

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

***Βαθμονόμηση Ανιχνευτικής Διάταξης Γερμανίου
για τον Προσδιορισμό του Ισοτόπου ^7Be
στα Ατμοσφαιρικά Αερολύματα
με χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης Monte Carlo***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της
ΜΑΡΙΛΙΑΣ Ι. ΣΑΒΒΑ
Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επ. Καθηγητής Μ.Ι.Αναγνωστάκης
Συνεργασία: Κ.Λ.Καρφόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2009

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά το χρονικό διάστημα Απριλίου - Σεπτεμβρίου 2009.

Επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ.Ι.Αναγνωστάκη για τη βοήθεια που μου προσέφερε. Διέθεσε προσωπικό χρόνο και μου μετέδωσε πλήθος επιστημονικών γνώσεων καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κ.Λ.Καρφόπουλο για την καταλυτική και ουσιαστικότερη συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η βοήθειά του ήταν πολύτιμη και η συνεργασία μαζί του άψογη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και το λοιπό προσωπικό του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας για τη βοήθειά του και το κλίμα συνεργασίας.

Μαρίλια Ι. Σάββα
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

Περιεχόμενα:

Κεφάλαιο 1:

<i>Εισαγωγή</i>	1
-----------------------	---

Κεφάλαιο 2:

Μετρήσεις του ισοτόπου ^7Be της ατμόσφαιρας στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

2.1 Εισαγωγή	4
2.2 Το ισότοπο ^7Be	4
2.2.1 Παραγωγή του ισοτόπου ^7Be	5
2.2.2 Το ισότοπο ^7Be στην ατμόσφαιρα	6
2.2.3 Μέτρηση του ισοτόπου ^7Be στην ατμόσφαιρα	7
2.3 Το πρωτόκολλο δειγματοληψίας και ανάλυσης για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	8
2.3.1 Οι γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ	10
2.3.1.1 Ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ	12
2.3.1.2 Η θωράκιση του ανιχνευτή XtRa.....	14
2.3.2 Η απόδοσης φωτοκορυφής και η διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής	15
2.3.3 Διαδικασία βαθμονόμησης γεωμετρίας 12 στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	18
2.3.4 Επαναπροσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για τη γεωμετρία 12 με χρήση πειραματικών σημείων.....	22
2.3.5 Συνολικά αποτελέσματα της παρούσας Δ.Ε. για τη γεωμετρία ανάλυσης φίλτρων 12	43
2.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη της υπάρχουσας γεωμετρίας ανάλυσης ‘12’	48
Εικόνες κεφαλαίου 2	49

Κεφάλαιο 3:

Προσδιορισμός της απόδοσης του ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ με τη μέθοδο Monte Carlo για την ανίχνευση του ^7Be σε φίλτρα αέρα

3.1 Εισαγωγή	51
3.2 Η νέα γεωμετρία ανάλυσης φίλτρων αέρα	53
3.3 Προσομοίωση Monte-Carlo.....	55
3.3.1 Ο κώδικας PENELOPE	57
3.3.1.1 Τα κυρίως προγράμματα του κώδικα PENELOPE	58
3.3.1.2 Οι υπορουτίνες του κώδικα PENELOPE.....	58
3.3.1.3 Τα αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE.....	59
3.3.1.4 Οι χρησιμοποιούμενοι εικονικοί ανιχνευτές.....	60
3.3.1.5 Τα αρχεία εξόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE	61
3.3.2 Υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση την προσομοίωση	62
3.4 Προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή XtRa για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων	64
3.5 Επιλογή των διαστάσεων του dead layer.....	66
3.5.1 Τροποποίηση του κυρίως προγράμματος προσομοίωσης	68
3.5.2 Έλεγχος του τρόπου ορισμού των πηγών προσομοίωσης	69
3.5.3 Προσδιορισμός της νεκρής ζώνης με χρήση του φίλτρου διαμέτρου 47mm .71	
3.5.3.1 Πειραματικά δεδομένα για το φίλτρο διαμέτρου 47mm	72
3.5.3.2 Προσομοίωση φίλτρου διαμέτρου 47mm με dead layer σε όλη την περιφέρεια του κρυστάλλου.....	73
3.5.3.3 Προσομοίωση φίλτρου διαμέτρου 47mm με dead layer μόνο μπροστά (front) και περιφερειακά	76
3.5.4 Προσδιορισμός του dead layer με χρήση της γεωμετρίας 8.....	79
3.5.4.1 Πειραματικά δεδομένα γεωμετρίας 8	79
3.5.4.1.1 Πειραματικά δεδομένα γεωμετρίας 8 με χρήση της πηγής QCY12 (4M HCl).....	80
3.5.4.1.2 Πειραματικά δεδομένα γεωμετρίας 8 με χρήση της πηγής της άσκησης διαβαθμόνωσης της ΕΕΑΕ (2M HCl).....	81
3.5.4.2 Προσομοιώσεις γεωμετρίας 8.....	83

3.5.4.2.1 Προσομοίωση διαλύματος QCY12 (4M HCl) σε γεωμετρία 8	84
3.5.4.2.2 Προσομοίωση διαλύματος EEAE (2M HCl) σε γεωμετρία 8	87
3.5.5 Διερεύνηση του πολυπροπυλενίου ως υλικό του καλύμματος του ανιχνευτή	89
3.5.6 Συσχέτιση όλων των αποτελεσμάτων και τελικές διαστάσεις dead layer	89
3.6 Προσομοιώσεις γεωμετρίας 12	91
3.6.1 Τροποποίηση κυρίως προγράμματος για τη γεωμετρία 12	91
3.6.2 Έλεγχος ομοιομορφίας για τη γεωμετρία 12	92
3.6.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τη γεωμετρία 12	93
3.7 Προσομοιώσεις νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου αέρα	96
3.7.1 Επίδραση του πάχους του φίλτρου στον προσδιορισμό της απόδοσης μέσω προσομοίωσης	97
3.7.2 Κατασκευή θήκης από Plexiglas – Τελική μορφή νέας γεωμετρίας	99
3.7.3 Πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της νέας γεωμετρίας	100
3.8 Αβεβαιότητα νέας βαθμονόμησης	102
3.9 Σύγκριση της απόδοσης της νέας γεωμετρίας με την απόδοση της γεωμετρίας 12	103
Εικόνες κεφαλαίου 3	105
Διαγράμματα κεφαλαίου 3	115

Κεφάλαιο 4:

Σύγκριση της νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρων αέρα με την ισχύουσα γεωμετρία 12

4.1 Εισαγωγή	118
4.2 Νέα διαδικασία δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα	119
4.3 Σύγκριση της υπολογιζόμενης συγκέντρωσης ^7Be με τις δύο γεωμετρίες	120
4.3.1 Δειγματοληψίες φίλτρων με σκοπό τη σύγκριση της συγκέντρωσης του ^7Be στις δύο γεωμετρίες	122
4.3.2 Αναλύσεις φίλτρων με σκοπό τη σύγκριση της συγκέντρωσης του ^7Be στις δύο γεωμετρίες	123
4.3.3 Αποτελέσματα σύγκρισης της συγκέντρωσης του ^7Be στις δύο γεωμετρίες	125

4.4 Εφαρμογή της νέας γεωμετρίας σε κύκλο φίλτρων αέρα	130
4.5 Συμπεράσματα	136

Κεφάλαιο 5:

Προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ^7Be στο νερό της βροχής

5.1 Εισαγωγή	138
5.2 Μέτρηση του ^7Be σε νερό της βροχής	138
5.3 Δειγματοληψία και ανάλυση βρόχινου νερού στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	139
5.4 Βαθμονόμηση απόδοσης φίλτρων βρόχινου νερού με χρήση κώδικα Monte Carlo	143
5.5 Προσδιορισμός ραδιενέργειας του ^7Be σε νερό βροχής.....	144
5.5.1 γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων νερού.....	145
5.5.2 Δυνατότητες ανίχνευσης του ^7Be με γ-φασματοσκοπική ανάλυση νερού σε τυποποιημένη γεωμετρία 2	147
5.6 Συμπεράσματα από την ανάλυση βρόχινου νερού στο ΕΠΤ-ΕΜΠ	150
Εικόνες κεφαλαίου 5	151

Κεφάλαιο 6:

<i>Συμπεράσματα και μελλοντικά βήματα</i>	152
---	-----

<i>Παράρτημα Α</i>	157
--------------------------	-----

<i>Παράρτημα Β</i>	168
--------------------------	-----

<i>Παράρτημα Γ</i>	173
--------------------------	-----

<i>Παράρτημα Δ</i>	198
--------------------------	-----

<i>Βιβλιογραφία</i>	258
---------------------------	-----

Κεφάλαιο 1:

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Δ.Ε.) είναι η βελτίωση της μεθοδολογίας προσδιορισμού της συγκέντρωσης του ισοτόπου κοσμικής προέλευσης ^7Be στην ατμόσφαιρα, η οποία ακολουθείται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Το ισότοπο αυτό απαντάται στην ατμόσφαιρα σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις και η ραδιενέργειά του συνήθως δεν ξεπερνά τα 10mBq/m^3 . Στόχος της επιδιωκόμενης βελτίωσης είναι η καλύτερη μελέτη της κύμανσης της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ισοτόπου στην ατμόσφαιρα και μάλιστα σε μικρή κλίμακα χρόνου - της τάξης μερικών ωρών.

Σε παλαιότερη εργασία [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009] αναπτύχθηκε πρωτόκολλο για τη δειγματοληψία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση φίλτρων αέρα, με σκοπό τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ, με χρήση του ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στην παρούσα Δ.Ε. εισάγεται και μελετάται μια νέα γεωμετρία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα, με στόχο την αύξηση της απόδοσης ανίχνευσης των φωτονίων του ^7Be , καθώς και τη βελτίωση της επαναληψιμότητας στις αναλύσεις. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται βαθμονόμηση απόδοσης του συγκεκριμένου ανιχνευτή για τα φωτόνια του ^7Be και τη νέα γεωμετρία.

Η βαθμονόμηση απόδοσης έγινε με χρήση προσομοίωσης Monte-Carlo και πιο συγκεκριμένα με χρήση του κώδικα PENELOPE που είναι εγκατεστημένος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για την εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo ωστόσο πρέπει να είναι γνωστά με ικανοποιητική ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτικού συστήματος. Στα πλαίσια της Δ.Ε. η δυσκολία αυτή ξεπεράστηκε μέσω του συνδυασμού προσομοίωσης και πειράματος.

