Ενεργοποίηση» (Radiochemical Neutron Activation Analysis- R.N.A.A.), (Kruger, 1971).

Τα πρώτα πειράματα νετρονικής ενεργοποίησης αναφέρονται στη δεκαετία 1940. Με την παράλληλη ανάπτυξη της φασματοσκοπίας των ακτίνων-γ, η μέθοδος εξελίχθηκε γρήγορα, με αποτέλεσμα σήμερα να είναι καθιερωμένη μέθοδος ανάλυσης. Η νετρονική ενεργοποίηση βρίσκει εφαρμογές σε μεγάλη ποικιλία δειγμάτων όπως: περιβαλλοντικά (Bem, et al., 2003), γεωλογικά, ορυκτά, βράχοι, μέταλλα, λάβα ηφαιστειών (Sroog, 2003), χλωρίδας (Djingova, et al., 1999), τρόφιμα, βιολογικά δείγματα όπως: αίμα, ιστοί, τρίχες, δόντια, κόκαλα (Pazirandeh, et al., 1998), δείγματα βιομηχανικών προϊόντων, κράματα, κεραμικά, ύαλοι, οργανικά υλικά καθώς και υλικά από άνθρακα και βόριο (Killick, et al., 1962), αλλά και δείγματα αρχαιολογικών και ιστορικών ερευνών (Zamudio-Zamudio, et al., 2003). Λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση της μεθόδου μπορεί να αναζητηθεί σε άλλη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008), η οποία ξεκινά από τις απαρχές της νετρονικής

ενεργοποίησης και φθάνει σε πιο σύγχρονες εφαρμογές και δημοσιεύσεις που έχουν να κάνουν με την ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων και άλλες εφαρμογές της μεθόδου, όπως στην ιατρική και στην αρχαιολογία.

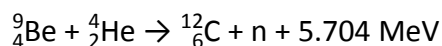
### 8.2.1 Η νετρονική ενεργοποίηση στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η διάταξη ενεργοποίησης με θερμικά νετρόνια του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. περιλαμβάνει διμερή ισοτοπική πηγή νετρονίων,  $^{241}\text{Am-Be}$ , ενεργότητας 10 Ci ( $2.2 \times 10^7 \text{ n/s} \pm 10\%$ ), την οποία προμηθεύτηκε το Εργαστήριο στα μέσα της δεκαετίας του 1970 από την εταιρεία Amersham International Limited. Στην Εικόνα 8.1 παρουσιάζεται η κάψουλα που περιέχει την πηγή, με κωδικό AMN.25, καθώς και τυπικά φάσματα νετρονίων και φωτονίων αυτού του τύπου ισοτοπικής πηγής όπως δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία (Amersham, 1976).



Εικόνα 8.1: Η κάψουλα που περιέχει την πηγή  $^{241}\text{Am/Be}$  (αριστερά) και τυπικά φάσματα νετρονίων και φωτονίων της πηγής (δεξιά) [Amersham, 1976].

Η εκπομπή των νετρονίων από τη διμερή πηγή  $^{241}\text{Am-Be}$ , επιτυγχάνεται χάρη στην αντίδραση των σωματιδίων-α που εκπέμπονται από το  $^{241}\text{Am}$  με τους πυρήνες του  $^9\text{Be}$ , από την οποία προκύπτουν πυρήνες  $^{12}\text{C}$ , νετρόνια και εκλύεται ενέργεια, σύμφωνα με την αντίδραση:

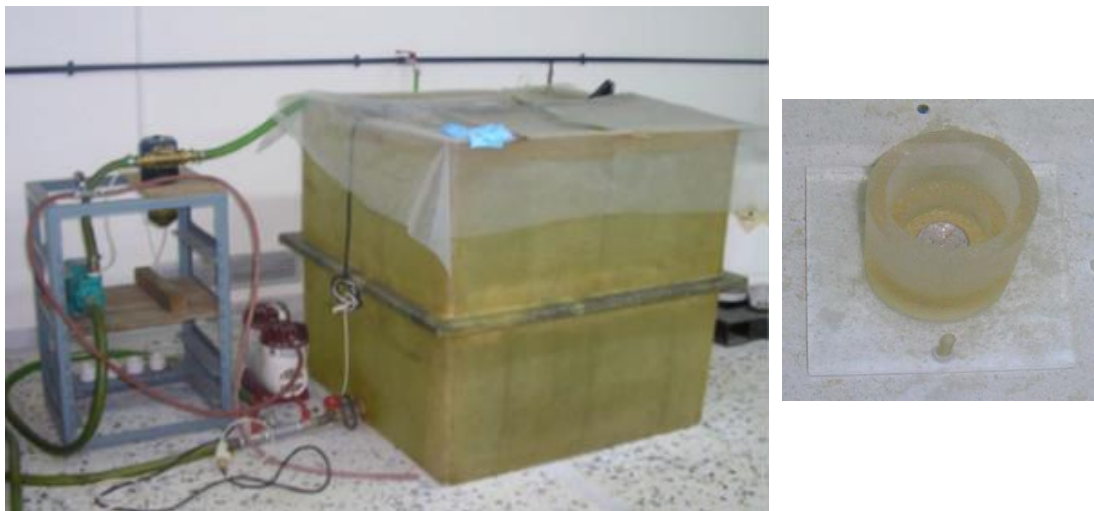


Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η πηγή είναι κατάλληλη για εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης, τόσο με ταχέα νετρόνια μέσω των αντιδράσεων (n, γ), (n, α), (n, ρ) και (n, n', γ), όσο και με θερμικά νετρόνια μέσω των αντιδράσεων (n, γ). Για ενεργοποίηση με θερμικά νετρόνια προτείνονται από την εταιρεία πηγές  $^{241}\text{Am-Be}$  από 1 – 100 Ci, που μπορούν να δώσουν επίπεδα ανίχνευσης της τάξης του 1 ppm, ενώ αντίστοιχα για ενεργοποίηση με ταχέα νετρόνια προτείνονται πηγές από



10 – 100 Ci, οι οποίες μπορούν να δώσουν επίπεδα ανίχνευσης της τάξης των 100 ppm. Μικρότερες πηγές 1 – 10 Ci προτείνονται για αναλύσεις σε επίπεδο (%), για χονδρικούς ελέγχους και για την *in vivo* ενεργοποίηση ανθρώπινων ζωτικών οργάνων ή όλου του σώματος, με στόχο τον προσδιορισμό αζώτου ή ασβεστίου σε οστά ασθενών (Amersham, 1976).

Η πηγή  $^{241}\text{Am-Be}$  του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. για λόγους θωράκισης βρίσκεται στο κέντρο πολυεστερικής δεξαμενής, διαστάσεων 1 x 1 x 1 m, που περιέχει ελαφρύ νερό (Εικόνα 8.2), η οποία παρέχει επαρκή θωράκιση, σύμφωνα και με έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. αναφορικά με την εξασθένηση των νετρονίων (Simopoulos, et al., 1981), (Simopoulos, et al., 1982). Το προς ακτινοβόληση δείγμα συσκευάζεται μέσα σε πλαστικό κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 30 mm και όγκου 6.3 mL, το οποίο τοποθετείται σε απόσταση 41.5 mm από την πηγή νετρονίων, σε ειδική βάση από plexiglass. (Εικόνα 8.2). Ο σχετικά μικρός όγκος του προς ακτινοβόληση δείγματος εξασφαλίζει ότι ακτινοβολείται όλη η μάζα του δείγματος και ότι η αυτοαπορρόφηση στο ακτινοβολημένο δείγμα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη διάταξη ενεργοποίησης δίδονται σε σχετική Διδακτορική Διατριβή (Ρούνη, 2008).



**Εικόνα 8.2:** Η δεξαμενή τοποθέτησης της πηγής νετρονίων (αριστερά) και η βάση στερέωσης της πηγής νετρονίων εντός της δεξαμενής (δεξιά).

## 8.2.2 Βαθμονόμηση της διάταξης νετρονικής ενεργοποίησης στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Η βαθμονόμηση της διάταξης νετρονικής ενεργοποίησης του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. έχει αρχικά πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο προηγούμενης Δ.Δ. (Ρούνη, 2008). Στην εργασία αυτή είχαν χρησιμοποιηθεί πρότυπα υλικά αναφοράς, τα οποία είχαν ενεργοποιηθεί και αναλυθεί υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες με τα προς ανάλυση δείγματα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου βαθμονόμησης είναι το υλικό (matrix) του προτύπου αναφοράς να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στο υλικό του δείγματος. Με αυτόν τον τρόπο βαθμονόμησης απαλείφεται η ανάγκη προσδιορισμού των παραμέτρων της ενεργοποίησης και ανάλυσης (π.χ. ροή νετρονίων, μικροσκοπική ενεργός διατομή κλπ), που μπορεί να παρουσιάζει δυσκολίες και εισάγει μία σειρά από αβεβαιότητες. Τα πρότυπα υλικά αναφοράς που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι υλικά γνωστής και πιστοποιημένης συγκέντρωσης, όπως χώμα, χλωρίδα, φίλτρα ή υγρά παρασκευάσματα, που παρασκευάζονται και διατίθενται από Ερευνητικά Κέντρα και Διεθνείς Οργανισμούς για βαθμονομήσεις και ελέγχους μεθόδων.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου βαθμονόμησης απλοποιεί κατά πολύ τον υπολογισμό της μάζας και κατά συνέπεια και της συγκέντρωσης του στοιχείου που ανιχνεύεται. Πιο συγκεκριμένα, η μάζα του στοιχείου στο πρότυπο υλικό αναφοράς και στο υπό ανάλυση δείγμα, δίνεται από την εξής σχέση (Ρούνη, 2008):

$$m = \frac{\text{cps}}{\text{eff} \cdot \text{yield} \cdot e^{-\lambda \cdot t_d}} \cdot \frac{AB}{N_A \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot \theta \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})} \quad \text{Σχέση (8.1)}$$

όπου:

cps: είναι ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας E,

$\lambda$ : είναι η σταθερά διάσπασης του ισότοπου που ενεργοποιείται,

eff: είναι η απόδοση του ανιχνευτή γερμανίου για τη συγκεκριμένη ενέργεια E,

yield: είναι το ποσοστό εκπομπής φωτονίων ενέργειας E,

$t_d$ : είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το πέρας της ενεργοποίησης μέχρι την έναρξη της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης,

AB: είναι το ατομικό βάρος του στοιχείου που αναλύεται,

$N_A$ : είναι ο αριθμός Avogadro,

- φ: είναι η ροή νετρονίων, σε νετρόνια ανά m<sup>2</sup>/sec,  
 σ: είναι η μικροσκοπική ενεργός διατομή σε μονάδες επιφάνειας (m<sup>2</sup>),  
 θ: είναι η φυσική ισοτοπική αναλογία του ισότοπου που ενεργοποιείται, και  
 t: είναι η διάρκεια ακτινοβολήσης.

Με την παραδοχή ότι το πρότυπο αναφοράς και το άγνωστο δείγμα ενεργοποιήθηκαν και αναλύθηκαν υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες και για τον ίδιο χρόνο, προκύπτει ότι η μάζα του στοιχείου στο άγνωστο δείγμα συνδέεται με τη μάζα του στο πρότυπο αναφοράς με τη σχέση:

$$\frac{m_{(\delta)}}{m_{(ST)}} = \frac{cps_{(\delta)}}{cps_{(ST)}} \quad \text{Σχέση (8.2)}$$

Τονίζεται ότι η Σχέση (8.2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εφόσον όλοι οι παράγοντες που απαλείφονται στη Σχέση (8.1) παραμένουν σταθεροί κατά την ενεργοποίηση και την ανάλυση προτύπου αναφοράς και του άγνωστου δείγματος. Σε περίπτωση που κάποιες από αυτές τις συνθήκες μεταβάλλονται πρέπει να γίνονται διορθώσεις με κατάλληλους συντελεστές (Ρούνη, 2008).

Επεκτείνοντας τη Σχέση (8.2), για καθένα από τα στοιχεία που ανιχνεύονται στο ενεργοποιημένο δείγμα, μπορεί να υπολογιστεί ο *συντελεστής βαθμονόμησης* λ:

$$\lambda = \frac{cps_{ST}}{m(gr_{ST})} \quad \text{Σχέση (8.3)}$$

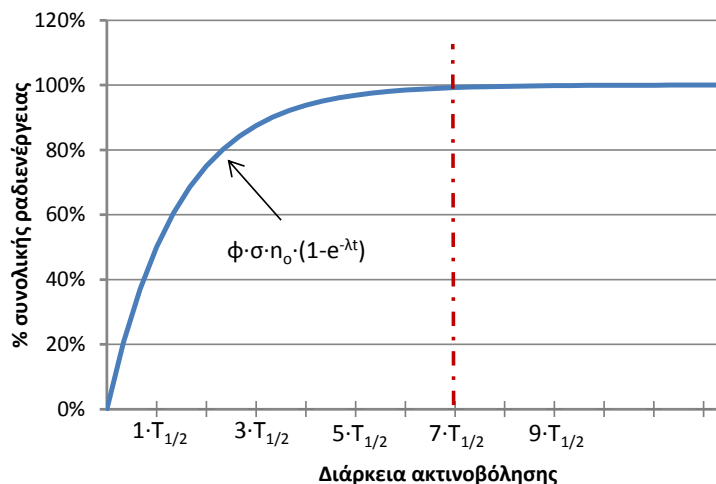
Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της άγνωστης μάζας του στοιχείου στο αναλυόμενο δείγμα. Εάν το δείγμα βαθμονόμησης και το άγνωστο δείγμα έχουν την ίδια μάζα, τότε στη Σχέση (8.2) η μάζα του στοιχείου μπορεί να αντικατασταθεί από τη συγκέντρωσή του, C:

$$\lambda = \frac{cps_{ST}}{C(ppm_{ST})} \quad \text{Σχέση (8.4)}$$

### 8.2.3 Ακτινοβολήση δειγμάτων στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου της νετρονικής ενεργοποίησης, η διάρκεια ακτινοβολήσης παίζει σημαντικό ρόλο για την ανίχνευση των στοιχείων που περιέχονται σε ένα δείγμα, και όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ακτινοβολήσης τόσο χαμηλότερα επίπεδα ανίχνευσης επιτυγχάνονται. Πάντως, δεν έχει νόημα η ακτινοβολήση να υπερβαίνει τους 6 – 7 χρόνους ημιζωής του παραγόμενου από την

ακτινοβόληση ραδιενεργού ισότοπου, καθώς μετά το οριακό αυτό σημείο (κορεσμός), ο ρυθμός παραγωγής του είναι ίσος με το ρυθμό κατανάλωσης λόγω ραδιενεργού διάσπασης και δεν αυξάνεται το πλήθος των ενεργοποιημένων πυρήνων στο δείγμα (Εικόνα 8.3).



Εικόνα 8.3: Ραδιενέργεια ισότοπου που παράγεται κατά την νετρονική ενεργοποίηση.

Συνήθως, κατά τη νετρονική ενεργοποίηση ενδιαφέρει η ανίχνευση και ο προσδιορισμός περισσότερων του ενός στοιχείων, τα οποία μπορεί να έχουν χρόνους ημιζωής που διαφέρουν τάξεις μεγέθους. Στην περίπτωση αυτή πολύ μεγάλοι χρόνοι ακτινοβόλησης μπορεί να είναι σε βάρος της ανίχνευσης των βραχύβιων ισότοπων που παράγονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, ενώ η ραδιενέργεια των βραχύβιων ισότοπων δεν αυξάνει με το χρόνο μετά από ένα όριο, το συνεχές υπόστρωμα που οφείλεται στα μακρόβια ισότοπα που παράγονται αυξάνει, δημιουργώντας ενδεχομένως δυσμενέστερες συνθήκες ανίχνευσης για τα βραχύβια. Για αυτό το λόγο, σε πολλές εφαρμογές ακολουθείται διαφορετικό σενάριο για την ανίχνευση των μακρόβιων ισότοπων, από ότι για την ανίχνευση των βραχύβιων. Στη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) μελετήθηκαν διάφορα σενάρια ακτινοβόλησης και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 8.1. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά από πρότυπα υλικά (Standard Reference Materials). Η διάρκεια ενεργοποίησης κυμαίνονταν από 4–7 ημέρες, ενώ η γ-φασματοσκοπική ανάλυση που έγινε σε ανιχνευτική διάταξη HPGe (rel. eff. 33.8%) είχε διάρκεια έως και 7 ημέρες. Η μεγάλη διάρκεια ακτινοβόλησης ήταν αναγκαία εξαιτίας της χαμηλής ροής νετρονίων από την ισοτοπική πηγή  $^{241}\text{Am-Be}$

$(2.2 \times 10^7 \text{ n/s})^{179}$ . Πάντως, πρέπει να επισημανθεί ότι η αυστηρή τήρηση χρονικά των σεναρίων στην ενεργοποίηση, αλλά και την εν συνεχεία γ-φασματοσκοπική ανάλυση παίζει σημαντικό ρόλο για τον ακριβή προσδιορισμό των στοιχείων και ιχνοστοιχείων που ανιχνεύονται, ιδιαίτερα μάλιστα όταν ο προσδιορισμός γίνεται από βραχύβια ισότοπα.

Standard Reference Material	Μάζα (gr)	Διάρκεια ενεργοποίησης (h)	Διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (sec)
Coal Fly Ash 1633b	5.95	110.5	3476 έως 105244
San Joaquin Soil 2709	6.50	159.0	3562 έως 13412
Montana Soil 2710	5.80	110.5	3484 έως 312599
Montana Soil 2711	6.50	159.0	3700 έως 65467

Πίνακας 8.1: Σενάρια ακτινοβόλησης-ανάλυσης Δ.Δ. (Ρούνη, 2008).

Από τις αναλύσεις που είχαν γίνει στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) είχε διαπιστωθεί ότι πολλές από τις φωτοκορυφές των προϊόντων της νετρονικής ενεργοποίησης δεν ήταν δυνατό να σχηματισθούν με ικανοποιητική αβεβαιότητα (< 10%, 1σ) με τα σενάρια ενεργοποίησης και ανάλυσης που ακολουθήθηκαν. Αυτό είχε αποδοθεί στη χαμηλή ροή νετρονίων και στη σχετικά χαμηλή απόδοση του ανιχνευτή HPGe που είχε χρησιμοποιηθεί. Ανίχνευση και ποσοτικός προσδιορισμός είχε καταστεί δυνατός για τα εξής στοιχεία: As, Sb, Zn, Mn, Na, K, Al, για τα οποία και υπολογίστηκαν συντελεστές βαθμονόμησης για κάθε τύπο δείγματος που διατίθετο πρότυπο (χώμα και ιπτάμενη τέφρα). Για τον υπολογισμό των συντελεστών αυτών για το χώμα, είχαν χρησιμοποιηθεί τα αποτελέσματα των αναλύσεων του πρότυπου χώματος Montana Soil 2710 για τα στοιχεία As, Sb, Zn, Mn, Na, K και του πρότυπου χώματος San Joaquin Soil 2709 για το Al (Ρούνη, 2008). Στον Πίνακα 8.2 δίνονται οι συντελεστές αυτοί, συνοδευόμενοι από τις αβεβαιότητές τους, όπως αυτές προκύπτουν μόνο από την αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής στο φάσμα βαθμονόμησης. Η προσέγγιση αυτή είχε θεωρηθεί ικανοποιητική, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις οι αβεβαιότητες αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες που αναφέρονται στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης.

<sup>179</sup> Ανάλογες ακτινοβολήσεις σε ροές νετρονίων πυρηνικού αντιδραστήρα μπορεί να έχουν διάρκεια μερικών λεπτών ή και δευτερολέπτων.

Υλικό	Στοιχείο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (sec)	Συντελεστής βαθμονόμησης λ (ppm/cps)
Χώμα 2709	Al	1779.8	3562	1599701 ± 26%
Χώμα 2710	As	559.1 <sup>c</sup>	48180	7070 ± 7%
	Sb	564.1 <sup>c</sup>	312599	18933 ± 21%
	Zn	1115.5	312599	585750 ± 19%
	Mn	846.6 <sup>c</sup>	6973	1361 ± 1%
	Na	1368.6 <sup>c</sup>	48180	27805 ± 1%
	K	1524.7	48180	1674791 ± 19%
Ιπτάμενη τέφρα 1633b	As	559.1 <sup>c</sup>	48199	8482 ± 155
	Al	1779.8	3476	2724677 ± 19%
	Mn	846.6 <sup>c</sup>	10652	1081 ± 10%
	Na	1368.6 <sup>c</sup>	48199	22499 ± 3%
	K	1524.7	48199	1800537 ± 15%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.2:** Συντελεστές βαθμονόμησης για τον ανιχνευτή HPGe-33% (Ρούνη, 2008).

Με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας ανίχνευσης περισσότερων στοιχείων και τη βελτίωση των επιπέδων ανίχνευσης, είχε δοκιμασθεί και η χρήση του ανιχνευτή XtRa σε εφαρμογή νετρονικής ενεργοποίησης, πριν από την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression. Για το σκοπό αυτό είχε ακτινοβοληθεί και αναλυθεί το πρότυπο υλικό Montana Soil 2710, ακολουθώντας σενάριο ενεργοποίησης 116 h. Όσον αφορά στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση είχε ακολουθηθεί η διαδικασία καταγραφής φασμάτων ανά δίωρο για το πρώτο 12ωρο και ανά 24ωρο στη συνέχεια. Οι συντελεστές βαθμονόμησης που είχαν προκύψει για την περίπτωση αυτή παρατίθενται στον Πίνακα 8.3, συνοδευόμενοι από αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ.

Υλικό	Στοιχείο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (sec)	Συντελεστής βαθμονόμησης λ (ppm/cps)
Χώμα	As	559.1 <sup>c</sup>	451013	11930 ± 4%
	Sb	564.1 <sup>c</sup>	451013	6763 ± 10%
	Zn	1115.5	451013	3938998 ± 22%
	Mn	846.6 <sup>c</sup>	451013	18903 ± 8%
	Na	1368.6 <sup>c</sup>	451013	52152 ± 1%
	K	1524.7	451013	2819666 ± 10%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.3:** Συντελεστές βαθμονόμησης για τον ανιχνευτή XtRa (Ρούνη, 2008).

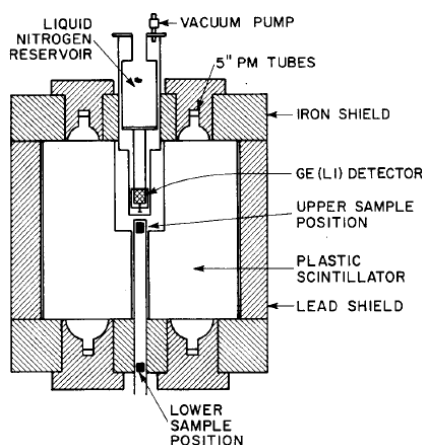
Όπως είχε διαπιστωθεί, με χρήση του ανιχνευτή XtRa και με αύξηση της διάρκειας της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, είχε επιτευχθεί βελτίωση έναντι του ανιχνευτή HPGe 33% στην ανίχνευση των στοιχείων του Πίνακα 8.3, σε όρους

αβεβαιότητας και κατώτερου επιπέδου ανίχνευσης, χωρίς όμως να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός επιπλέον στοιχείων<sup>180</sup>.

Στόχος της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. είναι η διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης των παραπάνω αποτελεσμάτων, τόσο σε πλήθος ανιχνευόμενων στοιχείων και αβεβαιοτήτων προσδιορισμού, όσο και σε όρους κατώτερων επιπέδων ανίχνευσης, με χρήση της διάταξης XtRa - CSS, και ενδεχομένως με εφαρμογή νέων σεναρίων ακτινοβόλησης – ανάλυσης.

### 8.3 Συστήματα Compton Suppression για εφαρμογές Νετρονικής Ενεργοποίησης

Η χρήση συστημάτων Compton Suppression στη νετρονική ενεργοποίηση ξεκίνησε όταν οι (Cooper, et al., 1967) κατασκεύασαν ένα τέτοιο σύστημα περιβάλλοντας έναν ανιχνευτή Ge(Li) όγκου 35 cm<sup>3</sup> με έναν πλαστικό σπινθηριστή διαμέτρου 46 cm και ύψους 46 cm (Εικόνα 8.4). Με αυτή τη διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε συστηματικά για νετρονική ενεργοποίηση, το συνεχές υπόστρωμα πηγής <sup>137</sup>Cs μειώθηκε 2 φορές.

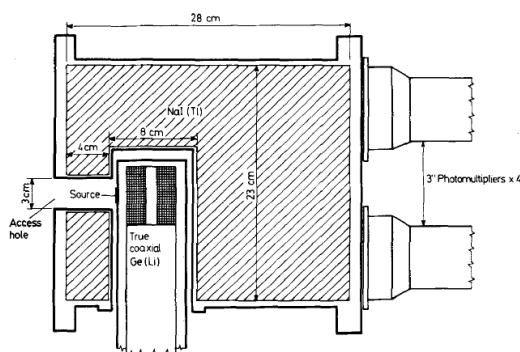


Εικόνα 8.4: Η διάταξη των (Cooper, et al., 1967).

Νεότερες εφαρμογές περιελάμβαναν τη χρήση δευτερευόντων ανιχνευτών σπινθηρισμού NaI(Tl). Οι (Murata, et al., 1977) ανέφεραν ένα αρκετά αυτοματοποιημένο σύστημα για νετρονική ενεργοποίηση. Ο πρωτεύων ανιχνευτής

<sup>180</sup> Σύμφωνα με τη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008), με νετρονική ενεργοποίηση διάρκειας 4 ημερών και ανάλυση των δειγμάτων στον ανιχνευτή HPGe-33% για 3–10 h, επιτυγχάνονται χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης για πολύ σημαντικά, λόγω τοξικότητας, στοιχεία, όπως As (25ppm), Sb (16ppm) και Mn (28ppm). Με ανάλυση των δειγμάτων στον ανιχνευτή XtRa και με αύξηση της διάρκειας ανάλυσης το ελάχιστο όριο ανίχνευσης των στοιχείων αυτών μειώνεται κατά 50%.

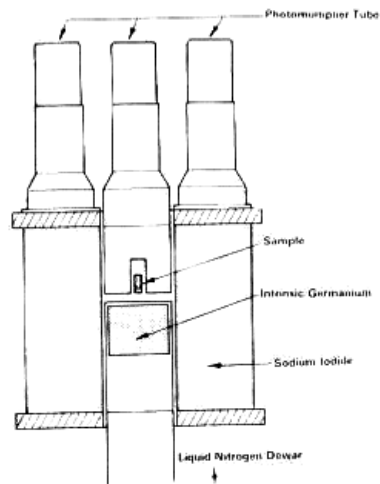
ήταν ένας ανιχνευτής Ge(Li) σχετικής απόδοσης 10%, η ενεργητική θωράκιση ήταν ένας ανιχνευτής NaI(Tl) τύπου φρέατος (well type) διαστάσεων  $15 \times 15$  cm και ολόκληρο το σύστημα βρισκόταν μέσα σε θωράκιση από ασάλι και μόλυβδο. Σκοπός τους ήταν η ανίχνευση των ισοτόπων  $^{51}\text{Ti}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{66}\text{Cu}$ ,  $^{52}\text{V}$  και  $^{25}\text{Al}$  κατά την ανάλυση φίλτρων αέρα. Οι (Klie, et al., 1982), με στόχο την ανίχνευση Θείου στον γαιάνθρακα μέσω νετρονικής ενεργοποίησης χρησιμοποίησαν νετρόνια ενέργειας 14 MeV και ανιχνευτική διάταξη με έναν μεγάλο ανιχνευτή Ge(Li) και μία ενεργητική θωράκιση NaI(Tl). Την ίδια χρονιά οι (Ledingham, et al., 1982) εφάρμοσαν την τεχνική της νετρονικής ενεργοποίησης με ένα σύστημα Compton Suppression, για την ακτινοβολήση και ανάλυση προτύπων υλικών (γαιανθράκων και τεφρών) από το Εθνικό Γραφείο Προτύπων Υλικών των Η.Π.Α. (National Bureau of Standards – N.B.S.). Η διάταξη που χρησιμοποίησαν παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.5, με το δείγμα να τοποθετείται στο πλάι ανιχνευτή Ge(Li) σχετικής απόδοσης 19%. Ο δευτερεύων ανιχνευτής ήταν ένας δακτύλιος NaI(Tl) δύο τμημάτων διαμέτρου 28 cm και μήκους 28 cm. Η μείωση της αιχμής Compton πηγής  $^{137}\text{Cs}$  που επιτυγχάνεται με τη διάταξη αυτή εκτιμήθηκε σε  $\sim 8$  φορές, ενώ η αβεβαιότητα προσδιορισμού των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος βελτιώθηκε με το σύστημα Compton Suppression έως και 3 φορές.



Εικόνα 8.5: Η διάταξη των (Ledingham, et al., 1982).

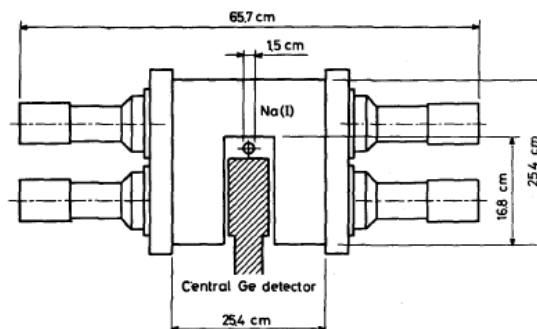
Οι (Vogt, et al., 1982) χρησιμοποίησαν ένα σύστημα Compton Suppression αποτελούμενο από έναν πρωτεύοντα ανιχνευτή Ge(Li) σχετικής απόδοσης 19% και έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή NaI(Tl) διαμέτρου 24 cm και μήκους 25 cm (δακτύλιος και plug) (Εικόνα 8.6). Το όλο σύστημα βρισκόταν στο εσωτερικό θωράκισης από μόλυβδο και φύλλα χαλκού συνολικού πάχους 10.2 cm. Η μείωση της αιχμής Compton του  $^{137}\text{Cs}$  που επετεύχθη ήταν της τάξης του 7 – 8.





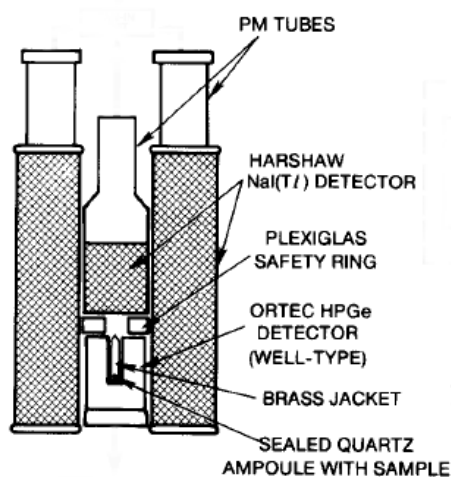
Εικόνα 8.6: Η διάταξη των (Vogt, et al., 1982).

Καθώς κατά τη νετρονική ενεργοποίηση μπορεί να προκύψουν δείγματα σχετικά υψηλής ραδιενέργειας, κατά τη χρήση συστημάτων Compton Suppression, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ενδεχόμενη μείωση φωτοκορυφών ενδιαφέροντος εξαιτίας της υψηλής συνολικής ραδιενέργειας του δείγματος και του φαινομένου της τυχαίας σύμπτωσης. Ο (Millard, 1984) διερεύνησε την επίδραση του ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων στην ανάλυση ενεργοποιημένων δειγμάτων σε σύστημα Compton Suppression και κατέληξε ότι για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των αναλύσεων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του υψηλού ρυθμού καταμέτρησης των φωτονίων. Μια άλλη λεπτομερής εργασία πάνω στην ακρίβεια και τα όρια ανίχνευσης τεχνικών νετρονικής ενεργοποίησης που περιλαμβάνουν τη χρήση συστήματος Compton Suppression είναι εκείνη του (Das, 1986), ο οποίος χρησιμοποίησε μία διάταξη με πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 21.4%, ενεργητική θωράκιση κυλινδρικό ανιχνευτή NaI(Tl) 25 × 25 cm (Εικόνα 8.7) και παθητική θωράκιση από 5 cm μολύβδου με φύλλα καδμίου και χαλκού.



Εικόνα 8.7: Η διάταξη του (Das, 1986).

Οι (Cumming, et al., 1988) παρουσίασαν μια άλλη προσέγγιση για την ανίχνευση του Ιριδίου<sup>181</sup>, μέσω χρήσης συστήματος Compton Suppression. Η διάταξή τους αποτελείται από έναν πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 25.5% και έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή NaI(Tl) (δακτυλιοειδής και plug, Εικόνα 8.8). Δεδομένου ότι το <sup>192</sup>Ir εκπέμπει πλήθος φωτονίων σε σειρά και επομένως αναμένεται η χρήση του συστήματος Compton Suppression να επηρεάσει, εκτός από το υπόστρωμα, και τις ίδιες τις φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης, χρησιμοποίησαν για την ανάλυσή του και τις αθροιστικές φωτοκορυφές οι οποίες προκύπτουν στο φάσμα, επιτρέποντας έτσι τον προσδιορισμό τόσο υψηλών συγκεντρώσεων Ιριδίου (ppm) όσο και χαμηλών (ppb). Η ευαισθησία της μεθόδου αυτής βρέθηκε να είναι περί τα 5 ppb Ιριδίου. Η εργασία αυτή αργότερα επεκτάθηκε σε διάφορα υλικά (Murali, et al., 1990).



Εικόνα 8.8: Η διάταξη των (Cumming, et al., 1988).

Οι (Roszbach, et al., 1990) μελετώντας τη χρήση συστημάτων Compton Suppression για τον προσδιορισμό ιχνοστοιχείων σε βιολογικά δείγματα, σημείωσαν ότι το υψηλό κόστος ενός τέτοιου συστήματος, σε σύγκριση με τις συμβατικές διατάξεις γ-φασματοσκοπίας, αντισταθμίζεται από τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου ανάλυσης, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη στατιστική. Η εργασία τους κατέληξε ότι ένα σύστημα Compton Suppression μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της ανίχνευσης 36 στοιχείων<sup>182</sup>.

<sup>181</sup> Συνήθως προσδιορίζεται με νετρονική ενεργοποίηση χημικά επεξεργασμένου δείγματος (Radiochemical Neutron Activation Analysis – RNAA),

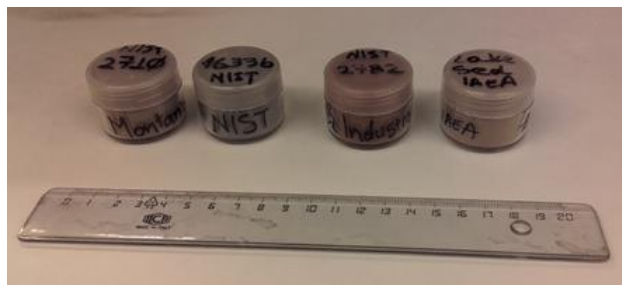
<sup>182</sup> Στις περισσότερες περιπτώσεις βελτίωσης το προϊόν της νετρονικής ενεργοποίησης ήταν μονοενεργειακό ισότοπο.

## 8.4 Εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. εφαρμόστηκε η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης, με χρήση της διάταξης XtRa - CSS, με σκοπό την ανίχνευση περισσότερων ιχνοστοιχείων και τη βελτίωση της ακρίβειας και των επιπέδων ανίχνευσης, σε σχέση με αυτά που περιγράφονται στην Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) (Παράγραφος 8.2.3).

Στο σύνολο ακτινοβολήθηκαν και αναλύθηκαν τα παρακάτω υλικά (τα αντίστοιχα δείγματα φαίνονται στην Εικόνα 8.9):

- Montana Soil 2710: πρότυπο δείγμα χώματος, πιστοποιημένο από το N.I.S.T.
- Fly ash 1633b: πρότυπο δείγμα υπτάμενης τέφρας, πιστοποιημένο από το N.I.S.T.
- Industrial Sludge 2782: πρότυπο δείγμα βιομηχανικής ιλύος, πιστοποιημένο από το N.I.S.T.
- Lake sediment SL-1: πρότυπο δείγμα ιζήματος από λίμνη, πιστοποιημένο από το Δ.Ο.Α.Ε.