Η Δ.Ε. αποτελείται από έξι κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

Στο 2^ο κεφάλαιο αρχικά γίνεται σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά στο ισότοπο ^7Be . Περιγράφεται ο τρόπος παραγωγής και απόθεσης στη γη του ισοτόπου καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν τις δύο αυτές διαδικασίες. Αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους πραγματοποιούνται μετρήσεις της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ισοτόπου και περιγράφεται η συνήθης τεχνική που, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ακολουθείται με σκοπό τον προσδιορισμό του ^7Be . Στη

συνέχεια του κεφαλαίου, αναλύεται το υπάρχον πρωτόκολλο δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, με χρήση φίλτρων αέρα glass-fiber 8x10". Περιγράφονται εν συντομία οι γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του εργαστηρίου και δίνεται έμφαση σε εκείνη που περιλαμβάνει τον ανιχνευτή XtRa, ο οποίος χρησιμοποιείται σύμφωνα με το προαναφερθέν πρωτόκολλο. Στο σημείο αυτό εισάγονται και επεξηγούνται οι έννοιες της απόδοσης φωτοκορυφής και της πειραματικής βαθμονόμησης απόδοσης μιας ανιχνευτικής διάταξης, καθώς αποτελούν βασικές έννοιες για την παρούσα Δ.Ε. Τέλος, παρουσιάζεται η ισχύουσα σήμερα συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φίλτρων αέρα 8x10" στον ανιχνευτή XtRa η οποία είναι γνωστή ως 'γεωμετρία 12'. Γίνεται κριτική ανασκόπηση της διαδικασίας βαθμονόμησης και προσπάθεια επαναπροσδιορισμού των τιμών που υπεισέρχονται στη βαθμονόμηση αυτή, καθώς και των αβεβαιοτήτων τους.

Στο 3^ο κεφάλαιο εισάγεται η νέα γεωμετρία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης η οποία προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. και γίνεται βαθμονόμηση απόδοσής της. Καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, η βαθμονόμηση αυτή γίνεται με χρήση του κώδικα Monte Carlo PENELOPE. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της λογικής που ακολουθούν τέτοιοι κώδικες και δίνονται περισσότερα στοιχεία για τη λειτουργία του κώδικα PENELOPE και την προετοιμασία των απαραίτητων αρχείων εισόδου. Ακόμα, περιγράφεται ο τρόπος χρήσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, με σκοπό τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι η λεπτομερής γνώση των διαστάσεων του ανιχνευτή και του δείγματος. Οι διαστάσεις του δείγματος μπορούν εύκολα να μετρηθούν, χωρίς όμως να συμβαίνει το ίδιο και για τον ανιχνευτή. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζεται μια σειρά από πειράματα και προσομοιώσεις που στόχο έχουν την όσο το δυνατόν πιο ακριβή εκτίμηση των διαστάσεων του ανιχνευτή. Τέλος, με γνωστές πλέον τις διαστάσεις, γίνεται βαθμονόμηση απόδοσης της νέας γεωμετρίας φίλτρων αέρα, με χρήση προσομοίωσης για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV που εκπέμπει το ^7Be και αναλύονται οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στη βαθμονόμηση αυτή. Παράλληλα, κατασκευάζεται μία πρότυπη πηγή της ίδιας γεωμετρίας από άλας KCl, με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύγκριση της νέας προτεινόμενης γεωμετρίας φίλτρων αέρα με την ισχύουσα γεωμετρία. Για το σκοπό αυτό δεν

συγκρίνονται μόνο οι τιμές της απόδοσης, αλλά και οι τιμές της συγκέντρωσης του ^7Be στον αέρα, όπως προσδιορίζονται με τις δύο βαθμονομήσεις (ισχύουσα και νέα) κατά την ανάλυση φίλτρων αέρα. Στα πλαίσια της Δ.Ε. συλλέχθηκαν μία σειρά από φίλτρα αέρα $8 \times 10''$, τα οποία αναλύθηκαν και στις δύο γεωμετρίες και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις του ^7Be και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες. Από τη σύγκριση αυτή εμφανίζονται τα πλεονεκτήματα της νέας γεωμετρίας. Στο τέλος του κεφαλαίου, η νέα γεωμετρία και βαθμονόμηση απόδοσης εφαρμόζεται για την ανάλυση μίας άλλης σειράς φίλτρων αέρα, τα οποία ελήφθησαν στα πλαίσια ημερήσιου κύκλου δειγματοληψιών φίλτρων αέρα, ο οποίος πραγματοποιήθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε. Στόχος του κύκλου αυτού ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας παρακολούθησης της κύμανσης της συγκέντρωσης του ^7Be μέσα σε μία ημέρα. Από την εφαρμογή αυτή καταδεικνύονται πάλι τα πλεονεκτήματα της νέας γεωμετρίας.

Στο 5^ο κεφάλαιο μελετάται η δειγματοληψία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση βρόχινου νερού, για προσδιορισμό του ^7Be . Εξαιτίας της εξαιρετικά χαμηλής συγκέντρωσης του ^7Be στο βρόχινο νερό, για την ανάλυση αυτή πρέπει να προηγηθεί φιλτράρισμα του νερού μέσα από κατάλληλα φίλτρα και στη συνέχεια γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φίλτρου. Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους πραγματοποιούνται μετρήσεις ^7Be στο νερό της βροχής και περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την ανάλυση του νερού. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση απόδοσης για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων αυτών, με χρήση του κώδικα PENELOPE. Τέλος, η βαθμονόμηση αυτή εφαρμόζεται για την ανάλυση του βρόχινου νερού το οποίο συλλέχθηκε στα πλαίσια ενός περιστατικού βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε.

Η Δ.Ε. ολοκληρώνεται με 4 παραρτήματα στα οποία παρατίθενται οι λεπτομερείς υπολογισμοί που πραγματοποιούνται σε διάφορα σημεία της εργασίας, καθώς και όλα τα απαραίτητα για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αρχεία.

Κεφάλαιο 2:

Μετρήσεις του ισοτόπου ^7Be της ατμόσφαιρας στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία για το ισότοπο ^7Be , το οποίο ανιχνεύεται στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και η ανίχνευση του οποίου απασχολεί την παρούσα Δ.Ε. Αρχικά, αναφέρονται οι τρόποι παραγωγής του, οι παράγοντες που την επηρεάζουν και οι μηχανισμοί απόθεσης του ισοτόπου στο έδαφος. Παρουσιάζονται επίσης, οι λόγοι για τους οποίους ενδιαφέρει η ανίχνευση και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα η οποία ακολουθείται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) και παρουσιάζεται αναλυτικά τόσο η διάταξη δειγματοληψίας αέρα σε φίλτρα, όσο και η διάταξη ανάλυσής τους με χρήση του ανιχνευτή ΧtRa (Extended Range Germanium). Τέλος, γίνεται έλεγχος της υπάρχουσας βαθμονόμησης απόδοσης της παραπάνω ανιχνευτικής διάταξης, για την περίπτωση των χρησιμοποιούμενων φίλτρων αέρα. Πιο συγκεκριμένα, επαναπροσδιορίζονται οι αποδόσεις φωτοκορυφής από τα δείγματα που είχαν χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη βαθμονόμηση σε παλαιότερη εργασία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και δίνεται επιπλέον έμφαση στον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτούς τους υπολογισμούς, εντοπίζονται ορισμένα προβλήματα που παρουσιάζει η τρέχουσα βαθμονόμηση και αναδεικνύεται η ανάγκη για υιοθέτηση νέας γεωμετρίας πηγής-ανιχνευτή, με την οποία να επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές απόδοσης στην ανίχνευση του ^7Be σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται ο ακριβέστερος ή/και ο ταχύτερος ποσοτικός προσδιορισμός του ^7Be στην ατμόσφαιρα.

2.2 Το ισότοπο ^7Be

Το στοιχείο Βηρύλλιο (Be) έχει 12 ισότοπα, από τα οποία την παρούσα Δ.Ε. ενδιαφέρει μόνο το ραδιενεργό ισότοπο ^7Be το οποίο έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 53.44 ημέρες και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 477.59keV με ποσοστό εκπομπής 10.4% [Radiation Decay v.3.6].

Το ^7Be χαρακτηρίζεται ως κοσμογενές (cosmogenic) ισότοπο καθώς παράγεται κατά τον κατακερματισμό ελαφρών ατμοσφαιρικών πυρήνων (spallation), όπως αυτοί του άνθρακα, του αζώτου και του οξυγόνου, όταν οι πυρήνες αυτοί απορροφήσουν πρωτόνια ή νετρόνια που προέρχονται από κοσμικές ακτίνες [Lal D. et al, 1958], [Rindi A. & Charalambous S., 1967]. Η παραγωγή του ^7Be γίνεται κατά περίπου 70% στην στρατόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο περίπου 30% παράγεται στην ανώτερη τροπόσφαιρα.

2.2.1 Παραγωγή του ισότοπου ^7Be

Τα κοσμογενή ισότοπα, όπως το ^7Be , δημιουργούνται όταν πρωτόνια ή νετρόνια υψηλής ενέργειας (1GeV) της κοσμικής ακτινοβολίας συγκρουστούν με πυρήνες της γήινης ατμόσφαιρας. Επομένως, ο ρυθμός παραγωγής τους εξαρτάται από την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της γης, καθώς και από το γεωμαγνητικό πλάτος και ύψος από την επιφάνειά της. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας εξαρτάται από:

- τις ηλιακές κηλίδες και τον ενδεκαετή κύκλο του ήλιου
- τον ηλιακό άνεμο
- τις μαγνητικές καταιγίδες
- τις ηλιακές εκλάμψεις

Πιο συγκεκριμένα, 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. Κατά τις χρονικές περιόδους που οι ηλιακές κηλίδες είναι μέγιστες (κατά το πλήθος αλλά και την ένταση) το ηλιακό μαγνητικό πεδίο γίνεται ισχυρότερο, με αποτέλεσμα να “προστατεύεται” η γη από την κοσμική ακτινοβολία. Συνεπώς, η παραγωγή του ^7Be επηρεάζεται κατά αντίστροφο τρόπο από την ηλιακή δραστηριότητα, δηλαδή κατά τις περιόδους όπου οι ηλιακές κηλίδες φθάνουν στο μέγιστο τους, η παραγωγή του ισότοπου στην ατμόσφαιρα είναι ελάχιστη, γεγονός που έχει μελετηθεί και πειραματικά [Cannizzato F. et al, 2004], [Hotzl H., Rosner G. & Winkler R., 1991].

Η παραγωγή του ^7Be εξαρτάται και από άλλες συνιστώσες της ηλιακής δραστηριότητας, εκτός από τις ηλιακές κηλίδες, όπως είναι ο ηλιακός άνεμος και οι

μαγνητικές καταιγίδες. 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 ^7Be στον αέρα στο επίπεδο του εδάφους, όπου είναι εύκολη τέτοιου είδους μέτρηση [Papastefanou C. & Ioannidou A., 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 της συγκέντρωσης ισοτόπων όπως το ^7Be [Lal D. & Peters B., 1967].

Τέλος, μία άλλη συνιστώσα της ηλιακής δραστηριότητας που θεωρείται ότι επιδρά στο ρυθμό παραγωγής ισοτόπων κοσμικής προέλευσης είναι οι ηλιακές εκλάμψεις. Πρόκειται για βίαιες εκρήξεις στην ατμόσφαιρα του ήλιου οι οποίες απελευθερώνουν τεράστια ποσότητα ενέργειας, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και φορτισμένα σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας. Αποτέλεσμα των ηλιακών εκλάμψεων είναι η αύξηση της παραγωγής στην ατμόσφαιρα των ισοτόπων κοσμικής προέλευσης και άρα και του ^7Be . Ωστόσο, επειδή συμβαίνουν σπάνια και διαρκούν μόνο λίγες ώρες, εκτιμάται ότι δεν μπορούν να επηρεάσουν το μέσο ρυθμό παραγωγής των ισοτόπων αυτών [Lal D. et al., 1958], [Lal D. & Peters B., 1967].

2.2.2 Το ισότοπο ^7Be στην ατμόσφαιρα

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους το ισότοπο ^7Be εναποτίθεται στη γη. Άμεσα, από τον αέρα λόγω της βαρύτητας (ξηρή απόθεση, dry deposition) και έμμεσα, από τις σταγόνες της βροχής ή τις νιφάδες του χιονιού (υγρή απόθεση, wet deposition). Γενικά, είναι αποδεκτό ότι το χιόνι απομακρύνει το ^7Be της ατμόσφαιρας πιο αποτελεσματικά σε σχέση με τη βροχή [Ioannidou A. & Papastefanou C., 2006].

Για την περίπτωση της υγρής απόθεσης, οι πυρήνες του ισοτόπου μπορεί να βρίσκονται ήδη μέσα στις σταγόνες της βροχής ή τις νιφάδες του χιονιού (μηχανισμός απόθεσης rainout) ή να βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα και να παρασύρονται από τις σταγόνες ή τις νιφάδες αντίστοιχα (μηχανισμός απόθεσης washout). Συνήθως, η εναπόθεση του ^7Be να γίνεται ταυτόχρονα και με τους δύο μηχανισμούς [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009].

Η συγκέντρωση του ισοτόπου στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από διάφορους ατμοσφαιρικούς και μετεωρολογικούς παράγοντες όπως:

- η θερμοκρασία [Azahra M. et al, 2003]
- η ατμοσφαιρική πίεση [Likuku A.S., 2006]

- η σχετική υγρασία [Meresova J., 2008]
- η βροχόπτωση [Al-Azmi D. et al., 2001]
- η χιονόπτωση [Ioannidou A. & Papastefanou C., 2006]
- η νέφωση [Durana L. et al, 1996]

2.2.3 Μέτρηση του ισοτόπου ^7Be στην ατμόσφαιρα

Η μέτρηση του ^7Be στην ατμόσφαιρα είναι σημαντική γιατί το συγκεκριμένο ισότοπο θεωρείται ένας σημαντικός ιχνηλάτης (tracer) για τη μελέτη της κίνησης των αερίων μαζών και τον προσδιορισμό μοντέλων παγκόσμιας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (Global Circulation Models: GCMs). Υπολογίζοντας τη συγκέντρωση του ισοτόπου, μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για την κατακόρυφη κίνηση των αερίων μαζών, τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για τον κλάδο της μετεωρολογίας [Lal D. et al, 1958], [Gregory J.C., 1996], [Young J.A. & Silker W.B., 1980].

Το ^7Be , όπως και άλλα ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα, με σημαντικότερα τα ^{212}Pb , ^{210}Pb , ^{22}Na , ^{35}S , ^{32}P και ^{35}P , από τη στιγμή που παράγεται στην ατμόσφαιρα, προσκολλάται σε αερολύματα και μετακινείται από τη στρατόσφαιρα στην ανώτερη τροπόσφαιρα και τέλος στο έδαφος [Papastefanou C. & Ioannidou A., 1995]. Ο χρόνος παραμονής του ^7Be στα ατμοσφαιρικά αερολύματα εξαρτάται από το ύψος και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής όπου παράγεται [Meresova J., 2008]. Έτσι, μέσω της μελέτης της μεταβολής της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα, μπορεί να εκτιμηθεί ο χρόνος παραμονής του ^7Be στα αερολύματα και κατ' επέκταση μπορεί να μελετηθεί ο χρόνος παραμονής των αερολυμάτων στον περιβάλλοντα αέρα. Εάν μάλιστα τα αερολύματα αυτά είναι αέριοι ρύποι μπορεί να εξαχθούν συμπεράσματα για την ατμοσφαιρική ρύπανση και το χρόνο παραμονής των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του ^7Be στον αέρα γίνεται με δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα (με αντλία αέρα) και υγρών κατακρημνίσεων - βροχή και χιόνι - (με ειδικούς δειγματολήπτες) και στη συνέχεια ανάλυση των δειγμάτων. Η συνήθης τεχνική ανάλυσης που συνήθως χρησιμοποιείται είναι η γ-φασματοσκοπική ανάλυση, με ανιχνευτές Γερμανίου (Ge) μεγάλης καθαρότητας και υψηλής διακριτικής ικανότητας, και στηρίζεται στην ανίχνευση των φωτονίων ενέργειας 477.59keV που εκπέμπει το ^7Be . Οι χρόνοι δειγματοληψίας, η συχνότητα δειγματοληψίας καθώς και η διάρκεια της φασματοσκοπικής ανάλυσης κυμαίνονται από εργαστήριο σε εργαστήριο. Εξαιτίας κυρίως της χαμηλής συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα (συνήθως

$<10\text{mBq/m}^3$), οι μελέτες που συνήθως συναντώνται στη βιβλιογραφία, αναφέρονται σε δειγματοληψίες πολλών ημερών, παρέχοντας μέσες μηνιαίες, εβδομαδιαίες και ημερήσιες συγκεντρώσεις ^7Be [Aldahan A. et al., 2001], [Azahra M. et al., 2003], [Cannizzaro F. et al, 2004], [Daish S.R. et al., 2005], [Gregory J.C., 1996], [Ioannidou A. et al., 2005], [Kulan A. (2006)], [Papastefanou C. & Ioannidou A. (1995),(2004)], [Yu K. N. & Lee L.Y.L., 2002]. Ωστόσο, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά και στη συνέχεια της Δ.Ε., στοχεύουν στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be σε μικρότερα χρονικά διαστήματα (~4h) προκειμένου να είναι εφικτή η μελέτη της μεταβολής της συγκέντρωσης σε μικρή κλίμακα χρόνου, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, ή εξαιτίας της παρουσίας κάποιου μετεωρολογικού φαινομένου, όπως για παράδειγμα ενός περιστατικού βροχόπτωσης.

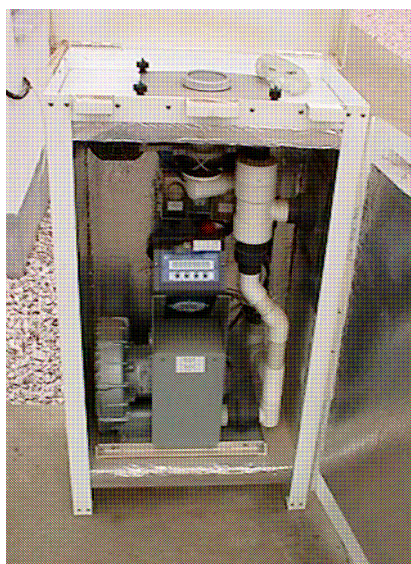
2.3 Το πρωτόκολλο δειγματοληψίας και ανάλυσης για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα από το ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ γίνονται μετρήσεις ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα και στο βρόχινο νερό. Στην παράγραφο αυτή, περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης της συγκέντρωσης του εξεταζόμενου ισοτόπου στην ατμόσφαιρα, με βάση συγκεκριμένο πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε και εφαρμόζεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009], ενώ η διαδικασία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be στο βρόχινο νερό περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 της παρούσας Δ.Ε.

Η διαδικασία μέτρησης της συγκέντρωσης του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, περιλαμβάνει δύο κύρια στάδια:

- τη δειγματοληψία αέρα σε κατάλληλα φίλτρα, και
- τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων.

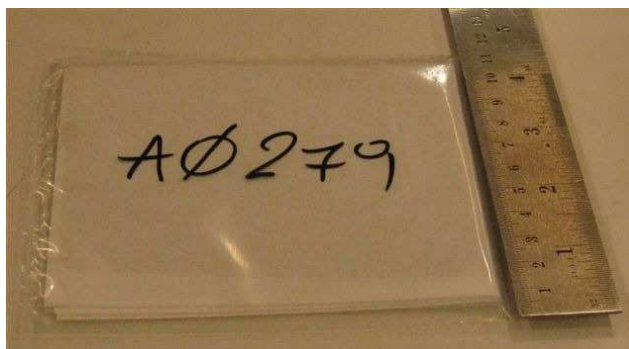
Για την πραγματοποίηση της δειγματοληψίας αέρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται αντλία αέρα υψηλής παροχής τύπου DH-50810E της εταιρείας F&J Specialty Products Inc, η οποία είναι εγκαταστημένη στην ταράτσα του κτηρίου Κ του ΕΠΤ και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Η αντλία αέρα τύπου DH-50810E της εταιρείας F&J Specialty Products Inc

Στην αντλία αυτή τοποθετούνται φίλτρα από ίνες γυαλιού (glass-fiber) τυποποιημένων διαστάσεων 8x10” τύπου FR810M της εταιρείας F&J Specialty Products Inc. και γίνεται δειγματοληψία για τέσσερις ώρες. Με το συνδυασμό αυτό αντλίας - φίλτρου είναι δυνατή η άντληση περίπου 80-90m³/h. Η αντλία κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, καταγράφει επίσης πληροφορίες για τη θερμοκρασία, την πίεση, την παροχή και το συνολικό όγκο του αέρα που περνά μέσα από το φίλτρο.