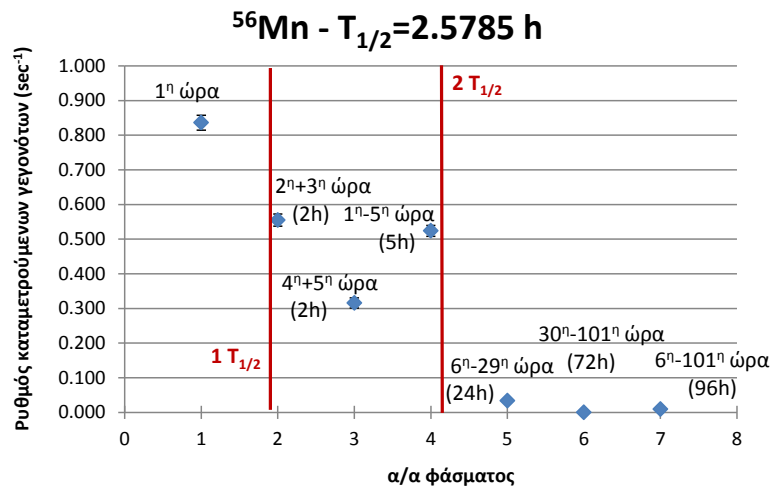
Εικόνα 8.9: Δείγματα νετρονικής ενεργοποίησης.

Το σενάριο ακτινοβολήσης – ανάλυσης που επιλέχθηκε για τα μακρόβια ισότοπα αποτελεί βελτίωση του σεναρίου της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) και περιλαμβάνει:

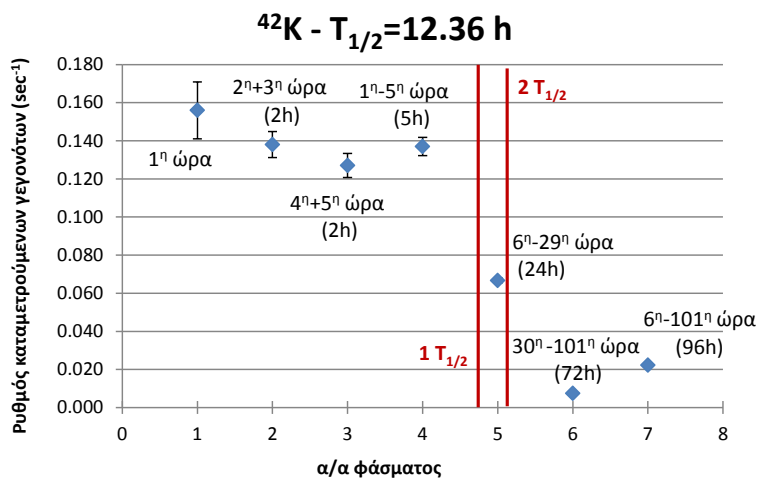
- Ακτινοβολήση του δείγματος για χρονικό διάστημα ίσο με 110.5 h
- Λήψη διαδοχικών φασμάτων<sup>183</sup> με χρονική διάρκεια 1 h, 2 h, 2 h, 24 h και 72 h, με μηδενισμό του προηγούμενου φάσματος κάθε φορά. Η συλλογή περισσότερων του ενός φασμάτων επιλέχθηκε γιατί τα φάσματα μικρής διάρκειας δίνουν καλύτερη στατιστική για τα βραχύβια ισότοπα, ενώ τα φάσματα μεγαλύτερης διάρκειας πλεονεκτούν για τα μακρόβια ισότοπα.

<sup>183</sup> Για λειτουργικούς λόγους η έναρξη της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ξεκινά 1 min μετά το πέρας της ακτινοβολήσης.

Επιπλέον, μελετήθηκε η σύνθεση των φασμάτων των πρώτων ωρών (αθροίζοντας ανά κανάλι, ώστε να προκύψει ένα φάσμα 5 h) και η σύνθεση των δύο επόμενων μεγαλύτερων φασμάτων (αθροίζοντας ανά κανάλι, ώστε να προκύψει ένα φάσμα 96 h) με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σεναρίου ανάλυσης, ώστε να ανιχνεύονται όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία σε όσο το δυνατό λιγότερες αναλύσεις με την καλύτερη στατιστική. Στις Εικόνες 8.10 και 8.11 δίνονται υπό τη μορφή διαγράμματος δύο παράδειγμα της κύμανσης του ρυθμού καταγραφής φωτονίων και της αντίστοιχης αβεβαιότητας για δύο ισότοπα:  $^{56}\text{Mn}$  και  $^{42}\text{K}$ . Με βάση αυτή την κύμανση επιλέγεται το σενάριο όπου ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων είναι επαρκώς υψηλός και η αβεβαιότητα (1σ) επαρκώς χαμηλή.



Εικόνα 8.10: Κύμανση του ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων και της αντίστοιχης αβεβαιότητας στα διάφορα σενάρια ανάλυσης για το  $^{56}\text{Mn}$ .



Εικόνα 8.11: Κύμανση του ρυθμού καταμέτρησης φωτονίων και της αντίστοιχης αβεβαιότητας στα διάφορα σενάρια ανάλυσης για το  $^{42}\text{K}$ .

Επιπλέον του σεναρίου μεγάλης διάρκειας επιλέχθηκε να ενεργοποιηθούν τα δείγματα και για ένα σύντομο σενάριο που αποσκοπεί στην ανίχνευση βραχύβιων ισοτόπων το οποίο περιλαμβάνει:

- ενεργοποίηση των δειγμάτων για 1 h
- γ-φασματοσκοπική ανάλυση για 15 min<sup>184</sup>

Όλες οι αναλύσεις και των δύο σεναρίων πραγματοποιήθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS και λήφθηκαν τόσο το unsuppressed όσο και το suppressed φάσμα. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται για κάθε ένα από τα πρότυπα δείγματα που ακτινοβολήθηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων και για τα δύο σενάρια ακτινοβολήσης.

#### **8.4.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2710**

Το πρότυπο υλικό με κωδικό N.I.S.T. Montana Soil 2710 (κωδική ονομασία 2710) είναι χώμα με υψηλά επίπεδα ρύπανσης που έχει συλλεχθεί από τον όρμο Silver Bow Creek στην περιοχή Bute της Μοντάνα των Η.Π.Α. Λόγω συχνών πλημμυρών στην περιοχή, αναφέρεται η απόθεση φερτών υλικών με υψηλές συγκεντρώσεις σε χαλκό, μαγγάνιο και ψευδάργυρο. Στο πιστοποιητικό του πρότυπου υλικού, που δίνεται στο Παράρτημα Δ, εκτός από τις πιστοποιημένες συγκεντρώσεις που δίνονται για μία σειρά στοιχείων, δίνονται και μη-πιστοποιημένες τιμές (non certified values) για ορισμένα άλλα. Οι τιμές αυτές δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για βαθμονομήσεις ή έλεγχο ποιότητας. Στο πλαίσιο της παρούσας παραγράφου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για όλα τα στοιχεία, ανεξάρτητα εάν είναι ή όχι πιστοποιημένες οι αντίστοιχες τιμές της συγκέντρωσης.

##### **8.4.1.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2710 για 1 h**

Το δείγμα χώματος Montana Soil 2710, καθαρής μάζας 23.2429 gr, ενεργοποιήθηκε για 1 h στην διάταξη νετρονικής ενεργοποίησης του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.

---

<sup>184</sup> Για λειτουργικούς λόγους η έναρξη της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ξεκινά 1 min μετά το πέρας της ακτινοβολήσης.

και στη συνέχεια αναλύθηκε στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για 900 sec<sup>185</sup>. Αυτό το σενάριο ενεργοποίησης στοχεύει στην ανίχνευση των εξής στοιχείων: Al, Mg, Mn, Ti, V. Τα πυρηνικά δεδομένα για τα ισότοπα των παραπάνω στοιχείων που παράγονται κατά την ενεργοποίησή τους δίνονται στο Παράρτημα Η, ενώ τα διαγράμματα διάσπασης στο Παράρτημα Β. Στον Πίνακα 8.4 δίνονται για κάθε ισότοπο και φωτοκορυφή ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων (counts per second, cps) με βάση τις αναλύσεις του κώδικα SPUNAL, μαζί με την αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ, για το unsuppressed και το suppressed φάσμα. Επισημαίνεται ότι ο ρυθμός υπολογίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας φωτοκορυφής προς τη διάρκεια λήψης του φάσματος και δεν είναι σταθερός κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
<sup>28</sup> Al	1778.8	1.69 ± 3.0%	1.61 ± 2.8%
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	--	--
	1014.4	0.10 ± 30.4%	0.10 ± 18.1%
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	13.5 ± 1.0%	10.6 ± 1.1%
	1811.2 <sup>c</sup>	1.97 ± 3.0%	0.65 ± 5.0%
<sup>24</sup> Na	1368.6 <sup>c</sup>	0.22 ± 18.1%	0.10 ± 18.0%
<sup>52</sup> V	1434.0	--	--
<sup>51</sup> Ti	320.0 <sup>c</sup>	--	--
	928.5 <sup>c</sup>	--	--

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.4: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Montana Soil 2710 μετά από 1 h ενεργοποίησης.**

Συγκρίνοντας τις αναλύσεις χωρίς και με τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης, παρατηρείται ότι για το <sup>28</sup>Al, το οποίο είναι μονοενεργειακό, δεν παρουσιάζεται σημαντική βελτίωση με τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης. Αντίθετα, για τα φωτόνια 1014.4 keV του <sup>27</sup>Mg, που δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλο φωτόνιο, η βελτίωση της στατιστικής είναι αξιοσημείωτη στο suppressed φάσμα.

Δεν ισχύει το ίδιο όμως για τις φωτοκορυφές του <sup>56</sup>Mn, όπου ενδείκνυται η χρήση του unsuppressed φάσματος, καθώς και για τη φωτοκορυφή του <sup>24</sup>Na, καθώς τα αντίστοιχα φωτόνια εκπέμπονται σε σειρά με άλλα φωτόνια. Ειδικότερα για το <sup>56</sup>Mn, ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων στο suppressed φάσμα είναι αισθητά μειωμένος και κατά συνέπεια η αντίστοιχη αβεβαιότητα αυξημένη.

Όσον αφορά στο Ti και στο V, η ανίχνευσή τους δεν κατέστη δυνατή.

<sup>185</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 549 – 550.

### 8.4.1.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2710 για 110.5 h

Την ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς Montana Soil 2710 για 110.5 h ακολούθησε πλήθος αναλύσεων διαφορετικής διάρκειας με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σεναρίου ανάλυσης όπου να ανιχνεύονται όσο το δυνατόν περισσότερα ισότοπα: 1 h, 2 h, 2 h, 5 h, 24 h, 72 h, 96 h<sup>186</sup>. Υπενθυμίζεται ότι τα φάσματα διάρκειας 5 h και 96 h αποτελούν επεξεργασμένα φάσματα τα οποία προέκυψαν αθροίζοντας ανά κανάλι τα προηγούμενα φάσματα 1 h, 2 h, 2 h και 24 h, 72 h, αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι τα φάσματα προς επεξεργασία είναι πολλά, στην Παράγραφο αυτή δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων μόνο για το βέλτιστο σενάριο για κάθε ισότοπο, δηλαδή το σενάριο ανάλυσης στο οποίο ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων είναι επαρκώς υψηλός και η αβεβαιότητα (1σ) επαρκώς χαμηλή (Πίνακας 8.5).

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το δείγμα Montana Soil 2710, μετά από ενεργοποίηση 110.5 h ανιχνεύεται στο φάσμα της πρώτης ώρας το βραχύβιο <sup>28</sup>Al, το οποίο όπως και στην περίπτωση της ενεργοποίησης 1 h, δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed), ενώ σε επίπεδο αβεβαιοτήτων υπερτερεί το suppressed φάσμα. Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα υπόλοιπα ισότοπα που δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, δηλαδή τα μονοενεργειακά <sup>198</sup>Au, <sup>64</sup>Cu, <sup>42</sup>K και <sup>69m</sup>Zn και τα πολυενεργειακά μεν αλλά χωρίς φωτόνια σε σειρά <sup>59</sup>Fe (που ανιχνεύεται μόνο στο suppressed φάσμα) και <sup>65</sup>Zn<sup>187</sup>. Το αντίθετο συμβαίνει για τα υπόλοιπα ισότοπα τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, όπου η ανάλυση στο suppressed φάσμα οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής και σε αύξηση των αβεβαιοτήτων. Εξάιρεση αποτελεί η φωτοκορυφή του πολυενεργειακού <sup>76</sup>As στην ενέργεια 1216.3 keV, η οποία αντιστοιχεί σε φωτόνιο που δεν εκπέμπεται σε σειρά με άλλο, με αποτέλεσμα να αναλύεται με

<sup>186</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 551 – 564.

<sup>187</sup> Αξίζει να σημειωθεί ότι η φωτοκορυφή του εν λόγω ισότοπου υπόκειται, αν και σε πολύ μικρό ποσοστό, σε summing in, φαινόμενο το οποίο αποτελεί υποπερίπτωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, αλλά δεν επιδρά στη λειτουργία του συστήματος Compton Suppression.

χαμηλότερη αβεβαιότητα στο suppressed φάσμα. Βέβαια, δεδομένου ότι το ποσοστό εκπομπής του εν λόγω φωτονίου είναι συγκριτικά μικρό (3.4% έναντι 45% του φωτονίου ενέργειας 559.1 keV), συνολικά για την ανάλυση του ισότοπου προτείνεται η χρήση του unsuppressed φάσματος.

	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια αναμονής <sup>188</sup>	Διάρκεια ανάλυσης	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
Certified values	<sup>28</sup> Al	1778.8	1 min	1 h	0.41 ± 7.6%	0.38 ± 3.9%
	<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.377 ± 1.4%	0.324 ± 1.3%
		657.0 <sup>c</sup>			0.040 ± 9.5%	0.0098 ± 10.2%
		1216.3 <sup>c</sup>			0.020 ± 24.8%	0.018 ± 6.7%
	<sup>64</sup> Cu	1345.8	5 h	24 h	0.006 ± 35.7%	0.0057 ± 17.5%
	<sup>42</sup> K	1524.7	1 min	5 h	0.14 ± 9.2%	0.142 ± 3.4%
	<sup>59</sup> Fe	1099.3	5 h	96 h	< LLD	0.0017 ± 20.2%
		1291.6			< LLD	0.0013 ± 27.3%
	<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	1 min	1 h	52.7 ± 0.2%	41.10 ± 0.2%
		1811.2 <sup>c</sup>			7.36 ± 0.8%	2.57 ± 1.2%
	<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	1 min	5 h	3.85 ± 0.5%	0.370 ± 0.4%
	<sup>122</sup> Sb	564.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.029 ± 6.2%	0.0246 ± 4.1%
<sup>65</sup> Zn	1115.5	5 h	96 h	0.0052 ± 6.9%	0.0053 ± 5.4%	
<sup>69m</sup> Zn	438.9	5 h	96 h	0.0099 ± 9.5%	0.0094 ± 5.3%	
Non-certified values	<sup>198</sup> Au	411.8	29 h	72 h	0.0055 ± 15.6%	0.0053 ± 9.5%
	<sup>152</sup> Eu	121.8 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.017 ± 19.3%	0.005 ± 34.2%
		841.6 <sup>c</sup>			0.005 ± 61.1%	0.003 ± 62.7%
		963.5 <sup>c</sup>			0.011 ± 22.7%	0.010 ± 12.2%
	<sup>72</sup> Ga	834.0 <sup>c</sup>	5 h	96 h	0.0037 ± 21.6%	0.0014 ± 31.0%
	<sup>140</sup> La <sup>189</sup>	328.8 <sup>c</sup>	29h	72 h	0.006 ± 19.1%	0.0017 ± 33.6%
		487.0 <sup>c</sup>			0.0089 ± 10.7%	0.0024 ± 13.4%
		815.0 <sup>c</sup>			0.0035 ± 19.0%	0.0014 ± 23.3%
		1596.2 <sup>c</sup>			0.008 ± 12.8%	0.0025 ± 11.9%
	<sup>46</sup> Sc <sup>190</sup>	889.3 <sup>c</sup>	29 h	72 h	0.0040 ± 19.2%	0.0018 ± 20.1%
1120.0 <sup>c</sup>		0.022 ± 5.5%			0.0062 ± 6.7%	

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.5: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Montana Soil 2710 μετά από 110.5 h ενεργοποίησης για το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης για κάθε ισότοπο.**

Υπενθυμίζεται ότι δείγμα από το υλικό Montana Soil 2710 έχει ενεργοποιηθεί στο παρελθόν στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) για 116.33 h και στη συνέχεια αναλυθεί στην ανιχνευτική διάταξη XtRa – πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression – για διάφορους χρόνους ανάλυσης. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων σε όρους ρυθμού καταγραφόμενων γεγονότων για το βέλτιστο

<sup>188</sup> Όπου διάρκεια αναμονής διάφορη του 1 min σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τυχόν φάσματα που λήφθηκαν από το πέρας της ενεργοποίησης μέχρι την έναρξη της ανάλυσης ενδιαφέροντος.

<sup>189</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>228</sup>Ac.

<sup>190</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>214</sup>Bi.



σενάριο ανάλυσης δίνονται στον Πίνακα 8.6. Όπως φαίνεται είχαν ανιχνευθεί τα ισότοπα  $^{76}\text{As}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  και  $^{69\text{m}}\text{Zn}$ . Με άλλα λόγια, με τα σενάρια ακτινοβόλησης - ανάλυσης που μελετήθηκαν στην παρούσα Δ.Δ., κατέστη δυνατή η ανίχνευση επτά επιπλέον στοιχείων / ισωτόπων και να βελτιωθεί η στατιστική ανίχνευσής τους.

	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια ανάλυσης	cps
Certified values	$^{76}\text{As}$	559.1 <sup>c</sup>	451013 sec	0.052 ± 4.0%
		657.0 <sup>c</sup>		0.005 ± 19.0%
		1216.3 <sup>c</sup>		0.003 ± 26.0%
	$^{56}\text{Mn}$	846.6 <sup>c</sup>	451013 sec	0.534 ± 0.0%
		1811.2 <sup>c</sup>		0.070 ± 2.0%
	$^{42}\text{K}$	1524.7	451013 sec	0.007 ± 10.0%
	$^{24}\text{Na}$	1368.5 <sup>c</sup>	451013 sec	0.219 ± 1.0%
	$^{122}\text{Sb}$	564.1 <sup>c</sup>	451013 sec	0.006 ± 10.0%
	$^{65}\text{Zn}$	1115.5	451013 sec	0.002 ± 22.0%
	$^{69\text{m}}\text{Zn}$	438.9	451013 sec	0.003 ± 31.0%

Πίνακας 8.6: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Montana Soil 2710 στον ανιχνευτή XtRa μετά από 116 h ενεργοποίησης από τη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008).

## 8.4.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2711

Το πρότυπο υλικό με κωδικό N.I.S.T. Montana Soil 2711 (κωδική ονομασία 2711) είναι χώμα από χωράφι σίτου μέχρι βάθους 6", με μέτριο επίπεδο ρύπανσης. Το αντίστοιχο πιστοποιητικό δίνεται στο Παράρτημα Δ. Εκτός από τις πιστοποιημένες συγκεντρώσεις, δίνονται επίσης ορισμένες μη-πιστοποιημένες τιμές (non certified values), οι οποίες δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για βαθμονομήσεις ή έλεγχο ποιότητας. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για όλα τα στοιχεία, ανεξάρτητα εάν είναι ή όχι πιστοποιημένες οι αντίστοιχες τιμές της συγκέντρωσης. Το δείγμα Montana Soil 2711 δεν περιέχει διαφορετικά στοιχεία σε σχέση με το δείγμα Montana Soil 2710, ωστόσο οι συγκεντρώσεις τους είναι σε χαμηλότερα επίπεδα.

### 8.4.2.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2711 για 1 h

Το δείγμα χώματος Montana Soil 2711, καθαρής ξηρής μάζας 23.857 gr (υγρασία 0.7%), ενεργοποιήθηκε για 1 h στη διάταξη ενεργοποίησης του Ε.Π.Τ - Ε.Μ.Π. και

στη συνέχεια αναλύθηκε στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για 900 min<sup>191</sup>. Αυτό το σενάριο ενεργοποίησης στοχεύει στην ανίχνευση των εξής στοιχείων: Al, Mg, Mn, Ti, V, όπως και στο δείγμα χώματος Montana Soil 2710. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται στον Πίνακα 8.7.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
<sup>28</sup> Al	1778.8	1.85 ± 2.8%	1.77 ± 2.7%
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	0.26 ± 6.4%	0.25 ± 7.0%
	1014.4 <sup>c</sup>	0.07 ± 33.1%	0.08 ± 16.4%
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.93 ± 3.8%	0.73 ± 4.2%
	1811.2 <sup>c</sup>	0.15 ± 9.7%	0.056 ± 16.7%
<sup>52</sup> V	1434.0	--	0.03 ± 37.3%
<sup>51</sup> Ti	320.0 <sup>c</sup>	--	--
	928.5 <sup>c</sup>	--	--

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.7: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Montana Soil 2711 μετά από 1 h ενεργοποίησης.**

Όπως και στο δείγμα Montana Soil 2710, δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση Ti, ενώ το V ανιχνεύθηκε μόνο στο suppressed φάσμα. Με ικανοποιητική ακρίβεια ανιχνεύονται τα Al, Mg και Mn. Η ανάλυση στο suppressed φάσμα οδηγεί σε χαμηλότερες αβεβαιότητες για το μονοενεργειακό <sup>28</sup>Al και τη φωτοκορυφή του <sup>27</sup>Mg που αντιστοιχεί σε φωτόνιο που δεν εκπέμπεται σε σειρά (1014.4 keV), ενώ το <sup>56</sup>Mn, που εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, αναλύεται καλύτερα στο unsuppressed φάσμα.

#### 8.4.2.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Montana Soil 2711 για 110.5 h

Την ενεργοποίηση του δείγματος Montana Soil 2711 για 110.5 h ακολούθησε πλήθος αναλύσεων διαφορετικής διάρκειας, όπως και στη περίπτωση του δείγματος Montana Soil 2710. Στον Πίνακα 8.8 δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων<sup>192</sup> για το βέλτιστο σενάριο για κάθε ισότοπο<sup>193</sup>.

<sup>191</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 565 – 566.

<sup>192</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 567 – 580.

<sup>193</sup> Σημειώνεται ότι κατά την 1<sup>η</sup> ώρα ανάλυσης ανιχνεύονται οι φωτοκορυφές του <sup>27</sup>Mg, αλλά με υψηλές αβεβαιότητες, επομένως δεν ενδείκνυται η ανάλυσή του στο σενάριο των 110.5 h.

	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια αναμονής <sup>194</sup>	Διάρκεια ανάλυσης	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
Certified values	<sup>28</sup> Al	1778.8	1 min	1 h	0.45 ± 4.2%	0.41 ± 3.0%
	<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.063 ± 5.0%	0.053 ± 3.0%
		657.0 <sup>c</sup>			--	--
		1216.3 <sup>c</sup>			--	0.003 <sup>195</sup> ± 35.8%
	<sup>42</sup> K	1524.7	1 min	5 h	0.173 ± 3.9%	0.167 ± 2.4%
	<sup>59</sup> Fe	1099.3	5 h	96 h	--	0.0012 ± 27.0%
		1291.6			--	0.0009 ± 35.9%
	<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	1 min	1 h	3.48 ± 1.2%	2.69 ± 1.2%
		1811.2 <sup>c</sup>			0.50 ± 3.9%	0.161 ± 5.6%
	<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	1 min	5 h	4.12 ± 0.4%	0.395 ± 0.4%
<sup>122</sup> Sb	564.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.016 ± 7.3%	0.0137 ± 3.8%	
<sup>81m</sup> Se	103.0	5 h	24 h	0.025 ± 4.1%	0.027 ± 4.4%	
<sup>69m</sup> Zn	438.9	5 h	96 h	--	0.0006 ± 60.5%	
Non-certified values	<sup>152</sup> Eu	121.8 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.016 ± 16.1%	0.005 ± 27.3%
		841.6 <sup>c</sup>			0.0099 ± 9.2%	0.0054 ± 7.3%
		963.5 <sup>c</sup>			0.010 ± 20.2%	0.010 ± 10.7%
	<sup>72</sup> Ga	629.9 <sup>c</sup>	5 h	96 h	0.0012 ± 62.1%	--
		834.0 <sup>c</sup>			0.0031 ± 23.4%	0.0016 ± 11.3%
		894.2 <sup>c</sup>			--	--
	<sup>140</sup> La <sup>196</sup>	328.8 <sup>c</sup>	29 h	72 h	0.009 ± 10.9%	0.0020 ± 24.1%
		487.0 <sup>c</sup>			0.0131 ± 5.6%	0.0033 ± 11.6%
		815.0 <sup>c</sup>			0.0057 ± 12.5%	0.0024 ± 14.4%
		1596.2 <sup>c</sup>			0.0129 ± 7.3%	0.0038 ± 8.6%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.8:** Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Montana Soil 2711 μετά από 110.5 h ενεργοποίησης για το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης για κάθε ισότοπο.

Αντίστοιχα με το δείγμα Montana Soil 2710, στην ανάλυση της πρώτης ώρας μετά την ενεργοποίηση 110.5 h, ανιχνεύεται με ικανοποιητική ακρίβεια <sup>28</sup>Al. Τα μονοενεργειακά ισότοπα <sup>42</sup>K, <sup>122</sup>Sb, <sup>81m</sup>Se, <sup>69m</sup>Zn και το ισότοπο <sup>59</sup>Fe που δεν εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, ανιχνεύονται με χαμηλότερες αβεβαιότητες στο suppressed φάσμα. Παράλληλα, στο unsuppressed φάσμα ανιχνεύονται με ικανοποιητική ακρίβεια τα πολυενεργειακά ισότοπα <sup>152</sup>Eu, <sup>72</sup>Ga, <sup>140</sup>La, <sup>56</sup>Mn, <sup>24</sup>Na. Συγκεκριμένα για το <sup>72</sup>Ga, αξίζει να σημειωθεί ότι η φωτοκορυφή στην ενέργεια 834.0 keV που έχει και το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής και η οποία ανιχνεύεται σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν, εκπέμπεται σε σειρά με άλλα φωτόνια του

<sup>194</sup> Όπου διάρκεια αναμονής διάφορη του 1 min σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τυχόν φάσματα που λήφθηκαν από το πέρας της ενεργοποίησης μέχρι την έναρξη της ανάλυσης ενδιαφέροντος.

<sup>195</sup> Το εν λόγω φωτόνιο δεν εκπέμπεται σε σειρά με άλλα, επομένως ανιχνεύεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο suppressed φάσμα, όπως εξηγήθηκε στην 8.4.1.2.

<sup>196</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>228</sup>Ac στην ίδια ενέργεια.

ισοτόπου, τα οποία όμως συνήθως δεν ανιχνεύονται στο φάσμα. Για το λόγο αυτό η φωτοκορυφή στην ενέργεια 834.0 keV εμφανίζει στο suppressed φάσμα μειωμένη επιφάνεια σε σχέση με το unsuppressed φάσμα, πλην όμως με καλύτερη στατιστική, λόγω του χαμηλού συνεχούς υποστρώματος. Αναφορικά με το πολυενεργειακό  $^{76}\text{As}$ , ανιχνεύεται μόνο η φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στα φωτόνια 559.1 keV που έχουν το υψηλότερο ποσοστό εκπομπής (45.0%), καθώς η συγκέντρωση του στοιχείου στο δείγμα είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με το δείγμα Montana Soil 2710<sup>197</sup>.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) είχε αναλυθεί και το δείγμα Montana Soil 2711. Ωστόσο οι αναλύσεις δεν πραγματοποιήθηκαν στην τότε ανιχνευτική διάταξη XtRa, αλλά στη διάταξη HPGe-33% και είχαν ανιχνευθεί τα ισότοπα:  $^{76}\text{As}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{69\text{m}}\text{Zn}$ .

### **8.4.3 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Fly ash 1633b**

Το πρότυπο υλικό με κωδικό N.I.S.T. Fly ash 1633b (κωδική ονομασία 1633b) είναι ιπτάμενη τέφρα από την καύση λιγνίτη (bituminous coal) που προέρχεται από τις περιοχές Πενσυλβάνιας και Δυτικής Βιρτζίνια των Η.Π.Α. Το υλικό, το πιστοποιητικό του οποίου δίνεται στο Παράρτημα Δ, έχει ξηρανθεί με αέρα και έχει περάσει από κόσκινο διαμέτρου 90  $\mu\text{m}$ .

#### **8.4.3.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Fly ash 1633b για 1 h**

Το δείγμα ιπτάμενης τέφρας N.I.S.T. Fly ash 1633b, καθαρής ξηρής μάζας 25.0349 gr (υγρασία 0.5%), ενεργοποιήθηκε για 1 h στη διάταξη ενεργοποίησης του Ε.Π.Τ - Ε.Μ.Π. και στη συνέχεια αναλύθηκε στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για 900 min<sup>198</sup>. Με βάση τα περιεχόμενα στοιχεία στο δείγμα, όπως δίνονται στο πιστοποιητικό του, και τα δεδομένα ενεργοποίησης, αυτό το σενάριο ενεργοποίησης στοχεύει στην ανίχνευση των εξής στοιχείων: Al, Mg, Mn, Ti, V. Στον Πίνακα 8.9 δίνονται για το unsuppressed και για το suppressed φάσμα οι ρυθμοί καταγραφής φωτονίων, με βάση τις αναλύσεις του κώδικα SPUNAL για κάθε

<sup>197</sup> Η συγκέντρωση As στο δείγμα 2711 είναι 105 ppm, έναντι 626 ppm στο δείγμα 2710.

<sup>198</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 581 – 582.

φωτοκορυφή, συνοδευόμενοι από την αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
<sup>28</sup> Al	1778.8	3.47 ± 1.9%	3.33 ± 1.9%
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	0.56 ± 7.0%	0.51 ± 8.1%
	1014.4 <sup>c</sup>	0.20 ± 14.3%	0.20 ± 9.9%
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.20 ± 10.9%	--
	1811.2 <sup>c</sup>	--	--
<sup>52</sup> V	1434.0	0.12 ± 30.3%	0.14 ± 14.7%
<sup>51</sup> Ti	320.0 <sup>c</sup>	--	--
	928.5 <sup>c</sup>	--	--

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.9: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Fly ash 1633b μετά από 1 h ενεργοποίησης.**

Η εικόνα των παραπάνω αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη εκείνης για τα προηγούμενα δείγματα που εξετάστηκαν. Με αυτό το σενάριο ενεργοποίησης και ανάλυσης δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση Ti ούτε στο δείγμα ιπτάμενης τέφρας, ωστόσο ανιχνεύεται V.

Όπως και σε όλες τις συγκριτικές αναλύσεις με χρήση της ενεργητικής θωράκισης, τα μονοενεργειακά ισότοπα δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις σε όρους cps στα δύο φάσματα, ενώ στο suppressed φάσμα η αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής είναι χαμηλότερη.

#### 8.4.3.2 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Fly ash 1633b για 110.5 h

Την ενεργοποίηση του δείγματος Fly ash 1633b για 110.5 h ακολούθησε πλήθος αναλύσεων διαφορετικής διάρκειας. Στον Πίνακα 8.10 δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων<sup>199</sup> για το βέλτιστο σενάριο για κάθε ισότοπο<sup>200</sup>. Σημειώνεται ότι σε σχέση με τα δείγματα που μελετήθηκαν μέχρι στιγμής το δείγμα Fly ash 1633b περιέχει επιπλέον <sup>60</sup>Co και <sup>175</sup>Yb.

Το συγκριτικά βραχύβιο μονοενεργειακό <sup>28</sup>Al ανιχνεύεται με ικανοποιητική ακρίβεια και στο δείγμα Fly ash 1633b, με την αβεβαιότητα προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής του να είναι μικρότερη στο suppressed φάσμα. Το ίδιο

<sup>199</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 583 – 596.

<sup>200</sup> Σημειώνεται ότι κατά την 1<sup>η</sup> ώρα ανάλυσης ανιχνεύονται <sup>27</sup>Mg και <sup>52</sup>V, αλλά με υψηλές αβεβαιότητες, επομένως δεν ενδείκνυται η ανάλυσή τους στο σενάριο των 110.5 h.

ισχύει και για τα συγκριτικά μακρόβια μονοενεργειακά ισότοπα  $^{42}\text{K}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Se}$  και  $^{87\text{m}}\text{Sr}$  και τα πολυενεργειακά μεν αλλά χωρίς φωτόνια σε σειρά  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{122}\text{Sb}$  και  $^{175}\text{Yb}$  (αν και με συγκριτικά υψηλές αβεβαιότητες > 20%). Το αντίθετο συμβαίνει για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά  $^{76}\text{As}$  (με εξαίρεση τη φωτοκορυφή στην ενέργεια 1216.3 keV),  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{56}\text{Mn}$  και  $^{24}\text{Na}$ .

Το δείγμα N.I.S.T. Fly ash 1633b είχε ενεργοποιηθεί για 110.5 h και στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008). Ωστόσο, οι αναλύσεις δεν έγιναν στην τότε ανιχνευτική διάταξη XtRa, αλλά στη διάταξη HPGe-33% και είχαν ανιχνευθεί τα εξής ισότοπα:  $^{76}\text{As}$ ,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{56}\text{Mn}$  και  $^{24}\text{Na}$ .

	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια αναμονής <sup>201</sup>	Διάρκεια ανάλυσης	cps <sub>unsup</sub>		cps <sub>sup</sub>	
Certified values	$^{28}\text{Al}$	1778.8	1 min	1 h	0.77 ± 2.2%	0.75 ± 2.0%		
	$^{76}\text{As}$	559.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.086 ± 3.2%	0.073 ± 2.3%		
		657.0 <sup>c</sup>			0.010 ± 16.2%	0.0026 ± 29.2%		
		1216.3 <sup>c</sup>			0.005 ± 32.2%	0.0038 ± 18.8%		
	$^{42}\text{K}$	1524.7	1 min	5 h	0.137 ± 3.5%	0.135 ± 2.4%		
	$^{59}\text{Fe}$	1099.3	5 h	96 h	0.0034 ± 19.0%	0.0037 ± 7.9%		
		1291.6			0.0029 ± 26.5%	0.0029 ± 15.5%		
	$^{56}\text{Mn}$	846.6 <sup>c</sup>	1 min	1 h	0.52 ± 3.0%	0.42 ± 2.8%		
		1811.2 <sup>c</sup>			0.074 ± 5.3%	0.019 ± 10.4%		
$^{24}\text{Na}$	1368.5 <sup>c</sup>	1 min	5 h	0.966 ± 0.8%	0.487 ± 1.2%			
$^{81\text{m}}\text{Se}$	103.0	5 h	24 h	0.136 ± 2.1%	0.136 ± 1.5%			
$^{87\text{m}}\text{Sr}$	388.4	1 min	5 h	0.022 ± 22.5%	0.022 ± 13.6%			
Non-certified values	$^{60}\text{Co}$	1173.2 <sup>c</sup>	29 h	72 h	0.0012 ± 51.9%	0.006 ± 48.6%		
		1332.5 <sup>c</sup>			0.0013 ± 38.8%	0.005 ± 47.2%		
	$^{152}\text{Eu}$	121.8 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.065 ± 3.5%	0.023 ± 6.1%		
		841.6 <sup>c</sup>			0.038 ± 5.2%	0.021 ± 5.2%		
		963.5 <sup>c</sup>			0.040 ± 5.5%	0.036 ± 3.6%		
	$^{140}\text{La}^{202}$	328.8 <sup>c</sup>	29h	72 h	0.0204 ± 4.8%	0.0034 ± 13.6%		
		487.0 <sup>c</sup>			0.0307 ± 2.2%	0.0084 ± 8.0%		
		815.0 <sup>c</sup>			0.014 ± 8.8%	0.0062 ± 5.0%		
		1596.2 <sup>c</sup>			0.0306 ± 2.5%	0.0091 ± 3.9%		
	$^{122}\text{Sb}$	564.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.0055 ± 13.5%	0.0039 ± 8.0%		
$^{175}\text{Yb}$	113.5 <sup>c</sup>	5 h	96 h	0.0025 ± 37.4%	0.0022 ± 28.3%			
	396.0			0.0019 ± 38.5%	0.0021 ± 17.7%			

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.10: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Fly ash 1633b μετά από 110.5 h**

**ενεργοποίησης για το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης για κάθε ισότοπο.**

<sup>201</sup> Όπου διάρκεια αναμονής διάφορη του 1 min σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τυχόν φάσματα που λήφθηκαν από το πέρας της ενεργοποίησης μέχρι την έναρξη της ανάλυσης.