Μετά το πέρας των τεσσάρων ωρών το φίλτρο απομακρύνεται από την αντλία και διπλώνεται στα μέσα των πλευρών του ώστε οι τελικές του διαστάσεις να είναι 10”/2=12.70cm μήκος και 8”/2=10.16cm πλάτος (4x5”). Στη συνέχεια, το φίλτρο τοποθετείται αρχικά σε πλαστική σακούλα, σφραγίζεται αεροστεγώς και ακολούθως τοποθετείται στον ανιχνευτή XtRa για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Η χρησιμοποιούμενη αυτή γεωμετρία φίλτρου-ανιχνευτή, είναι μία από τις τυποποιημένες γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και χαρακτηρίζεται ως ‘γεωμετρία 12’. Στην παρακάτω εικόνα 2.2 φαίνεται ένα φίλτρο διπλωμένο μέσα σε σακούλα πριν τοποθετηθεί στον ανιχνευτή για ανάλυση.



Εικόνα 2.2: Το φίλτρο 8x10” διπλωμένο στη γεωμετρία ανάλυσης 12

Σύμφωνα πάντα με το πρωτόκολλο δειγματοληψίας-ανάλυσης που έχει υιοθετηθεί, γίνονται δύο διαδοχικές γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις. Η πρώτη ανάλυση γίνεται για τη μελέτη των βραχύβιων θυγατρικών ισοτόπων (^{214}Pb , ^{214}Bi) του ραδονίου (^{222}Rn) και διαρκεί δύο ώρες. Μετά από το χρονικό διάστημα των δύο ωρών (διάρκεια μεγαλύτερη από το πενταπλάσιο του χρόνου ημιζωής των θυγατρικών ισοτόπων), η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου έχει πρακτικά μηδενιστεί, οπότε ξεκινά η δεύτερη ανάλυση στην ίδια γεωμετρία. Από τη δεύτερη αυτή ανάλυση, προκύπτουν τα μεγέθη που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ^7Be . Η ραδιενεργός απομείωση (decay) των θυγατρικών του ^{222}Rn οδηγεί στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος στην περιοχή ανίχνευσης του ^7Be και κατά συνέπεια μειώνει το κατώτερο όριο ανίχνευσής του, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την ανίχνευση του συγκεκριμένου ισοτόπου και οδηγεί σε ακριβέστερο (μικρότερες αβεβαιότητες) υπολογισμό της συγκέντρωσής του [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009].

Καθώς το ισότοπο ^7Be βρίσκεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα (λίγα mBq/m^3) απαιτούνται αρκετές ώρες γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του φίλτρου, προκειμένου να προσδιορισθεί η συγκέντρωσή του με ικανοποιητική ακρίβεια. Συγκεκριμένα, με το συνδυασμό δειγματοληψίας και ανάλυσης στην ήδη υπάρχουσα γεωμετρία φίλτρου - ανιχνευτή (γεωμετρία 12) απαιτείται μέτρηση διάρκειας 18 ωρών, προκειμένου να προσδιορισθεί το ^7Be με αβεβαιότητα της τάξης του 10% (1σ), ενώ αν η συγκέντρωση του ισοτόπου ^7Be είναι χαμηλή απαιτείται πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

2.3.1 Οι γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Όπως προηγούμενα αναφέρθηκε, για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων που συλλέγονται, απαιτείται η χρήση γ-ανιχνευτικής διάταξης. Από το πρωτόκολλο δειγματοληψίας-ανάλυσης που εφαρμόζεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ προκύπτει ότι για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ^7Be απαιτείται η χρήση της ανιχνευτικής διάταξης του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή XtRa της εταιρίας Canberra Industries. Ωστόσο, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι διαθέσιμες τρεις ακόμα ανιχνευτικές διατάξεις με ανιχνευτές Γερμανίου (Ge). Πρόκειται για τους ανιχνευτές GeLi, HPGe και LEGe, επίσης της εταιρίας Canberra. Στη συνέχεια της παραγράφου, δίνονται στοιχεία για τους τρεις αυτούς ανιχνευτές, ενώ αναλυτικά παρουσιάζεται ο ανιχνευτής XtRa και η αντίστοιχη ανιχνευτική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται αφενός για λόγους πληρότητας, καθώς στη συνέχεια της Δ.Ε. θα γίνουν αναφορές σε μετρήσεις οι οποίες

λήφθηκαν με χρήση και των τεσσάρων ανιχνευτών, αφετέρου για να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα της χρήσης του ανιχνευτή XtRa στη μελέτη της κύμανσης της συγκέντρωσης του ^7Be σε μικρή κλίμακα χρόνου.

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι εγκατεστημένοι και χρησιμοποιούνται για γ -φασματοσκοπικές αναλύσεις οι παρακάτω ανιχνευτές:

- **GeLi** (Lithium drifted Germanium detector) με διακριτική ικανότητα 1.97keV (FWHM) στα 1332keV και σχετική απόδοση 22.3%. Σε ανιχνευτές τέτοιου τύπου στον κρύσταλλο γερμανίου έχουν προστεθεί ιόντα λιθίου (Li) με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερης από ότι στους άλλους ανιχνευτές περιοχής αντιστάθμισης πάχους 5-10mm, όπου ανιχνεύονται τα φωτόνια. Το παράθυρο του κρυστάτη είναι κατασκευασμένο από Al και για το λόγο αυτό δεν είναι κατάλληλος για την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών ($E < 200\text{keV}$).

- **HPGe** (High Purity Germanium detector) ο οποίος είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ανιχνευτής Ge και τέθηκε σε λειτουργία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ το 1983. Ο ανιχνευτής έχει διάμετρο 55.3mm, ύψος 65mm και η σχετική απόδοσή του για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV είναι 33.8%. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε κρυστάτη από Al και για το λόγο αυτό η απόδοσή του για φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι χαμηλή. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, όπως εκφράζεται από το FWHM:

- Για φωτόνια ενέργειας 122.06keV είναι 0.85keV.
- Για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV είναι 1.78keV.

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

- **LEGe** (Low Energy Germanium detector) ο οποίος είναι εγκατεστημένος και λειτουργεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ από το 1988. Πρόκειται για επίπεδο ανιχνευτή από υπερκάθαρο γερμάνιο (High purity Ge, HPGe) τύπου n, κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 50.5mm (επιφάνειας 2000mm^2) και ύψους 20mm. Το παράθυρο του κρυστάτη είναι κατασκευασμένο από Be πάχους 0.5mm, με συνέπεια η εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών να είναι πολύ μικρή. Λόγω του μικρού πάχους αλλά και της ύπαρξης κενού μέσα στον κρυστάτη, το παράθυρο του Be είναι εξαιρετικά ευαίσθητο. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε όρους FWHM είναι:

- Για ενέργεια φωτονίων 5.9keV, FWHM=341eV
- Για ενέργεια φωτονίων 122keV, FWHM=530eV, FW.1M=996eV.

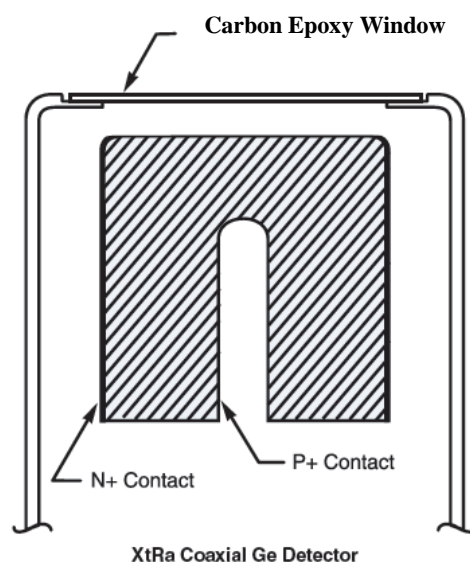
- **XtRa** (Extended Range Germanium detector) με διακριτική ικανότητα 2.04keV για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV και σχετική απόδοση 104.5%. Ο ανιχνευτή αυτός

αναλύεται παρακάτω ξεχωριστά καθώς είναι ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην παρούσα Δ.Ε.

2.3.1.1 Ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Ο ανιχνευτής αυτός είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ημιαγωγός ανιχνευτής γερμανίου με παράθυρο από ανθρακονήματα (carbon fibers). Ο ανιχνευτής που υπάρχει και χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι τύπου GX10021 της εταιρείας Canberra Industries. Στην παρακάτω εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα του κρυστάλλου από γερμάνιο του ανιχνευτή, όπου φαίνονται τα ηλεκτρόδια τύπου p και n, καθώς και το παράθυρο του κρυστάτη από ανθρακονήματα πάχους 0.5mm, το οποίο επιτρέπει την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών.

Ο ανιχνευτής έχει διάμετρο 80mm, ύψος 78mm και η σχετική απόδοσή του (relative efficiency) είναι 104.5% για φωτόνια ενέργειας 1332.5keV. Παρουσιάζει πολύ καλή διακριτική ικανότητα, της τάξεως του 1.03keV για φωτόνια ενέργειας 122.06keV και 2.04keV για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV, ενώ ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50keV είναι 82.2:1. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις ακριβείς διαστάσεις του ανιχνευτή μπορούν να βρεθούν στο επόμενο κεφάλαιο (εικόνα 3.7).