<sup>202</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του  $^{228}\text{Ac}$ .

#### **8.4.4 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Industrial Sludge 2782**

Το υλικό του πρότυπου υλικού αναφοράς Industrial Sludge 2782 (κωδική ονομασία 2782) προέρχεται από βιομηχανική περιοχή του New Jersey των Η.Π.Α. Στο πιστοποιητικό, το οποίο δίνεται στο Παράρτημα Δ, οι συγκεντρώσεις των στοιχείων που περιέχονται στο δείγμα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- πιστοποιημένες τιμές (certified values), που πληρούν όλα τα κριτήρια του N.I.S.T. και για τον υπολογισμό της ακρίβειας των οποίων έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι γνωστές πηγές αβεβαιότητας,
- τιμές αναφοράς (reference values), που αποτελούν μη-πιστοποιημένες τιμές συγκεντρώσεων και αποτελούν τη καλύτερη δυνατή εκτίμηση της πραγματικής τιμής, αλλά δεν περνούν από όλα τα κριτήρια του N.I.S.T. ώστε να αποτελούν πιστοποιημένες τιμές,
- μη πιστοποιημένες τιμές (information values), που αποτελούν αποτελέσματα από ένα ή περισσότερα εργαστήρια, αλλά δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για την εκτίμηση των επιπέδων της αβεβαιότητάς τους.

Για τους σκοπούς της παραγράφου αυτής χρησιμοποιούνται όλα τα στοιχεία, ανεξάρτητα από την ακρίβεια προσδιορισμού των συγκεντρώσεών τους, καθώς αυτό που καταρχήν ενδιαφέρει είναι οι συγκριτικές μετρήσεις στο unsuppressed και το suppressed φάσμα και όχι οι απόλυτες τιμές και η αντίστοιχη βαθμονόμηση.

##### **8.4.4.1 Ενεργοποίηση του πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Industrial Sludge 2782 για 1 h**

Το δείγμα N.I.S.T. Industrial Sludge 2782, καθαρής ξηρής μάζας 25.397 gr (υγρασία 4.8%), ενεργοποιήθηκε για 1 h στη διάταξη ενεργοποίησης του Ε.Π.Τ - Ε.Μ.Π. και αναλύθηκε στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για διάρκεια 900 min<sup>203</sup>. Αυτό το σενάριο ενεργοποίησης στοχεύει στην ανίχνευση των εξής στοιχείων: Al, In, Mg, Mn, Ti, V, δηλαδή σε σχέση με τα προηγούμενα δείγματα προστίθεται το In. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται στον Πίνακα 8.11.

<sup>203</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 597 – 598.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
<sup>28</sup> Al	1778.8	0.55 ± 6.1%	0.53 ± 4.9%
<sup>116</sup> In	417.0 <sup>c</sup>	2.29 ± 2.7%	0.79 ± 4.2%
	818.8 <sup>c</sup>	0.52 ± 8.6%	0.04 ± 34.4%
	1097.0 <sup>c</sup>	2.78 ± 2.4%	1.13 ± 3.4%
	1293.4 <sup>c</sup>	3.52 ± 2.0%	1.20 ± 3.2%
	1507.7 <sup>c</sup>	0.41 ± 9.0%	0.17 ± 1.1%
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	--	--
	1014.4 <sup>c</sup>	--	--
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.55 ± 8.5%	0.42 ± 7.8%
	1811.2 <sup>c</sup>	0.10 ± 21.2%	0.04 ± 21.1%
<sup>52</sup> V	1434.0	0.07 ± 41.0%	0.05 ± 24.4%
<sup>51</sup> Ti	320.0 <sup>c</sup>	--	--
	928.5 <sup>c</sup>	--	--

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.11: Ρυθμοί καταγραφής φωτονίων του δείγματος Industrial Sludge 2782 μετά από 1 h ενεργοποίησης.**

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των αναλύσεων μετά την ενεργοποίηση του δείγματος Industrial Sludge 2782, κατ' αρχήν ανιχνεύεται ικανοποιητικά η φωτοκορυφή του <sup>28</sup>Al, για την ανάλυση της οποίας, όπως προέκυψε και από τα άλλα δύο δείγματα ενδείκνυται η χρήση του suppressed φάσματος. Δεν ανιχνεύονται καθόλου οι φωτοκορυφές του <sup>27</sup>Mg, γεγονός το οποίο αποδίδεται στη χαμηλή συγκέντρωση του στοιχείου στο δείγμα<sup>204</sup>. Όπως και στα προηγούμενα δείγματα που αναλύθηκαν, δεν ανιχνεύεται το <sup>51</sup>Ti.

#### 8.4.4.2 Ενεργοποίηση πρότυπου υλικού αναφοράς N.I.S.T. Industrial Sludge 2782 για 110.5 h

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων<sup>205</sup> που ακολούθησαν την ενεργοποίηση του δείγματος Industrial Sludge 2782 δίνονται στον Πίνακα 8.12 για το βέλτιστο σενάριο για κάθε ισότοπο.

Αντίστοιχα με τα δείγματα που μελετήθηκαν παραπάνω, και στο δείγμα Industrial Sludge 2782 ανιχνεύεται με ικανοποιητική ακρίβεια <sup>28</sup>Al κατά την πρώτη ώρα ανάλυσης μετά από 110.5 h ενεργοποίηση. Επίσης, στο ίδιο σενάριο ανάλυσης, ανιχνεύεται το <sup>116</sup>In ( $T_{1/2} = 54.41$  min), με αβεβαιότητες μάλιστα μικρότερες από ότι στο αντίστοιχο σενάριο σύντομης ενεργοποίησης και ανάλυσης 15 min.

<sup>204</sup> Η συγκέντρωση Mg στο δείγμα Industrial Sludge 2782 είναι 0.26%, ενώ στο δείγμα Fly ash 1633b είναι 0.482% και στο δείγμα Montana Soil 2710 είναι 1.01%.

<sup>205</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 599 – 612.



	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια αναμονής <sup>206</sup>	Διάρκεια ανάλυσης	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
Certified values	<sup>28</sup> Al	1778.8	1 min	1 h	0.15 ± 14.1%	0.15 ± 10.7%
	<sup>141</sup> Ce	145.5	5 h	96 h	0.020 ± 5.3%	0.0173 ± 3.9%
	<sup>60</sup> Co	1173.2 <sup>c</sup>	29 h	72 h	0.0022 ± 37.0%	0.0010 ± 31.2%
		1332.5 <sup>c</sup>			0.0016 ± 35.5%	0.0007 ± 42.7%
	<sup>59</sup> Fe	1099.3	5 h	96 h	0.017 ± 6.0%	0.0156 ± 2.5%
		1291.6			0.0126 ± 5.5%	0.0118 ± 3.2%
	<sup>42</sup> K	1524.7	1 min	5 h	0.029 ± 22.8%	0.025 ± 11.9%
	<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	1 min	5 h	4.74 ± 0.4%	2.35 ± 0.5%
	<sup>72</sup> Ga	629.9 <sup>c</sup>	5 h	96 h	0.0018 ± 44.7%	< LLD
		834.0 <sup>c</sup>			0.0147 ± 5.3%	0.0126 ± 3.3%
<sup>140</sup> La <sup>207</sup>	328.8 <sup>c</sup>	29 h	72 h	0.009 ± 11.4%	0.0017 ± 29.7%	
	487.0 <sup>c</sup>			0.0160 ± 4.7%	0.0044 ± 8.7%	
	815.0 <sup>c</sup>			0.0081 ± 8.2%	0.0032 ± 10.5%	
	1596.2 <sup>c</sup>			0.0166 ± 3.5%	0.0045 ± 8.9%	
Reference values	<sup>198</sup> Au	411.8	29 h	72 h	0.0264 ± 3.2%	0.0267 ± 1.9%
	<sup>152</sup> Eu	121.8 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.008 ± 35.8%	0.002 ± 65.7%
		841.6 <sup>c</sup>			< LLD	< LLD
		963.5 <sup>c</sup>			< LLD	0.0033 ± 27.2%
	<sup>116</sup> In	417.0 <sup>c</sup>	1 min	1 h	3.38 ± 1.2%	1.16 ± 2.3%
		818.8 <sup>c</sup>			0.87 ± 3.6%	0.07 ± 18.0%
		1097.0 <sup>c</sup>			4.07 ± 1.1%	1.64 ± 1.4%
		1293.4 <sup>c</sup>			5.11 ± 0.8%	1.76 ± 1.4%
	<sup>56</sup> Mn	1507.7 <sup>c</sup>	1 min	1 h	0.56 ± 4.3%	0.24 ± 4.9%
		846.6 <sup>c</sup>			2.10 ± 1.8%	1.64 ± 1.5%
<sup>181</sup> Mn	1811.2 <sup>c</sup>	1 min	1 h	0.30 ± 4.7%	0.107 ± 8.9%	
	846.6 <sup>c</sup>			2.10 ± 1.8%	1.64 ± 1.5%	
Information values	<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.110 ± 3.4%	0.0915 ± 1.8%
		657.0 <sup>c</sup>			0.012 ± 19.9%	0.002 ± 60.1%
		1216.3 <sup>c</sup>			0.007 ± 37.0%	0.006 ± 19.3%
	<sup>64</sup> Cu	1345.8	5 h	24 h	0.003 ± 54.6%	0.0046 ± 20.4%
	<sup>81m</sup> Se	103.0	5 h	24h	0.012 ± 22.4%	0.010 ± 13.8%
<sup>69m</sup> Zn	438.9	5 h	96 h	0.0021 ± 39.2%	0.0018 ± 22.2%	

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.12: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Industrial Sludge 2782 μετά από 110.5 h ενεργοποίησης για το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης για κάθε ισότοπο.**

Αντίστοιχα με τα δείγματα που έχουν εξετασθεί μέχρι στιγμής, στο δείγμα Industrial Sludge 2782 ανιχνεύονται στο suppressed φάσμα με χαμηλότερες αβεβαιότητες τα μονοενεργειακά ισότοπα <sup>198</sup>Au, <sup>64</sup>Cu, <sup>42</sup>K, <sup>81m</sup>Se, <sup>69m</sup>Zn και το πολυενεργειακό αλλά χωρίς φωτόνια σε σειρά <sup>59</sup>Fe, ενώ τα πολυενεργειακά <sup>76</sup>As, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu, <sup>72</sup>Ga, <sup>140</sup>La, <sup>56</sup>Mn, <sup>24</sup>Na ανιχνεύονται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο unsuppressed φάσμα. Ειδικά για το <sup>152</sup>Eu, σημειώνεται ότι στο δείγμα Industrial Sludge 2782, δεν ανιχνεύονται όλες οι φωτοκορυφές του λόγω της συγκριτικά

<sup>206</sup> Όπου διάρκεια αναμονής διάφορη του 1 min σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τυχόν φάσματα που λήφθηκαν από το πέρας της ενεργοποίησης μέχρι την έναρξη της ανάλυσης ενδιαφέροντος.

<sup>207</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>228</sup>Ac.

χαμηλής συγκέντρωσής του στο δείγμα<sup>208</sup>. Όσον αφορά στο μονοενεργειακό ισότοπο <sup>141</sup>Ce, το οποίο δεν περιέχεται σε κανέναν από τα άλλα δείγματα που εξετάστηκαν, η επιφάνεια της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στα φωτόνια 145.5 keV προσδιορίζεται με χαμηλότερη αβεβαιότητα στο suppressed φάσμα.

#### **8.4.5 Ενεργοποίηση του υλικού αναφοράς I.A.E.A. Lake Sediment SL-1**

Το υλικό αναφοράς με κωδικό I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 (κωδική ονομασία SL-1) είναι ίζημα από τη λίμνη Sardis, στην επαρχία Panoia του Μισισίπι των Η.Π.Α. σε βάθος 15 m. Το υλικό έχει ξηρανθεί σε φούρνο στους 50°C για επτά ημέρες και έχει υποστεί λιωτρίβιση και κοσκίνισμα, ώστε η κοκκομετρία του να είναι < 0.1 mm. Οι τιμές των συγκεντρώσεων που δίνονται στο πιστοποιητικό, το οποίο δίνεται στο Παράρτημα Δ, βασίζονται σε στατιστικά αποδεκτά αποτελέσματα που υποβλήθηκαν από μία σειρά εργαστηρίων, στο πλαίσιο Άσκησης Διασύγκρισης που διενεργήθηκε τη διετία 1977-1978. Οι τιμές της συγκέντρωσης που δίδονται στο πιστοποιητικό κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- τιμές αναφοράς (recommended values), όπου συμπεριληφθήκαν τα στοιχεία που ικανοποίησαν και τους δύο στατιστικούς ελέγχους που έγιναν,
- μη-πιστοποιημένες τιμές (information values), όπου συμπεριληφθήκαν τα στοιχεία που ικανοποίησαν έναν από τους δύο στατιστικούς ελέγχους.

Στην παράγραφο αυτή μελετώνται όλα τα στοιχεία για τα οποία δίνονται οι τιμές των συγκεντρώσεων στο πιστοποιητικό του δείγματος.

##### **8.4.5.1 Ενεργοποίηση του υλικού αναφοράς I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 για 1 h**

Το δείγμα I.A.E.A. Lake Sediment SL-1, καθαρής ξηρής μάζας 28.947 gr (υγρασία 6.0%), ενεργοποιήθηκε για 1 h στη διάταξη ενεργοποίησης του Ε.Π.Τ - Ε.Μ.Π. και αναλύθηκε στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS για διάρκεια 900 min<sup>209</sup>. Αυτό το

<sup>208</sup> Η συγκέντρωση Eu στο δείγμα Industrial Sludge 2782 είναι 0.34 ppm, έναντι 1.0 ppm στο δείγμα 2710, 1.1 ppm στο δείγμα 2711 και 4.1 ppm στο δείγμα 1633b.

<sup>209</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 613 – 614.

σενάριο ενεργοποίησης στοχεύει στην ανίχνευση των εξής στοιχείων: Al, Mg, Mn, V.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται στον Πίνακα 8.13.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
<sup>28</sup> Al	1778.8	3.11 ± 2.1%	2.99 ± 2.1%
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	0.45 ± 5.5%	0.45 ± 6.4%
	1014.4 <sup>c</sup>	0.15 ± 21.5%	0.15 ± 13.4%
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	5.89 ± 1.6%	4.66 ± 1.6%
	1811.2 <sup>c</sup>	0.78 ± 5.3%	0.27 ± 7.6%
<sup>52</sup> V	1434.0	0.06 ± 59.5%	0.11 ± 17.2%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.13: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Lake Sediment SL-1 μετά από 1 h ενεργοποίησης.**

Η εικόνα των παραπάνω αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη εκείνης που παρουσιάζουν τα υπόλοιπα δείγματα που εξετάστηκαν. Η φωτοκορυφή του μονοενεργειακού <sup>28</sup>Al ανιχνεύεται με ικανοποιητική ακρίβεια, όπως κι εκείνη του <sup>52</sup>V, το οποίο εάν και εκπέμπει κι άλλα φωτόνια, τα ποσοστά εκπομπής τους καθιστούν το φωτόνιο ενέργειας 1434.0 keV πρακτικά μοναδικό. Η φωτοκορυφή του <sup>27</sup>Mg ενέργειας 1014.4 keV – που δεν εκπέμπεται σε σειρά με άλλα – ανιχνεύεται με χαμηλότερη αβεβαιότητα στο suppressed φάσμα, ενώ τα φωτόνια ενέργειας 843.8 keV αναλύονται καλύτερα στο unsuppressed φάσμα. Αντίστοιχα, για την ανίχνευση των φωτοκορυφών του <sup>56</sup>Mn, ενδείκνυται η χρήση του unsuppressed φάσματος. Στο δείγμα I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 ανιχνεύονται όλες οι φωτοκορυφές των ισότοπων που αναμένονταν να ανιχνευθούν.

#### 8.4.5.2 Ενεργοποίηση του υλικού αναφοράς I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 για 110.5 h

Η ενεργοποίηση μεγαλύτερης διάρκειας του δείγματος I.A.E.A. Lake Sediment SL-1, για λειτουργικούς λόγους, ήταν 113 h, έναντι 110.5 h για όλα τα άλλα δείγματα που εξετάστηκαν. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων<sup>210</sup> που ακολούθησαν, για το βέλτιστο σενάριο για κάθε ισότοπο δίνονται στον Πίνακα 8.14.

Όπως φαίνεται από τα περιεχόμενα στο δείγμα στοιχεία και τα αποτελέσματα των αναλύσεων, τα ισότοπα που ανιχνεύονται κατά την ενεργοποίηση μεγαλύτερης διάρκειας είναι τα αντίστοιχα με τα προηγούμενα δείγματα. Πιο συγκεκριμένα,

<sup>210</sup> Παράρτημα Α, Παράγραφος Α.7, φάσματα 615 – 628.

ανιχνεύονται με χαμηλότερες αβεβαιότητες στο suppressed φάσμα τα μονοενεργειακά ισότοπα  $^{42}\text{K}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Se}$  και το πολυενεργειακό αλλά χωρίς φωτόνια σε σειρά  $^{59}\text{Fe}$ , ενώ τα πολυενεργειακά  $^{76}\text{As}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{46}\text{Sc}$  ανιχνεύονται με μικρότερες αβεβαιότητες στο unsuppressed φάσμα. Ειδικά για το  $^{76}\text{As}$ , ανιχνεύεται μόνο το φωτόνιο με το υψηλότερο ποσοστό εκπομπής, κυρίως λόγω της συγκριτικά χαμηλότερης συγκέντρωσης του στοιχείου στο δείγμα<sup>211</sup>.

	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Διάρκεια αναμονής <sup>212</sup>	Διάρκεια ανάλυσης	cps <sub>unsup</sub>	cps <sub>sup</sub>
Recommended values	$^{76}\text{As}$	559.1 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.006 ± 26.3%	0.0065 ± 12.8%
		657.0 <sup>c</sup>			--	--
		1216.3 <sup>c</sup>			--	--
	$^{59}\text{Fe}$	1099.3	5 h	96 h	0.0014 ± 32.8%	0.0015 ± 12.5%
		1291.6			0.0011 ± 37.1%	0.0010 ± 18.9%
	$^{140}\text{La}^{213}$	328.8 <sup>c</sup>	5 h	96 h	0.0059 ± 11.0%	0.0006 ± 62.7%
		487.0 <sup>c</sup>			0.0086 ± 6.5%	0.0017 ± 16.7%
		815.0 <sup>c</sup>			0.0035 ± 12.4%	0.0015 ± 14.6%
		1596.2 <sup>c</sup>			0.0091 ± 4.2%	0.0021 ± 11.6%
	$^{56}\text{Mn}$	846.6 <sup>c</sup>	1 min	1 h	9.59 ± 0.5%	7.20 ± 0.7%
1811.2 <sup>c</sup>		1.45 ± 1.9%			0.47 ± 2.7%	
Information values	$^{152}\text{Eu}$	121.8 <sup>c</sup>	5 h	24 h	0.016 ± 11.2%	0.006 ± 18.2%
		841.6 <sup>c</sup>			0.009 ± 11.9%	0.0043 ± 15.5%
		963.5 <sup>c</sup>			0.009 ± 12.1%	0.0075 ± 8.4%
	$^{72}\text{Ga}$	629.9 <sup>c</sup>	5 h	96h	--	--
		834.0 <sup>c</sup>			0.0021 ± 21.6%	0.0009 ± 26.0%
	$^{42}\text{K}$	1524.7	1 min	5 h	0.045 ± 13.1%	0.044 ± 5.2%
	$^{24}\text{Na}$	1368.5 <sup>c</sup>	1 min	5 h	0.387 ± 1.7%	0.174 ± 2.0%
	$^{81\text{m}}\text{Se}$	103.0	29 h	72 h	0.029 ± 6.6%	0.029 ± 4.4%
	$^{46}\text{Sc}^{214}$	889.3 <sup>c</sup>	5 h	29 h	0.0043 ± 11.9%	0.0017 ± 15.2%
		1120.0 <sup>c</sup>			0.0067 ± 5.6%	0.0018 ± 6.8%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

Πίνακας 8.14: Ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων του δείγματος Lake Sediment SL-1 μετά από 110.5 h ενεργοποίησης για το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης για κάθε ισότοπο.

## 8.5 Συντελεστές βαθμονόμησης

Για τον υπολογισμό των συντελεστών βαθμονόμησης της μεθόδου για κάθε στοιχείο χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ.: N.I.S.T. Montana Soil 2710, N.I.S.T. Montana Soil 2711, N.I.S.T. Industrial Sludge 2782, N.I.S.T. Fly ash 1633b και I.A.E.A. Lake Sediment SL-1. Καθώς τα δείγματα δεν έχουν ακριβώς τις ίδιες μάζες, για τον υπολογισμό του συντελεστή βαθμονόμησης,

<sup>211</sup> Η συγκέντρωση As στο δείγμα IAEA SL-1 είναι 27.6 ppm, έναντι > 100 ppm στα άλλα δείγματα.

<sup>212</sup> Όπου διάρκεια αναμονής διάφορη του 1 min σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη φάσματα που λήφθηκαν από το πέρας της ενεργοποίησης μέχρι την έναρξη της ανάλυσης ενδιαφέροντος.

<sup>213</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του  $^{228}\text{Ac}$ .

<sup>214</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του  $^{214}\text{Bi}$ .

λ, χρησιμοποιείται η Σχέση (8.3). Άλλωστε και τα δείγματα που αναλύονται δεν θα έχουν απαραίτητα την ίδια ακριβώς μάζα με τα πρότυπα βαθμονόμησης.

Τα αποτελέσματα για κάθε πρότυπο δείγμα και ισότοπο για το σύντομο σενάριο ενεργοποίησης 1 h δίνονται στον Πίνακα 8.15. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα δεν είναι στρογγυλοποιημένα. Στις αβεβαιότητες που δίνονται συμπεριλαμβάνονται η αβεβαιότητα της φωτοκορυφής και η αβεβαιότητα της συγκέντρωσης του στοιχείου, όπως αυτή δίνεται στο πιστοποιητικό του δείγματος.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)	λ (gr <sup>215</sup> /cps) – unsuppressed <sup>216</sup> φάσμα					
	χώρα 2710	χώρα 2711	ιπτάμενη τέφρα 1633b	βιομηχανική υλός 2782	ίζημα λίμνης SL-1	
<sup>28</sup> Al	1778.8	0.8857 ± 3.1%	0.8421 ± 3.2%	1.0858 ± 2.1%	0.6349 ± 6.9%	-- <sup>217</sup>
<sup>116</sup> In	417.0 <sup>c</sup>	-- <sup>217</sup>	-- <sup>217</sup>	-- <sup>217</sup>	0.0026 ± 14.9%	-- <sup>217</sup>
	818.8 <sup>c</sup>				0.0116 ± 17.0%	
	1097.0 <sup>c</sup>				0.0022 ± 14.9%	
	1293.4 <sup>c</sup>				0.0017 ± 14.8%	
	1507.7 <sup>c</sup>				0.0147 ± 17.3%	
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	< LLD	0.9747 ± 7.0%	0.2151 ± 7.0%	< LLD	-- <sup>217</sup>
	1014.4 <sup>c</sup>	1.9064 ± 30.5%	3.4035 ± 33.2%	0.6003 ± 14.3%	< LLD	
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.0174 ± 2.2%	0.0164 ± 5.8%	0.0162 ± 10.9%	0.0140 ± 8.5%	0.0170 ± 4.9%
	1811.2 <sup>c</sup>	0.1192 ± 3.6%	0.0995 ± 10.6%	< LLD	0.0777 ± 21.2%	0.1291 ± 7.0%
<sup>52</sup> V	1434.0	< LLD	< LLD	0.0597 ± 30.3%	0.0284 ± 41.4%	0.0893 ± 60.2%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.15: Συντελεστές βαθμονόμησης, λ, για κάθε πρότυπο δείγμα για το σενάριο ενεργοποίησης 1 h.**

Για την σύγκριση των τιμών των συντελεστών βαθμονόμησης που προκύπτουν για κάθε υλικό χρησιμοποιείται ο στατιστικός έλεγχος U. Στον Πίνακα 8.16 δίνονται οι τιμές της μεταβλητής U ανά δύο υλικά. Στον Πίνακα δεν δίνονται αποτελέσματα σύγκρισης για το In, καθώς έχει ανιχνευθεί μόνο σε ένα δείγμα.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)	τιμή μεταβλητής U – unsuppressed φάσμα										
	2710/ 2711	2710/ 1633b	2710/ 2782	2710/ SL-1	2711/ 1633b	2711/ 2782	2711/ SL-1	2782/ 1633b	2782/ SL-1	1633b/ SL-1	
<sup>28</sup> Al	1778.8	0.983	5.634	4.065	--	6.777	3.382	--	8.126	--	--
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	--	--	--	--	9.767	--	--	--	--	--
	1014.4 <sup>c</sup>	1.190	2.220	--	--	4.851	--	--	--	--	--
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.830	0.672	2.075	0.420	0.179	1.179	0.464	0.689	2.089	0.425
	1811.2 <sup>c</sup>	1.653	--	2.109	0.990	--	0.915	2.124	--	2.735	--
<sup>52</sup> V	1434.0	--	--	--	--	--	--	--	1.364	1.108	0.522

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.16: Σύγκριση συντελεστών βαθμονόμησης, λ, για το σενάριο ενεργοποίησης 1 h.**

<sup>215</sup> Ξηρή μάζα

<sup>216</sup> Για μονοενεργειακά ισότοπα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το suppressed φάσμα.

<sup>217</sup> Όπου «--», σημαίνει ότι δεν δίνεται στο πιστοποιητικό και δεν ανιχνεύθηκε.

Από τη σύγκριση των συντελεστών βαθμονόμησης φαίνεται ότι τα δείγματα χώματος Montana Soil 2710 και 2711, που έχουν παρόμοια σύσταση, οδηγούν σε συντελεστές βαθμονόμησης οι οποίοι δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, για όλα τα ισότοπα τα οποία αναλύθηκαν με το σύντομο σενάριο ενεργοποίησης 1 h. Ως εκ τούτου, μπορούν να υπολογιστούν οι σταθμισμένες μέσες τιμές από τα δείγματα αυτά για τον προσδιορισμό των συντελεστών βαθμονόμησης για υλικό δείγματος χώμα. Αντίστοιχο συμπέρασμα δεν μπορεί να προκύψει για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις σύγκρισης των συντελεστών βαθμονόμησης, όπου συχνά οι αποκλίσεις των συντελεστών βαθμονόμησης είναι στατιστικά σημαντικές. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των συντελεστών βαθμονόμησης για τα υλικά N.I.S.T. Montana Soil 2711 και N.I.S.T. Fly ash 1633b.

Στον Πίνακα 8.17 δίνονται οι συντελεστές βαθμονόμησης, λ, για κάθε τύπο δείγματος, για το σενάριο σύντομης ενεργοποίησης 1 h. Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των στοιχείων σε άγνωστα δείγματα ίδιου τύπου. Σημειώνεται ότι για τα δείγματα χώματος, οι συντελεστές βαθμονόμησης προκύπτουν ως οι σταθμισμένες μέσες τιμές των αντίστοιχων συντελεστών από τα πρότυπα δείγματα N.I.S.T. Montana Soil 2710 και N.I.S.T. Montana Soil 2711.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)	λ (gr <sup>218</sup> /cps) – unsuppressed <sup>219</sup> φάσμα				
	χώμα	ιπτάμενη τέφρα	βιομηχανική ιλύς	ίζημα λίμνης	
<sup>28</sup> Al	1778.8	0.8635 ± 2.5%	1.0858 ± 2.1%	0.6349 ± 6.9%	-- <sup>217</sup>
<sup>116</sup> In	417.0 <sup>c</sup>	-- <sup>217</sup>	-- <sup>217</sup>	0.0026 ± 14.9%	-- <sup>217</sup>
	818.8 <sup>c</sup>			0.0116 ± 17.0%	
	1097.0 <sup>c</sup>			0.0022 ± 14.9%	
	1293.4 <sup>c</sup>			0.0017 ± 14.8%	
	1507.7 <sup>c</sup>			0.0147 ± 17.3%	
<sup>27</sup> Mg	843.8 <sup>c</sup>	0.9747 ± 7.0%	0.2151 ± 7.0%	< LLD	-- <sup>217</sup>
	1014.4 <sup>c</sup>	2.2198 ± 27.4%	0.6003 ± 14.3%	< LLD	
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.0173 ± 2.1%	0.0162 ± 10.9%	0.0140 ± 8.5%	0.0170 ± 4.9%
	1811.2 <sup>c</sup>	0.1164 ± 5.9%	< LLD	0.0777 ± 21.2%	0.1291 ± 7.0%
<sup>52</sup> V	1434.0	< LLD	0.0597 ± 30.3%	0.0284 ± 41.4%	0.0893 ± 60.2%

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.17:** Συντελεστές βαθμονόμησης για κάθε τύπο δείγματος για το σενάριο ενεργοποίησης 1 h.

Τα αποτελέσματα για κάθε πρότυπο δείγμα και ισότοπο, σε όρους συντελεστών βαθμονόμησης, λ, για το βέλτιστο σενάρια ανάλυσης μετά από ενεργοποίηση

<sup>218</sup> Ξηρή μάζα

<sup>219</sup> Για μονοενεργειακά ισότοπα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το suppressed φάσμα.

διάρκειας 110.5 h δίνονται στον Πίνακα 8.18, ενώ η σύγκριση των τιμών με τη βοήθεια του στατιστικού ελέγχου U δίνονται στον Πίνακα 8.19.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)	$\lambda$ (gr <sup>220</sup> /cps) – unsuppressed <sup>221</sup> φάσμα					
	2710	2711	1633b	2782	SL-1	
<sup>28</sup> Al	1778.8	3.6598 ± 7.6%	3.4851 ± 4.5%	4.8932 ± 2.4%	2.2890 ± 14.5%	-- <sup>222</sup>
<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	0.0386 ± 3.3%	0.0401 ± 9.1%	0.0397 ± 3.4%	0.0383 ± 6.9%	0.1321 ± 28.3%
	657.0 <sup>c</sup>	0.3610 ± 9.9%	< LLD	0.3476 ± 16.3%	0.3634 ± 20.8%	< LLD
	1216.3 <sup>c</sup>	0.7312 ± 25.0%	< LLD	0.6595 ± 32.3%	< LLD	< LLD
<sup>198</sup> Au	411.8	0.0025 ± 15.6%	< LLD	-- <sup>225</sup>	0.0019 ± 2.9%	-- <sup>225</sup>
<sup>141</sup> Ce	145.5	< LLD	< LLD	< LLD	1.5986 ± 6.9%	< LLD
<sup>64</sup> Cu	1345.8	12.050 ± 35.8%	< LLD	< LLD	19.207 ± 54.6%	< LLD
<sup>72</sup> Ga	834.0 <sup>c</sup>	0.2165 ± 21.6%	0.1169 ± 23.4%	-- <sup>225</sup>	0.0605 ± 15.2%	0.3314 ± 30.5%
<sup>42</sup> K	1524.7	3.4295 ± 9.6%	3.3786 ± 5.1%	3.5634 ± 3.5%	2.7643 ± 22.8%	9.2452 ± 19.5%
<sup>152</sup> Eu	121.8 <sup>c</sup>	0.0014 ± 19.3%	0.0017 ± 16.1%	0.0016 ± 3.5%	0.0011 ± 35.8%	0.0028 ± 33.2%
	841.6 <sup>c</sup>	0.0043 ± 61.1%	0.0026 ± 9.2%	0.0027 ± 5.2%	< LLD	0.0051 ± 33.4%
	963.5 <sup>c</sup>	0.0022 ± 22.7%	0.0026 ± 20.2%	0.0026 ± 5.5%	< LLD	0.0050 ± 33.5%
<sup>59</sup> Fe	1099.3	< LLD	< LLD	579.68 ± 19.1%	458.50 ± 5.9%	1364.4 ± 32.9%
	1291.6			671.63 ± 26.6%	615.47 ± 5.7%	1726.6 ± 37.1%
<sup>116</sup> In	417.0 <sup>c</sup>	< LLD	< LLD	-- <sup>225</sup>	0.0028 ± 14.9%	-- <sup>225</sup>
	818.8 <sup>c</sup>				0.0122 ± 17.0%	
	1097.0 <sup>c</sup>				0.0023 ± 14.9%	
	1293.4 <sup>c</sup>				0.0018 ± 14.8%	
	1507.7 <sup>c</sup>				0.0154 ± 17.3%	
<sup>140</sup> La <sup>223</sup>	328.8 <sup>c</sup>	0.1324 ± 19.1%	0.1007 ± 10.9%	0.1155 ± 4.8%	0.1297 ± 10.2%	0.2577 ± 12.5%
	487.0 <sup>c</sup>	0.0887 ± 10.7%	0.0728 ± 5.6%	0.0767 ± 2.2%	0.0709 ± 4.3%	0.1770 ± 8.8%
	815.0 <sup>c</sup>	0.2264 ± 19.0%	0.1686 ± 12.5%	0.1657 ± 8.8%	0.1512 ± 8.0%	0.4313 ± 13.7%
	1596.2 <sup>c</sup>	0.0987 ± 12.8%	0.0740 ± 7.3%	0.0769 ± 2.5%	0.0690 ± 3.7%	0.1681 ± 7.3%
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.0045 ± 2.0%	0.0044 ± 4.6%	0.0063 ± 3.1%	0.0036 ± 1.8%	0.0104 ± 4.7%
	1811.2 <sup>c</sup>	0.0319 ± 2.2%	0.0307 ± 5.9%	0.0447 ± 5.3%	0.0258 ± 4.7%	0.0691 ± 5.0%
<sup>46</sup> Sc <sup>224</sup>	889.3 <sup>c</sup>	0.0508 ± 19.2%	< LLD	< LLD	< LLD	0.1178 ± 13.5%
	1120.0 <sup>c</sup>	0.0090 ± 5.5%				< LLD
<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	0.0688 ± 2.7%	0.0660 ± 2.7%	0.0521 ± 1.1%	0.0697 ± 2.0%	0.1272 ± 6.1%
<sup>122</sup> Sb	564.1 <sup>c</sup>	0.0311 ± 7.3%	0.0297 ± 11.8%	0.0454 ± 12.4%	< LLD	-- <sup>225</sup>
<sup>81m</sup> Se	103.0	-- <sup>225</sup>	0.0015 ± 10.1%	0.0019 ± 2.2%	0.0017 ± 19.7%	0.0029 ± 54.1%
<sup>65</sup> Zn	1115.5	31.014 ± 6.9%	< LLD	< LLD	< LLD	< LLD
<sup>69m</sup> Zn	438.9	16.387 ± 9.5%	< LLD	< LLD	15.535 ± 39.9%	< LLD
<sup>175</sup> Yb	113.5 <sup>c</sup>	< LLD	< LLD	0.0752 ± 37.4%	< LLD	0.0639 ± 55.4%
	396.0			0.1023 ± 38.5%		< LLD

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.18: Συντελεστές βαθμονόμησης για κάθε πρότυπο δείγμα για το σενάριο ενεργοποίησης 110.5 h.**

<sup>220</sup> Ξηρή μάζα

<sup>221</sup> Για μονοενεργειακά ισότοπα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το suppressed φάσμα.

<sup>222</sup> Η φωτοκορυφή του <sup>28</sup>Al ανιχνεύεται, ωστόσο δεν δίνεται στο πιστοποιητικό του δείγματος.

<sup>223</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>228</sup>Ac.

<sup>224</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>214</sup>Bi.

<sup>225</sup> Όπου «--», σημαίνει ότι δεν δίνεται στο πιστοποιητικό και δεν ανιχνεύθηκε.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)		τιμή μεταβλητής U – unsuppressed φάσμα <sup>226</sup>									
		2710/ 2711	2710/ 1633b	2710/ 2782	2710/ SL-1	2711/ 1633b	2711/ 2782	2711/ SL-1	2782/ 1633b	2782/ SL-1	1633b/ SL-1
<sup>28</sup> Al	1778.8	0.470	4.081	2.815	--	7.053	2.892	--	6.761	--	--
<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	0.454	0.619	0.542	2.497	0.159	0.023	15.461	0.168	2.500	2.467
	657.0 <sup>c</sup>	--	0.201	0.237	--	--	--	--	0.350	--	--
	1216.3 <sup>c</sup>	--	0.256	--	--	--	--	--	--	--	--
<sup>198</sup> Au	411.8	--	--	1.443	--	--	--	--	--	--	--
<sup>64</sup> Cu	1345.8	--	--	0.687	--	--	--	--	--	--	--
<sup>152</sup> Eu	121.8 <sup>c</sup>	0.864	0.742	0.355	1.497	0.460	1.001	1.170	0.881	1.657	1.339
	841.6 <sup>c</sup>	0.615	0.593	--	0.264	0.217	--	1.425	--	--	1.388
	963.5 <sup>c</sup>	0.551	0.721	--	1.596	0.046	--	1.372	--	--	1.436
<sup>72</sup> Ga	834.0 <sup>c</sup>	1.817	--	3.198	1.031	--	1.858	2.047	--	2.668	--
<sup>42</sup> K	1524.7	0.073	0.380	0.711	3.170	0.749	0.727	3.236	0.977	3.389	3.140
<sup>59</sup> Fe	1099.3	--	--	--	--	--	--	--	0.858	2.015	1.698
	1291.6	--	--	--	--	--	--	--	0.138	1.728	1.583
<sup>140</sup> La	328.8 <sup>c</sup>	1.122	0.653	0.132	3.065	1.140	1.958	4.629	1.385	3.687	4.368
	487.0 <sup>c</sup>	1.478	1.245	1.411	4.855	0.736	0.220	6.493	0.584	6.708	6.432
	815.0 <sup>c</sup>	1.178	1.335	1.505	2.802	0.157	0.442	4.187	0.357	4.645	4.365
	1596.2 <sup>c</sup>	1.751	1.696	2.025	3.944	0.415	0.341	7.045	1.357	7.952	7.375
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.228	8.594	5.783	12.115	8.803	2.807	11.551	12.052	13.897	7.914
	1811.2 <sup>c</sup>	0.510	5.183	3.309	10.575	16.910	1.701	9.858	6.532	11.841	5.819
<sup>46</sup> Sc	889.3 <sup>c</sup>	--	--	--	3.599	--	--	--	--	--	--
	1120.0 <sup>c</sup>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	0.918	8.654	1.861	7.292	7.704	2.936	7.661	13.612	7.276	9.615
<sup>122</sup> Sb	564.1 <sup>c</sup>	0.291	--	--	--	2.332	--	--	--	--	--
<sup>81m</sup> Se	103.0	--	--	--	--	2.599	0.740	0.900	0.352	0.755	0.638
<sup>65</sup> Zn	1115.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<sup>69m</sup> Zn	438.9	--	--	0.010	--	--	--	--	--	--	--
<sup>175</sup> Yb	113.5 <sup>c</sup>	--	0.410	--	--	--	--	--	--	--	0.251
	396.0	--	0.196	--	--	--	--	--	--	--	--

<sup>c</sup> φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.19: Σύγκριση συντελεστών βαθμονόμησης, λ, για το σενάριο ενεργοποίησης 110.5 h.**

Από τα αποτελέσματα των δύο πινάκων προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα και για αυτό το σενάριο ακτινοβολήσης. Μεταξύ των συντελεστών βαθμονόμησης για τα δύο υλικά Montana Soil 2710 και 2711 δεν παρουσιάζονται στατιστικά σημαντικές διαφορές. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τα άλλα δείγματα, που έχουν διαφορετική σύσταση. Πιο συγκεκριμένα, ενώ για ορισμένα στοιχεία, όπως As, Au, Cu, Eu, K, Fe, La, οι συντελεστές απόδοσης που προσδιορίζονται από δείγματα διαφορετικής σύστασης δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά, για άλλα στοιχεία, όπως Al, Mn, Na, οι συντελεστές βαθμονόμησης διαφέρουν σημαντικά από δείγμα σε δείγμα.

<sup>226</sup> Δεν δίνονται τιμές σύγκρισης για το In και το Ce, καθώς έχουν ανιχνευθεί μόνο σε ένα δείγμα.



Οι διαφορές αυτές ενδεχομένως οφείλονται στην επίδραση επί των φωτοκορυφών που χρησιμοποιούνται, προϊόντων άλλων αντιδράσεων, οι οποίες παράγονται από την ενεργοποίηση άλλων στοιχείων που περιέχονται στα πρότυπα υλικά. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονισθεί ότι ορισμένα προϊόντα ενεργοποίησης παράγονται από περισσότερες της μίας αντιδράσεις των νετρονίων με διαφορετικά στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσε η περιεκτικότητα ενός προτύπου υλικού σε ένα στοιχείο να επηρεάζει τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας ενός άλλου στοιχείου. Μία τέτοια περίπτωση είναι και η ενεργοποίηση ορισμένων στοιχείων με ταχεία νετρόνια, παρόλο που γενικά οι ενεργές διατομές των αντιδράσεων θερμικών νετρονίων ( $n_{th,\gamma}$ ) είναι αρκετά υψηλότερες από ότι οι αντίστοιχες αντιδράσεις ταχέων νετρονίων ( $n_{f,p}$ ) ή ( $n_{f,\alpha}$ ). Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στη βιβλιογραφία κυρίως σε εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης με θερμικά νετρόνια. Ο λόγος είναι ότι οι πληθυσμοί νετρονίων της πηγής δεν έχουν θερμοποιηθεί πλήρως, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται και προϊόντα από αντιδράσεις με ταχεία νετρόνια (Athari Allaf, et al., 2004). Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι εξής περιπτώσεις ισοτόπων:

- το  $^{28}\text{Al}$  μπορεί να προκύψει και από τη αντίδραση  $^{38}\text{Si}(n_{f,p})^{28}\text{Al}$ , με αποτέλεσμα η φωτοκορυφή που σχηματίζεται στο φάσμα να οφείλεται τόσο στο Al, όσο και στο Si (Perlman, et al., 1969), (Gatschke, et al., 1980), (Lavi, et al., 1996). Συνεπώς, η περιεκτικότητα του δείγματος σε Si, θα μπορούσε να έχει επίδραση στον προσδιορισμό του Al.
- το  $^{56}\text{Mn}$  μπορεί να προκύψει και από την αντίδραση  $^{56}\text{Fe}(n_{f,p})^{56}\text{Mn}$ . Μάλιστα, ερευνητές έχουν εκτιμήσει ότι 1 gr Fe συνεισφέρει μέσω αυτής της αντίδρασης στην παραγωγή 20  $\mu\text{gr}$   $^{56}\text{Mn}$  (Athari Allaf, et al., 2004), (Alves da Costa, et al., 2007). Συνεπώς, η περιεκτικότητα του δείγματος σε Fe, θα μπορούσε να έχει επίδραση στον προσδιορισμό του Mn.
- το  $^{24}\text{Na}$  μπορεί να προκύψει και από τις αντιδράσεις  $^{24}\text{Mg}(n_{f,p})^{24}\text{Na}$  και  $^{27}\text{Al}(n_{f,\alpha})^{24}\text{Na}$  (Retief, et al., 1971), (Athari Allaf, et al., 2004). Παρόλο που η ενεργός διατομή του Na για θερμικά νετρόνια είναι πολύ υψηλότερη από την ενεργό διατομή του Mg για ταχεία νετρόνια (Jeronymo, et al., 1963), ερευνητές έχουν εκτιμήσει ότι για κάθε 1 mg Mg παράγονται 0.65  $\mu\text{g}$  Na μέσω της αντίδρασης  $^{24}\text{Mg}(n_{f,p})^{24}\text{Na}$  (Singh, et al., 1973). Αντίστοιχα, αν και

η ενεργός διατομή του Al για ταχέα νετρόνια είναι πολύ χαμηλότερη από ότι την ενεργό διατομή του Na για θερμικά νετρόνια (Schmitt, et al., 1961), έχει εκτιμηθεί ότι μέσω της αντίδρασης  $^{27}\text{Al}(n_{f,\alpha})^{24}\text{Na}$  για κάθε 3.7 mg Al καταγράφονται γεγονότα στη φωτοκορυφή του  $^{24}\text{Na}$  που αντιστοιχούν στην ενεργοποίηση με αντίδραση  $(n_{th,\gamma})$  1 μg Na. Συνεπώς, η περιεκτικότητα του δείγματος σε Mg και Al, θα μπορούσε να έχει επίδραση στον προσδιορισμό του Na.

Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία αναφέρεται η επίδραση που έχουν πάνω στη ροή των νετρονίων φαινόμενα όπως η απορρόφηση και η σκέδαση των νετρονίων εντός του ίδιου του δείγματος (Tzika, et al., 2004), (Blaauw, et al., 2007). Βέβαια, στις περιπτώσεις αυτές η μάζα του ενεργοποιούμενου δείγματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερη (τάξη μεγέθους 1 kg) από εκείνη των δειγμάτων που μελετηθήκαν στην παρούσα Δ.Δ., οπότε το φαινόμενο αυτό ίσως δεν παίζει σημαντικό ρόλο στα πειράματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο αυτό.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το δείγμα I.A.E.A. Lake Sediment SL-1, το οποίο φαίνεται ότι συστηματικά δίνει υψηλότερες τιμές των συντελεστών βαθμονόμησης, σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά που εξετάστηκαν. Μάλιστα, όπως φαίνεται από το στατιστικό έλεγχο U ανάμεσα σε όλα τα δείγματα (Πίνακας 8.19), η απόκλιση των συντελεστών βαθμονόμησης με βάση αυτό το δείγμα είναι στατιστικά σημαντική, για όλα σχεδόν τα στοιχεία. Η διάρκεια ενεργοποίησης του δείγματος αυτού ήταν 113 h – και όχι 110.5 h όπως των υπολοίπων δειγμάτων – δηλαδή αυξημένη μόνο κατά ~ 2%, γεγονός όμως που δεν μπορεί να ερμηνεύσει το μέγεθος των παρατηρούμενων αποκλίσεων. Επιπλέον, με βάση το πιστοποιητικό του δείγματος, φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις που δίνονται αποτελούν μέσες τιμές από αποτελέσματα που δόθηκαν από διάφορα εργαστήρια στο πλαίσιο Άσκησης Διασύγκρισης και μάλιστα οι αρχικές τιμές του 1979 αναθεωρήθηκαν το 1999. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το δείγμα I.A.E.A. Lake Sediment SL-1 αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη.

Εν κατακλείδι, στον Πίνακα 8.20 δίνονται οι συντελεστές βαθμονόμησης, λ, για κάθε τύπο δείγματος, για το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης μετά από ενεργοποίηση διάρκειας 110.5 h. Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον

προσδιορισμό της συγκέντρωσης των στοιχείων σε άγνωστα δείγματα ίδιου τύπου. Σημειώνεται ότι για τα δείγματα χώματος, οι συντελεστές βαθμονόμησης προκύπτουν ως οι σταθμισμένες μέσες τιμές των αντίστοιχων συντελεστών από τα πρότυπα δείγματα N.I.S.T. Montana Soil 2710 και N.I.S.T. Montana Soil 2711.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)		λ (gr <sup>227</sup> /cps) – unsuppressed <sup>228</sup> φάσμα				
		χώμα	ιπτάμενη τέφρα	βιομηχανική λύς	ίζημα λίμνης	
<sup>28</sup> Al	1778.8	3.5272 ± 3.9%	4.8932 ± 2.4%	2.2890 ± 14.5%	-- <sup>229</sup>	
<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	0.0388 ± 3.1%	0.0397 ± 3.4%	0.0383 ± 6.9%	0.1321 ± 28.3%	
	657.0 <sup>c</sup>	0.3610 ± 9.9%	0.3476 ± 16.3%	0.3634 ± 20.8%	< LLD	
	1216.3 <sup>c</sup>	0.7312 ± 25.0%	0.6595 ± 32.3%	< LLD	< LLD	
<sup>198</sup> Au	411.8	0.0025 ± 15.6%	-- <sup>225</sup>	0.0019 ± 2.9%	-- <sup>225</sup>	
<sup>141</sup> Ce	145.5	< LLD	< LLD	1.5986 ± 6.9%	< LLD	
<sup>64</sup> Cu	1345.8	12.050 ± 35.8%	< LLD	19.207 ± 54.6%	< LLD	
<sup>72</sup> Ga	834.0 <sup>c</sup>	0.1423 ± 30.5%	-- <sup>225</sup>	0.0605 ± 15.2%	0.3314 ± 30.5%	
<sup>42</sup> K	1524.7	3.3895 ± 4.5%	3.5634 ± 3.5%	2.7643 ± 22.8%	9.2452 ± 19.5%	
	121.8 <sup>c</sup>	0.0015 ± 12.4%	0.0016 ± 3.5%	0.0011 ± 35.8%	0.0028 ± 33.2%	
	841.6 <sup>c</sup>	0.0026 ± 9.1%	0.0027 ± 5.2%	< LLD	0.0051 ± 33.4%	
<sup>152</sup> Eu	963.5 <sup>c</sup>	0.0024 ± 15.1%	0.0026 ± 5.5%	< LLD	0.0050 ± 33.5%	
	1099.3	< LLD	579.68 ± 19.1%	458.50 ± 5.9%	1364.4 ± 32.9%	
	1291.6		671.63 ± 26.6%	615.47 ± 5.7%	1726.6 ± 37.1%	
<sup>116</sup> In	417.0 <sup>c</sup>	< LLD	-- <sup>225</sup>	0.0028 ± 14.9%	-- <sup>225</sup>	
	818.8 <sup>c</sup>			0.0122 ± 17.0%		
	1097.0 <sup>c</sup>			0.0023 ± 14.9%		
	1293.4 <sup>c</sup>			0.0018 ± 14.8%		
	1507.7 <sup>c</sup>			0.0154 ± 17.3%		
<sup>140</sup> La <sup>230</sup>	328.8 <sup>c</sup>	0.1057 ± 11.0%	0.1155 ± 4.8%	0.1297 ± 10.2%	0.2577 ± 12.5%	
	487.0 <sup>c</sup>	0.0753 ± 7.7%	0.0767 ± 2.2%	0.0709 ± 4.3%	0.1770 ± 8.8%	
	815.0 <sup>c</sup>	0.1798 ± 12.7%	0.1657 ± 8.8%	0.1512 ± 8.0%	0.4313 ± 13.7%	
	1596.2 <sup>c</sup>	0.0778 ± 11.5%	0.0769 ± 2.5%	0.0690 ± 3.7%	0.1681 ± 7.3%	
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	0.0045 ± 1.8%	0.0063 ± 3.1%	0.0036 ± 1.8%	0.0104 ± 4.7%	
	1811.2 <sup>c</sup>	0.0317 ± 2.1%	0.0447 ± 5.3%	0.0258 ± 4.7%	0.0691 ± 5.0%	
<sup>46</sup> Sc <sup>231</sup>	889.3 <sup>c</sup>	0.0508 ± 19.2%	< LLD	< LLD	0.1178 ± 13.5%	
	1120.0 <sup>c</sup>	0.0090 ± 5.5%			< LLD	
<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	0.0673 ± 2.1%	0.0521 ± 1.1%	0.0697 ± 2.0%	0.1272 ± 6.1%	
<sup>122</sup> Sb	564.1 <sup>c</sup>	0.0307 ± 6.2%	0.0454 ± 12.4%	< LLD	-- <sup>225</sup>	
<sup>81m</sup> Se	103.0	0.0015 ± 10.1%	0.0019 ± 2.2%	0.0017 ± 19.7%	0.0029 ± 54.1%	
<sup>65</sup> Zn	1115.5	31.014 ± 6.9%	< LLD	< LLD	< LLD	
<sup>69m</sup> Zn	438.9	16.387 ± 9.5%	< LLD	15.535 ± 39.9%	< LLD	
<sup>175</sup> Yb	113.5 <sup>c</sup>	< LLD	0.0752 ± 37.4%	< LLD	0.0639 ± 55.4%	
	396.0		0.1023 ± 38.5%		< LLD	

c φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.20: Συντελεστές βαθμονόμησης, λ, για κάθε πρότυπο δείγμα για το σενάριο ενεργοποίησης 110.5 h.**

<sup>227</sup> Ήπρη μάζα

<sup>228</sup> Για μονοενεργειακά ισότοπα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το suppressed φάσμα.

<sup>229</sup> Η φωτοκορυφή του <sup>28</sup>Al ανιχνεύεται, ωστόσο δεν δίνεται στο πιστοποιητικό του δείγματος.

<sup>230</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>228</sup>Ac.

<sup>231</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>214</sup>Bi.

## 8.6 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 8.2.3, στη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) είχαν μελετηθεί διάφορα σενάρια ακτινοβόλησης και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης μίας σειρά από πρότυπα υλικά του N.I.S.T.: Coal Fly Ash 1633b, San Joaquin Soil 2709, Montana Soil 2710, Montana Soil 2711. Για τα στοιχεία που προσδιορίστηκαν με αυτά τα σενάρια νετρονικής ενεργοποίησης και ανάλυσης εκτιμήθηκε η ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση για την ανάλυση δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας (χρησιμοποιήθηκαν οι αναλύσεις της πρότυπης τέφρας Coal Fly ash 1633b) και για την ανάλυση χωμάτων (χρησιμοποιήθηκε το χώμα Montana Soil 2710 και το χώμα San Joaquin 2709). Στον Πίνακα 8.21 δίνονται ενδεικτικά οι ελάχιστες ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) για το δείγμα χώματος Montana Soil 2710, το οποίο είχε αναλυθεί τόσο στην ανιχνευτική διάταξη HPGe-33% όσο και στη διάταξη XtRa (πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression).

Στοιχείο	Montana Soil 2710 HPGe-33% 110.5 h ενεργοποίηση		Montana Soil 2710 XtRa 116 h ενεργοποίηση	
	Διάρκεια ανάλυσης (h)	Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση (ppm)	Διάρκεια ανάλυσης (h)	Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση (ppm)
Al <sup>232</sup>	1.0	20659		
As	13.4	25	125	14
K	13.4	3824	125	2288
Mn	1.9	28	125	19
Na	13.4	68	125	50
Sb	86.8	16	125	8
Zn	86.8	3959	125	4366

Πίνακας 8.21: Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση με βάση το πρότυπο δείγμα Montana Soil 2710 (Ρούνη, 2008).

Για το ίδιο δείγμα, Montana Soil 2710, μάζας 23.2429 gr, δίδονται στον Πίνακα 8.22 οι ελάχιστες ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις που προέκυψαν με βάση τη διερεύνηση που έγινε στο πλαίσιο της παρούσης Δ.Δ., για το βέλτιστο σενάριο για κάθε στοιχείο. Ο υπολογισμός του κατώτερου επιπέδου ανίχνευσης  $L_D$  γίνεται σύμφωνα με τη Σχέση (3.4), ενώ για τον υπολογισμό της ελάχιστης ανιχνεύσιμης συγκέντρωσης επιπλέον χρησιμοποιούνται και οι συντελεστές βαθμονόμησης που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 8.5. Επισημαίνεται ότι το  $L_D$  και κατά συνέπεια η

<sup>232</sup> Οι τιμές για το Al έχουν προκύψει από το πρότυπο δείγμα χώματος N.I.S.T. San Joaquin 2709.

ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση ενός στοιχείου εξαρτάται από το δείγμα το οποίο αναλύεται. Επιπλέον, για τα στοιχεία που δεν έχουν ανιχνευθεί δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης συγκέντρωσης, καθώς δεν μπορούν να υπολογισθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές βαθμονόμησης, λ.

Montana Soil 2710					
	Στοιχείο	Διάρκεια ενεργοποίησης	Διάρκεια αναμονής/ ανάλυσης	Φάσμα	Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση (ppm)
Certified values	Al	1 h	1 min / 15 min	suppressed	932
	As	110.5 h	5 h / 24 h	unsuppressed	9
	Cu	110.5 h	5 h / 24 h	suppressed	836
	Fe	110.5 h	5 h / 96 h	suppressed	11848
	K	110.5 h	1 min / 5 h	suppressed	933
	Mg	1 h	1 min / 15 min	unsuppressed	4246
	Mn	110.5 h	1 min / 1 h	unsuppressed	13
	Na	110.5 h	1 min / 5 h	unsuppressed	55
	Sb	110.5 h	5 h / 24 h	suppressed	10
	Zn ( <sup>65</sup> Zn)	110.5 h	5 h / 96 h	suppressed	759
Zn ( <sup>69m</sup> Zn)	110.5 h	5 h / 96 h	suppressed	618	
Non certified values	Au	110.5 h	29 h / 72 h	suppressed	0.1
	Eu	110.5 h	5 h / 24 h	unsuppressed	1
	Ga	110.5 h	5 h / 96 h	unsuppressed	18
	La	110.5 h	29 h / 72 h	unsuppressed	2
	Sc	110.5 h	29 h / 72 h	unsuppressed	2

Πίνακας 8.22: Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση για τον ανιχνευτή XtRa (παρούσα Δ.Δ.).

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, με τη χρήση του συστήματος Compton Suppression και τα σενάρια ενεργοποίησης - ανάλυσης που εξετάστηκαν στην παρούσα Δ.Δ. και περιγράφονται στο Κεφάλαιο αυτό, είναι δυνατός ο προσδιορισμός περισσότερων στοιχείων και με καλύτερα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης από ότι στη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008). Ειδικότερα, για τα κοινά στοιχεία προκύπτει ότι με τα σενάρια ενεργοποίησης - ανάλυσης που εισάγονται στην παρούσα Δ.Δ. επιτυγχάνονται καλύτερα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης, έως και 7 φορές (Πίνακας 8.23). Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές της ελάχιστης ανιχνεύσιμης συγκέντρωσης που συγκρίνονται αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο πρότυπο υλικό και για διαφορετικά σενάρια ενεργοποίησης - ανάλυσης, επομένως αποτελούν μόνο ένδειξη της βελτίωσης που μπορεί να εισάγει το σενάριο ενεργοποίησης - ανάλυσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα Δ.Δ. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι στις δύο περιπτώσεις στοιχείων όπου τα προτεινόμενα στη Δ.Δ. σενάρια φαίνεται να οδηγούν σε χειρότερα επίπεδα ανίχνευσης (Na και Sb), η διαφορά δεν είναι

στατιστικά σημαντική. Κατά συνέπεια το συμπέρασμα που προκύπτει για τα δύο αυτά στοιχεία είναι ότι, με τα προτεινόμενα σενάρια ακτινοβόλησης - ανάλυσης δεν βελτιώθηκε το επίπεδο της ελάχιστης ανιχνεύσιμης συγκέντρωσης.

Montana Soil 2710				
Ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση (ppm)				
Στοιχείο	Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) HPGe-33%	Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) XtRa	Παρούσα Δ.Δ. XtRa	Λόγος <sup>233</sup> XtRa
As	25	14	9	1.56
K	3824	2288	933	2.45
Mn	28	19	13	1.46
Na	68	50	55	0.91
Sb	16	8	10	0.80
Zn	3959	4366	618	7.06

Πίνακας 8.23: Σύγκριση ελάχιστης ανιχνεύσιμης συγκέντρωσης για τον ανιχνευτή XtRa.

## 8.7 Συμπεράσματα από τις εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης με την ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS

Σκοπός του Κεφαλαίου αυτού ήταν η χρήση του συστήματος XtRa - CSS σε εφαρμογές νετρονικής ενεργοποίησης, η διερεύνηση του κατά πόσον η νέα διάταξη, σε συνδυασμό με νέα σενάρια ακτινοβόλησης - ανάλυσης βελτιώνει τις ανιχνευτικές δυνατότητες του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. σε τέτοιου είδους εφαρμογές και φυσικά η βαθμονόμηση της όλης διαδικασίας της νετρονικής ενεργοποίησης στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε δείγματα διαφορετικής σύστασης: δύο δείγματα χώματος, ένα δείγμα ιπτάμενης τέφρας, ένα δείγμα βιομηχανικής ιλύος και ένα δείγμα ιζήματος από λίμνη. Όσον αφορά στην ενεργοποίηση, μελετήθηκαν δύο σενάρια: ένα σύντομο διάρκειας 1 h για πιο βραχύβια ισότοπα και ένα μεγαλύτερης διάρκειας 110.5 h για πιο μακρόβια ισότοπα. Κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση εξετάστηκαν διάφορα σενάρια, όσον αφορά στην καθυστέρηση και στη διάρκεια λήψης του φάσματος, με σκοπό την εύρεση του σεναρίου ανάλυσης που συνδυάζει επαρκή ρυθμό καταγραφής γεγονότων και χαμηλές αβεβαιότητες προσδιορισμού των φωτοκορυφών που ενδιαφέρουν.

Από τη σύγκριση των φασμάτων με και χωρίς την ενεργητική θωράκιση, προέκυψε ότι η χρήση του suppressed φάσματος δίνει πλεονέκτημα στην ανίχνευση ορισμένων μόνο στοιχείων, καθώς τα περισσότερα ισότοπα που προκύπτουν από νετρονική ενεργοποίηση είναι πολυενεργειακά, εκπέμποντας φωτόνια σε σειρά,

<sup>233</sup> Σημειώνεται ότι για τις περιπτώσεις που ο λόγος είναι μικρότερος από 1, ο στατιστικός έλεγχος δείχνει ότι δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τη μονάδα.

γεγονός που οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας των αντίστοιχων φωτοκορυφών, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Ωστόσο, συγκριτικά με τα αποτελέσματα πειραμάτων νετρονικής ενεργοποίησης που είχαν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της Δ.Δ. (Ρούνη, 2008), παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση, τόσο όσον αφορά στο πλήθος των στοιχείων που ανιχνεύονται όσο και σε όρους ελάχιστης ανιχνεύσιμης συγκέντρωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο πλήθος των σεναρίων ακτινοβολήσης – ανάλυσης που μελετήθηκαν και δευτερευόντως στη χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS.

Συγκεντρωτικά και συνοπτικά, από τη μελέτη του παρόντος Κεφαλαίου προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα ανά στοιχείο:

- **Al**

Το ισότοπο του Al που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το  $^{28}\text{Al}$ , με χρόνο ημιζωής 2.246 min και εκπέμπει μοναδικό φωτόνιο ενέργειας 1778.8 keV. Για την ανάλυσή του, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο φάσματα, *unsuppressed* και *suppressed*, καθώς στην ενεργειακή περιοχή που ανιχνεύεται, το συνεχές υπόστρωμα είναι ιδιαίτερα χαμηλό και δεν επηρεάζεται έντονα από την ενεργητική θωράκιση. Αλουμίνιο ανιχνεύθηκε τόσο στο σύντομο σενάριο ενεργοποίησης διάρκειας 1 h, όσο και στο σενάριο διάρκειας 110.5 h κατά την πρώτη ώρα ανάλυσης. Από τις αβεβαιότητες προσδιορισμού της φωτοκορυφής στα δύο σενάρια, προτείνεται *ενεργοποίηση 1 h, αναμονή 1 min και ανάλυση 15 min*.

- **As**

Το ισότοπο του As που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{76}\text{As}$  με χρόνο ημιζωής 26.3 h. Για την ανίχνευσή του προτείνεται το σενάριο *ενεργοποίησης 110.5 h* και χρήση του *unsuppressed φάσματος*. Το φωτόνιο με το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής (559.1 keV), ανιχνεύθηκε σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Συνολικά, από όλες τις αναλύσεις διαφορετικής διάρκειας, προέκυψε ότι το βέλτιστο σενάριο ανάλυσης, στο οποίο ανιχνεύονται όλες οι φωτοκορυφές του ισοτόπου, είναι *αναμονή 5 h και ανάλυση διάρκειας 24 h*.

- **Au**

Το ισότοπο του Au που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το μονοενεργειακό  $^{198}\text{Au}$ , με χρόνο ημιζωής 2.695 d. Για την ανίχνευσή του, με βάση τα

διάφορα σενάρια ανάλυσης, προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 29 h, ανάλυση 72 h* και χρήση του *suppressed φάσματος*, όπου οι αβεβαιότητες προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής είναι χαμηλότερες.

- **Ce**

Υπάρχουν δύο ισότοπα του Ce που προκύπτουν από νευτρονική ενεργοποίηση: το  $^{141}\text{Ce}$  και το  $^{143}\text{Ce}$ . Ωστόσο, λόγω της ισοτοπικής αναλογίας των ισωτόπων αυτών (88.5% και 11.1%, αντίστοιχα), ανιχνεύθηκε μόνο το μονοενεργειακό  $^{141}\text{Ce}$ , με χρόνο ημιζωής 32.503 d. Για την ανίχνευσή του προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 96 h* και χρήση του *suppressed φάσματος*, όπου οι αβεβαιότητες προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής είναι χαμηλότερες.

- **Co**

Το ισότοπο του Co που προκύπτει από νευτρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{60}\text{Co}$ , με χρόνο ημιζωής 5.27 γ. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων, για την ανίχνευση του  $^{60}\text{Co}$  προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 29 h, ανάλυση 72 h* και χρήση του *unsuppressed φάσματος*. Δεδομένου του χρόνου ημιζωής του ισωτόπου, επισημαίνεται ότι δεν πρέπει να γίνεται προσδιορισμός Co σε δείγμα το οποίο έχει ακτινοβοληθεί ξανά στο παρελθόν.

- **Cu**

Το ισότοπο του Cu που προκύπτει από νευτρονική ενεργοποίηση είναι ο  $^{64}\text{Cu}$ , με χρόνο ημιζωής 12.74 h. Το ισότοπο  $^{64}\text{Cu}$  μπορεί να αποδιεγερθεί με  $\beta^+$  διάσπαση – με αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων ενέργειας 511 keV – ή με σύλληψη ηλεκτρονίου εκπέμποντας στη συνέχεια μοναδικό φωτόνιο με πολύ χαμηλό ποσοστό εκπομπής (0.48%). Για το λόγο αυτό, η αντίστοιχη φωτοκορυφή ανιχνεύθηκε μόνο στα δείγματα Montana Soil 2710 και Industrial Sludge 2782, όπου η συγκέντρωση του Cu ήταν υψηλή (~ 3000 ppm). Για την ανίχνευσή του προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 24 h* και χρήση του *suppressed φάσματος*, όπου η επιφάνεια της φωτοκορυφής προσδιορίζεται με μικρότερη αβεβαιότητα.



- **Eu**

Το ισότοπο του Eu που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{152}\text{Eu}$ , με χρόνο ημιζωής 9.3 h. Το ισότοπο ανιχνεύθηκε σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν και προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 24 h* και χρήση του *unsuppressed φάσματος*.

- **Fe**

Το ισότοπο του Fe που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το  $^{59}\text{Fe}$ , με χρόνο ημιζωής 44.6 d, που εκπέμπει δύο φωτόνια, αλλά όχι σε σειρά. Η δυσκολία εφαρμογής της μεθόδου νετρονικής ενεργοποίησης για την περίπτωση του Fe, είναι η πολύ χαμηλή ισοτοπική αναλογία του ενεργοποιούμενου ισοτόπου  $^{58}\text{Fe}$  (0.31%). Παρά τη δυσκολία αυτή,  $^{59}\text{Fe}$  ανιχνεύθηκε σε όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν. Προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 96 h* και χρήση του *suppressed φάσματος*. Βέβαια, σημειώνεται ότι μεγαλύτερη αναμονή και μεγαλύτερης διάρκειας ανάλυση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αβεβαιότητας προσδιορισμού των φωτοκορυφών του ισοτόπου.

- **Ga**

Το ισότοπο του Ga που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{72}\text{Ga}$  με χρόνο ημιζωής 14.10 h. Κατά τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ., ανιχνεύθηκαν μόνο τα φωτόνια ενέργειας 834.0 keV, που έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής, κυρίως λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης του στοιχείου στα υπό μελέτη δείγματα (< 30 ppm). Για την ανίχνευσή του προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 96 h* και χρήση του *unsuppressed φάσματος*.

- **In**

Το ισότοπο του In που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{116}\text{In}$ , με χρόνο ημιζωής 54.2 min. Οι φωτοκορυφές του  $^{116}\text{In}$  ανιχνεύθηκαν τόσο στο σύντομο σενάριο ενεργοποίησης, όσο και στο μεγαλύτερης διάρκειας στην ανάλυση της πρώτης ώρας, αν και με υψηλότερες αβεβαιότητες. Υπενθυμίζεται ότι μόνο το δείγμα Industrial Sludge 2782 περιείχε In. Προτείνεται *ενεργοποίηση 1 h, αναμονή 1 min, ανάλυση 15 min* και χρήση του *unsuppressed φάσματος*.

- **K**

Το ισότοπο του K που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το μονοενεργειακό  $^{42}\text{K}$ , με χρόνο ημιζωής 12.36 h. Για την ανίχνευσή του, με βάση τα διάφορα σενάρια ανάλυσης, προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 1 min, ανάλυση 5 h* και χρήση του *suppressed φάσματος*.

- **La**

Το ισότοπο του La που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{140}\text{La}$ , με χρόνο ημιζωής 1.68 d. Το  $^{140}\text{La}$  ανιχνεύθηκε σε όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν και προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 29 h, ανάλυση 72 h* και χρήση του *unsuppressed φάσματος*. Κατά τον προσδιορισμό του  $^{140}\text{La}$  δεν θα πρέπει να αμελείται η συνεισφορά που έχουν στη διαμόρφωση της φωτοκορυφής στην ενέργεια 328.8 keV, τα φωτόνια ενέργειας 328.0 keV του  $^{228}\text{Ac}$  που ανιχνεύονται στο υπόστρωμα.

- **Mg**

Το ισότοπο του Mg που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το  $^{27}\text{Mg}$ , με χρόνο ημιζωής  $T_{1/2} = 9.45 \text{ min}$ . Το  $^{27}\text{Mg}$  είναι πολυενεργειακό, εκπέμποντας συνολικά τρία φωτόνια: δύο σε σειρά (170.6 keV και 843.8 keV) κι ένα αθροιστικό (1014.4 keV). Το ισότοπο, πέραν του σύντομου σεναρίου ενεργοποίησης, ανιχνεύθηκε και στο σενάριο διάρκειας 110.5 h κατά την πρώτη ώρα ανάλυσης, αν και με αρκετά υψηλότερες αβεβαιότητες. Ως εκ τούτου, προτείνεται *ενεργοποίηση 1 h, αναμονή 1 min και ανάλυση 15 min*. Όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο φάσμα, η φωτοκορυφή στα 843.8 keV ανιχνεύεται με χαμηλότερες αβεβαιότητες στο *unsuppressed φάσμα*, ενώ η φωτοκορυφή στα 1014.4 keV ανιχνεύεται καλύτερα στο *suppressed φάσμα*. Δεδομένου όμως ότι το φωτόνιο ενέργειας 843.8 keV έχει το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής (100%), προτείνεται η χρήση του *unsuppressed φάσματος*. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στη φωτοκορυφή των 843.8 keV υπάρχει επίδραση και από τη φωτοκορυφή στα 846.6 keV του  $^{56}\text{Mn}$ .