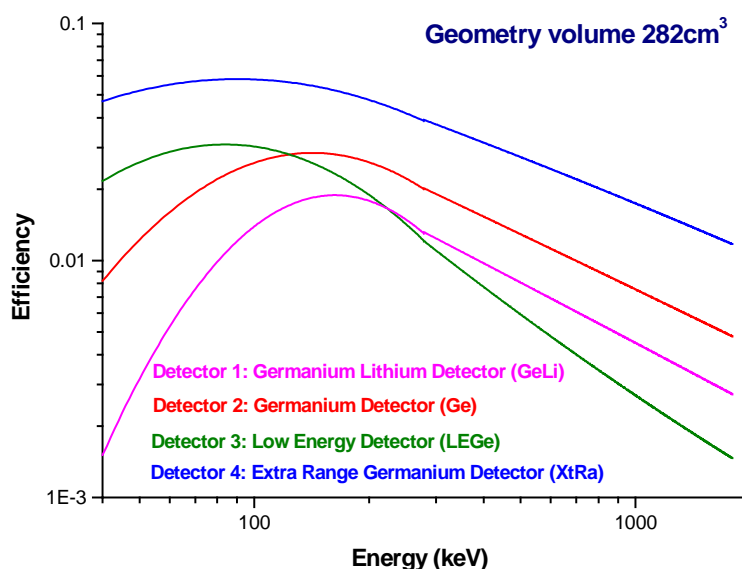


Εικόνα 2.3: Σκαρίφημα του κρυστάλλου του ανιχνευτή XtRa [www.canberra.com]

Κάθε ανιχνευτής γερμανίου έχει τα δικά του χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο του. Δύο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός ανιχνευτή είναι η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας και η ικανότητά του να διακρίνει φωτόνια παραπλήσιων ενεργειών. Για την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης, χρησιμοποιείται

συνήθως το μέγεθος *απόδοση φωτοκορυφής ή αιχμής* (full energy peak efficiency) το οποίο εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που ανιχνεύονται, έχοντας αποδώσει στον ανιχνευτή ολόκληρη την ενέργειά τους, σε σχέση με τον αριθμό των φωτονίων της ίδιας ενέργειας που εκπέμπονται από μία πηγή. Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης των ανιχνευτικών διατάξεων του ΕΠΤ-ΕΜΠ για μία από τις γεωμετρίες ανίχνευσης (γεωμετρία '2') που χρησιμοποιούνται. Παρατηρείται ότι ο ανιχνευτής XtRa παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές απόδοσης αιχμής, σε ολόκληρη την ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος (0-2000keV) και συνεπώς και στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης του ^7Be (477.59keV). Στην παράγραφο 2.3.2 περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία πειραματικής βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτών Ge. Οι υψηλότερες τιμές της απόδοσης του ανιχνευτή XtRa τον καθιστούν ως τον καταλληλότερο, συγκρινόμενο με τους άλλους ανιχνευτές Ge του ΕΠΤ-ΕΜΠ, για την ανίχνευση του ^7Be .

Ένα άλλο πλεονέκτημα του ανιχνευτή XtRa, εκτός του ευρέως φάσματος απόδοσης και της ικανότητας ανίχνευσης φωτονίων με χαμηλές ενέργειες, είναι ότι έχει και καλή διακριτική ικανότητα, παρά το μεγάλο όγκο του κρυστάλλου.



Εικόνα 2.4: Απόδοση των ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ για γεωμετρία '2'

Ο ανιχνευτής XtRa αποτελεί συνιστώσα της μετρητικής διάταξης του ΕΠΤ-ΕΜΠ που είναι εγκαταστημένη και λειτουργεί από το 1999 και η οποία είναι ρυθμισμένη για την ανάλυση δειγμάτων στην ενεργειακή περιοχή 0-2000keV. Η διάταξη αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Ανιχνευτής XtRa (Extended Range Germanium), τύπου GX10021 της Canberra
- Προενιχνυτής, τύπου 2002CSL της Canberra
- Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2025 της Canberra
- Διαχωριστής ύψους παλμών, τύπου 1437 της Canberra
- Αναλογοψηφιακός μετατροπέα, τύπου 2071 της Canberra
- Πολυκαναλικός αναλυτή, AIM 556A της Canberra
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D της Canberra (τάση: 4.5keV)
- Δοχείο υγρού αζώτου όγκου 30lt, στο οποίο είναι εμβαπτισμένος ο κρυστάλλος τύπου 2000CSL της Canberra
- Ελεγκτής στάθμης του αζώτου, τύπου 1786 της Canberra
- Θωράκιση τύπου front-open/split-top, μοντέλο 767 της Canberra
- Μονάδα NIM-BIN, τύπου 2000 της Canberra

2.3.1.2 Η θωράκιση του ανιχνευτή XtRa

Μία συνιστώσα της ανιχνευτικής διάταξης - πέραν του ανιχνευτή - που έχει μεγάλη επίδραση στο υπόστρωμα του συλλεγόμενου φάσματος είναι η θωράκιση. Εξαιρετική σημασία έχει το πάχος και η καθαρότητα του υλικού, καθώς και η γεωμετρία της θωράκισης. Συνήθως η θωράκιση έχει εσωτερική επένδυση από μια σειρά από στρώματα μικρού πάχους, από διάφορα υλικά με σταδιακά μειούμενο ατομικό αριθμό Z , που στόχο έχουν να θωρακίσουν τον ανιχνευτή από τις ακτίνες- X που παράγονται μέσα στο ίδιο το υλικό της θωράκισης, κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας της πηγής με αυτήν.

Η θωράκιση που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον ανιχνευτή XtRa είναι κατακόρυφου προσανατολισμού τύπου front-open/split-top, μοντέλο 767 της Canberra, όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή της μετρητικής διάταξης. Στο εσωτερικό της έχει διάμετρο 28cm και ύψος 40.6cm. Όσον αφορά στα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη, ξεκινώντας από το εσωτερικό, αποτελείται από:

- στρώμα χαλκού πάχους 1.5mm (0.062")
- στρώμα κασσίτερου πάχους 1mm (0.040")
- στρώμα μολύβδου πάχους 100mm (4")
- στρώμα ατσαλιού πάχους 9.5mm (3/8")

Στο μοντέλο αυτό υπάρχουν δύο είσοδοι, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει εκτεθειμένος μόλυβδος είτε οι πόρτες

είναι ανοιχτές είτε είναι κλειστές. Οι πόρτες στο καπάκι είναι συνδεδεμένες ώστε ανοίγουν και κλείνουν μαζί ανεξάρτητα του ποια έχει τεθεί σε κίνηση. Όπως φαίνεται από τον τρόπο που ανοίγουν οι πόρτες, η πόρτα στο κυρίως μέρος της θωράκισης ανοίγοντας δίνει πλήρη πρόσβαση στο εσωτερικό της θωράκισης.

Η θωράκιση εδράζεται σε τραπέζι το οποίο διαθέτει πόδια με ρύθμιση ύψους και βραχίονες οι οποίοι επιτρέπουν την μετακίνηση της συναρμολογημένης θωράκισης με τη βοήθεια μόνο ενός απλού μεταφορέα (pallet truck).

Οι ακριβείς διαστάσεις της θωράκισης φαίνονται στην εικόνα 2.8 στο τέλος του κεφαλαίου.



Εικόνα 2.5: Η θωράκιση του ανιχνευτή XiRa μοντέλο 767 της Canberra Industries

2.3.2 Η απόδοσης φωτοκορυφής και η διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι μια μη καταστροφική αναλυτική τεχνική για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων, μέσω της ανίχνευσης των φωτονίων που εκπέμπουν. Για απλά φάσματα και για μικρές απαιτήσεις ακριβείας είναι δυνατό να γίνει η ανάλυση με χρήση των ευκολιών που παρέχει ένας πολυκαναλικός αναλυτής. Όταν όμως πρόκειται για πιο πολύπλοκα φάσματα και για αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, απαιτείται η χρήση εξειδικευμένου

λογισμικού ανάλυσης. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται ο κώδικας SPUNAL ο οποίος, εκμεταλλευόμενος τα δεδομένα που καταγράφονται στο φάσμα το οποίο συλλέγεται από τον πολυκαναλικό αναλυτή, μετά από ανάλυση, δίνει πληροφορίες για τις φωτοκορυφές που εντοπίζονται στο φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχει για την ύπαρξη απλών και πολλαπλών φωτοκορυφών, προσδιορίζει την επιφάνεια (area) τους, καθώς και την αβεβαιότητα (σε 1.65σ) που τη συνοδεύει. Επίσης, αποδίδει κάθε φωτοκορυφή σε συγκεκριμένο ισότοπο, πραγματοποιώντας αυτό που προηγουμένα αναφέρθηκε ως ποιοτικός προσδιορισμός.

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ραδιενέργειας ενός δείγματος, δηλαδή τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ισοτόπων που περιέχονται σε αυτό, πρέπει να έχει προηγηθεί η διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής. Κατά τη βαθμονόμηση απόδοσης, προσδιορίζεται η απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων.

Ως απόδοση φωτοκορυφής (*full energy peak efficiency*), όπως αναφέρεται και προηγουμένως, ορίζεται ο λόγος των γεγονότων που καταγράφονται από την ανιχνευτική διάταξη και τα οποία οφείλονται σε πλήρη απορρόφηση φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας, προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων της ίδιας ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή. Η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται από τον ανιχνευτή, τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και την ενέργεια των φωτονίων. Η απόδοση αυτή είναι απολύτως απαραίτητη για τον ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων και συνήθως εκτιμάται πειραματικά, ενώ τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο συχνά αναφορά σε βαθμονομήσεις με χρήση κωδικών προσομοίωσης Monte Carlo [Peyres V. & Garcia-Torano E., 2007], [Liu Liye et al., 2006], [Hurtado S. et al., 2004], [Rodenas J. et al., 2007], [Debertin K. & Grosswendt B., 1982].

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης μιας διάταξης είναι τα ακόλουθα:

- i. Προετοιμασία εργαστηριακών προτύπων πηγών της συγκεκριμένης γεωμετρίας, χρησιμοποιώντας πιστοποιημένες πηγές (certified reference sources). Προτείνεται οι πρότυπες πηγές να εκπέμπουν φωτόνια που να καλύπτουν πλήρως την ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος.
- ii. Τοποθέτηση των προτύπων πηγών στην προκαθορισμένη θέση-γεωμετρία και συλλογή του φάσματος για επαρκές χρονικό διάστημα, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική.