- **Mn**

Το ισότοπο του Mn που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{56}\text{Mn}$ , με χρόνο ημιζωής 2.58 h, το οποίο πρακτικά εκπέμπει τρία φωτόνια. Ως εκ τούτου, προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 1 min, ανάλυση*

1 h και χρήση του *unsuppressed* φάσματος. Σημειώνεται όμως ότι η μία φωτοκορυφή του ισότοπου, στην ενέργεια 846.6 keV, επηρεάζεται κατά την ανάλυση του φάσματος από τη φωτοκορυφή του  $^{27}\text{Mg}$  στην κοντινή ενέργεια των 843.8 keV.

- **Na**

Το ισότοπο του Na που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το  $^{24}\text{Na}$ , με χρόνο ημιζωής 14.96 h, το οποίο εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά, ενέργειας 1368.6 keV και 2754.0 keV. Η φωτοκορυφή ενέργειας 1368.6 keV του  $^{24}\text{Na}$  ανιχνεύθηκε τόσο στο σύντομο σενάριο ενεργοποίησης 1 h, όσο και στο μεγαλύτερης διάρκειας. Με βάση τις αναλύσεις και με τα δύο σενάρια ενεργοποίησης, προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 1 min, ανάλυση 5 h* και χρήση του *unsuppressed* φάσματος (λόγω της εκπομπής του φωτονίου ενέργειας 1368.6 keV σε σειρά με φωτόνια ενέργειας 2754.0 keV).

- **Sb**

Το ισότοπο του Sb που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{122}\text{Sb}$ , με χρόνο ημιζωής 2.72 d. Το ισότοπο ανιχνεύθηκε σε όλα τα δείγματα που εξετάσθηκαν και προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 24 h* και χρήση του *unsuppressed* φάσματος.

- **Sc**

Το ισότοπο του Sc που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το  $^{46}\text{Sc}$ , με χρόνο ημιζωής 83.8 d, το οποίο εκπέμπει δύο φωτόνια σε σειρά. Για την ανίχνυσή του προτείνεται *ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 29 h, ανάλυση 72 h* και χρήση του *unsuppressed* φάσματος. Επισημαίνεται ότι κατά τον προσδιορισμό του  $^{46}\text{Sc}$  δεν θα πρέπει να αμελείται η συνεισφορά στη φωτοκορυφή στην ενέργεια 1120.0 keV, από τα φωτόνια ενέργειας 1120.3 keV του  $^{214}\text{Bi}$  που ανιχνεύονται στο υπόστρωμα.

- **Se**

Πολλά ισότοπα του Se μπορούν να προκύψουν από νετρονική ενεργοποίηση. Το ισότοπο που ανιχνεύθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. είναι το μονοενεργειακό  $^{81\text{m}}\text{Se}$ , με χρόνο ημιζωής 57.3 min, το οποίο προκύπτει από την ενεργοποίηση του ισότοπου  $^{80}\text{Se}$  με τη υψηλότερη ισοτοπική αναλογία (50%). Για την ανίχνυσή του προτείνεται

ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 24 h και χρήση του *suppressed* φάσματος που οδηγεί σε χαμηλότερες αβεβαιότητες.

- **Sr**

Δύο ισότοπα του Sr μπορούν να προκύψουν μέσω νετρονικής ενεργοποίησης: το  $^{87m}\text{Sr}$  και το  $^{89}\text{Sr}$ . Από αυτά πρακτικά μόνο το  $^{87m}\text{Sr}$  μπορεί να ανιχνευθεί, καθώς το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου που εκπέμπει το  $^{89}\text{Sr}$  είναι πάρα πολύ μικρό (0.01%). Στο πλαίσιο της μελέτης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο αυτό ανιχνεύθηκε μόνο το μονοενεργειακό  $^{87m}\text{Sr}$  για το οποίο προτείνεται ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 1 min, ανάλυση 5 h και χρήση του *suppressed* φάσματος που οδηγεί σε χαμηλότερες αβεβαιότητες.

- **V**

Το ισότοπο του V που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το  $^{52}\text{V}$ , με χρόνο ημιζωής 3.743 min και εκπέμπει μοναδικό φωτόνιο ενέργειας 1434.0 keV. Το ισότοπο ανιχνεύθηκε τόσο στο σύντομο σενάριο ενεργοποίησης διάρκειας 1 h, όσο και στο σενάριο διάρκειας 110.5 h κατά την πρώτη ώρα ανάλυσης. Ωστόσο, με βάση τις αβεβαιότητες προσδιορισμού της φωτοκορυφής, προτείνεται η χρήση του σεναρίου ενεργοποίησης 1 h και ανάλυσης 15 min στο *suppressed* φάσμα.

- **Yb**

Το ισότοπο του Yb που προκύπτει από νετρονική ενεργοποίηση είναι το πολυενεργειακό  $^{175}\text{Yb}$  με χρόνο ημιζωής 4.19 d. Ανιχνεύθηκε μόνο στο δείγμα N.I.S.T. Fly ash 1633b και με υψηλές αβεβαιότητες (> 20%). Προτείνεται ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 96 h και χρήση του *unsuppressed* φάσματος.

- **Zn**

Με νετρονική ενεργοποίηση μπορούν να προκύψουν δύο ισότοπα του Zn: το  $^{65}\text{Zn}$  και το  $^{69m}\text{Zn}$ , που είναι και τα δύο μονοενεργειακά. Το  $^{65}\text{Zn}$  έχει χρόνο ημιζωής 244.26 d και προκύπτει από ισότοπο του Zn με ισοτοπική αναλογία 48.9%, ενώ το  $^{69m}\text{Zn}$  έχει χρόνο ημιζωής 13.76 h και προκύπτει από ισότοπο με αναλογία 18.6%. Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ.,  $^{69m}\text{Zn}$  ανιχνεύθηκε σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ  $^{65}\text{Zn}$  μόνο στο Montana Soil 2710. Για την ανίχνευση και των

δύο ισότοπων του Zn προτείνεται ενεργοποίηση 110.5 h, αναμονή 5 h, ανάλυση 96 h και χρήση του *suppressed φάσματος* που οδηγεί σε χαμηλότερες αβεβαιότητες.

Συγκεντρωτικά, στον Πίνακα 8.24 που ακολουθεί δίνονται όλα τα ισότοπα που ανιχνεύθηκαν και το σενάριο ενεργοποίησης - ανάλυσης που προτείνεται. Οι συντελεστές βαθμονόμησης για τα σενάρια αυτά δόθηκαν στην Παράγραφο 8.5.

Διάρκεια INAA (h)	Διάρκεια αναμονής	Διάρκεια ανάλυσης	Ισότοπα για το βέλτιστο σενάριο
1 h	1 min	15 min	$^{28}\text{Al}$ , $^{116}\text{In}$ , $^{27}\text{Mg}$ , $^{52}\text{V}$
110.5 h	1 min	1 h	$^{56}\text{Mn}$
	1 min	5 h	$^{42}\text{K}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{87\text{m}}\text{Sr}$
	5 h	24 h	$^{76}\text{As}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{152}\text{Eu}$ , $^{122}\text{Sb}$ , $^{81\text{m}}\text{Se}$
	5 h	96 h	$^{141}\text{Ce}$ , $^{59}\text{Fe}$ , $^{72}\text{Ga}$ , $^{175}\text{Yb}$ , $^{65}\text{Zn}$ , $^{69\text{m}}\text{Zn}$
	29 h	72 h	$^{198}\text{Au}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{140}\text{La}$ , $^{46\text{m}}\text{Sc}$

Πίνακας 8.24: Βέλτιστα σενάρια ενεργοποίησης - ανάλυσης.

Σε περίπτωση που υπάρχει δυσκολία στη λήψη των φασμάτων κατά το σενάριο ενεργοποίησης 110.5 h, μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο τρία σενάρια ανάλυσης, με κάποιες – όχι ιδιαίτερα υψηλές – απώλειες σε όρους αβεβαιότητας για ορισμένα ισότοπα:

- αναμονή 1 min, ανάλυση 5 h:  $^{42}\text{K}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{87\text{m}}\text{Sr}$
- αναμονή 5 h, ανάλυση 24 h:  $^{76}\text{As}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Se}$
- αναμονή 5 h, ανάλυση 96 h:  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{46\text{m}}\text{Sc}$ ,  $^{175}\text{Yb}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{69\text{m}}\text{Zn}$

Βέβαια, στην περίπτωση αυτή δεν ισχύουν οι συντελεστές βαθμονόμησης που προσδιορίστηκαν στην Παράγραφο 8.5, αλλά αυτοί που δίνονται στον Πίνακα 8.25. Σημειώνεται ότι δεν περιλαμβάνονται συντελεστές βαθμονόμησης από το δείγμα I.A.E.A. Lake Sediment SL-1, για τους λόγους που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 8.5.

Ισότοπο/ Ενέργεια (keV)		Διάρκεια αναμονής/ ανάλυσης	$\lambda$ (gr <sup>234</sup> /cps) – unsuppressed <sup>235</sup> φάσμα		
			χώρα	ιπτάμενη τέφρα	βιομηχανική λύς
<sup>198</sup> Au	411.8	5 h / 24 h	0.0019 ± 20.4%	-- <sup>236</sup>	0.0013 ± 3.2%
<sup>76</sup> As	559.1 <sup>c</sup>	5 h / 24 h	0.0388 ± 3.3%	0.0397 ± 3.4%	0.0383 ± 6.9%
	657.0 <sup>c</sup>		0.3610 ± 9.9%	0.3476 ± 16.3%	0.3634 ± 20.8%
	1216.3 <sup>c</sup>		0.7312 ± 25.0%	0.6595 ± 32.3%	< LLD
<sup>141</sup> Ce	145.5	5 h / 96 h	< LLD	< LLD	1.5986 ± 6.9%
<sup>64</sup> Cu	1345.8	5 h / 24 h	12.050 ± 35.8%	< LLD	19.207 ± 54.6%
<sup>60</sup> Co	1173.2 <sup>c</sup>	5 h / 96 h	< LLD	0.9204 ± 47.0%	0.6817 ± 40.2%
	1332.5 <sup>c</sup>			0.9483 ± 37.2%	1.1775 ± 44.9%
<sup>152</sup> Eu	121.8 <sup>c</sup>	5 h / 24 h	0.0015 ± 12.4%	0.0016 ± 3.5%	0.0011 ± 35.8%
	841.6 <sup>c</sup>		0.0026 ± 9.1%	0.0027 ± 5.2%	< LLD
	963.5 <sup>c</sup>		0.0024 ± 15.1%	0.0026 ± 5.5%	< LLD
<sup>59</sup> Fe	1099.3	5 h / 96 h	< LLD	579.68 ± 19.1%	458.50 ± 5.9%
	1291.6			671.63 ± 26.6%	615.47 ± 5.7%
<sup>72</sup> Ga	834.0 <sup>c</sup>	5 h / 96 h	0.1423 ± 30.5%	--	0.0605 ± 15.2%
<sup>42</sup> K	1524.7	1 min / 5 h	3.3895 ± 4.5%	3.5634 ± 3.5%	2.7643 ± 22.8%
<sup>140</sup> La <sup>237</sup>	328.8 <sup>c</sup>	5 h / 24 h	0.0679 ± 15.7%	0.0772 ± 6.9%	0.0844 ± 14.6%
	487.0 <sup>c</sup>		0.0446 ± 8.2%	0.0459 ± 3.3%	0.0417 ± 6.7%
	815.0 <sup>c</sup>		0.1049 ± 18.8%	0.1028 ± 6.5%	0.0997 ± 15.5%
	1596.2 <sup>c</sup>		0.0457 ± 7.6%	0.0452 ± 2.7%	0.0408 ± 5.7%
<sup>56</sup> Mn	846.6 <sup>c</sup>	1 min / 5 h	0.0076 ± 1.8%	0.0063 ± 3.1%	0.0060 ± 1.0%
	1811.2 <sup>c</sup>		0.0528 ± 1.9%	0.0447 ± 5.3%	0.0410 ± 4.4%
<sup>24</sup> Na	1368.5 <sup>c</sup>	1 min / 5 h	0.0673 ± 2.1%	0.0521 ± 1.1%	0.0697 ± 2.0%
<sup>122</sup> Sb	564.1 <sup>c</sup>	5 h / 24 h	0.0307 ± 6.2%	0.0454 ± 12.4%	< LLD
<sup>81m</sup> Se	103.0	5 h / 24 h	0.0015 ± 10.1%	0.0019 ± 2.2%	0.0017 ± 19.7%
<sup>87m</sup> Sr	388.4	1 min / 5 h	--	1.1635 ± 22.5%	--
<sup>46</sup> Sc <sup>238</sup>	889.3 <sup>c</sup>	5 h / 96 h	0.0544 ± 23.3%	< LLD	< LLD
	1120.0 <sup>c</sup>		0.0090 ± 6.5%		
<sup>175</sup> Yb	113.5 <sup>c</sup>	5 h / 96 h	< LLD	0.0752 ± 37.4%	< LLD
	396.0			0.1023 ± 38.5%	
<sup>65</sup> Zn	1115.5	5 h / 96 h	31.014 ± 6.9%	< LLD	< LLD
<sup>69m</sup> Zn	438.9	5 h / 96 h	16.387 ± 9.5%	< LLD	15.535 ± 39.9%

c φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά με άλλα

**Πίνακας 8.25:** Συντελεστές βαθμονόμησης,  $\lambda$ , για τα τρία σενάρια ακτινοβόλησης – ανάλυσης (ενεργοποίηση 110.5 h).

<sup>234</sup> Ξηρή μάζα

<sup>235</sup> Για μονοενεργειακά ισότοπα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το suppressed φάσμα.

<sup>236</sup> Όπου «--», σημαίνει ότι δεν δίνεται στο πιστοποιητικό και δεν ανιχνεύθηκε.

<sup>237</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>228</sup>Ac.

<sup>238</sup> Έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της φωτοκορυφής υποστρώματος του <sup>214</sup>Bi.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

## Επίλογος

---

Το Κεφάλαιο αυτό αποτελεί τον επίλογο και τη σύνοψη της παρούσας Δ.Δ. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της απόκρισης και της βαθμονόμησης του συστήματος Compton Suppression του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δ.Δ. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μίας σειράς αναλύσεων δειγμάτων, που έγιναν με το σύστημα αυτό και όχι μόνο, με στόχο την ανίχνευση πολύ χαμηλών επιπέδων φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, καθώς και προϊόντων νετρονικής ενεργοποίησης. Αναφέρονται τα σημεία πρωτοτυπίας της Δ.Δ. και γίνονται προτάσεις για μελλοντική επέκταση της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της. Τέλος, παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Δ.Δ.

### 9.1 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Δ.Δ.

Το 2011, στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ., αναβαθμίστηκε η ανιχνευτική διάταξη XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. με την εγκατάσταση σε αυτήν συστήματος Compton Suppression. Στο σύστημα αυτό, ως δευτερεύων ανιχνευτής (ενεργητική θωράκιση) επιλέχθηκε ανιχνευτής σπινθηρισμού NaI(Tl), ο οποίος αποτελείται από δύο τμήματα: ένα δακτυλιοειδές (annulus) και ένα κυλινδρικό (plug) που αφαιρείται για την τοποθέτηση του προς ανάλυση δείγματος. Το δακτυλιοειδές τμήμα του δευτερεύοντα ανιχνευτή συνδέεται με οκτώ φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ το αφαιρούμενο τμήμα με έναν επιπλέον φωτοπολλαπλασιαστή. Η ενεργητική θωράκιση τοποθετήθηκε στο εσωτερικό της παθητικής θωράκισης της διάταξης του ανιχνευτή XtRa. Η διάταξη συγκροτήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία της με τρεις τρόπους: (α) χωρίς να αξιοποιείται στο σύστημα Compton

Suppression (συμβατικό ή unsuppressed φάσμα), (β) με χρήση του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα) και (γ) με χρήση του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence φάσμα). Σε κάθε περίπτωση, μπορούν να λαμβάνονται συγχρόνως μόνο δύο φάσματα, εκ των οποίων το ένα είναι το συμβατικό. Στο πλαίσιο της Δ.Δ. υπολογίστηκαν οι ακριβείς διαστάσεις και η θέση του δευτερεύοντα ανιχνευτή ώστε να διατίθεται επαρκής χώρος για την τοποθέτηση τυπικού δοχείου δείγματος το οποίο χρησιμοποιείται κατά τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Οι απαραίτητες τροποποιήσεις της προϋπάρχουσας διάταξης για την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2, μαζί με εκτενέστατη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρόμοιων συστημάτων μείωσης του υποστρώματος και αντίστοιχες εφαρμογές.

Η απόκριση της νέας ανιχνευτικής διάταξης μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση που έχει η χρήση του συστήματος και για τους τρεις τρόπους λειτουργίας, στο συνεχές και στο διακριτό υπόστρωμα της διάταξης. Εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση οδήγησε σε μία σειρά από συντελεστές που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη μελέτη της απόκρισης μίας διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression. Διαπιστώθηκε ποικιλία στους χρησιμοποιούμενους συντελεστές, με κάθε συντελεστή να παρέχει πληροφορίες για κάτι διαφορετικό. Άλλοι συντελεστές δίνουν πληροφορίες για το συνεχές υπόστρωμα – είτε κάτω από την φωτοκορυφή είτε σε κάποια περιοχή του ενεργειακού φάσματος όπου δεν υπάρχει φωτοκορυφή – και άλλοι δίνουν πληροφορίες για την ίδια τη φωτοκορυφή. Στο πλαίσιο της Δ.Δ., με σκοπό τη μελέτη της απόκρισης της διάταξης με το σύστημα Compton Suppression, επιλέχθηκαν ορισμένοι από τους συντελεστές που ανευρέθηκαν στη βιβλιογραφία, όπως *Total Area Suppression Factor*, T.A.S.F., *Compton Area Suppression Factor*, C.A.S.F., και *Peak Reduction Factor*,  $R_p$ , και χρησιμοποιήθηκαν σε μία σειρά από πειράματα με χρήση πηγών διαφόρων γεωμετριών, οι οποίες περιέχουν συνδυασμούς ραδιενεργών ισοτόπων σε διάφορες ενεργότητες. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιήθηκαν και για τους δύο τρόπους λειτουργίας της διάταξης: σε αντί-σύμπτωση και σε σύμπτωση. Από τους συντελεστές αυτούς φαίνεται μεγαλύτερη



σημασία να έχει ο συντελεστής  $R_p$  καθώς δείχνει την επίδραση της χρήσης ενεργητικής θωράκισης στην ίδια την φωτοκορυφή ενδιαφέροντος, και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης που έχουν πάνω στη φωτοκορυφή φαινόμενα όπως η πραγματική σύμπτωση ή η τυχαία άθροιση. Οι άλλοι συντελεστές, T.A.S.F. και C.A.S.F., αν και είναι χρήσιμοι για την αξιολόγηση του συστήματος, δεν δίνουν τόσο σημαντική πληροφορία, καθώς αναφέρονται στην βελτίωση που επιφέρεται από τη χρήση του συστήματος Compton Suppression στον λόγο της επιφάνειας μίας φωτοκορυφής προς ολόκληρο το φάσμα ή το υπόστρωμα κοντά στην περιοχή της αιχμής Compton, αντίστοιχα. Οι λόγοι αυτοί σαφώς εξαρτώνται από τη θέση της φωτοκορυφής στο φάσμα, την ύπαρξη άλλων φωτοκορυφών σε αυτό κλπ. Πάντως, με εκτίμηση όλων των παραπάνω συντελεστών για διάφορες πηγές – κάτι που έγινε στο πλαίσιο της Δ.Δ. – είναι τελικά δυνατή μία γενική εκτίμηση της απόκρισης του συστήματος.

Από τη συγκριτική μελέτη των φασμάτων που ελήφθησαν και για τους τρεις τρόπους λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

#### Όσον αφορά στο συνεχές υπόστρωμα

- το συνεχές υπόστρωμα στο suppressed φάσμα βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με το αντίστοιχο unsuppressed κατά 2 – 6 φορές, ανάλογα με την ενεργειακή περιοχή, με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται στις υψηλότερες ενέργειες
- το συνεχές υπόστρωμα στο coincidence φάσμα βρέθηκε να είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο unsuppressed από 20% έως 50% – με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται στις χαμηλότερες ενέργειες – και υψηλότερο από το αντίστοιχο suppressed έως και ~ 5 φορές

#### Όσον αφορά στο διακριτό υπόστρωμα

- ανάμεσα στα φάσματα unsuppressed και suppressed δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τις φωτοκορυφές που αντιστοιχούν σε φωτόνια που δεν εκπέμπονται σε σειρά ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  και ορισμένες φωτοκορυφές του  $^{214}\text{Bi}$  και του  $^{228}\text{Ac}$ )

- στο coincidence φάσμα δεν εμφανίζονται φωτοκορυφές διακριτού υποστρώματος, με εξαίρεση την φωτοκορυφή στην ενέργεια των 511.0 keV
- η επιφάνεια της φωτοκορυφής του  $^{40}\text{K}$  στη νέα διάταξη είναι αυξημένη κατά  $\sim 6$  φορές, σε σύγκριση με πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression, κυρίως εξαιτίας της φυσικής ραδιενέργειας του NaI.

Όσον αφορά στην ανίχνευση των διαφόρων ισοτόπων:

- για την ανίχνευση και ανάλυση των μονοενεργειακών ισοτόπων, όπως  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{40}\text{K}$ , διαπιστώθηκε ότι σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα) οι αντίστοιχες φωτοκορυφές προσδιορίζονται με χαμηλότερες αβεβαιότητες και δεν υπόκεινται σε μείωση της επιφάνειάς τους. Τα ισότοπα αυτά δεν ανιχνεύονται σε λειτουργία σύμπτωσης (coincidence φάσμα)
- για την ανίχνευση και ανάλυση των πολυενεργειακών ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, όπως  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ , ενδείκνυται η χρήση του unsuppressed φάσματος, καθώς με τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης παρατηρείται μείωση στην επιφάνεια των φωτοκορυφών τους και χειρότερη στατιστική και για τους δύο τρόπους λειτουργίας του συστήματος (coincidence και suppressed).
- για τα φωτόνια τα οποία εκπέμπονται μεν από πολυενεργειακά ισότοπα, αλλά όχι σε σειρά – όπως ο  $^{214}\text{Pb}$  – καλύτερες συνθήκες ανίχνευσης επιτυγχάνονται στο suppressed φάσμα.

Από την παραπάνω διερεύνηση προέκυψε, κατ' αρχήν ότι η λειτουργία της διάταξης σε σύμπτωση (coincidence mode) δεν φαίνεται να βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες ανίχνευσης κάποιου ισοτόπου από αυτά που εξετάστηκαν. Κατά συνέπεια, δεδομένου ότι τα ηλεκτρονικά της διάταξης επιτρέπουν την ταυτόχρονη συλλογή δύο μόνο φασμάτων (unsuppressed / coincidence ή unsuppressed / suppressed) προτείνεται η διάταξη να είναι ρυθμισμένη μονίμως για τη συλλογή του unsuppressed και του suppressed φάσματος, μία ρύθμιση που βελτιώνει τα επίπεδα ανίχνευσης για πλήθος ισοτόπων. Επιπλέον, από τα συγκριτικά πειράματα μελέτης της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression, διαπιστώθηκε πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος της τυχαίας σύμπτωσης (chance coincidence) για έναν

τόσο μεγάλο ανιχνευτή όπως ο XtRa, κατά την ανάλυση ισχυρών πηγών, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη, τόσο σε πειράματα που γίνονται για την αξιολόγηση της απόκρισης της διάταξης, όσο και κατά την ανάλυση δειγμάτων υψηλής ραδιενέργειας και κυρίως κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης με χρήση προτύπων πηγών.

Η πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Πρέπει να επισημανθεί ότι ο ανιχνευτής XtRa πριν την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression ήταν βαθμονομημένος για μία σειρά από γεωμετρίες δείγματος – ανιχνευτή. Παρόλα αυτά, μετά την εγκατάσταση του συστήματος Compton Suppression, λόγω μικρών αλλαγών στη γεωμετρία τοποθέτησης του δείγματος, η ανιχνευτική διάταξη παρουσιάζει μικρή αύξηση της απόδοσης φωτοκορυφής και κατά συνέπεια η διάταξη έπρεπε να βαθμονομηθεί εκ νέου.

Η δυσκολία βαθμονόμησης απόδοσης μίας ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression κατά τη λειτουργία σε αντί-σύμπτωση, έγκειται στη διαφορετική απόκριση του συστήματος, ανάλογα με το σχήμα αποδιέγερσης του υπό ανάλυση ισοτόπου. Για το λόγο αυτό, κατά τη λειτουργία σε αντί-σύμπτωση, μία καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης έχει νόημα μόνο για την ανίχνευση φωτονίων τα οποία είναι μοναδικά ή δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλα. Εξυπακούεται ότι για τον προσδιορισμό της καμπύλης αυτής θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν επίσης φωτόνια που είτε είναι μοναδικά είτε δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλα. Για οποιαδήποτε άλλα φωτόνια, έχει νόημα μόνο η σημειακή εκτίμηση της απόδοσης. Για τη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS στο πλαίσιο της Δ.Δ. ακολουθήθηκε η συνήθης πειραματική μεθοδολογία βαθμονομήσεων που εφαρμόζεται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Καθώς δεν διατίθετο πρότυπη πιστοποιημένη πηγή βαθμονόμησης, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα τα οποία είτε κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο (πηγή KCl) είτε ήταν διαθέσιμα μέσω συμμετοχής του εργαστηρίου σε Ασκήσεις Διασύγκρισης (Intercomparisons). Για τις βαθμονομήσεις χρησιμοποιήθηκαν τόσο μονοενεργειακά ισότοπα όπως  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , όσο και ισότοπα που εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια, όπως  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ . Και πάλι, λόγω έλλειψης επαρκούς πλήθους

πειραματικών σημείων που να καλύπτουν ολόκληρη την ενεργειακή περιοχή έως τα 2000 keV, για όλες τις γεωμετρίες που βαθμονομήθηκαν, οι νέες καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης προέκυψαν με χρήση των διατιθέμενων πειραματικών σημείων και με εφαρμογή της τεχνικής της μεταφοράς απόδοσης από τις ήδη υπάρχουσες βαθμονομήσεις. Οι καμπύλες απόδοσης που προσδιορίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία για τη λειτουργία σε αντί-σύμπτωση, δεν διαφέρουν από τις καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης που προσδιορίστηκαν για τη συμβατική λειτουργία (unsuppressed φάσμα). Οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης για τις τρεις γεωμετρίες όγκου («2», «5» και «8») που χρησιμοποιούνται ευρέως στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Από τα πειράματα που διεξήχθησαν κατά τη διαδικασία πειραματικής βαθμονόμησης, διαπιστώθηκε πόσο σημαντική είναι η επίδραση του φαινομένου της τυχαίας άθροισης, όταν χρησιμοποιούνται πηγές σχετικά υψηλής ενεργότητας κατά τη βαθμονόμηση του συστήματος. Επιπλέον, μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης κατέστη δυνατή η εκτίμηση των κατωτέρων επιπέδων ανίχνευσης για μία σειρά από γεωμετρίες και ισότοπα και για τους δύο τρόπους λειτουργίας της διάταξης (συμβατικός και σε αντί-σύμπτωση) και επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα τα οποία είχαν προκύψει στο Κεφάλαιο 3.

Στο πλαίσιο της Δ.Δ. έγινε και βαθμονόμηση απόδοσης της διάταξης XtRa - CSS με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνικών Monte Carlo κατά τη βαθμονόμηση ανιχνευτικών διατάξεων είναι η δυνατότητα εκτίμησης τιμών της απόδοσης για γεωμετρίες και ενέργειες φωτονίων που ενδεχομένως δεν υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα. Από την άλλη πλευρά, η προσομοίωση ενός μεγάλου ανιχνευτή που διαθέτει σύστημα Compton Suppression είναι πιο πολύπλοκη από την αντίστοιχη για ένα συμβατικό ανιχνευτή, καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη δύο ανιχνευτών (πρωτεύων και δευτερεύων) και φαινόμενα όπως αυτό της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) και της τυχαίας σύμπτωσης (chance coincidence). Η όλη μεθοδολογία υπολογιστικής βαθμονόμησης της διάταξης XtRa - CSS που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Για την προσομοίωση

χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE και πιο συγκεκριμένα, τροποποιήθηκε ο κώδικας χρήστη (user code) *penmain* ώστε:

- να προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συστήματος Compton Suppression, μέσω της προσομοίωσης δύο ανιχνευτών οι οποίοι «επικοινωνούν» μεταξύ τους,
- να προσομοιώνει τη διάσπαση ενός ραδιενεργού πυρήνα κι όχι την εκπομπή ενός φωτονίου, κάτι που είναι απαραίτητο προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, κατά την εκπομπή φωτονίων σε σειρά. Για να καταστεί αυτό δυνατό πρέπει ο χρήστης να αναπτύξει υπορουτίνα που να περιγράφει το σχήμα διάσπασης του ισότοπου που ενδιαφέρει.

Τα αποτελέσματα του τροποποιημένου κώδικα (*penmain\_css*) συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής για δύο τυπικές γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., για μονοενεργειακά ισότοπα ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) και για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ), με πολύ καλά αποτελέσματα. Η χρήση του συστήματος Compton Suppression σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης δεν ενδείκνυται για την ανάλυση ισωτόπων τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, όπως ειπώθηκε και παραπάνω. Ωστόσο, ακριβώς επειδή η ανίχνευση των ισωτόπων αυτών επηρεάζεται σημαντικά από τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης, θεωρήθηκε σκόπιμη η μελέτη τους, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία της προσομοίωσης του suppressed φάσματος. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά διαπιστώθηκε ότι η απόκλισή τους δεν ξεπέρασε το 5%. Εξαιρεση αποτέλεσαν δύο από τις φωτοκορυφές του  $^{134}\text{Cs}$  για τη γεωμετρία «8», όπου παρουσιάσθηκε απόκλιση 6% και 9%, χωρίς όμως η απόκλιση αυτή να είναι στατιστικά σημαντική. Μετά την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας του τροποποιημένου κώδικα προσομοίωσης, αυτός χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για διάφορες γεωμετρίες όγκου που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., τόσο χωρίς τη χρήση της ενεργητικής θωράκισης όσο και με αυτή σε λειτουργία αντί-σύμπτωσης (suppressed φάσμα). Το σημαντικό πλεονέκτημα του τροποποιημένου κώδικα προσομοίωσης είναι ότι μπορεί να υπολογίσει την απόδοση φωτοκορυφής, για φωτόνια που εκπέμπονται σε σειρά από ένα ισότοπο για το οποίο δεν υπάρχουν πειραματικά σημεία και προφανώς, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη

καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης για τη λειτουργία σε αντί-σύμπτωση. Επιπλέον, είναι δυνατόν με τη χρήση του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα προσομοίωσης να υπολογισθούν συντελεστές διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για τη διάταξη, για οποιαδήποτε γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή.

Από τους βασικούς στόχους της Δ.Δ. είναι η ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις σε περιβαλλοντικά δείγματα. Έχοντας μελετήσει την απόκριση του νέου συστήματος και εκτιμήσει την απόδοσή του, η διάταξη χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη περιβαλλοντικών δειγμάτων χαμηλών συγκεντρώσεων σε τεχνητά και φυσικά ισότοπα. Στο Κεφάλαιο 6 της Δ.Δ. παρουσιάζονται οι αναλύσεις δειγμάτων που έγιναν με στόχο την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό πολύ χαμηλών επιπέδων τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν τριών ειδών δείγματα: (α) δείγματα τα οποία έχουν ρυπανθεί από το πυρηνικό ατύχημα στο Chernobyl, (β) δείγματα τα οποία έχουν ρυπανθεί από το πυρηνικό ατύχημα στη Fukushima, και (γ) δείγματα τα οποία λήφθηκαν κατά τη διάρκεια επεισοδίων εμφάνισης υψηλών επιπέδων αιθαλομίχλης στην περιοχή της Αττικής.

Αναφορικά με την ανάλυση δειγμάτων που έχουν ρυπανθεί από το ατύχημα στο Chernobyl, στο πλαίσιο της Δ.Δ. επιλέχθηκαν και αναλύθηκαν στις ανιχνευτικές διατάξεις XtRa - CSS και LEGe ορισμένα από τα πλέον επιβαρυμένα σε  $^{137}\text{Cs}$  δείγματα χώματος, από την περιοχή των νομών Καρδίτσας και Τρικάλων, στα οποία δεν είχε ποτέ ανιχνευθεί  $^{241}\text{Am}$  κατά τις αναλύσεις που είχαν γίνει στο παρελθόν. Με τις νέες αναλύσεις, σε αρκετές περιπτώσεις το  $^{241}\text{Am}$  ανιχνεύθηκε, αν και συχνά με σχετικά υψηλές αβεβαιότητες ( $> 20\%$ ,  $1\sigma$ ). Από τις αναλύσεις αυτές διαπιστώθηκε υψηλή θετική συσχέτιση ανάμεσα στην ειδική ραδιενέργεια των ισοτόπων  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$ . Επισημαίνεται ότι η συσχέτιση αυτή αφορά μόνο σε δείγματα που έχουν συλλεχθεί από την περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων και έχει ενδιαφέρον να διερευνηθεί κατά πόσο η συσχέτιση αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε δείγματα που συλλέγονται από άλλες περιοχές της χώρας.

Όσον αφορά στην περίοδο του ατυχήματος στον πυρηνικό σταθμό της Fukushima, οι τεχνικές δειγματοληψίας, προετοιμασίας δείγματος και αναλύσεων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Δ. και η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης

XtRa - CSS, επέτρεψαν την ανίχνευση στον αέρα πολύ χαμηλών επιπέδων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{134}\text{Cs}$ , της τάξης των  $\sim 10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Όσον αφορά στα δείγματα νερού, κατέστη δυνατή η ανίχνευση μόνον του  $^{131}\text{I}$ .

Στο πλαίσιο των συστηματικών δειγματοληψιών ατμοσφαιρικού αεροζόλ, που πραγματοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., λήφθηκαν φίλτρα αέρα και κατά τη διάρκεια επεισοδίων αυξημένης αιθαλομίχλης στον Αττικό ουρανό την περίοδο από το 2013 και μετά. Σε ορισμένα από τα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ που συλλέχθηκαν κατά τις χειμερινές περιόδους ανιχνεύθηκε  $^{137}\text{Cs}$  με συγκεντρώσεις που δεν ξεπερνούν το  $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  και συνοδεύονται από πολύ υψηλές αβεβαιότητες, χωρίς να διαπιστώνεται συσχέτιση της συγκέντρωσης του  $^{137}\text{Cs}$  με τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στη διάταξη XtRa - CSS για τη μελέτη περιβαλλοντικών δειγμάτων χαμηλών συγκεντρώσεων σε φυσικά ισότοπα. Το επίκεντρο της μελέτης ήταν τα ισότοπα κοσμικής προέλευσης  $^7\text{Be}$  και  $^{22}\text{Na}$  και τα ισότοπα γήινης προέλευσης  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{40}\text{K}$ . Πραγματοποιήθηκαν συστηματικές δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων, καλύπτοντας χρονική περίοδο 2 ετών και 7 μηνών, αντίστοιχα.

Αναφορικά με τα δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ, σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν ανιχνεύθηκε  $^7\text{Be}$  και  $^{210}\text{Pb}$  με ακρίβεια της τάξεως του 4% (1σ) και 5% (1σ), αντίστοιχα. Ενδεχομένως και εξαιτίας του υψηλού υποστρώματος του ίδιου του φίλτρου (blank) και της διάταξης XtRa - CSS σε  $^{40}\text{K}$ , δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση του ισότοπου αυτού στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ. Σχετικά με το  $^{22}\text{Na}$ , το οποίο βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις της τάξης του  $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  και για το λόγο αυτό είναι δύσκολη η ανίχνευσή του, δοκιμάστηκαν και εφαρμόστηκαν σενάρια δειγματοληψίας αέρα και ανάλυσης πολλών ημερών. Παρόλα αυτά, με τα σενάρια που μελετήθηκαν, η σχηματιζόμενη φωτοκορυφή παραμένει στα όρια ανίχνευσης – συχνά δυσδιάκριτη στο φάσμα – με αποτέλεσμα η ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  να είναι δυνατή μόνο σε μικρό πλήθος δειγμάτων. Με στόχο την ανίχνευσή του σε περισσότερα δείγματα χρησιμοποιήθηκε – πέραν του κώδικα φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. – και το πρόγραμμα ANGES. Με τον κώδικα SPUNAL ανιχνεύθηκε σε 6 μόνο από τα 30

δείγματα, και αυτό μόνο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Με αύξηση των επιπέδων ευαισθησίας του κώδικα (επιλογή χαμηλότερου επίπεδου σημαντικότητας φωτοκορυφών) κατέστη δυνατή η ανίχνευση του ισοτόπου σε περισσότερα φίλτρα, αν και με αβεβαιότητες της τάξης του 90% (1σ). Με το πρόγραμμα ANGES το  $^{22}\text{Na}$  ανιχνεύθηκε σε περισσότερα φίλτρα, αν και συχνά μόνο μετά από επέμβαση του χρήστη (forced analysis). Μάλιστα, στις περιπτώσεις αυτές παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της συγκέντρωσης του ισοτόπου είναι εν γένει χαμηλότερες από το αντίστοιχο κατώτερο όριο ανίχνευσης, γεγονός που καθιστά τις τιμές αυτές αμφισβητήσιμες.

Συμπερασματικά, στα φίλτρα όπου ο όγκος δειγματοληψίας ήταν επαρκώς μεγάλος ( $\sim 19\,000\text{ m}^3$ ), ανιχνεύτηκε  $^{22}\text{Na}$  χωρίς καμία τροποποίηση των κριτηρίων ανάλυσης φωτοκορυφών, αν και με υψηλή αβεβαιότητα ( $> 50\%$ , 1σ). Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι ένας από τους κύριους λόγους που δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  στα υπόλοιπα φίλτρα είναι ο συγκριτικά μικρότερος όγκος δειγματοληψίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στη βιβλιογραφία οι όγκοι δειγματοληψίας αέρα με σκοπό την ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$  είναι μεγαλύτεροι από  $\sim 30\,000\text{ m}^3$ , συχνά μάλιστα μεγαλύτεροι από  $\sim 100\,000\text{ m}^3$ .

Με σκοπό την αύξηση του όγκου του αέρα, τα φίλτρα συνδυάστηκαν ανά τρία και αναλύθηκαν ως ένα δείγμα. Κάθε ένα από αυτά τα συνδυασμένα δείγματα αντιστοιχεί σε όγκους μεγαλύτερους από  $30\,000\text{ m}^3$ . Από τη μελέτη αυτή προέκυψε ότι ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  πραγματοποιείται συνήθως μόνο στις περιπτώσεις όπου σε κάποιο – ή κάποια – από τα επιμέρους φίλτρα έχει ανιχνευθεί  $^{22}\text{Na}$ , όπως και αναμενόταν.

Αναφορικά με τα δείγματα υγρών κατακρημνίσεων, αναπτύχθηκε τεχνική επεξεργασίας των δειγμάτων με χρήση ρητίνης κατιόντων. Σε όλα τα δείγματα που αναλύθηκαν κατέστη δυνατή η ανίχνευση  $^7\text{Be}$ , με αβεβαιότητα της τάξεως του 4% (1σ), και  $^{210}\text{Pb}$ , με αβεβαιότητα από 5% έως 22% (1σ). Αναφορικά με το  $^{40}\text{K}$ , ανιχνεύθηκε σε 6 από τα 11 δείγματα με υψηλές αβεβαιότητες ( $> 24\%$ , 1σ), κυρίως εξαιτίας του υψηλού υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS. Τέλος, δεν κατέστη δυνατή η ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$  με κανέναν από τους κώδικες φασματοσκοπικής ανάλυσης. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι κατά την περίοδο που πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες και οι αναλύσεις που περιγράφονται στη Δ.Δ., ο 11ετής κύκλος του ηλίου βρισκόταν στο ζενίθ, με συνέπεια η



συγκέντρωση των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης να είναι χαμηλή, καθιστώντας την ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$  ακόμα πιο δύσκολη.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS για την ανάλυση δειγμάτων μετά από νετρονική ενεργοποίηση, μια πυρηνική αναλυτική τεχνική στην οποία χρησιμοποιούνται ευρέως συστήματα Compton Suppression. Μελετήθηκαν πέντε πιστοποιημένα υλικά διαφορετικής σύστασης: δύο δείγματα χώματος, ένα δείγμα ιπτάμενης τέφρας, ένα δείγμα βιομηχανικής ιλύος και ένα δείγμα ιζήματος από λίμνη. Οι ακτινοβολήσεις έγιναν στη διμερή πηγή Am-Be που διαθέτει το Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Εξετάσθηκαν δύο σενάρια ενεργοποίησης: ένα σύντομο διάρκειας 1 h για πιο βραχύβια ισότοπα και ένα μεγαλύτερης διάρκειας 110.5 h για πιο μακρόβια ισότοπα. Κατά την  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση εξετάσθηκε μία σειρά από σενάρια, αναφορικά με την αναμονή μετά την ακτινοβολήση και τη διάρκεια λήψης φάσματος, με σκοπό την εύρεση του σεναρίου ανάλυσης που συνδυάζει επαρκή ρυθμό καταγραφής γεγονότων και χαμηλές αβεβαιότητες κατά τον προσδιορισμό των αντίστοιχων φωτοκορυφών ενδιαφέροντος.

Συνολικά κατέστη δυνατή η ανίχνευση 15 στοιχείων (Al, As, Au, Cu, Eu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Na, Sb, Sc, Zn), με τα περισσότερα να ανιχνεύονται στο σενάριο ακτινοβολήσης μεγαλύτερης διάρκειας. Για κάθε ένα από τα στοιχεία προτείνεται το βέλτιστο σενάριο ενεργοποίησης - ανάλυσης, για το οποίο και υπολογίσθηκαν κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ποσοτικό προσδιορισμό του στοιχείου εντός άγνωστου δείγματος. Συγκριτικά με αντίστοιχα πειράματα νετρονικής ενεργοποίησης που είχαν πραγματοποιηθεί σε προηγούμενη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008), η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης XtRa - CSS και οι συνδυασμοί διάρκειας ενεργοποίησης και διάρκειας  $\gamma$ -φασματοσκοπικής ανάλυσης που δοκιμάσθηκαν, οδηγούν στην ανίχνευση περισσότερων στοιχείων - στη Δ.Δ. (Ρούνη, 2008) είχαν ανιχνευθεί μόνο τα στοιχεία As, K, Mn, Na, Sb, Zn. Επιπλέον, αναφορικά με τα κατώτερα όρια ανίχνευσης κάθε στοιχείου, για τα στοιχεία που ήταν κοινά στις δύο Δ.Δ., παρατηρήθηκε βελτίωση έως και 7 φορές.

Από τη σύγκριση των φασμάτων με και χωρίς την ενεργητική θωράκιση (suppressed και unsuppressed), προέκυψε ότι η χρήση του suppressed φάσματος σε

πολλές περιπτώσεις δεν δίνει ιδιαίτερο πλεονέκτημα, καθώς τα περισσότερα ισότοπα που προκύπτουν από νετρονική ενεργοποίηση είναι πολυενεργειακά, εκπέμποντας φωτόνια σε σειρά, γεγονός που οδηγεί σε μειώσεις στην επιφάνεια φωτοκορυφής, όπως αναλύθηκε και παραπάνω.

Αυτό που διαπιστώθηκε από την ενεργοποίηση και ανάλυση διαφορετικού τύπου δειγμάτων είναι ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης που εκτιμάται για ορισμένα υλικά εξαρτάται από το είδος του υλικού. Αυτό θα μπορούσε – τουλάχιστο σε ένα βαθμό – να οφείλεται στο γεγονός ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις ένα ισότοπο μπορεί να είναι προϊόν ενεργοποίησης δύο διαφορετικών στοιχείων. Τυπική περίπτωση είναι το  $^{24}\text{Na}$  το οποίο παράγεται μέσω της αντίδρασης  $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$  με θερμικά νετρόνια, αλλά και τις αντιδράσεις  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  και  $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$  με ταχέα νετρόνια. Στην περίπτωση αυτή, και εφόσον υπάρχουν ταχέα νετρόνια, η συγκέντρωση των  $^{27}\text{Al}$  και  $^{24}\text{Mg}$  μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην εκτιμώμενη συγκέντρωση του  $^{24}\text{Na}$ . Επιπλέον, όπως διαπιστώθηκε, σε ορισμένες φωτοκορυφές ενδιαφέροντος υπάρχει αλληλεπίδραση με φωτόνια φυσικών ραδιενεργών ισωτόπων, τα οποία ανιχνεύονται ενδεχομένως και στο υπόστρωμα της διάταξης, όπως τα φωτόνια ενέργειας 328.0 keV του  $^{228}\text{Ac}$ , τα οποία συνεισφέρουν σε μία από τις φωτοκορυφές από τις οποίες ανιχνεύεται το  $^{140}\text{La}$  (328.8 keV).

## 9.2 Επιτεύγματα και σημεία πρωτοτυπίας της Δ.Δ.

Επιγραμματικά τα επιτεύγματα και τα στοιχεία πρωτοτυπίας της Δ.Δ. μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Σχεδίαση και εγκατάσταση συστήματος Compton Suppression στην ανιχνευτική διάταξη XtRa του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. Η διάταξη τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να καταστεί δυνατή η τοποθέτηση ενεργητικής θωράκισης ανάμεσα στον ανιχνευτή XtRa και την παθητική του θωράκιση.
- Μελέτη της απόκρισης συστήματος Compton Suppression κατά την ανάλυση μονοενεργειακών και πολυενεργειακών ισωτόπων. Από τη μελέτη αυτή καταδείχθηκε ότι σημαντικός παράγοντας κατά την ανάλυση πολυενεργειακών ισωτόπων δεν είναι τόσο το κατά πόσον εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια, αλλά το κατά πόσο αυτά τα φωτόνια είναι σε σειρά. Η μελέτη αυτή

κατέδειξε τη σημαντική επίδραση φαινομένων όπως η πραγματική σύμπτωση (true coincidence), η τυχαία άθροιση (random summing) και η τυχαία σύμπτωση (chance coincidence). Επίσης οδήγησε σε προτάσεις για τις βέλτιστες συνθήκες ανίχνευσης ενός μεγάλου πλήθους φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στην ανιχνευτική διάταξη XtRa - CSS.

- Κατάλληλη τροποποίηση του κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE ώστε να μπορεί να προσομοιώσει συγχρόνως το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και ένα σύστημα Compton Suppression σε λειτουργία σύμπτωσης ή αντί-σύμπτωσης. Μέσω αυτής της τροποποίησης μπορούν να εκτιμηθούν καθαρά υπολογιστικά, συντελεστές διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, για οποιοδήποτε ισότοπο και οποιαδήποτε γεωμετρία δείγματος.
- Ανίχνευση πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων  $^{241}\text{Am}$  σε δείγματα χώματος από την περιοχή της Καρδίτσας ρυπασμένα από το ατύχημα του Chernobyl. Τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν υψηλό υπόστρωμα, κυρίως λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης συγκέντρωσης  $^{137}\text{Cs}$  και για το λόγο αυτό ήταν καταρχήν δύσκολη η ανίχνευση του  $^{241}\text{Am}$ . Η ανίχνευση του  $^{241}\text{Am}$  κατέστη δυνατή με χρήση του συστήματος XtRa - CSS αλλά και του ανιχνευτή LEGe. Διαπιστώθηκε πολύ υψηλή συσχέτιση μεταξύ των  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  για τα δείγματα που είχαν συλλεχθεί από την περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων.
- Ανίχνευση πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  και  $^{137}\text{Cs}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ λόγω του ατυχήματος στη Fukushima, της τάξεως των  $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .
- Βελτίωση των ανιχνευτικών τεχνικών του Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π. που επέτρεψαν την ανίχνευση πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{22}\text{Na}$  (της τάξεως του  $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ) σε δείγματα ατμοσφαιρικού αεροζόλ και εύρεση συσχέτισης μεταξύ  $^{210}\text{Pb}$  και  $^7\text{Be}$ .
- Ανάπτυξη τεχνικής για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ισοτόπων κοσμικής προέλευσης στις υγρές κατακρημνίσεις.
- Βελτίωση των τεχνικών νετρονικής ενεργοποίησης που εφαρμόζονται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π., μετά από ενδελεχή διερεύνηση σειράς σεναρίων ενεργοποίησης και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, και με χρήση της ανιχνευτικής διάταξης

XtRa - CSS. Η βελτίωση συνίσταται στην ανίχνευση περισσότερων στοιχείων και στην επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας και χαμηλότερων επιπέδων ανίχνευσης.

### 9.3 Δυνατότητες μελλοντικής έρευνας

Οι δυνατότητες μελλοντικής έρευνας ή / και εφαρμογής των τεχνικών που αναπτύχθηκαν στην Δ.Δ. μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Μελέτη της εξάρτησης των συντελεστών απόκρισης της διάταξης XtRa - CSS ( $R_p$ , R.F., T.A.S.F.) από τη γεωμετρία μέτρησης δειγμάτων, με χρήση μονοενεργειακών και πολυενεργειακών ισοτόπων σε διάφορες γεωμετρίες.
- Ανάλυση δειγμάτων με πολυενεργειακά ισότοπα σε διάφορες γεωμετρίες, με στόχο τη συγκέντρωση δεδομένων απόδοσης φωτοκορυφής της διάταξης XtRa - CSS για τα αντίστοιχα ισότοπα, σε λειτουργία σύμπτωσης και αντί-σύμπτωσης.
- Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου της τυχαίας σύμπτωσης (chance coincidence) στο suppressed φάσμα, μέσω της ανάλυσης δειγμάτων με διάφορα επίπεδα συνολικής ραδιενέργειας.
- Βελτίωση του τροποποιημένου κώδικα προσομοίωσης *penmain\_css*, με εισαγωγή περισσότερων ισοτόπων με πιο περίπλοκα σχήματα διάσπασης, για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά.
- Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης true coincidence με χρήση του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα *penmain*, για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, και για διάφορες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή που χρησιμοποιούνται στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.
- Εισαγωγή στον κώδικα PENELOPE της δυνατότητας προσομοίωσης ισοτόπου το οποίο διασπάται με διάσπαση  $\beta^+$  και στη συνέχεια αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνιο- $\gamma$ . Τα φωτόνια 511 keV που ακολουθούν την εξαΰλωση του ποζιτρονίου εκπέμπονται πρακτικά ταυτόχρονα με το φωτόνιο- $\gamma$  από την αποδιέγερση του πυρήνα, καθιστώντας την διάσπαση αυτή μία ιδιαίτερη περίπτωση εκπομπής φωτονίων σε σειρά, η οποία δεν προσομοιώνεται με τον τροποποιημένο κώδικα *penmain\_css*.

- Ανάλυση περισσότερων δειγμάτων χώματος από τις πλέον επιβαρυνμένες περιοχές του Ελλαδικού χώρου με στόχο την ανίχνευση  $^{241}\text{Am}$  σε αυτά και τη διερεύνηση εάν η συσχέτιση  $^{241}\text{Am}$  και  $^{137}\text{Cs}$  που βρέθηκε στα δείγματα από την περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων ισχύει και σε άλλες περιοχές.
- Εκτίμηση των επιπέδων  $^{241}\text{Am}$  και  $^{241}\text{Pu}$  στα δείγματα αυτά, κατά την περίοδο αμέσως μετά το ατύχημα.
- Δειγματοληψίες ατμοσφαιρικού αεροζόλ με μεγαλύτερους όγκου αέρα με στόχο την ανίχνευση  $^{22}\text{Na}$ .
- Συστηματικές μετρήσεις ατμοσφαιρικού αεροζόλ και υγρών κατακρημνίσεων σε περίοδο που ο 11ετής κύκλος του Ήλιου βρίσκεται στο ναδίρ του, οπότε η συγκέντρωση κοσμογενών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα είναι υψηλότερη. Αυτές οι εν γένει αυξημένες συγκεντρώσεις μπορούν να δείξουν την αποτελεσματικότητα ή όχι των πρωτοκόλλων δειγματοληψίας και ανάλυσης που προτάθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Δ.Δ. για την ανίχνευση του  $^{22}\text{Na}$ . Εκτίμηση της εποχιακής κύμανσης του λόγου  $^{22}\text{Na}/^7\text{Be}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ.
- Διάκριση του  $^{210}\text{Pb}$  που κατακρατείται κατά τη δειγματοληψία αεροζόλ στα φίλτρα αέρα ως  $^{210}\text{Pb}$ , από τον  $^{210}\text{Pb}$  που παράγεται στα φίλτρα από τη διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που κατακρατούνται στα φίλτρα.
- Βελτίωση και εφαρμογή της τεχνικής προσδιορισμού ισοτόπων κοσμικής προέλευσης σε υγρές κατακρημνίσεις.
- Διερεύνηση της δυνατότητας μετατροπής της διάταξης Xtra - CSS, προκειμένου να γίνεται έλεγχος της σύμπτωσης φωτονίων με συγκεκριμένη ενέργεια και ειδικότερα των φωτονίων ενέργειας 1274.6 keV και 511 keV του  $^{22}\text{Na}$ . Η μετατροπή αυτή ενδεχομένως θα επιτρέψει την βελτίωση των επιπέδων ανίχνευσης του  $^{22}\text{Na}$  σε λειτουργία σύμπτωσης. Η μετατροπή αυτή θα ανοίξει νέους ορίζοντες στην ανίχνευση ισοτόπων στο Ε.Π.Τ. - Ε.Μ.Π.
- Ανάλυση περισσότερων προτύπων υλικών με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης, με στόχο την εύρεση συντελεστών βαθμονόμησης για τα υλικά

αυτά. Επιπρόσθετα, αναφορικά με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης πρέπει να διερευνηθούν:

- Οι λόγοι για τους οποίους οι συντελεστές βαθμονόμησης για διάφορα στοιχεία διαφέρουν ανάμεσα στα διάφορα υλικά.
- Η ύπαρξη ταχέων νετρονίων στη θέση ακτινοβολήσης και ο βαθμός στον οποίο παρατηρούνται αντιδράσεις (n,α) και (n,p)
- Η επίδραση της πυκνότητας των δειγμάτων στη διατάραξη της ροής νετρονίων λόγω απορρόφησης και σκέδασής τους εντός του δείγματος.
- Η επίδραση που μπορεί να έχει η φυσική ραδιενέργεια των δειγμάτων που ενεργοποιούνται στο αποτέλεσμα της ενεργοποίησης, ειδικά στο βαθμό που εμπλέκονται φωτόνια με ενέργειες παρόμοιες με τις ενέργειες που εκπέμπουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα.
- Το κατά πόσον μία διαφορετική γεωμετρία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης θα βελτιώνει την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων και κατά συνέπεια τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης για ορισμένα στοιχεία.
- Συστηματική ανάλυση διαφόρων τύπων περιβαλλοντικών δειγμάτων, όπως ιζήματα, με στόχο τον προσδιορισμό των περιεχομένων στοιχείων και ιχνοστοιχείων σε αυτά, όπως για παράδειγμα σπάνιες γαίες.
- Συμμετοχή σε Διεθνείς Ασκήσεις Διασύγκρισης νετρονικής ενεργοποίησης, με στόχο τη διαπίστωση της ορθότητας των χρησιμοποιούμενων τεχνικών και της ακρίβειας των συντελεστών βαθμονόμησης.

#### 9.4 Δημοσιεύσεις – Ανακοινώσεις σε συνέδρια

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Δ.Δ. πραγματοποιήθηκε μία σειρά από δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια.

##### A. Δημοσιεύσεις σε περιοδικά

- Monitoring of  $^7\text{Be}$  atmospheric activity concentration using short term measurements, S.M.A. Papandreou, M.I. Savva, K.L. Karfopoulos, D.J. Karangelos, M.J. Anagnostakis, S.E. Simopoulos, Nuclear Technology and Radiation Protection 26 (2), pp. 101-109, 2011.

- Environmental measurements and inspections on imported foods and feedstuffs in Greece after the Fukushima accident, C. Potiriadis, C. Housiadas, K. Kehagia, M. Kolovou, D. Xarchoulakos, M.J. Anagnostakis, D.I. Karangelos, K.L. Karfopoulos, M.I. Savva, S.E. Simopoulos, A. Clouvas, S. Xanthos, K. Eleftheriadis, E. Florou, P. Kritidis, K. Ioannides, A. Ioannidou, M. Manolopoulou, K. Papastefanou, S. Stoulos, K. Stamoulis, Radiation Protection Dosimetry 156 (4), pp. 465-474, 2013.
- Installation and performance testing of an XtRa-Nal(Tl) Compton Suppression System at the NED-NTUA, M.I. Savva, K.L. Karfopoulos, D.J. Karangelos, M.J. Anagnostakis, S.E. Simopoulos, Applied Radiation and Isotopes 87, pp. 361–364, 2014.
- Determination of True Coincidence Correction factors using Monte-Carlo simulation techniques, D.A. Chionis, M.I. Savva, K.L. Karfopoulos, M.J. Anagnostakis, Nuclear Technology & Radiation Protection 29, Suppl., 2014.
- Experimentally validated Monte Carlo simulation of an XtRa-Nal(Tl) Compton Suppression System response, M.I. Savva, M.J. Anagnostakis, Applied Radiation and Isotopes 109, pp. 555-557, 2016.
- Analysis of size-fractionated soil samples by gamma spectrometry, M.I. Savva, D.J. Karangelos, M.J. Anagnostakis, S.E. Simopoulos, Applied Radiation and Isotopes 109, pp. 563-565, 2016.
- Determination of  $^{22}\text{Na}$  Activity in Air and Rainwater samples by Gamma-ray Spectrometry, M.I. Savva, M.J. Karangelos, M.J. Anagnostakis, Applied Radiation and Isotopes, In press, 2017.

### ***B. Ανακοινώσεις σε συνέδρια***

- The response of the Nuclear Engineering Department of NTUA to the Fukushima Accident, M.I. Savva, K.L. Karfopoulos, D.J. Karangelos, M.I. Anagnostakis, S.E. Simopoulos, Ημερίδα της Ε.Ε.Α.Ε. για το πυρηνικό ατύχημα στην Ιαπωνία, Αθήνα, 7 Ιουλίου 2011.
- Calculation of the true coincidence correction factors using Monte Carlo simulation techniques, D.A. Chionis, M.I. Savva, K.L. Karfopoulos, M.J.

Anagostakis, 8<sup>th</sup> Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection, Αθήνα, 28-30 Μαΐου 2012.

- Επίδραση της γεωμετρίας του δείγματος κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση χώματος για τον προσδιορισμό του  $^{210}\text{Pb}$ , Δ.Ε. Χαβιάρας, M.I. Σάββα, Δ.Ι. Καράγγελος, Μ.Ι. Αναγνωστάκης, 5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014.
- Determination of  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{22}\text{Na}$  Activity in Air and Rainwater samples by Gamma-ray Spectrometry, M.I. Savva, M.J. Anagostakis, 25<sup>th</sup> Symposium of the Hellenic Nuclear Physics Society, Αθήνα, 3-4 Ιουνίου 2016.



# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

- [1] Aaltonen, H., Klemola, S., Ugletveit, F. (1994). "Validation of a method for computer calculation of germanium detector efficiencies", *Nuclear Instruments and methods in Physics Research A*, 339 (1-2), pp. 87-91.
- [2] Aglietta, M., Badino, G., Castagnoli, C., Castellina, A., Fulgione, W., Galeotti, P., Marchetti, G., Periale, L., Saavedra, O., Trincherro, G., Vernetto, S. (1992). "Study of the low energy background radiation and the effects of the  $^{222}\text{Rn}$  in the LSD underground experiment". *Nuclear Physics B (Pros. Suppl.)*, 28A, pp. 430-434.
- [3] Agrafiotis, K., Karfopoulos, K.L., Anagnostakis, M.J. (2011). "Calibration of an in-situ BEGe detector using semi-empirical and Monte Carlo techniques", *Applied Radiation and Isotopes*, 69 (8), pp. 1151-1155.
- [4] Al-Azmi, D. (2008). "Simplified slow anti-coincidence circuit for Compton suppression systems", *Applied Radiation and Isotopes*, 66 (8), pp. 1108-1116.
- [5] Al-Azmi, D., Sayed, A., Yatim, H. (2001). "Variations in  $^7\text{Be}$  concentrations in the atmosphere of Kuwait during the period 1994 to 1998", *Applied Radiation and Isotopes*, 55 (3), pp. 413-417.
- [6] Albert, R. D. (1953). "An Anticoincidence Gamma-Ray Scintillation Spectrometer", *Review of Scientific Instruments*, 24 (12), pp. 1096-1101.
- [7] Aldahan, A., Possnert, G., Vintersved, I. (2001). "Atmospheric interactions at northern high latitudes from weekly Be-isotopes in surface air", *Applied Radiation and Isotopes*, 54, pp. 345-353.
- [8] Alves da Costa, L., B.C.Menezes, M.-A. (2007). "Neutron activation analysis: Nuclear interference from Iron on Manganese", International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007, Santos, SP, Brazil.
- [9] Amersham. (1976). "Neutron Sources Americium-241/Beryllium and Californium-252". Technical Bulletin 76/7.
- [10] Anagnostakis, M.J., Simopoulos, S.E. (1995). "An experimental numerical method for the efficiency calibration of Low Energy Germanium detectors", *The Natural Radiation Environment VI*, 22, Suppl.1, pp. S93-S99.

- [11] Anagnostakis, M.J., Bolzan, C., De Felice, P., Fazio, A., Grisanti, G., Risica, S., Turtiainen, T., van der Graaf, E. (2004). "A preliminary intercomparison of gamma-ray spectrometry on building materials", *Applied Radiation and Isotopes*, 61, pp. 381-388.
- [12] Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E. (2005). "Uranium-238 and its daughter products in Greek surface soils", *Radioactivity In the Environment*, 7, pp. 175-186.
- [13] Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Karangelos, D.J., Petropoulos, N.P., Rouni, P.K., Simopoulos, S.E., Zunic, Z. (2001). "Determination of depleted uranium in environmental samples by gamma-spectroscopic techniques", *Archive of Oncology*, 9 (4), pp. 231-236.
- [14] Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E., Angelopoulos, M.G. (1994). "Natural radioactivity mapping of Greek surface soil", Proceedings of the 1<sup>st</sup> Mediterranean Congress on Radiation Protection, 5-7 April 1994, Athens.
- [15] Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E., Angelopoulos, M.G. (1996). "Natural radioactivity mapping of Greek surface soils", *Environment International*, 22, Supplement 1, pp. 3-8.
- [16] ANSI/IEEE. (1997). "IEEE Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Ray Detectors" (Vols. 325-1996).
- [17] Arnold, J. (1956). "Beryllium-10 Produced by Cosmic Rays", *Science*, 124 (3224), pp. 584-585.
- [18] Arnold, J., Al-Salih, H. (1955). "Beryllium-7 produced by cosmic rays", *Science*, 121 (3144), pp. 451-453.
- [19] Arpesella, C. (1996). "A Low Background Counting Facility at Laboratori Nazionali del Gran Sasso", *Applied Radiation and Isotopes*, 47 (9-10), pp. 991-999.
- [20] Ashrafi, S., Likar, A., Vidmar, T. (1999). "Precise modeling of a coaxial HPGe detector" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 438 (2-3), pp. 421-428.
- [21] Athari Allaf, M., Shahriari, M., Sohrabpour, M. (2004). "Monte Carlo source simulation technique for solution of interference reactions in INAA experiments: a preliminary report", *Radiation Physics and Chemistry*, 69 (6), pp. 461-465.
- [22] Aurelian, L. (2009). "Some considerations about MDA and ISO 11929-3(2000)", *17th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications*. Bratislava, Σλοβακία.

- [23] Azahra, M., Camacho-Garcia, A., Gonzalez-Gomez, C., Lopez-Penalver, J., El Bardouni, T. (2003). "Seasonal  $^7\text{Be}$  concentrations in near- surface air of Granada (Spain) in period 1993- 2001", *Applied Radiation and Isotopes*, 59 (2-3), pp. 159-164.
- [24] Balkanski, Y., Jacob, D., Gardner, G. (1993). "Transport and residence times of tropospheric aerosols inferred from a global threedimensional simulation of  $^{210}\text{Pb}$ ", *Journal Geophysical Research*, 98 (D11), pp. 20573-20585.
- [25] Baro, J., Sempau, J., Fernandez-Varea, J., Salvat, F. (1995). "PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 100 (1), pp. 31-46.
- [26] Barsanti, M., Conte, F., Delbonoa, I., Iurlarob, G., Battistic, P., Bortoluzzi, S., Lorenzelli, R., Salvi, S., Zicari, S., Papucci, C., Delfanti, R. (2012). "Environmental radioactivity analyses in Italy following the Fukushima Dai-ichi nuclear accident", *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, pp. 126-130.
- [27] Baskaran, M. (2011). "Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a Review", *Journal of Environmental Radioactivity*, 102 (5), pp. 500-513.
- [28] Bé, M.-M., Chisté, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V., Kuzmenko, N., Helmer, R., Nichols, A., Schoenfeld, E., Dersch, R. (2004). "Tables des Radionucléides", Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres, Γαλλία.
- [29] Beausang, C., Simpson, J. (1996). "Large arrays of escapes suppressed spectrometers for nuclear structure experiments", *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 5, pp. 527-558.
- [30] Bell, P. (1954). "Scintillation spectrometer with improved response", *Science*, 120 (3121), pp. 625-626.
- [31] Bem, H., Gallorini, M., Rizzio, E., Krzeminska, M. (2003). "Comparative studies on the concentrations of some elements in the urban air particulate matter in Lodz City of Poland and in Milan, Italy", *Environment International*, 29 (4), pp. 423-428.
- [32] Berger, M., Seltzer, S. (1988). "Monte Carlo Transport of Electrons and Photons", Plenum, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.

- [33] Bhandari, N., Rama, T. (1963). "Atmospheric circulation from observations of Sodium-22 and other short-lived natural radioactivities", *Journal of Geophysical Research*, 68 (7), pp. 1959-1966.
- [34] Biegalski, S., Bowyer, T., Eslinger, P., Friese, J., Greenwood, L., Haas, D., Hayes, J.C., Hoffman, I., Keillor, M., Miley, H.S., Moring, M. (2012). "Analysis of data from sensitive U.S. monitoring stations for the Fukushima Dai-ichi nuclear reactor accident", *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, pp. 15-21.
- [35] Bikit, I., Mrda, D., Todorovic, N., Nikolov, J., Krmar, M., Veskovic, M., Slivka, J., Hansman, J., Forkapic, S., Jovancevic, N. (2012). "Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima", *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, pp. 89-93.
- [36] Bikit, I., Slivka, J., Krmar, M., Durcic, Z., Zikic, N., Conkic, L., Veskovic, M., Anicin, I. (1999). "Detection limits of the NaI(Tl) shielded HPGe spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 421 (1-2), pp. 266-271.
- [37] Blaauw, M., Degenaar, I., de Goeij, J. (2007). "Influence of the effective mass on the relative neutron density distribution inside a large sample in prompt-gamma neutron activation analysis", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 271 (3), pp. 761-764.
- [38] Blazej, S., Mietelski, J. (2014). "Cosmogenic  $^{22}\text{Na}$ ,  $^7\text{Be}$  and terrestrial  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  radionuclides in ground level air samples collected weekly in Kraków (Poland) over years 2003–2006", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300 (2), pp. 747-756.
- [39] Bochud, F., Bailat, C., Buchillier, T., Byrde, F., Schmid, E., Laedermann, J.-P. (2006). "Simple Monte-Carlo method to calibrate well-type HPGe detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 569 (3), pp. 790-795.
- [40] Bojanowski, R., Radecki, Z., Campbell, M., Burns, K., Trinkl, A. (2001). "Report on the intercomparison run for the determination of radionuclides in soils IAEA-326 and IAEA-327", International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [41] Bolling, A., Pagels, J., Yttri, K., Barregard, L., Sallsten, G., Schwarze, P., Boman, C. (2009). "Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties", *Particle Fibre Toxicology*, 6:29.
- [42] Bondietti, E., Brantley, J., Rangarajan, C. (1988). "Size distributions and growth of natural and Chernobyl-derived submicron aerosols in Tennessee", *Journal of Environmental Radioactivity*, 6 (2), pp. 99-120.

- [43] Boo-Rabee, F., Bakir, Y.-Y., Bem, H. (1995). "Simultaneous determination of Lead-210, gross beta and gross alpha activities of air filters by pulse shape discrimination liquid scintillation counting", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 194 (2), pp. 403-409.
- [44] Borovoy, A. (1992). "Characteristics of the nuclear fuel of power unit No.4 of Chernobyl NPP", In: *Radioecological consequences of the Chernobyl accident*. Nuclear Society International, Μόσχα, Ρωσία.
- [45] Bortoli, M., Gaglione, P., Malvicini, A. (1966). "Some data and comments on Sodium-22 in food chains", *Health Physics*, 12 (3), pp. 353-359.
- [46] Borzilov, V., Klepikova, N. (1993). "Effect of Meteorological Conditions and Release Composition on Radionuclide Deposition after the Chernobyl Accident" In S. Merwin, M. Balonov, *The Chernobyl papers. Volume 1. Doses to the Soviet population and early health effects studies* (pp. 47-69). Research Enterprises Richland, Ουάσινγκτον, Η.Π.Α.
- [47] Boson, J., Agren, G., Johansson, L. (2008). "A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 587 (2-3), pp. 304-314.
- [48] Bourcier, L., Sellegria, K., Masson, O., Zangrando, R., Barbante, C., Gambaro, A., Pichon, M.-J., Boulon, J., Laj, P. (2010). "Experimental evidence of biomass burning as a source of atmospheric <sup>137</sup>Cs, puy de Dôme (1465 m a.s.l.), France", *Atmospheric Environment*, 44 (19), pp. 2280-2286.
- [49] Briesmeister, J. (1997). "MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code", LA-12625-M Version 4B, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, Νέο Μεξικό, Η.Π.Α.
- [50] Britton, R. (2012). "Compton suppression systems for environmental radiological analysis", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 292, pp. 33-39.
- [51] Britton, R., Burnett, J., Davies, A., Regan, P. (2013). "Improving the effectiveness of a low-energy Compton suppression system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 729, pp. 64-68.
- [52] Broecker, W., Peng, T.-H. (1974). "Gas exchange rates between air and sea", *Tellus*, 26 (1-2), pp. 21-35.
- [53] Broecker, W., Peng, T., Mathieu, G., Hesslein, R., Torgersen, T. (1980). "Gas exchange rate measurements in natural systems", *Radiocarbon*, 22 (3), pp. 676-683.