- iii. γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φάσματος και προσδιορισμός των επιφανειών των αιχμών που ενδιαφέρουν.
- iv. Υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για κάθε μία ενέργεια φωτονίων με βάση τη σχέση 2.1:

$$\text{eff} = \frac{\text{area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{activity}} \quad \text{σχέση (2.1)}$$

όπου

activity : η ραδιενέργεια του εξεταζόμενου ισότοπου σε Bq,

area : η καθαρή επιφάνεια της αντίστοιχης φωτοκορυφής στο φάσμα,

time : ο χρόνος συλλογής του φάσματος (live time) σε sec,

yield : το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή,

eff : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για την υπόψη ενέργεια.

- v. Τοποθέτηση των πειραματικών σημείων (E_i , eff_i) σε κατάλληλο γράφημα (λογαριθμική κλίμακα) προκειμένου να γίνει προσαρμογή τους σε μία ή περισσότερες κατάλληλες συναρτήσεις αναδρομής, ανάλογα με τον τύπο του ανιχνευτή και την περιοχή ενεργειών. Συνήθως προκύπτουν δύο συναρτήσεις αναδρομής, μία για χαμηλές και μεσαίες ενέργειες ($\sim 200\text{keV}$) και μία για υψηλές ενέργειες ($>200\text{keV}$).

Αν χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία πρότυπες πηγές τα βήματα αυτά πρέπει να επαναληφθούν για κάθε πηγή, ενώ η τελική καμπύλη αναδρομής προκύπτει με χρήση όλων των σημείων (E_i , eff_i) που προκύπτουν.

Εφόσον έχει προηγηθεί βαθμονόμηση απόδοσης, για να υπολογιστεί η ραδιενέργεια ενός ισότοπου που ανιχνεύεται σε δείγμα, χρησιμοποιείται η σχέση (2.1) με άγνωστο αυτή τη φορά το μέγεθος *activity* (σχέση 2.2). Στην περίπτωση αυτή όλες οι άλλες παράμετροι είναι γνωστές.

$$\text{activity} = \frac{\text{area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{eff}} \quad \text{σχέση (2.2)}$$

Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης για την περίπτωση της ‘γεωμετρίας 12’ στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

2.3.3 Διαδικασία βαθμονόμησης γεωμετρίας 12 στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3, ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φίλτρων (fiber glass) διαστάσεων 8x10" που λαμβάνονται με την αντλία τύπου FR810M της εταιρείας F&J Specialty Products Inc. Μετά τη δειγματοληψία, τα φίλτρα διαστάσεων 8"x10" διπλώνονται στα μέσα των πλευρών τους, ώστε να έχουν τελικές διαστάσεις 4x5" (12.70x10.16cm). Η γεωμετρία την οποία καταλήγουν να έχουν τα φίλτρα πριν αναλυθούν στον ανιχνευτή έχει την κωδική ονομασία 'γεωμετρία 12'.

Η 'γεωμετρία 12' εισήχθη στη Διδακτορική Διατριβή (Δ.Δ.) της Ρούνη Π. (2008), όπου έγινε και η βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Στη συνέχεια της παραγράφου περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης που εφαρμόστηκε στα πλαίσια αυτής της Δ.Δ.

Για τη βαθμονόμηση ακολουθήθηκαν τα βήματα που περιγράφονται στην παράγραφο 2.3.2 και χρησιμοποιήθηκαν διάφορες πηγές που εκπέμπουν φωτόνια σε διαφορετικές ενέργειες. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της Δ.Δ. Ρούνη Π. (2008) κατασκευάστηκαν από διάφορα υλικά τα οποία ήταν διαθέσιμα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ κατά την περίοδο εκπόνησής της, τα οποία πρέπει να επισημανθεί ότι δεν ήταν όλα πιστοποιημένα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν :

- πιστοποιημένο υγρό διάλυμα QCY.44 της εταιρείας Amersham International plc, από το οποίο παρασκευάστηκε ραδιενεργό διάλυμα με την κωδική ονομασία QCY8. Το πιστοποιητικό του υγρού διαλύματος QCY.44 παρουσιάζεται στην εικόνα 2.9 στο τέλος του κεφαλαίου. Στο παρασκεύασμα QCY8, κατά την περίοδο που χρησιμοποιήθηκε, μπορούσαν να ανιχνευθούν ικανοποιητικά τα φωτόνια 1173.24keV και 1332.50keV του ^{60}Co και τα φωτόνια 661.62keV του ^{137}Cs .

- λιγνίτης πλούσιος σε φυσικό ουράνιο από την περιοχή των Σερρών (πηγή LS011) στον οποίο ανιχνεύονται όλα τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη βαθμονόμηση παρουσιάζουν τα ισότοπα ^{234}Th που εκπέμπει φωτόνια στα 63.29keV και 92.74keV και ^{235}U που εκπέμπει φωτόνια στα 143.96keV, 163.50keV και 185.72keV. Μολονότι στα φάσματα που συλλέγονται με το δείγμα αυτό ανιχνεύονται σημαντικές φωτοκορυφές από θυγατρικά του ραδονίου ^{222}Rn και του θορονίου ^{220}Rn , αυτές δεν αξιοποιήθηκαν, καθώς ήταν δύσκολη η εξασφάλιση της ραδιενεργού ισορροπίας του ραδονίου με τα θυγατρικά του.

- τέφρα από ανακύκλωση μετάλλου, η οποία είναι πλούσια σε ^{137}Cs εξαιτίας ατυχήματος τήξης πηγής ^{137}Cs η οποία εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 661.62keV (πηγή SID). Η τέφρα χρησιμοποιήθηκε χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, όπως π.χ. λειοτρίβιση, και η ομοιογένειά της δεν μπορεί να θεωρηθεί εξασφαλισμένη.

- καθαρό άλας KCl της εταιρείας MERCK (πηγή KCl) το οποίο περιέχει το ραδιενεργό ισότοπο ^{40}K που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 1460.75keV. Για την πηγή αυτή ήταν πιστοποιημένη η καθαρότητά της.

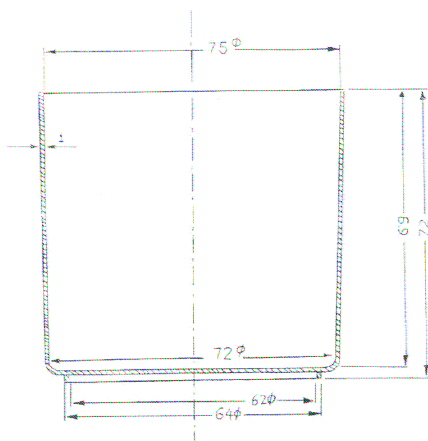
Οι πηγές βαθμονόμησης παρασκευάστηκαν με τοποθέτηση των παραπάνω υλικών σε κατάλληλες θήκες, οι οποίες κατασκευάστηκαν με εσωτερικές διαστάσεις: 127x102x1.5mm, όσο δηλαδή ήταν διαστάσεις των διπλωμένων φίλτρων 8x10” (γεωμετρία 12). Μία τέτοια θήκη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Θήκη που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή βαθμονόμησης για τη γεωμετρία 12

Οι θήκες είχαν τοποθετηθεί στον ανιχνευτή XtRa για ανάλυση, όπως γίνεται και στην περίπτωση ενός δείγματος φίλτρου, και συλλέχθηκαν τα φάσματα. Για κάθε μία φωτοκορυφή από τις παραπάνω υπολογίστηκε η απόδοση αιχμής από τη σχέση (2.1). Για την εφαρμογή της σχέσης (2.1) απαιτείται η γνώση της συγκέντρωσης των χρησιμοποιούμενων ισωτόπων. Στην περίπτωση του ραδιενεργού διαλύματος QCY8, το οποίο είναι πιστοποιημένο, η συγκέντρωση είχε ληφθεί από το σχετικό πιστοποιητικό. Ομοίως, για την πηγή KCl, η ραδιενέργειά της είχε υπολογισθεί από τη σύστασή της. Αντίθετα, για τη ραδιενεργό τέφρα και το λιγνίτη που δεν είναι πιστοποιημένες πηγές είχε ακολουθηθεί άλλη διαδικασία. Συγκεκριμένα, είχε γίνει η παραδοχή ότι, για τον ίδιο ανιχνευτή και την ίδια ενέργεια φωτονίων, η απόδοση φωτοκορυφής για μία γεωμετρία μπορεί να προσδιορισθεί συναρτήσει της γνωστής απόδοσης για μία άλλη γεωμετρία, (γεωμετρία αναφοράς), υπό την προϋπόθεση ότι υλικό των δύο πηγών βαθμονόμησης παραμένει το ίδιο και αλλάζει μόνο η μάζα του.

Ως γεωμετρία αναφοράς στη Δ.Δ. Ρούνη Π. είχε θεωρηθεί η γεωμετρία 2, για την οποία είναι βαθμονομημένοι όλοι οι ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ με πρότυπες πηγές. Πρόκειται για τη γεωμετρία κυλινδρικού δοχείου συνολικού όγκου 282cm^3 , ελαφρώς κωνικού, με συνάρτηση κωνικότητας $R(\text{cm})=0.029h(\text{cm})+3.54$ [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008], το οποίο είναι πλήρες με το προς ανάλυση δείγμα (εικόνα 2.7). Το δείγμα είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω στον ανιχνευτή.



Εικόνα 2.7: Δοχείο που χρησιμοποιείται στη γεωμετρία 2

Με βάση την παραδοχή που έγινε παραπάνω, η απόδοση φωτοκορυφής για τη ‘γεωμετρία 12’, για τη ραδιενεργό τέφρα και το λιγνίτη, υπολογίζεται μέσω της απόδοσης φωτοκορυφής για ‘γεωμετρία 2’, από την εξής σχέση:

$$\frac{\text{eff}_{2,E_i}}{\text{eff}_{12,E_i}} = \frac{\frac{\text{area}_2}{\text{time}_2 \cdot \text{yield} \cdot \text{spe_act} \cdot \text{mass}_2}}{\frac{\text{area}_{12}}{\text{time}_{12} \cdot \text{yield} \cdot \text{spe_act} \cdot \text{mass}_{12}}} \Rightarrow$$

$$\text{eff}_{12,E_i} = \text{eff}_{2,E_i} \frac{\text{area}_{12} \cdot \text{time}_2 \cdot \text{mass}_2}{\text{area}_2 \cdot \text{time}_{12} \cdot \text{mass}_{12}} \quad \text{σχέση (2.3)}$$

όπου spe_act είναι η ειδική ραδιενέργεια του υλικού της πηγής (Bq/kg), που είναι ίδια για τις δύο γεωμετρίες, και mass_2 , mass_{12} οι μάζα του υλικού σε κάθε πηγή.