- [54] Broude, C., Hausser, O., Malm, H., Sharpey-Schafer, J., Alexander, T. (1969). "A Ge(Li) two crystal Compton spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods*, 69, pp. 29-34.
- [55] Brun, R., Bruyant, F., Maire, M., McPherson, A., Zanarini, P. (1987). "GEANT 3". DD/EE/84-1, CERN, Γενεύη, Ελβετία.
- [56] Buzulukov, Y., Dobrynin, Y. (1993). "Release of radionuclides during the Chernobyl accident" In S. Merwin, M. Balonov, *The Chernobyl papers. Volume 1. Doses to the Soviet population and early health effects studies* (Vol. 1, pp. 3-21), Research Enterprises, Richland, Ουάσινγκτον, Η.Π.Α.
- [57] Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F., Dominik, J. (2001). "Factors controlling  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland", *Journal of Environmental Radioactivity*, 53 (2), pp. 241-256.
- [58] Camp, D., Gatrousis, C., Maynard, L. (1974). "Low-background Ge(Li) detector systems for radioenvironmental studies", *Nuclear Instruments and Methods*, 117, pp. 189-211.
- [59] Canberra. (2001). "Compton Suppression ... Made Easy", [www.canberra.com](http://www.canberra.com).
- [60] Canberra. (2002). "Genie-2000 Spectroscopy System Customization Tools".
- [61] Cannizzaro, F., Greco, G., Raneli, M., Spitale, M., Tomarchio, E. (1999). "Determination of  $^{210}\text{Pb}$  concentration in the air at ground level by gamma-ray spectrometry", *Applied Radiation and Isotopes*, 51 (2), pp. 239-245.
- [62] Cannizzaro, F., Greco, G., Raneli, M., Spitale, M., Tomarchio, E. (2004). "Concentration measurements of  $^7\text{Be}$  at ground level air at Palermo, Italy - comparison with solar activity over a period of 21 years", *Journal of Environmental Radioactivity*, 72 (3), pp. 259-271.
- [63] CEC (Commission of the European Communities), "The state of the environment in the European Community. Overview. Vol. III. COM(92)23/III Final", Luxembourg, 1992.
- [64] Cetiner, N. (2008). "Specifications and performance of the Compton Suppression Spectrometer at the Pennsylvania State University", Διδακτορική Διατριβή, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Pennsylvania State University, Η.Π.Α.
- [65] Cetiner, N., Unlu, K., Brenizer, J. (2008). "Compton suppression system at Penn State Radiation Science and Engineering Center", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 276 (3), pp. 615-621.

- [66] Chionis, D.A., Savva, M.I., Karfopoulos, K.L., Anagnostakis, M.J. (2014). "Determination of True Coincidence correction factors using Monte Carlo simulation techniques", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 29 (Suppl.), pp. S8-S13.
- [67] Cho, H., Chung, Y., Kim, Y. (2005). "Study on prompt gamma-ray spectrometer using Compton suppression system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 229 (3-4), pp. 499-507.
- [68] Chung, C., Lee, C. (1988). "Environmental monitoring using a HPGe-Nal(Tl) Compton suppression spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A273, pp. 436-440.
- [69] Chung, C., Yuan, L., Chen, K. (1986). "Performance of a HPGe-Nal(Tl) Compton suppression spectrometer in high-level radioenvironmental studies", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 243, pp. 102-110.
- [70] Cigna, A., Giorcelli, F. (1965). "Sodium-22 in milk", *Health Physics*, 11, pp. 1095-1097.
- [71] Cigna, A., Clemente, G., Giorcelli, F. (1970). "Cosmogenic and artificial Na-22 levels in rainwater", *Health Physics*, 18 (4), pp. 379-382.
- [72] Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M. (1998). "Monte Carlo based method for conversion of in-situ gamma ray spectra obtained with a portable Ge detector to an incident photon flux energy distribution", *Health Physics*, 74 (2), pp. 216-23.
- [73] Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M., Alifragis, D. (2005). "Radiocesium gamma dose rates in a Greek pine forest: measurements and Monte Carlo computations", *Radioactivity in the Environment*, 7, pp. 1155-1166.
- [74] Connally, R. (1953). "Two-Crystal Gamma-Ray Scintillation Spectrometer", *The Review of Scientific Instruments*, 24 (6), pp. 458-459.
- [75] Cooper, J., Perkins, R. (1972). "A versatile Ge(Li)-Nal(Tl) coincidence-anticoincidence gamma-ray spectrometer for environmental and biological problems", *Nuclear Instruments and Methods*, 99 (1), pp. 125-146.
- [76] Cooper, J., Rancitelli, L., Perkins, R. (1970). "An anticoincidence-shielded Ge(Li) gamma-ray spectrometer and its application to radioanalytical chemistry problems", *Journal of Analytical Chemistry*, 6 (1), pp. 147-163.

- [77] Cooper, R., Brownell, G. (1967). "A large coaxial Ge(Li) detector with plastic anticoincidence scintillator for activation analysis", *Nuclear Instruments and Methods*, 51 (1,2), pp. 72-76.
- [78] Cosma, C., Iurian, A., Niță, D., Begy, R., Cîndea, C. (2012). "Indicators of the Fukushima radioactive release in NW Romania", *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, pp. 94-99.
- [79] Courtine, F., Pilleyre, T., Sanzelle, S., Miallier, D. (2008). "Ge well detector calibration by means of a trial and error procedure using the dead layers as a unique parameter in a Monte Carlo simulation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 596 (2), pp. 229-234.
- [80] Crecelius, E. (1981). "Prediction of marine atmospheric deposition rates using total  $^7\text{Be}$  deposition velocities", *Atmospheric Environment*, 15 (4), pp. 579-582.
- [81] Cumming, J., Parekh, P., Murali, A. (1988). "A novel approach to the determination of iridium via Ge-coincidence/Nal(Tl)-anticoincidence gamma-ray spectrometry", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 265 (3), pp. 468-474.
- [82] Cutshall, N., Larsen, I., Olsen, C. (1983). "Direct analysis of  $^{210}\text{Pb}$  in sediment samples: self-absorption corrections", *Nuclear Instruments and Methods*, 206 (1-2), pp. 309-312.
- [83] Daish, S., Dale, A., Dale, C., May, R., Rowe, J. (2005). "The temporal variations of  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in air in England", *Journal of Environmental Radioactivity*, 84 (3), pp. 457-467.
- [84] Das, H. (1986). "The limits of decision, detection, and determination in anti-Compton gamma-ray spectrometry", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 99 (1), pp. 61-73.
- [85] Das, H., Zonderhuis, J. (1987). "Application of anti-Compton counting in instrumental neutron activation analysis", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 114 (2), pp. 207-213.
- [86] De Corte, F., Speecke, A., Hoste, J. (1969). "Reactor neutron activation analysis by a triple comparator", *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 3 (3), pp. 205-215.
- [87] de Dardel, F., Arden, T. (2008). "Ion Exchangers", *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- [88] de Oliveira, E., Iwahara, A., Poledna, R., da Silva, M., Tauhata, L., Delgado, J., Lopes, R.T. (2012). "Use of sum-peak and coincidence counting methods for activity standardization of  $^{22}\text{Na}$ ", *Nuclear Instruments and Methods in Physics*



*Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 687 (21), pp. 69-74.

- [89] de Vismes, A., Gurriaran, R., Cagnat, X. (2009). "Anti-Compton gamma spectrometry for environmental samples" *Radioprotection*, 44 (5), pp. 613-618.
- [90] de Voigt, M., Bacelar, J., Micek, S., Schotanus, P., Verhoef, B., Wintraecken, Y., Vermeulen, P. (1995). "A novel compact Ge-BGO Compton-suppression spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 356 (2-3), pp. 362-375.
- [91] Debertain, K., Helmer, R. (1988). "Gamma and x-ray spectrometry with semiconductor detectors", Elsevier, Άμστερνταμ, Ολλανδία.
- [92] DeMaster, D., Brewster, D., McKee, B., Nittrouer, C. (1991). "Rates of particle scavenging, sediment reworking, and longitudinal ripple formation at the HEBBLE site based on measurements of  $^{234}\text{Th}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ", *Marine Geology*, 99 (3-4), pp. 423-444.
- [93] DEMO 86/3 G. (1986). "The Chernobyl Nuclear Accident and its Consequences for Greece", Greek Atomic Energy Commission.
- [94] di Marco, M., Peiffer, P., Schonert, S. (2007). "LArGe Background suppression using liquid argon (LAr) scintillation for  $0\nu\beta\beta$  decay search with enriched germanium (Ge) detectors", *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 172, pp. 45-48.
- [95] Diaz Leon, J., Jaffe, D., Kaspar, J., Knecht, A., Miller, M., Robertson, R., Schubert, A.G. (2011). "Arrival time and magnitude of airborne fission products from the Fukushima, Japan, reactor incident as measured in Seattle, WA, USA", *Journal of Environmental Radioactivity*, 102 (11), pp. 1032-1038.
- [96] Djingova, R., Wagner, G., Kuleff, I. (1999). "Screening of heavy metal pollution in Bulgaria using *Populus nigra* 'Italica'", *Science of The Total Environment*, 234 (1-3), pp. 175-184.
- [97] Dlugosz-Lisiecka, M., Bem, H. (2012). "Determination of the mean aerosol residence times in the atmosphere and additional  $^{210}\text{Po}$  input on the base of simultaneous determination of  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  and  $^{210}\text{Po}$  in urban air", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 293 (1), pp. 135-140.
- [98] Dreicer, M., Aarkrog, A., Alexakhin, R., Anspaugh, L., Arkhipov, N., Johansson, K. (1996). "One Decade After Chernobyl, Summing up the Consequences of the Accident", *Consequences of the Chernobyl accident for the natural and human environments*, pp. 319-366, International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.

- [99] Dryak, P., Kovar, P. (2006). "Experimental and MC determination of HPGe detector efficiency in the 40–2754 keV energy range for measuring point source geometry with the source-to-detector distance of 25 cm", *Applied Radiation and Isotopes*, 64 (10-11), pp. 1346-1349.
- [100] Duchene, G., Beck, F., Twin, P., de France, G., Curien, D., Han, L., Beausang, C.W., Bentley, M.A., Nolan, P.J., Simpson, J. (1999). "The Clover: a new generation of composite Ge detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 432 (1), pp. 90-110.
- [101] Duenas, C., Fernandez, M., Canete, S., Perez, M. (2009). "<sup>7</sup>Be to <sup>210</sup>Pb concentration ratio in ground level air in Málaga (36.7°N, 4.5°W)", *Atmospheric Research*, 92 (1), pp. 49-57.
- [102] Duenas, C., Fernandez, M., Carretero, J., Liger, E., Canete, S. (2003). "<sup>7</sup>Be and <sup>210</sup>Pb concentrations in air in Málaga (Spain)", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 257 (2), pp. 249-253.
- [103] Duenas, C., Fernandez, M., Carretero, J., Liger, E., Canete, S. (2005). "Deposition velocities and washout ratios on a coastal site (southeastern Spain) calculated from <sup>7</sup>Be and <sup>210</sup>Pb measurements", *Atmospheric Environment*, 39 (36), pp. 6897-6908.
- [104] Duenas, C., Fernandez, M., Gordo, E., Canete, S., Perez, M. (2011). "Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of rainwater samples and deposition to ground", *Atmospheric Environment*, 45 (4), pp. 1015-1024.
- [105] Durana, L., Chudy, M., Masarik, J. (1996). "Investigation of <sup>7</sup>Be in the Bratislava atmosphere", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 207 (2), pp. 345-356.
- [106] Elekes, Z., Belgya, T., Molnar, G., Kiss, A., Csatlos, M., Gulyas, J., Krasznahorkay, A., Mate, Z. (2003). "Absolute full-energy peak efficiency calibration of a Clover-BGO detector system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 503 (3), pp. 580-588.
- [107] Ewa, I., Bodizs, D., Czifrus, S., Molnar, Z. (2001). "Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector", *Applied Radiation and Isotopes*, 55 (1), pp. 103-108.
- [108] Fan, Y., Wang, J., Wang, S., Zhang, X., Li, Q. (2012). "The coincidence-summing correction of the Compton-suppression spectrometer", *Applied Radiation and Isotopes*, 70 (9), pp. 2124-2126.

- [109] Fechner, M., Henson, C., Gaffiot, J., Lasserre, T., Letourneau, A., Lhuillier, D., Mention, G., Mueller, Th.A., Queval, R., Svoboda, R. (2011). "A large HPGe detector for the non-destructive radioassay of an ultra-low-background counting facility", *Applied Radiation and Isotopes*, 69 (7), pp. 1033-1038.
- [110] Feely, H., Larsen, R., Sanderson, C. (1989). "Factors that cause seasonal variations in Beryllium-7 concentrations in surface air", *Journal of Environmental Radioactivity*, 9 (3), pp. 223-249.
- [111] Feichter, J., Brost, R., Heimann, M. (1991). "Three-dimensional modeling of the concentration and deposition of  $^{210}\text{Pb}$  aerosols", *Journal Geophysical Research*, 96 (D12), pp. 22447-22460.
- [112] Fleishman, D. (2008). "Cosmogenic  $^{22}\text{Na}$  as an index of the residence time of water in freshwater basins: a review", *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (8), pp. 1203-1215.
- [113] Fogh, C., Andersson, K. (2001). "Dynamic behavior of  $^{137}\text{Cs}$  contamination in trees of the Briansk region, Russia", *Science of The Total Environment*, 269 (1-3), pp. 105-115.
- [114] Friedman, R., Reichard, M., Blue, T., Brown, A. (2001). "Evaluation of scatter contribution from shielding materials used in scatter measurements for calibration range characterization", *Health Physics*, 80 (1), pp. 54-61.
- [115] Garcia, E., Gonzalez, D., Morales, A., Morales, J., Ortiz de Solorzano, A., Puimedon, J., Saenz, C., Salinas, A., Sarsa, M.L., Villar, J.A. (1998). "Analysis of airborne radon in an ultra-low background experiment" *Applied Radiation and Isotopes*, 49 (12), pp. 1749-1754.
- [116] Garcia-Orellana, J., Sanchez-Cabeza, J., Masque, P., Avila, A., Costa, E., Loye-Pilot, M., Bruach-Menchen, J.M. (2006). "Atmospheric fluxes of  $^{210}\text{Pb}$  to the western Mediterranean Sea and the Saharan dust influence", *Journal of Geophysical Research*, 111 (D153), pp. 1-9.
- [117] García-Toraño, E., Pozuelo, M., Salvat, F. (2005). "Monte Carlo calculations of coincidence-summing corrections for volume sources in gamma-ray spectrometry with Ge detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 544 (3), pp. 577-583.
- [118] Gatschke, W., Gawlik, D. (1980). "Non-destructive Neutron Activation Analysis of Aluminum and Phosphorus in Bone Biopsies" *Journal of Clinical Chemistry and Clinical Biochemistry*, 18 (7), pp. 403-406.

- [119] Gilmore, G., Hemingway, J. (1995). "Practical Gamma Ray", John Wiley & Sons, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.
- [120] Goel, P. (1956). "Radioactive Sulphur produced by Cosmic Rays in Rain Water", *Nature*, 178 (4548), 1458-1459.
- [121] Grabowska, S., Mietelski, J., Kozak, K., Gaca, P. (2003). "Gamma Emitters on Micro-Becquerel Activity Level in Air at Krakow (Poland)", *Journal of Atmospheric Chemistry*, 46 (2), pp. 103-116.
- [122] Gregory, J. (1996). "Atmospheric radioactive isotopes at orbital altitudes", *Radiation Measurements*, 26 (6), pp. 841-850.
- [123] Halbleib, J., Kensek, R., Mehlhorn, T., Valdez, G., Seltzer, S. (1992). "ITS version 3.0: the integrated TIGER series of coupled electron / photon Monte Carlo transport codes", Report SAND91-1634, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- [124] Han, J., Lee, K., Park, T., Lee, J., Lee, S. (2013). "Geometrical optimization of an annulus Compton suppression system using Monte Carlo simulation" *Applied Radiation and Isotopes*, 81, pp. 132-135.
- [125] Harbottle, G., Cumming, J. (1994). "Performance and promise of the Compton suppression well counter", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 353 (1-3), pp. 503-507.
- [126] Hardy, J., Jacob, V., Sanchez-Vega, M., Effinger, R., Lipnik, P., Mayes, V., Willis, D.K., Helmer, R.G. (2002). "Precise efficiency calibration of an HPGe detector: source measurements and Monte Carlo calculations with sub-percent precision", *Applied Radiation and Isotopes*, 56 (1-2), pp. 65-69.
- [127] Hasebe, N., Doke, T., Kikuchi, J., Takeuchi, Y., Sugiyama, T. (1981). "Observation of fallout rates of atmospheric  $^7\text{Be}$  and  $^{22}\text{Na}$  produced by cosmic rays—concerning estimation of the fallout rate of atmospheric  $^{26}\text{Al}$ ", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86 (A2), pp. 520-524.
- [128] Haxel, O., Schumann, G. (1962). "Erzeugung radioaktiver Kernarten durch die kosmische Strahlung / Nuclear Radiation in Geophysics", Springer Berlin, Γερμανία.
- [129] Heinrich, P., Coindreau, O., Grillon, Y., Blanchard, X., Gross, P. (2007). "Simulation of the atmospheric concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  and comparison", *Atmospheric Environment*, 41 (31), pp. 6610-6621.

- [130] Helmer, R. (2003). "Modern tools for precise  $\gamma$ -ray spectrometry with Ge detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 505 (1-2), pp. 297-305.
- [131] Helmer, R., Hardy, J., Iacob, V., Sanchez-Vega, M., Neilson, R., Nelson, J. (2003). "The use of Monte Carlo calculations in the determination of a Ge detector efficiency curve", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 511 (3), pp. 360-381.
- [132] Hernandez, F., Hernandez-Armas, J., Catalan, A., Fernandez-Aldecoa, J., Karlsson, L. (2005). "Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of airborne particulate samples in an oceanic island", *Atmospheric Environment*, 39 (22), pp. 4057-4066.
- [133] Herold, L., Kouzes, R. (1991). "Intrinsic germanium detector efficiency calculations" *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 38 (2), pp. 231-238.
- [134] Holden, A., Sullivan, A., Munchak, L., Kreidenweis, S., Schichtel, B., Malm, W., Collett Jr., J.L. (2011). "Determining contributions of biomass burning and other sources to fine particle contemporary carbon in the western United States", *Atmospheric Environment*, 45 (11), pp. 1986-1993.
- [135] Hötzl, H., Winkler, R. (1981). "IAEA-SM-252/59 Report", International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [136] Hotzl, H., Rosner, G., Winkler, R. (1991). "Correlation of  $^7\text{Be}$  concentrations in surface air and precipitation with the solar cycle", *Naturwissenschaften*, 78 (5), pp. 215-217.
- [137] Space Weather Prediction Centre: <http://www.swpc.noaa.gov>
- [138] Hunt, G., O'Riordan, M., Whetmath, P. (1978). An Anticoidence-shielded Ge(Li) gamma-ray spectrometer with high sensitivity for measurement of environmental radionuclides. *Nuclear Instruments and Methods*, 156, 573-589.
- [139] Hurtado, S., Garcia-Leon, M., Garcia-Tenorio, R. (2004). "Monte Carlo simulation of the response of a germanium detector for low-level spectrometry measurements using GEANT4", *Applied Radiation and Isotopes*, 61 (2-3), pp. 139-143.
- [140] Huy, N., Binh, D., An, V. (2007). "Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 573 (3), pp. 384-388.

- [141] Hwanga, H., Parkb, T., Leeb, J. (1998). "Subtractions of accidental coincidences and Compton scattered events by multi-channel time scaling technique in  $\gamma$ -ray spectrometry", *Applied Radiation and Isotopes*, 49 (9-11), pp. 1201-1205.
- [142] IAEA. (1996). "One Decade after Chernobyl: The Environmental Impact in and Prospects for the Contaminated Areas", International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [143] IAEA/AQ/2. (2009). "Mediterranean Region Proficiency Test on the Determination of Radionuclides in Air Filters IAEA-CU-2008-02", International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [144] IAEA-TECDOC-1275. (2002). "Specialized Software Utilities for Gamma-ray Spectrometry", *Final report of a co-ordinated research project*. International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [145] International Nuclear Safety Group (INSAG). (1986). "Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident", IAEA Safety Series, International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία..
- [146] Ioannidou, A., Papastefanou, C. (2006). "Precipitation scavenging of  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides in air", *Journal of Environmental Radioactivity*, 85 (1), pp. 121-136.
- [147] Ioannidou, A., Manenti, S., Gini, L., Groppi, F. (2012). "Fukushima fallout at Milano, Italy", *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, pp. 119-125.
- [148] Ioannidou, A., Manolopoulou, M., Papastefanou, C. (2005). "Temporal changes of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in surface air at temperate latitudes ( $40^\circ\text{N}$ )", *Applied Radiation and Isotopes*, 63 (2), pp. 277-284.
- [149] IRSN. (2012). "Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences", Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire, ontenay-aux-Roses, Γαλλία.
- [150] Ishikawa, Y., Murakami, H., Sekine, T., Yoshihara, K. (1995). "Precipitation scavenging studies of radionuclides in air using cosmogenic  $^7\text{Be}$ ", *Journal of Environmental Radioactivity*, 26 (1), pp. 19-36.
- [151] Ishikawa, Y., Murakami, H., Sekine, T., Saito, T., Yoshihara, K. (1994). "Non-destructive determination of low-level  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{226}\text{Ra}$  with an ordinary high-purity Ge-detector", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 178 (2), pp. 301-310.
- [152] Ishikawa, Y., Shoji, K., Takahashi, M., Watanabe, T. (2000). "High sensitive measurements of  $^{137}\text{Cs}$  and other radionuclides in environmental samples using

- germanium detectors”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 243 (2), pp. 367-376.
- [153] Iskander, F., Landsberger, S., Warren, S. (2000). “Determination of  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples by low-level Compton suppression gamma-counting”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 244 (1), pp. 159-163.
- [154] Janicsko Csathy, J., Aghaei Khozani, H., Caldwell, A., Liu, X., Majorovits, B. (2011). “Development of an anti-Compton veto for HPGe detectors operated in liquid argon using silicon photo-multipliers”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 654 (1), pp. 225-232.
- [155] Jasiulionis, R., Wershofen, H. (2005). “A study of the vertical diffusion of the cosmogenic radionuclides,  $^7\text{Be}$  and  $^{22}\text{Na}$  in the atmosphere”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 79 (2), pp. 157-169.
- [156] Jeronymo, J., Mani, G., Olkowsky, J., Sadeghi, A., Williamson, C. (1963). “Absolute cross-sections for some (n, p), (n,  $\alpha$ ) and (n, 2n) reactions”, *Nuclear Physics*, 47, pp. 157-176.
- [157] Johansson, L., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., Potter, A. (2004). “Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets”, *Atmospheric Environment*, 38 (25), pp. 4183-4195.
- [158] Joshi, L., Rangarajan, C., Sarada Gopalakrishnan, S. (1969). “Measurement of lead-210 in surface air and precipitation”, *Tellus*, 21 (1), pp. 107-112.
- [159] Jung, H., Cho, H., Lee, J., Lee, C. (2007). “Improvement of the Compton suppression ratio of a standard BGO suppressor system by a digital pulse shape analysis”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 580, pp. 1016-1019.
- [160] Jungck, M., Andrey, J., Froidevaux, P. (2009). “Determination of radionuclide levels in rainwater using ion exchange resin and  $\gamma$ -spectrometry”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (4), pp. 361-365.
- [161] Junge, C. (1963). “Air Chemistry and Radioactivity” (J. van Mieghem, Ed.), Academic Press, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.
- [162] Jurado Vargas, M., Guerra, A. (2006). “Application of PENELOPE code to the efficiency calibration of coaxial germanium detectors”, *Applied Radiation and Isotopes* 64, 64 (10-11), pp. 1319-1322.
- [163] Juri Ayub, J., Di Gregorio, D., Velasco, H., Huck, H., Rizzotto, M., Lohaiza, F. (2009). “Short-term seasonal variability in  $^7\text{Be}$  wet deposition in a semiarid

ecosystem of central Argentina”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (11), pp. 977-981.

- [164] Kamboj, S., Kahn, B. (1996). “Evaluation of Monte Carlo simulation of photon counting efficiency for germanium detectors”, *Health Physics*, 70 (4), pp. 512-519.
- [165] Kantele, J., Fink, R. (1961). “Coincidence summing and non-linearity studies with a two-crystal scintillation gamma spectrometer”, *Nuclear Instruments and Methods*, 13, pp. 141-146.
- [166] Kantele, J., Marttila, O. (1964). “Proposal for a versatile coincidence spectrometer employing an anti-Compton annulus”, *Nuclear Instruments and Methods*, 27 (2), pp. 235-236.
- [167] Kantele, J., Marttila, O., Hattula, J. (1966). “Gamma spectrometer systems employing an anti-Compton annulus”, *Nuclear Instruments and Methods*, 39 (2), pp. 194-216.
- [168] Karadeniz, O., Yaprak, G. (2007). “Distribution of radiocesium and natural gamma emitters in pine needles in coniferous forest sites of Izmir”, *Applied Radiation and Isotopes*, 65 (12), pp. 1363-1367.
- [169] Karamanis, D., Lacoste, V., Andriamonje, S., Barreau, G., Petit, M. (2002). “Experimental and simulated efficiency of a HPGe detector with point-like and extended sources”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 487 (3), pp. 477-487.
- [170] Karangelos, D.J., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E. (2004). “Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 77 (3), 233–246.
- [171] Karangelos, D.J., Rouni, P.K., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E. (2005). “Radioenvironmental survey of the Megalopolis power plants fly-ash deposits”, *Radioactivity in the Environment*, 7, pp. 1025-1029.
- [172] Karlsson, L., Hernandez, F., Rodriguez, S., Lopez-Perez, M., Hernandez-Armas, J., Alonso-Perez, S., Cuevas, E. (2008). “Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  to identify natural Saharan dust contributions to PM10 concentrations and air quality impairment in the Canary Islands”, *Atmospheric Environment*, 42 (30), pp. 7034-7042.
- [173] Karfopoulos, K.L., Papadacos, G.N., Karangelos, D.J., Rouni, P.K., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E. (2004). “Radioactive



contamination due to  $^{241}\text{Am}$  Lightning Rod Failure”, *14<sup>th</sup> Hellenic Symposium on Nuclear Physics*, 21-22 Μαΐου 2004, Αθήνα.

- [174] Kaste, J., Friedland, A., Sturup, S. (2003). “Using stable and radioactive isotopes to trace atmospherically deposited Pb in Montane forest soils”, *Environmental Science and Technology*, 37 (16), pp. 3560-3567.
- [175] Kathren, R. (1984). “Radioactivity in the environment”, Harwood Academic Publishers, Ηνωμένο Βασίλειο.
- [176] Kawrakow, I., Rogers, D. (2000). “The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport”, PIRS-701, National Research Council of Canada, Ottawa, Καναδάς.
- [177] Kiang, L., Tsou, R., Li, J., Lin, S., Lo, C.-Y., Kiang, G., Teng, P.K. (1995). “A study of an asymmetric Compton suppression spectrometer by Monte Carlo simulation” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 355 (2-3), pp. 434-438.
- [178] Kierzek, J., Parus, J. (1997). “Optimization of the Gamma Spectrometry System at SAL with the Use of Large NaI(Tl) Annulus in the Anticoincidence Mode for Compton Scattered Radiation Suppression”, IAEA/AL/110Safeguards Analytical Laboratory (SAL) of the IAEA, International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [179] Killick, R., Morris, D. (1962). “The determination of traces of arsenic and antimony in samples of platinum by neutron-activation analysis”, *Talanta*, 9 (11), pp. 879-884.
- [180] Kimura, T., Hamada, T. (1978). “A simple and rapid method of collection of radionuclides in rain water”, *Radioisotopes*, 27 (6), pp. 348-349.
- [181] Kimura, T., Hamada, T. (1980). “A simple and rapid method of collecting radionuclides from rain water”, *Analytica Chimica Acta*, 120, pp. 419-422.
- [182] Klie, J., Sharma, H. (1982). “Sulfur determination in coal by 14 MeV neutron activation analysis”, *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 71 (1-2), pp. 299-309.
- [183] Knoll, G. (2010). “Radiation detection and measurements”, Wiley, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.
- [184] Koide, M., Soutar, A., Goldberg, E. (1972). “Marine geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ ”, *Earth and Planetary Science Letters*, 14 (3), pp. 442-446.

- [185] Komura, K., Kuwahara, Y., Abe, T., Tanaka, K., Murata, Y., Inoue, M. (2007). "Measurements of short-lived cosmic-ray-produced radionuclides in rainwater", *Journal of Environmental Radioactivity*, 96 (1-3), pp. 103-109.
- [186] Konki, J., Greenlees, P., Jakobsson, U., Jones, P., Julin, R., Juutinen, S., Ketelhut, S., Hauschild, K., Kontro, R., Leppanen, A.-P., Lopez-Martens, A., Mattila, A., Nieminen, P., Nyman, M., Perajarvi, K., Peura, P., Rahkila, P., Ruotsalainen, P., Saren, J., Scholey, C., Sorri, J., Toivonen, H., Turunen, J., Uusitalo, J. (2012). "Comparison of gamma-ray coincidence and low-background gamma-ray singles spectrometry", *Applied Radiation and Isotopes*, 70 (2), pp. 392-396.
- [187] Korun, M., Likar, A., Vidmar, T. (1997). "Monte-Carlo calculation of the spatial dependence of the coaxial HPGe detector efficiency for point sources", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 390 (1-2), pp. 203-208.
- [188] Kritidis, P., Florou, H., Eleftheriadis, K., Evangelidou, N., Gini, M., Sotiropoulou, M., Diapouli, E., Vratolis, S. (2012). "Radioactive pollution in Athens, Greece due to the Fukushima nuclear accident", *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, pp. 100-104.
- [189] Kruger, P. (1971). "Principles of Activation Analysis", Wiley-Interscience, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.
- [190] Kulan, A. (2006). "Seasonal  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities in surface air before and after the Chernobyl event", *Journal of Environmental Radioactivity*, 90 (2), pp. 140-150.
- [191] Kulisek, J., Hartwell, J., McIlwain, M., Gardner, R. (2007). "Design and preliminary Monte Carlo calculations of an active Compton-suppressed LaBr<sub>3</sub>(Ce) detector system for TRU assay in remote-handled wastes", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 580 (1), pp. 226-229.
- [192] Laborie, J.-M., Le Petit, G., Abt, D., Girard, M. (2002). "Monte Carlo calculation of the efficiency response of a low-background well-type HPGe detector", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 479 (2-3), pp. 618-630.
- [193] Lal, D. (1963). "Study of long and short-term geophysical processes using natural radioactivity", In *Radioactive dating: Proceeding of the symposium on radioactive dating* (pp. 149-157), International Atomic Energy Agency, Βιέννη, Αυστρία.
- [194] Lal, D. (1987). "In Situ-Produced Cosmogenic Isotopes in Terrestrial Rocks", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16 (1), pp. 355-388.

- [195] Lal, D., Peters, B. (1962). "Cosmic ray produced isotopes and their applications to problems in geophysics", *Progress in Cosmic Ray Physics and Elementary Particle Physics* (Vol. VI, pp. 1-74). J. Wilson & S. Wouthuysen, North Holland Publishing Company, Άμστερνταμ, Ολλανδία.
- [196] Lal, D., Peters, B. (1967). "Cosmic ray produced radioactivity on the Earth", *Handbuch der Physik*, 46 (2), pp. 551-612.
- [197] Lal, D., Goldberg, E., Koide, M. (1960). "Cosmic-Ray-Produced Silicon-32 in Nature", *Science*, 131 (3397), pp. 332-337.
- [198] Lal, D., Malhotra, P., Peters, B. (1958). "On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 12 (4), pp. 306-328.
- [199] Lal, D., Narasappaya, N., Zutshi, P. (1957). « Phosphorus isotopes  $P^{32}$  and  $P^{33}$  in rain water", *Nuclear Physics*, 3 (1), pp. 69-75.
- [200] Lal, D., Nijampurkar, V., Rajagopalan, G., Somayajulu, E. (1979). "Annual fallout of  $^{32}Si$ ,  $^{210}Pb$ ,  $^{22}Na$ ,  $^{36}S$  and  $^7Be$  in rains in India", *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 88 (A), pp. 29-40.
- [201] Landsberger, S. (1994). "Compton Suppression Neutron Activation Methods in Environmental Analysis", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 179 (1), pp. 67-79.
- [202] Landsberger, S., Peshev, S. (1996). Compton Suppression Neutron Activation Analysis: Past, Present and Future. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 202(1-2), 201-224.
- [203] Landsberger, S., Wu, D. (1995). "A comprehensive study for the determination of forty eight elements in the certification of a hazardous standard reference material", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 193 (1), pp. 49-59.
- [204] Landsberger, S., Biegalski, S., Kapsimalis, R. (2013). "The correct and incorrect way to calibrate a Compton suppression counting system for gamma-ray efficiency", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296 (1), pp. 309-313.
- [205] Landsberger, S., Biegalski, S., O'Kelly, D., Basunia, M. (2005). "Use of coincident and non-coincident gamma-rays in Compton suppression neutron activation analysis", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 263 (3), pp. 817-821.

- [206] Lavi, N., Ne'Eman, E., Brenner, S., Butenko, V. (1996). "Neutron activation analysis for determination of trace elements in sediments in the sea of Galilee, Israel", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 210 (1), pp. 149-160.
- [207] Ledingham, K., Kelliher, M., Robertson, S. (1982). "Multielement photon activation analysis of coal samples using a Compton suppressed Ge(Li) detector", *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 71 (1-2), pp. 169-180.
- [208] Lee, C., Chung, C. (1991). "Determination of  $^{134}\text{Cs}$  in Environmental Sample Using a Coincidence Gamma-ray Spectrometer", *Applied Radiation and Isotopes*, 42 (9), pp. 783-788.
- [209] Leppanen, A.-P., Usoskin, I., Kovaltsov, G., Paaterod, J. (2012). "Cosmogenic  $^7\text{Be}$  and  $^{22}\text{Na}$  in Finland: Production, observed periodicities and the connection to climatic phenomena", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 74, pp. 164-180.
- [210] Libby, W. (1952). "Radiocarbon dating", University of Chicago Press.
- [211] Likuku, A. (2006). "Factors influencing ambient concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  over the city of Edinburgh", *Journal of Environmental Radioactivity*, 87 (3), pp. 289-304.
- [212] Lindstrom, R., Lindstrom, D., Slaback, L., Langland, J. (1990). "A low-background gamma-ray assay laboratory for activation analysis", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 299, pp. 425-429.
- [213] Liu, L., Ma, J., Didier, F., Loic, d. C., Zhang, B. (2006). "Monte Carlo efficiency transfer method for full energy peak efficiency calibration of three type HPGe detectors: A coaxial N-type, a coaxial P-type and four BEGe detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 564 (1), pp. 608-613.
- [214] Ludington, M., Helmer, R. (2000). "High accuracy measurements and Monte Carlo calculations of the relative efficiency curve of an HPGe detector from 433 to 2754 keV", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 446 (3), pp. 506-521.
- [215] Lutter, G., Hult, M., Marissens, G., Andreotti, E., Rosengard, U., Misiaszek, M., Yüksel, A., Sahin, N. (2013). "A new versatile underground gamma-ray spectrometry system" *Applied Radiation and Isotopes*, 81, pp. 81-86.
- [216] Luyanas, V., Yasyulyonis, R., Shopauskiene, D., Styra, B. (1970). "Cosmogenic  $^{22}\text{Na}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{32}\text{P}$ , and  $^{33}\text{P}$  in atmospheric dynamics research. *Journal of Geophysical Research*, 75 (18), pp. 3665-3667.

- [217] Mabit, L., Benmansour, M., Walling, D. (2008). "Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation", *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, pp. 1799-1807.
- [218] Maleka, P., Maucec, M. (2005). "Monte Carlo uncertainty analysis of germanium detector response to  $\gamma$ -rays with energies below 1 MeV", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 538 (1-3), pp. 631-639.
- [219] Manolopoulou, M., Stoulos, S., Ioannidou, A., Vagen, E., Papastefanou, C. (2012). "Radiation measurements and radioecological aspects of fallout from the Fukushima nuclear accident", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 292 (1), pp. 155-159.
- [220] Manolopoulou, M., Vagen, E., Stoulos, S., Ioannidou, A., Papastefanou, C. (2011). "Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident", *Journal of Environmental Radioactivity*, 102 (8), pp. 796-797.
- [221] Marquez, L., Costa, N. (1955). "The Formation of  $^{32}\text{P}$  from Atmospheric Argon by Cosmic Rays", *Nuovo Cimento*, 2 (5), pp. 1038-1041.
- [222] Marquez, L., Costa, N., Almeida, J. (1957). "The formation of  $\text{Na}^{22}$  from atmospheric argon by cosmic rays", *Il Nuovo Cimento*, 6 (6), pp. 3152-3155.
- [223] Martell, E. (1970). "Transport patterns and residence times for atmospheric trace constituents vs. altitude", In *Radionuclides in the Environment* (Vol. 93, pp. 138-157). Washington D.C.: American Chemical Society.
- [224] Masarik, J., Beer, J. (1999). "Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the earth's atmosphere", *Journal of Geophysical Research*, 104 (D10), pp. 12099-12111.
- [225] Masse, D., Adam, A., Laurec, J. (1991). "A Ge-NaI(Tl) spectrometer with Compton suppression and gamma coincidence counting. Application to  $^{189}\text{Ir}$  and  $^{101}\text{Rh}$  activity measurements", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 309 (1-2), pp. 227-235.
- [226] Masson, O., Baeza, A., Bieringer, J., Brudecki, K., Bucci, S., Cappai, M., Carvalho, F.P., Connan, O., Cosma, C., Dalheimer, A., Didier, D., Depuydt, G., De Geer, L.E., De Vismes, A., Gini, L., Groppi, F., Gudnason, K., Gurriaran, R., Hainz, D., Halldorsson, O., Hammond, D., Hanley, O., Holey, K., Homoki, Z., Ioannidou, A., Isajenko, K., Jankovic, M., Katzlberger, C., Kettunen, M., Kierepko, R., Kontro, R., Kwakman, P.J.M., Lecomte, M., Leon Vintro, L., Leppänen, A.-P., Lind, B., Lujaniene, G., Mc Ginnity, P., Mahon, C.M., Mala, H., Manenti, S.,

Manolopoulou, M., Mattila, A., Mairing, A., Mietelski, J.W., Møller, B., Nielsen, S.P., Nikolic, J., Overwater, R.M.W., Pálsson, S.E., Papastefanou, C., Penev, I., Pham, M.K., Povinec, P.P., Ramebäck, H., Reis, M.C., Ringer, W., Rodriguez, A., Rulík, P., Saey, P.R.J., Samsonov, V., Schlosser, C., Sgorbati, G., Silobritiene, B.V., Söderström, C., Sogni, R., Solier, L., Sonck, M., Steinhauser, G., Steinkopff, T., Steinmann, P., Stoulos, S., Sýkora, I., Todorovic, D., Tooloutalaie, N., Tositti, L., Tschiersch, J., Ugron, A., Vagena, E., Vargas, A., Wershofen, H., Zhukova, O. (2011). "Tracking of airborne radionuclides from the damaged Fukushima Dai-chi nuclear reactors by European Networks", *Environmental Science and Technology*, 45 (18), pp. 7670-7677.

- [227] Matsuura, H., Kitagawa, T. (1983). "Collection of radionuclides in rainwater by ion exchange resin bed method", Annual report 20, Fukui Prefecture Institute of Public Health, Fukui-ken, Ιαπωνία.
- [228] Mattsson, L. (1972). "Sodium-22 in the food-chain: lichen-reindeer-man", *Health Physics*, 23, pp. 223-230.
- [229] Mauerhofer, E. (1996). "Improvement in the counting statistics and in the limit of detection with Compton suppression spectrometers: a contribution to instrumental neutron activation analysis", *Applied Radiation and Isotopes*, 47 (7), pp. 649-658.
- [230] Mauerhofer, E., Tharun, U., Denschlag, H., Schmidt, R., Kratz, J. (1996). "A Compton suppression spectrometer for neutron activation analysis" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 371, pp. 465-471.
- [231] McNamara, A., Heijnis, H., Fierro, D., Reinhard, M. (2012). "The determination of the efficiency of a Compton suppressed HPGe detector using Monte Carlo simulations" *Journal of Environmental Radioactivity*, 106, pp. 1-7.
- [232] McNeary, D., Baskaran, M. (2003). "Depositional characteristics of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in southeastern Michigan" *Journal of Geophysical Research*, 108 (D7), pp. 2156-2202.
- [233] Meresova, J. (2008). "Study of Radioactivity of Atmospheric Aerosol Particles and its Elemental Contents", Διδακτορική Διατριβή, Department of Nuclear Physics and Biophysics, Comenius University, Bratislava, Σλοβακία.
- [234] Metzger, F., Deutsch, M. (1950). "A Study of the Polarization-Direction Correlation of Successive Gamma-Ray Quanta" *Physical Review*, 78 (5), pp. 551-558.
- [235] Michelaraki, M., Vrantzas, P., Petropoulos, N., Hinis, E., Simopoulos, S. (2002). "Association of the Chernobil fallout isotopes patterns with those of rainfall in

Greece”, 7th International Symposium Natural Radiation Environment (NRE - VII), Ρόδος.

- [236] Millard, H. (1984). “Compton suppression gamma-counting, the effect of count rate”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 223 (2-3), pp. 416-419.
- [237] Moss, C., Ianakiev, D., Prettyman, T., Smith, M., Sweet, M. (2001). “Multi-element, large-volume CdZnTe detectors” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 458 (1-2), pp. 455-460.
- [238] Moszynski, M., Bjerregard, J., Gaardhoje, J., Herskind, B., Knudsen, P., Sletten, G. (1989). “Limitation of the Compton suppression in Ge-BGO Compton suppression spectrometers”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 280 (1), pp. 73-82.
- [239] Mould, R. (2000). “Chernobyl Record: The definitive history of the Chernobyl Catastrophe”, Institute of Physics Publishing, Bristol, Ηνωμένο Βασίλειο.
- [240] Murali, A., Parekh, P., Cumming, J. (1990). “On the determination of iridium in diverse geological samples employing HPGe-coincidence/NaI(Tl)-anticoincidence spectrometry”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (3), pp. 889-894.
- [241] Murata, Y., Hirai, S., Okamoto, M., Kakihana, H. (1977). “A new system of gamma-ray spectrometry for activation analysis”, *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 36 (2), pp. 525-535.
- [242] Nahle, O., Kossert, K., Klein, R. (2008). “Activity standardization of  $^{22}\text{Na}$ ”, *Applied Radiation and Isotopes*, 6-7, pp. 865-871.
- [243] Nelson, W., Hirayama, H., Rogers, D. (1985). “The EGS4 Code System”, Stanfors Linear Accelerator Center, Stanford, Καλιφόρνια, Η.Π.Α.
- [244] Nevissi, A. (1991). “Measurement of Lead-210, Bismuth-210, and Polonium-210 in environmental samples”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 148 (1), pp. 121-131.
- [245] Nicholson, G., Landsberger, S., Welch, L., Gritz, R. (2008). “Characterization of a Compton suppression system and the applicability of Poisson statistics”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 276( 3), pp. 577-581.
- [246] Nir-El, Y., Sima, O. (2001). “Angular response of a HPGe detector to gamma-rays in in situ measurements”, *Applied Radiation and Isotopes*, 55 (1), pp. 1-7.

- [247] Nishiizumi, K., Winterer, E., Kohl, C., Klein, J., Middleton, R., Lal, D., Arnold, J.R., (1989). "Cosmic ray production rates of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  in quartz from glacially polished rocks", *Journal of Geophysical Research*, 94 (B12), pp. 17907-17915.
- [248] OECD. (1995). "Chernobyl - Ten Years On, Radiological and Health Impact", OECD Nuclear Energy Agency, Παρίσι.
- [249] Olsen, C., Larsen, I., Lowry, P., Cutshall, N., Todd, J., Wong, G., Casey, W.H. (1985). "Atmospheric Fluxes and Marsh-Soil Inventories of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ", *Journal of Geophysical Research*, 90 (D6), pp. 10487-10495.
- [250] Orrell, J., Aalseth, C., Amsbaugh, J., Doe, P., Hossbach, T. (2007). "Operation of a high-purity germanium crystal in liquid argon as a Compton-suppressed radiation spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 579 (1), pp. 91-93.
- [251] Oshima, M., Toh, Y., Hatsukawa, Y., Koizumi, M., Kimura, A., Haraga, A., Ebihara, M., Sushida, K. (2008). "Multiple gamma-ray detection method and its application to nuclear chemistry", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 278 (2), pp. 257-262.
- [252] Papandreou, S., Savva, M.I., Karfopoulos, K.L., Karangelos, D.J., Anagnostakis, M.J., Simopoulos, S.E. (2011). "Monitoring of Be-7 atmospheric concentration using short term measurements", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 26 (2), pp. 101-109.
- [253] Papastefanou, C. (2006). "Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides", *Applied Radiation and Isotopes*, 64 (1), pp. 93-100.
- [254] Papastefanou, C., Ioannidou, A. (1995). "Aerodynamic size association of  $^7\text{Be}$  in ambient aerosols", *Journal of Environmental Radioactivity*, 26 (3), pp. 273-282.
- [255] Papastefanou, C., Ioannidou, A. (2004). "Beryllium-7 and solar activity", *Applied Radiation and Isotopes*, 61 (6), pp. 1493-1495.
- [256] Parus, J., Kierzek, J., Raab, W., Donohue, D. (2003). "A dual purpose Compton suppression spectrometer", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 258 (1), pp. 123-132.
- [257] Pazirandeh, A., Brati, A., Ghannadi Marageh, M. (1998). "Determination of arsenic in hair using neutron activation", *Applied Radiation and Isotopes*, 49 (7), pp. 753-759.
- [258] Pearsall, J. (2005). "Compton Suppression ... Made Easier", Rad Lab Product Line. Canberra.



- [259] Peerani, P., Carbol, P., Hrneck, E., Betti, M. (2002). "Assessment of a Compton-event suppression g-spectrometer for the detection of fission products at trace levels", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 482, pp. 42-50.
- [260] Perkins, R., Nielsen, J. (1965a). "Cosmic-ray produced radionuclides in the environment", *Health Physics*, 11 (12), pp. 1297-1304.
- [261] Perkins, R., Nielsen, J., Diebel, R. (1960). "Total Absorption Gamma-Ray Spectrometers Utilizing Anticoincidence Shielding", *Review of Scientific Instruments*, 31 (12), pp. 1344-1349.
- [262] Perkins, R., Thomas, C., Young, J. (1970). "Application of short-lived cosmogenic radionuclides as tracers of in-cloud scavenging processes" *Journal of Geophysical Research*, 75 (15), pp. 3076-3087.
- [263] Perkins, R., Thomas, C., Hill, M., Nielsen, J. (1965b). "Chlorine-38 and Sulphur-38 produced by Cosmic Radiation", *Nature*, 205 (4973), pp. 790-791.
- [264] Perlman, I., Asaro, F. (1969). "Pottery analysis by neutron activation", *Archaeometry*, 11 (1), pp. 21-38.
- [265] Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Simopoulos, S.E. (2002). "Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials", *Journal of Environmental Radioactivity*, 61, pp. 257-269.
- [266] Petropoulos, N., Hinis, E., Simopoulos, S. (1996). "<sup>137</sup>Cs Chernobyl fallout in Greece and its associated radiological impact", *Environment International*, 22 (Supp. 1), pp. S369-S373.
- [267] Peyres, V., García-Toraño, E. (2007). "Efficiency calibration of an extended-range Ge detector by a detailed Monte Carlo simulation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 580 (1), pp. 296-298.
- [268] Potiriadis, C., Anagnostakis, M.J., Clouvas, A., Eleftheriadis, K., Florou, E., Housiadas, C., Ioannides, K., Ioannidou, A., Karangelos, D.J., Karfopoulos, K.L., Kehagia, K., Kolovou, M., Kritidis, P., Manolopoulou, M., Papastefanou, K., Savva, M.I., Simopoulos, S.E., Stamoulis, K., Stoulos, S., Xanthos, S., Xarchoulakos, D. (2013). "Environmental measurements and inspections on imported foods and feedstuffs in Greece after the Fukushima accident", *Radiation Protection Dosimetry*, 156 (4), pp. 465-474.
- [269] Povinec, P., Hirose, K., Aoyama, M. (2013). "Fukushima accident: radioactivity impact on the environment", Elsevier, Ολλανδία.

- [270] Prussin, S., Perry, M., Pekrul Bicknese, E., Lamb, J. (1986). "A small Compton suppression shield for Si(Li) detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 242 (3), pp. 410-415.
- [271] Rama, T., Honda, M. (1961). "Natural radioactivity in the atmosphere", *Journal of Geophysical Research*, 66 (10), pp. 3227-3231.
- [272] Rastogi, N., Sarin, M. (2008). "Atmospheric  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  in ambient aerosols over low- and high-altitude sites in semiarid region: Temporal variability and transport processes" *Journal of Geophysical Research*, 113 (D11), pp. D11103.
- [273] Reconstruction Agency of Japan. (2013). "The second anniversary of the 3.11 earthquake: Progress report", <http://www.reconstruction.go.jp/english/topics/2013/03/2nd-anniversary-report.html>
- [274] Reeves, J., Arthur, R. (1988). "Anticomic-shielded ultralow-background germanium detector systems for analysis of bulk environmental samples", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 124 (2), pp. 435-447.
- [275] Reguigui, N., Landsberger, S. (2005). "Determination of soil depth profiles for  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  using gamma-ray spectrometry with Compton suppression", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 264 (2), pp. 469-476.
- [276] Reisch, F., (1987). "The Chernobyl accident - Its impact on Sweden", *Nuclear Safety*, 28(1), pp. 29-36.
- [277] Retief, D., Cleaton-Jones, P. (1971). "The quantitative analysis of sixteen elements in normal human enamel and dentine by neutron activation analysis and high-resolution gamma-spectrometry", *Archives of Oral Biology*, 16 (11), pp. 1257-1267.
- [278] Rindi, A., Charalambous, S. (1967). "Airborne radioactivity produced at high-energy accelerators", *Nuclear Instruments and Methods*, 47, pp. 227-232.
- [279] Robbins, J., Edgington, D. (1975). "Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137", *Geochimica et Cosmochimica acta*, 39 (3), pp. 288-304.
- [280] Roberts, K., Cochran, J., Barnes, C. (1997). " $^{210}\text{Pb}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$  in the Northeast Water Polynya, Greenland: particle dynamics and sediment mixing rates", *Journal of Marine Systems*, 10 (1-4), pp. 401-413.
- [281] Rodenas, C., Gomez, J., Quindos, L., Fernandez, P., Soto, J. (1997). " $^7\text{Be}$  Concentrations in Air, Rain Water and Soil in Cantabria (Spain)", *Applied Radiation and Isotopes*, 48 (4), pp. 545-548.

- [282] Rodenas, J., Gallardo, S., Ballester, S., Primault, V., Ortiz, J. (2007). "Application of the Monte Carlo method to the analysis of measurement geometries for the calibration of a HP Ge detector in an environmental radioactivity laboratory", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 263 (1), pp. 144-148.
- [283] Rodenas, J., Pascual, A., Zarza, I., Serradell, V., Ortiz, J., Ballesteros, L. (2003). "Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 496 (2-3), pp. 390-399.
- [284] Roedel, W. (1963). "Sodium24 produced by cosmic radiation", *Nature*, 200 (4910), pp. 999-1000.
- [285] Roedel, W. (1965). "Cosmic-ray-produced and artificial sodium 22 in the atmosphere", *Journal of Geophysical Research*, 70 (18), pp. 4447-4452.
- [286] Rossbach, M., Zeisler, R., Woittiez, J. (1990). "The use of Compton suppression spectrometers for trace element studies in biological materials", *Biological Trace Element Research*, 26-27 (1), pp. 63-73.
- [287] Roulston, K., Naqvi, S. (1956). "Reduced Compton effect scintillation spectrometer", *Review of Scientific Instruments*, 27 (10), pp. 830-832.
- [288] Rouni, P.K., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E. (2001). "Radioenvironmental survey of the Megalopolis lignite field basin", *The Science of the Total Environment*, 272, pp. 261-272.
- [289] Rulik, P., Mala, H., Beckova, V., Holgye, Z., Schlesingerova, E., Svetlik, I., Skrkal, J. (2009). "Low level air radioactivity measurements in Prague, Czech Republic", *Applied Radiation and Isotopes*, 67 (5), pp. 969-973.
- [290] Ryan, J.M., Lockwood, J.A., Debrunner, H. (2000). "Solar Energetic Particles", *Space Science Reviews*, 93 (1-2), pp. 35-53.
- [291] Sakaguchi, A., Yamamoto, M., Ohtsuka, Y., Sasaki, K., Yokota, K., Komura, K. (2003). "Low-level measurement of the cosmogenic  $^{22}\text{Na}$  radionuclide in fresh water by ultra low-background gamma-ray spectrometry after simple radiochemical separation", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 258 (1), pp. 101-105.
- [292] Sanchez, F., Navarro, E., Ferrero, J., Baeza, A., del Rio, L. (1992). "Reduction of the Compton effect in large-volume environmental samples for standard

geometrical dispositions”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A312, pp. 207-210.

- [293] Sanchez-Cabeza, J., Masque, P., Ani-Ragolta, I., Merino, J., Frignani, M., Alvisi, F., Palanques, A., Puig, P. (1999). “Sediment accumulation rates in the southern Barcelona continental margin (NW Mediterranean Sea) derived from  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  chronology”, *Progress in Oceanography*, 44 (1-3), pp. 313-332.
- [294] Sarkar, M., Kshetri, R., Raut, R., Mukherjee, A., Sinha, M., Ray, M., Goswami, A., Roy, S., Basu, P., Majumder, H., Bhattacharya, S., Dasmahapatra, B. (2006). “Characterisation of a Compton suppressed Clover detector for high energy gamma rays”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 556 (1), pp. 266-272.
- [295] Sato, J., Doi, T., Segawa, T., Sugawara, S. (1994). “Seasonal variation of atmospheric concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  at Tsukuba, Japan, with a possible observation of  $^{210}\text{Pb}$  originating from the 1991 eruption of Pinatubo volcano, Philippines”, *Geochemical Journal*, 2, pp. 123-129.
- [296] Savva, M.I., Anagnostakis, M.J. (2016). “Experimentally validated Monte Carlo simulation of an XtRa-Nal(Tl) Compton Suppression System response”, *Applied Radiation and Isotopes*, 109, pp. 555-557.
- [297] Savva, M.I., Karfopoulos, K.L., Karangelos, D.J Anagnostakis, M.J., Simopoulos, S.E. (2014). “Installation and performance testing of an XtRa – Nal(Tl)”, *Applied Radiation and Isotopes*, 87, pp. 361–364.
- [298] Scates, W., Hartwell, J., Aryaeinejad, R., McIlwain, M. (2006). “Optimization studies of a Compton suppression spectrometer using experimentally validated Monte Carlo simulations”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 556 (2), pp. 498-504.
- [299] Schaeffer, O., Davis, R. (1955). “Chlorine-36 in Nature”, The New York Academy of Sciences, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.
- [300] Schlager, M. (2007). “Precise modelling of coaxial germanium detectors in preparation for a mathematical calibration”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 580 (1), pp. 137-140.
- [301] Schmid, G., Beckedahl, D., Blair, J., Friensehner, A., Kammeraad, J. (1999). “HPGe Compton suppression using pulse shape analysis”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 422, pp. 368-372.

- [302] Schmitt, H., Halperin, J. (1961). " $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  Cross Section as a Function of Neutron Energy", *Physics Review*, 121 (3), pp. 827-830.
- [303] Schumaker, M., Hackman, G., Pearson, C., Svensson, C., Andreoiu, C., Andreyev, A., Austin, R.A.E., Ball, G.C., Bandyopadhyay, D., Boston, A.J., Chakrawarthy, R.S., Churchman, R., Drake, T.E., Finlay, P., Garrett, P.E., Grinyer, G.F., Hyland, B., Jones, B., Maharaj, R., Morton, A.C., Phillips, A.A., Sarazin, F., Scraggs, H.C., Smith, M.B., Valiente-Dobon, J.J., Waddington, J.C., Watters, L.M. (2007). "Measured and simulated performance of Compton-suppressed TIGRESS HPGe clover detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 570, pp. 437-445.
- [304] Schwarzer, M., Schuster, M., von Hentig, R. (2000). "Determination of palladium in gasoline by neutron activation analysis and automated column extraction", *Journal of Analytical Chemistry*, 368 (2-3), pp. 240-243.
- [305] Sebastiao, R., Rodrigues, R., Kastner, G., Ferreira, A., Leal, A. (2007). "Retrieval of efficiency curve in HPGe detector: an experimental and Monte Carlo simulation", *INAC 2007 International Nuclear Atlantic Conference*. 39. International Nuclear Information System (INIS).
- [306] Semkow, T., Parekh, P., Schwenker, C., Khan, A., Bari, A., Colaresi, J., Tench, O.K., David, G., Guryn, W. (2002). "Low-background gamma spectrometry for environmental radioactivity", *Applied Radiation and Isotope*, 57, pp. 213-223.
- [307] Sempau, J., Acosta, E., Baro, J., Fernandez-Varea, J., Salvat, F. (1997). "An algorithm for Monte Carlo simulation of coupled electron-photon transport", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 132 (3), pp. 377-390.
- [308] Sepulveda, A., Schuller, P., Walling, D., Castillo, A. (2008). "Use of  $^7\text{Be}$  to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall", *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (1), pp. 35-49.
- [309] Sever, Y., Lippert, J. (1965). "A Compton-rejection germanium spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods*, 33, pp. 347-348.
- [310] Sheets, R., Thompson, C. (1992). "Effects of polonium-210 on determination of atmospheric gross alpha-radioactivity", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 161 (2), pp. 465-474.
- [311] Shelley, J. (1989). "Essentials of FORTRAN 77", John Wiley and Sons Ltd, Νέα Υόρκη, Η.Π.Α.

- [312] Shotyk, W., Weiss, D., Heisterkamp, M., Cheburkin, A., Appleby, P., Adams, F. (2002). "New Peat Bog Record of Atmospheric Lead Pollution in Switzerland: Pb Concentrations, Enrichment Factors, Isotopic Composition, and Organolead Species", *Environmental Science and Technology*, 36 (18), pp. 3893-3900.
- [313] Silker, W., Robertson, D., Rieck, H., Perkins, R. (1968). "Beryllium-7 in Ocean Water", *Science*, 161 (3844), pp. 879-880.
- [314] Sima, O., Arnold, D. (2009). "On the Monte Carlo simulation of HPGe gamma-spectrometry systems", *Applied Radiation and Isotopes*, 67 (5), pp. 701-705.
- [315] Sima, O., Osvath, I. (2013). "Calibration of a low-level anti-Compton underground gamma-spectrometer by experiment and Monte Carlo", *Applied Radiation and Isotopes*, 81, pp. 109-113.
- [316] Sima, O., Cazan, I., Dinescu, L., Arnold, D. (2004). "Efficiency calibration of high volume samples using the GESPECOR software", *Applied Radiation and Isotopes*, 61 (2-3), pp. 123-127.
- [317] Simopoulos, S. (1989). "Soil Sampling and  $^{137}\text{Cs}$  Analysis of the Chernobyl Fallout in Greece", *Applied Radiation and Isotopes*, 40 (7), pp. 607-613.
- [318] Simopoulos, S., Angelopoulos, M. (1987). "Natural Radioactivity Releases from Lignite Power Plants in Greece", *Journal of Environmental Radioactivity*, 5 (5), pp. 379-389.
- [319] Simopoulos, S., Leonidou, D. (1981). "Age of Am-Be neutrons to indium resonance in water", *Atomkernenergie-Kernetechnik*, 37 (4), pp. 296-298.
- [320] Simopoulos, S., Leonidou, D., Angelopoulos, M. (1982). "Dependence of the experimentally obtained age of the AM-Be neutrons (1.46) in water on the source-foil geometry", *Atomkernenergie-Kernetechnik*, 41 (4), pp. 293-294.
- [321] Singh, J., Dieckert, J. (1973). "Magnesium interference in the determination of sodium in biological material by neutron activation analysis", *Analytical Biochemistry*, 53 (2), pp. 470-477.
- [322] Sobol, I. (1994). "A Primer for the Monte Carlo Method", CRC Press, Inc.
- [323] Sroor, A. (2003). "Passive and active measurements of Egyptian monazite samples", *Applied Radiation and Isotopes*, 58 (2), pp. 281-285.
- [324] Steinmann, P., Zeller, M., Beuret, P., Ferreri, G., Estier, S. (2013). "Cosmogenic  $^7\text{Be}$  and  $^{22}\text{Na}$  in ground level air in Switzerland (1994-2011)", *Journal of Environmental Radioactivity*, 124, pp. 68-73.

- [325] Stoulos, S., Ioannidou, A., Vagen, E., Koseoglou, P., Manolopoulou, M. (2014). "Post-Chernobyl  $^{137}\text{Cs}$  in the atmosphere of Thessaloniki: a consequence of the financial crisis in Greece", *Journal of Environmental Radioactivity*, 128, pp. 68-74.
- [326] Stover, T., Lamaze, G. (2005). "Compton suppression for neutron activation analysis applications at the National Institute of Standards and Technology (NIST)", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 241 (1-4), pp. 223-227.
- [327] Sudar, S. (2002). "'TrueCoinc' software utility for calculation of the true coincidence correction" Institute of Experimental Physics, University of Debrecen, Ουγγαρία.
- [328] Sudarti, S., Petri, H., Rossbach, M. (1997). "Application of a low-level anti-coincidence gamma-spectrometer for environmental radioactivity measurement", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 223(1-2), pp. 177-185.
- [329] Sun, Y., Yang, J. (1999). "Simultaneous determination of arsenic(III,V), selenium(IV,VI), and antimony(III,V) in natural water by coprecipitation and neutron activation analysis", *Analytica Chimica Acta*, 395 (3), pp. 293-300.
- [330] Tanaka, S., Sakamoto, K., Takagi, J. (1967). "An extremely low-level gamma-ray spectrometer", *Nuclear Instruments and Methods*, 56, pp. 319-324.
- [331] Theodorsson, P. (2003). "K-Th-U in photomultiplier tubes and improved low-level NaI detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, pp. 143-148.
- [332] Todorovic, D., Popovic, D., Djuric, G., Radenkovic, M. (2000). " $^{210}\text{Pb}$  in ground-level air in Belgrade city area", *Atmospheric Environment*, 19, pp. 3245-3248.
- [333] Tokieda, T., Yamanaka, K., Harada, K., Tsunogai, S. (1996). "Seasonal variations of residence time and upper atmospheric contribution of aerosols studied with Pb-210, Bi-210, Po-210 and Be-7", *Tellus*, 48B (5), pp. 690-702.
- [334] Tokuyama, H., Igarashi, S. (1998). "Seasonal variation in the environmental background level of cosmic-ray-produced  $^{22}\text{Na}$  at Fukui City, Japan", *Journal of Environmental Radioactivity*, 38 (2), pp. 147-161.
- [335] Tokuyama, H., Oonishi, M., Matsuura, H. (1993). "Environmental background level of cosmic ray produced  $^{22}\text{Na}$ ", *Journal of Environmental Radioactivity*, 21 (3), pp. 213-218.
- [336] Trail, C., Raboy, S. (1959). "Scintillation Spectrometer with an Anticoincidence Annulus of NaI(Tl)", *Review of Scientific Instruments*, 30 (6), pp. 425-429.

- [337] Tsou, R., Lin, S., Kiang, L. (1994). "Monte Carlo simulation for Compton suppression spectrometer", *Computer Physics Communications*, 83 (1), pp. 30-44.
- [338] Turekian, K., Graustein, W., Cochran, J. (1989). "Lead-210 in the SEAREX program: An aerosol tracer across the Pacific", *Chemical Oceanography*, 10, pp. 51-81.
- [339] Turekian, K., Nozaki, Y., Benninger, L. (1977). "Geochemistry of Atmospheric Radon and Radon Products", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, pp. 227-255.
- [340] Tzika, F., Stamatelatos, I., Kalef-Ezra, J., Bode, P. (2004). "Large sample neutron activation analysis: correction for neutron and gamma attenuation", *Nukleonika*, 49 (3), pp. 115-121.
- [341] Ugur, A., Ozden, B., Filizok, I. (2011). "Determination of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in atmospheric deposition in İzmir (Aegean sea-Turkey)", *Atmospheric Environment*, 45 (27), pp. 4809-4813.
- [342] UNSCEAR. (1988). "Sources, effects and risks of ionizing radiation", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- [343] Vidmar, T., Korun, M., Likar, A., Martincic, R. (2001). "A semi-empirical model of the efficiency curve for extended sources in gamma-ray spectrometry", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 470 (3), pp. 533-547.
- [344] Vogt, J., Zeisler, R. (1982). "A Compton suppression system for background reduction and improved sensitivity", Technical note 1178, National Bureau of Standards - NBS.
- [345] Faltings, V., Hardeck, P. (1950). "Der Tritiumgehalt der Atmosphäre", *Zeitschrift für Naturforschung*, 5 (a), pp. 438-439.
- [346] Wainio, K., Knoll, G. (1966). "Calculated gamma ray response characteristics of semiconductor detectors", *Nuclear Instruments and Methods*, 44 (2), pp. 213-223.
- [347] Wang, Z., Kahn, B., Valentine, J. (2002). "Efficiency calculation and coincidence summing correction for germanium detectors by Monte Carlo simulation", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 49 (4), pp. 1925-1931.
- [348] Wershofen, H. (2013). "Remarks on representative ground-level air monitoring", *Applied Radiation and Isotopes*, 81, pp. 284-289.



- [349] Westphal, G. (1998). "Real-time correction of chance coincidence losses in high-rate Compton suppression spectrometry", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 416 (2-3), pp. 536-538.
- [350] Winkler, R., Rosner, G. (2000). "Seasonal and long-term variation of  $^{210}\text{Pb}$  concentration in air, atmospheric deposition rate and total deposition velocity in south Germany", *Science of The Total Environment*, 263 (1-3), pp. 57-68.
- [351] Winsberg, L. (1956). "The production of chlorine-39 in the lower atmosphere by cosmic radiation", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 9 (4), pp. 183-189.
- [352] Wogman, N. (1980a). "Natural contamination in radionuclide detection systems", Pacific Northwest Laboratory.
- [353] Wogman, N. (1980b). "Design of an Ultralow Background, High Efficiency Intrinsic Germanium Gamma-Ray Spectrometer", Pacific Northwest Laboratory.
- [354] Wogman, N., Thomas, C., Cooper, J., Engelmann, R. (1968). "Cosmic ray produced radionuclides as tracers of atmospheric precipitation processes", *Science*, 159, pp. 189-192.
- [355] Yoshimori, M. (2005a). "Cosmogenic  $^7\text{Be}$  Radionuclide Produced in Upper Atmosphere by Galactic Cosmic Rays and Solar Energetic Particles", *29th International Cosmic Ray Conference*, Pune, India.
- [356] Yoshimori, M. (2005b). "Production and behavior of Beryllium-7 radionuclide in the upper atmosphere", *Advances in space research*, 36 (5), pp. 922-926.
- [357] Yoshimori, M. (2005c). "Beryllium-7 radionuclide as a tracer of vertical air mass transport in the troposphere", 36 (5), pp. 828-832.
- [358] Young, J., Silker, W. (1974). "The determination of air-sea exchange and oceanic mixing rates using  $^7\text{Be}$  during the Bomex experiment", *Journal of Geophysical Research*, 79 (30), pp. 4481-4489.
- [359] Young, J., Silker, W. (1980). "Aerosol deposition velocities on the Pacific and Atlantic oceans calculated from  $^7\text{Be}$  measurements", *Earth and Planetary Science Letters*, 50 (1), pp. 92-104.
- [360] Yu, K., Lee, L. (2002). "Measurements of atmospheric  $^7\text{Be}$  properties using high-efficiency gamma spectroscopy", *Applied Radiation and Isotopes*, 57 (6), pp. 941-946.
- [361] Yuan, L., Weng, P., Chan, C. (1989). "In situ measurement of low-level radioactivities using the Compton suppression technique", *Nuclear Technology*, 86 (1), pp. 30-34.

- [362] Zamudio-Zamudio, T., Garrido-Alfonseca, A., Tenorio, D., Jimenez-Reyes, M. (2003). "Characterization of 16th and 18th century building materials from Veracruz City, Mexico", *Microchemical Journal*, 74 (1), pp. 83-91.
- [363] Zhang, F., Zhong, H., Knoll, G., Wehe, D., Berry, J. (2005). "3-D position sensitive CdZnTe spectrometer performance using third generation VAS/TAT readout electronics", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52 (5), pp. 2009-2016.
- [364] Zhang, W., Ungar, K., Stukel, M., Mekarski, P. (2014). "A gamma-gamma coincidence/anticoincidence spectrometer for low-level cosmogenic  $^{22}\text{Na}/^7\text{Be}$  activity ratio measurement. *Journal of Environmental Radioactivity*, 130, pp. 1-6.
- [365] Zhang, W., Yi, J., Mekarski, P., Hoffman, I., Ungar, K., Leppanen, A.-P. (2010). "A system for low-level the cosmogenic  $^{22}\text{Na}$  radionuclide measurement by gamma-gamma coincidence method using BGO detectors", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2, pp. 551-555.
- [366] Αγραφιώτης, Κ. (2010). "Βαθμονόμηση απόδοσης φορητού ανιχνευτή (in-situ) BEGe στην ενεργειακή περιοχή 59 - 1596 keV, για γεωμετρία επιφανειακής πηγής ραδιενέργειας, με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [367] Αθανασίου, Ν. (2006). "Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονιακών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE - Εφαρμογή σε προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων και βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [368] Αναγνωστάκης, Μ.Ι. (1998). "γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [369] Βασιλοπούλου, Θ. (2008). "Προσδιορισμός συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ανιχνευτή HPGe λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μέσω προσομοίωσης Monte Carlo", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα
- [370] Καράγγελος, Δ.Ι. (2008). "Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [371] Καρφόπουλος, Κ.Λ. (2011). "Ανάπτυξη και Εφαρμογή Μετρητικών Τεχνικών για την Ανάλυση της Φυσικής και της Τεχνολογικά Επαγόμενης Ραδιενέργειας σε Οικοσυστήματα", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.

- [372] Μπασιάς, Κ. (2013). “Μετρήσεις της συγκέντρωσης του ισοτόπου κοσμικής προέλευσης  $^7\text{Be}$  στο αεροζόλ της ατμόσφαιρας και στο νερό της βροχής”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [373] Παπαδάκος, Γ. (2012). “Στοχαστικές διαδικασίες και συνακόλουθες ποσοτικές και ποιοτικές εκτιμήσεις ραδιοπεριβαλλοντικών επιπτώσεων σε πληθυσμιακές ομάδες στον ελληνικό χώρο”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [374] Παπαδιονυσίου, Μ. (2015). “Μελέτη της απόκρισης ανιχνευτή Γερμανίου πειραματικά και με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [375] Παπανδρέου, Σ. (2009). “Προσδιορισμός του ισοτόπου κοσμικής προέλευσης  $^7\text{Be}$  στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [376] Πέππας, Θ. (2008). “Εγκατάσταση και παραμετρική μελέτη διάταξης ανάλυσης κοκκομετρίας – Εφαρμογή στην κοκκομετρική ανάλυση και τον προσδιορισμό των ραδιολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων κλασμάτων ιπτάμενης τέφρας”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [377] Ρούνη, Π.Κ. (2008). “Ανίχνευση ιχνοστοιχείων σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας με χρήση μεθόδων πυρηνικής τεχνολογίας”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [378] Σάββα, Μ.Ι. (2009). “Βαθμονόμηση Ανιχνευτικής Διάταξης Γερμανίου για τον Προσδιορισμό του Ισοτόπου  $^7\text{Be}$  στα Ατμοσφαιρικά Αερολύματα με χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης Monte Carlo”. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [379] Σιμόπουλος, Σ.Ε. (1986). “Μετρήσεις ραδιενέργειας των ελληνικών εδαφών μετά το ατύχημα στο Chernobyl (MPX-1)”, Ε.Μ.Π. Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- [380] Σιμόπουλος, Σ.Ε. (1987). “Μετρήσεις ραδιενέργειας των ελληνικών εδαφών μετά το ατύχημα στο Chernobyl (MPX-2)”, Ε.Μ.Π. Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- [381] Σιμόπουλος, Σ.Ε. (1987), προσωπική επικοινωνία.
- [382] Χίνης, Ε.Π. (1995), προσωπική επικοινωνία.

- [383] Χιώνης, Δ. (2011). “Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.