Με την παραδοχή αυτή, απαλείφεται η ειδική ραδιενέργεια του υλικού της πηγής και επομένως δεν υπεισέρχεται στους υπολογισμούς η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει. Το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό, καθώς για τις μη πιστοποιημένες πηγές η αβεβαιότητα αυτή είναι είτε πολύ υψηλή είτε δύσκολο να προσδιορισθεί. Εξυπακούεται ότι, με τον τρόπο αυτό, ό,τι σφάλματα υπάρχουν κατά την ανάλυση στη μία γεωμετρία μεταφέρονται στον υπολογισμό που γίνεται για την άλλη γεωμετρία.

Στον πίνακα 2.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τη ‘γεωμετρία 12’ που έγιναν στα πλαίσια της Δ.Δ. Ρούνη Π.

Αποτελέσματα υπολογισμών απόδοσης φωτοκορυφής ανιχνευτή XtRa για γεωμετρία 12 (Δ.Δ. Ρούνη Π.)					
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Τελική Απόδοση</i>	\pm	<i>αβεβαιότητα (1.65σ,%)</i>	<i>Πηγή</i>	<i>γ-φάσμα</i>
63.29	$1.086 \cdot 10^{-1}$	\pm	1.3	LS011	LS0110412A,B,C
92.74	$1.077 \cdot 10^{-1}$	\pm	2.1	LS011	LS0110412A,B,C
143.96	$9.360 \cdot 10^{-2}$	\pm	4.4	LS011	LS0110412A
163.50	$9.085 \cdot 10^{-2}$	\pm	13.2	LS011	LS0110412A
185.72	$8.326 \cdot 10^{-2}$	\pm	0.9	LS011	LS0110412A
661.65	$3.828 \cdot 10^{-2}$	\pm	0.6	QCY8	QCY80412A
1173.24	$2.462 \cdot 10^{-2}$	\pm	1.3	QCY8	QCY80412A
1332.50	$2.257 \cdot 10^{-2}$	\pm	1.3	QCY8	QCY80412A

Πίνακας 2.1: Πειραματικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση απόδοσης του XtRa σε γεωμετρία 12 στη Δ.Δ. Ρούνη Π.

Στον πίνακα 2.1 δίνονται για κάθε φωτοκορυφή που εξετάστηκε η ενέργεια της, η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής, συνοδευόμενη από την αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1.65σ (όπως υπολογίστηκε στη συγκεκριμένη Δ.Δ.), η χρησιμοποιούμενη πηγή καθώς και τα φάσματα που συλλέχθηκαν και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της απόδοσης.

Επισημαίνεται ότι, κατά τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων των αποδόσεων στη Δ.Δ. (πίνακας 2.1) λήφθηκε υπόψη μόνο η αβεβαιότητα του μεγέθους *area* (επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής), όπως προκύπτει από τον κώδικα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης SPUNAL. Στην παρούσα Δ.Ε. επανεκτιμήθηκαν οι αβεβαιότητες, ώστε να ληφθούν υπόψη και άλλα σφάλματα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Σημειώνεται, ότι ο πλήρης προσδιορισμός των αβεβαιοτήτων των αποδόσεων που πειραματικά υπολογίζονται για την εξεταζόμενη γεωμετρία είναι απαραίτητος, δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες αβεβαιότητες, μέσω του νόμου διάδοσης σφαλμάτων, μεταφέρονται στην αβεβαιότητα προσδιορισμού της συγκέντρωσης των μετρούμενων ισοτόπων στα φίλτρα αέρα και κατά συνέπεια και του ^7Be . Αποτελούν, με τον τρόπο αυτό, σημαντική παράμετρο στη διερεύνηση των δυνατοτήτων μέτρησης της μεταβολής της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ισοτόπου σε μικρή κλίμακα χρόνου.

2.3.4 Επαναπροσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για τη γεωμετρία 12 με χρήση πειραματικών σημείων

Στα πλαίσια της παρούσης Δ.Ε. έγινε επαναπροσδιορισμός των τιμών της απόδοσης και των σχετικών αβεβαιοτήτων, με χρήση των πειραματικών δεδομένων της Δ.Δ. Ρούνη Π.. Για το σκοπό αυτό, λαμβάνονται επιπλέον υπόψη οι αβεβαιότητες λόγω: της ζύγισης των δειγμάτων, των πυρηνικών δεδομένων που ανευρίσκονται στη βιβλιογραφία, της ειδικής ραδιενέργειας των πηγών βαθμονόμησης (για τις πιστοποιημένες πηγές) και της απόδοσης της γεωμετρίας αναφοράς (για τις μη πιστοποιημένες πηγές). Επίσης, εισάγεται και η αβεβαιότητα από το συνδυασμό (στάθμιση) αποτελεσμάτων μετρήσεων που έγιναν σε διαφορετικούς ανιχνευτές.

Για τον επαναπροσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής στη γεωμετρία 12 του ανιχνευτή XtRa χρησιμοποιείται η σχέση (2.1), τροποποιημένη ως σχέση (2.4):

$$\text{eff}_{12} = \frac{\text{area}_{12}}{\text{time}_{12} \cdot \text{yield} \cdot \text{spe_act} \cdot \text{mass}_{12}} \quad \text{σχέση (2.4)}$$

Για τις τιμές των παραμέτρων area_{12} , time_{12} και mass_{12} χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις της Δ.Δ. Ρούνη Π. (2008) με τις πηγές που αναλυτικά περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τα φάσματα των πειραματικών μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 2.1. Το ποσοστό εκπομπής (yield) βρίσκεται σε βιβλιοθήκες ισοτόπων και λαμβάνεται υπόψη και η τιμή που χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL. Η ειδική ραδιενέργεια (spe_act) του κάθε ισοτόπου στην εκάστοτε πηγή, είτε λαμβάνεται από το πιστοποιητικό του κατασκευαστή - στην περίπτωση πιστοποιημένης πηγής - είτε υπολογίζεται από μετρήσεις που είχαν γίνει για την ίδια πηγή στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στη γεωμετρία αναφοράς (γεωμετρία 2) με βάση τη σχέση (2.5) που αποτελεί τροποποίηση της σχέσης (2.2):

$$\text{spe_act} = \frac{\text{area}_2}{\text{time}_2 \cdot \text{yield} \cdot \text{eff}_2 \cdot \text{mass}_2} \quad \text{σχέση (2.5)}$$

Όπως αναφέρθηκε, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στη Δ.Δ. Ρούνη Π. (2008) ήταν διάφορα και διαφορετικής φύσης. Για το λόγο αυτό, οι υπολογισμοί της ραδιενέργειας του κάθε δείγματος έγιναν με διαφορετικό τρόπο και παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε ενέργεια και κάθε δείγμα στις παρακάτω παραγράφους.

2.3.4.1 Υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για φωτόνια ενέργειας 63.29, 92.74, 143.9, 163.5 και 185.72keV

Τα φωτόνια των ενεργειών 63.29(²³⁴Th), 92.74(²³⁴Th), 143.96(²³⁵U), 163.5(²³⁵U) και 185.72keV(²³⁵U) μετρήθηκαν σε δείγμα λιγνίτη πλούσιο σε φυσικό ουράνιο από την περιοχή των Σερρών. Έχουν γίνει μετρήσεις σε δοχεία γεωμετρίας 2 και στους τέσσερις ανιχνευτές: HPGe, GeLi, LEGe και XtRa ώστε να προσδιοριστεί η ειδική ραδιενέργεια του δείγματος. Ωστόσο, μόνο στους δύο τελευταίους ανιχνεύονται φωτόνια χαμηλών ενεργειών (<200keV). Η τιμή της ειδικής ραδιενέργειας του δείγματος υπολογίζεται με βάση τη σχέση (2.5). Η επιφάνεια (area) και ο χρόνος λαμβάνονται για την κάθε ενέργεια από το αντίστοιχο φάσμα. Η καθαρή μάζα του δείγματος είναι γνωστή από την κατασκευή του δείγματος. Η απόδοση στη γεωμετρία 2 (eff₂) λαμβάνεται από τη συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 2 (εικόνα 2.4). Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι για τις παραπάνω ενέργειες φωτονίων δεν υπάρχουν πειραματικά σημεία κατά τη βαθμονόμηση της γεωμετρίας 2, συνεπώς θα πρέπει, τόσο η τιμή της απόδοσης, όσο και του σχετικού σφάλματος να προσδιορίζονται από την καμπύλη βαθμονόμησης.

Τα φάσματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας για τα ισότοπα ²³⁴Th και ²³⁵U είναι το LS011C που έχει συλλεχθεί στον ανιχνευτή LEGe (4/0.136) και το LS011E (4/0.188) που έχει συλλεχθεί στον ανιχνευτή XtRa. Και τα δύο φάσματα θεωρούνται ‘φάσματα αναφοράς’ για τη γεωμετρία 2 για τους δύο ανιχνευτές.

Οι συναρτήσεις βαθμονόμησης απόδοσης των δύο ανιχνευτών για τη γεωμετρία 2 και για την περιοχή χαμηλών ενεργειών (<200keV) είναι:

$$\text{για το LEGe: } \ln(\text{eff}) = -16.18901 + 5.740614 \cdot \ln(E) - 0.6481194 \cdot (\ln(E))^2 \text{ σχέση (2.6)}$$

$$\text{για τον XtRa: } \ln(\text{eff}) = -8.464252 + 2.501579 \cdot \ln(E) - 0.2785873 \cdot (\ln(E))^2 \text{ σχέση (2.7)}$$

όπου E είναι η ενέργεια των εκάστοτε φωτονίων σε keV.

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι, ως αβεβαιότητα της απόδοσης (1σ) η οποία εκτιμάται από τη συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης, λαμβάνεται το RMS της καμπύλης βαθμονόμησης για την ενεργειακή περιοχή αυτή, το οποίο για τον LEGe και τον XtRa έχουν εκτιμηθεί σε 2.967% και 3.395% αντίστοιχα. Κατά τη βαθμονόμηση απόδοσης που είχε γίνει στα πλαίσια της Δ.Δ. Ρούνη Π. δεν είχε ληφθεί υπόψη με κανένα τρόπο η αβεβαιότητα της απόδοσης αναφοράς που εκτιμάται από την αντίστοιχη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης.

Καθώς οι φωτοκορυφές που θα χρησιμοποιηθούν ανιχνεύονται στο υπόστρωμα, για τον υπολογισμό της ειδικής ραδιενέργειας της πηγής θα πρέπει να αφαιρεθεί και το διακριτό υπόστρωμα το οποίο λαμβάνεται από το αντίστοιχο φάσμα υποστρώματος του ανιχνευτή. Τα φάσματα υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι το BG3211 για τον LEGe (20/11/1998) και το BG4201 για τον XtRa (04/12/1999).

Επιπλέον, λόγω της χαμηλής ενέργειας των φωτονίων και του μεγάλου όγκου της γεωμετρίας 2, θα πρέπει να γίνει διόρθωση αυταπορρόφησης στη χρησιμοποιούμενη απόδοση. Έτσι, η σχέση υπολογισμού της ραδιενέργειας λαμβάνοντας υπόψη και το φαινόμενο αυτό γίνεται:

$$\text{spe_act} = \frac{\text{area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{eff} \cdot \text{mass} \cdot \eta} \quad \text{σχέση (2.8)}$$

όπου η είναι ένας συντελεστής διόρθωσης αυτοαπορρόφησης για την υπόψη γεωμετρία και ενέργεια των φωτονίων. Για τον υπολογισμό του συντελεστή η χρησιμοποιείται αριθμητική-πειραματική μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [Δ.Δ. Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Οι τιμές των συντελεστών μπορούν να ληφθούν με χρήση ενός προγράμματος του κώδικα SPUNAL που έχει την ονομασία calceff.

Τέλος, εφόσον για τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας του υλικού της πηγής χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές, θα υπολογισθεί η σταθμισμένη μέση τιμή της ειδικής ραδιενέργειας που συνδυάζει τα αποτελέσματα διαφορετικών μετρήσεων της ίδιας παραμέτρου. Η σταθμισμένη μέση τιμή μιας παραμέτρου \bar{a} υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση [Gilmore G. & Hemingway J., 1995]:

$$\bar{a} = \frac{\sum a_i w_i}{\sum w_i} \quad \text{σχέση (2.9)}$$

όπου a_i οι τιμές της παραμέτρου όπως προκύπτουν από τις i μετρήσεις και w_i παράγοντες στάθμισης για την κάθε μέτρηση, ίσοι με το αντίστροφο του τετραγώνου της τυπικής απόκλισης σ της κάθε μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική μεταβλητότητα που έχει η κάθε μέτρηση.

Για την εύρεση της αβεβαιότητας που συνοδεύει τη σταθμισμένη μέση τιμή της ειδικής ραδιενέργειας υπολογίζονται δύο μεταβλητότητες: η εσωτερική (internal ή pooled variance) και η εξωτερική (external ή weighted variance) οι οποίες υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις αντίστοιχα:

$$\text{int. var}(\bar{a}) = \frac{1}{\sum w_i} \quad \text{σχέση (2.10a)}$$

$$\text{ext. var}(\bar{a}) = \frac{\sum [a_i - \bar{a}]^2 w_i}{\sum w_i} \quad \text{σχέση (2.10β)}$$

Η εσωτερική μεταβλητότητα λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες της κάθε μέτρησης, ενώ η εξωτερική μεταβλητότητα λαμβάνει υπόψη την κατανομή των μετρήσεων γύρω από τη μέση τιμή. Ως αβεβαιότητα της σταθμισμένης μέσης τιμή προτείνεται να λαμβάνεται η μεγαλύτερη από τις δύο αυτές μεταβλητότητες [Gilmore G. & Hemingway J., 1995].

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των συντελεστών στάθμισης των διαφορετικών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται οι μη κοινές αβεβαιότητες (τυχαίες και συστηματικές) της κάθε μέτρησης. Γενικότερα και ανάλογα με το μετρούμενο μέγεθος ως τυχαίες μπορούν να θεωρηθούν οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν το μέγεθος επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, ενώ ως συστηματικές η αβεβαιότητα της ζύγισης των δειγμάτων, των πυρηνικών δεδομένων που ανευρίσκονται στη βιβλιογραφία, της ειδικής ραδιενέργειας των πηγών βαθμονόμησης (για τις πιστοποιημένες πηγές) και της απόδοσης της γεωμετρίας αναφοράς (για τις μη πιστοποιημένες πηγές). Κατά κύριο λόγο δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη στάθμιση συστηματικές αβεβαιότητες όπως η αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης (κοινή για μέτρηση συγκεκριμένου ισότοπου σε όλους τους ανιχνευτές). Μετά τη διαδικασία της στάθμισης χρησιμοποιείται η μέγιστη από την εσωτερική και εξωτερική μεταβλητότητα και συνδυάζεται, για τον υπολογισμό του συνολικού τελικού σφάλματος, με τις αβεβαιότητες που δεν λήφθηκαν υπόψη στη στάθμιση (κοινές αβεβαιότητες). Ο συνδυασμός των αβεβαιοτήτων γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\sigma = \sqrt{\max(\text{int.var}, \text{ext.var}) + \sigma_i^2} \quad \text{σχέση (2.11)}$$

Όπου $\max(\text{int.var}, \text{ext.var})$ η μέγιστη από την εσωτερική και εξωτερική μεταβλητότητα και σ_i η i -κοινή αβεβαιότητα των υπό στάθμιση μεγεθών.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω στην περίπτωση του δείγματος λιγνίτη, αναφέρεται ότι ως κοινή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί η αβεβαιότητα της ζύγισης και η αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης.

Αναφορικά με την *αβεβαιότητα της ζύγισης* λαμβάνεται υπόψη η ακρίβεια του ζυγού, 0.1gr [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008]. Κατά τη ζύγιση δείγματος και για συγκεκριμένη ένδειξη δ του ζυγού, η πιθανότητα η πραγματική μάζα του δείγματος να έχει οποιαδήποτε τιμή εντός του διαστήματος $[\delta \pm 0.05\text{gr}]$ παραμένει σταθερή. Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της μέτρησης προτείνεται να χρησιμοποιείται η ορθογωνική κατανομή [ISO-GUM, 1995]. Στην κατανομή αυτή η τυπική απόκλιση

είναι ίση με την αβεβαιότητα διαιρεμένη με την ποσότητα $2\cdot\sqrt{3}$. Επομένως, η τυπική απόκλιση της μέτρησης με τη συγκεκριμένη ζυγαριά είναι $0.1/(2\cdot\sqrt{3}) = 0.029\text{gr}$. Για το δείγμα γεωμετρίας 2 που έχει μάζα 205.gr προκύπτει ότι η αβεβαιότητα της ζύγισης είναι 0.014% (1σ). Η αβεβαιότητα αυτή παραμένει ίδια για όλες τις ενέργειες καθώς πρόκειται για ένα δείγμα με σταθερή μάζα.

Για την *αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης* χρησιμοποιείται το πιστοποιητικό του προμηθευτή. Τα σημεία της καμπύλης βαθμονόμησης που αντιστοιχούν στα εξεταζόμενα στην παρούσα παράγραφο φωτόνια έχουν προκύψει με χρήση ραδιενεργού διαλύματος QCY8 που παρασκευάστηκε από πιστοποιημένο ραδιενεργό παρασκεύασμα QCY.44 [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008]. Στο πιστοποιητικό του παρασκευάσματος αυτού (εικόνα 2.9 στο τέλος του κεφαλαίου) υπάρχουν οι αβεβαιότητες της πηγής για τις περιεχόμενες ενέργειες φωτονίων. Ωστόσο, το πρότυπο αυτό δεν περιέχει τα ^{234}Th (63.29keV και 92.74keV) και ^{235}U (143.96keV, 163.5keV και 185.72keV). Για το λόγο αυτό, έγινε η παραδοχή ότι η αβεβαιότητα εξαιτίας της πηγής βαθμονόμησης είναι η μεγαλύτερη από τις αβεβαιότητες που δίνει ο προμηθευτής στο πιστοποιητικό του στην εξεταζόμενη ενεργειακή περιοχή (60-200keV). Έτσι, η αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης θεωρείται 3.70% (3σ), δηλαδή 1.23% (1σ). Η αβεβαιότητα αυτή παραμένει ίδια για όλες τις χαμηλές ενέργειες που μελετούνται στην παρούσα παράγραφο καθώς έχουν μετρηθεί όλες στην ίδια γεωμετρία με βάση την ίδια πηγή, το ραδιενεργό διάλυμα QCY8.

Στις παραγράφους που ακολουθούν εξειδικεύονται τα παραπάνω και παραθέτονται λεπτομερείς υπολογισμοί της απόδοσης φωτοκορυφής για κάθε μία ενέργεια φωτονίου της υπόψη πηγής.

2.3.4.1.1 Φωτόνια ενέργειας 63.29keV (^{234}Th)

Ο υπολογισμός της απόδοσης για τη γεωμετρία 12 στην ενέργεια αυτή θα γίνει σε δύο βήματα:

- i. υπολογισμός της ραδιενέργειας του ^{234}Th και της αντίστοιχης αβεβαιότητας,
- ii. υπολογισμός της απόδοσης για τη γεωμετρία 12.

Ο προσδιορισμός της ραδιενέργειας του ^{234}Th , όπως προκύπτει από τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV, έγινε με βάση τις μετρήσεις που είχαν γίνει σε γεωμετρία 2. Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω βρέθηκαν οι καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (cps) για τη γεωμετρία 2, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV						
	<i>cps</i> φάσματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	<i>cps</i> υποστρώματος	Αβεβαιότητα υποστρώματος (1σ, %)	Καθαρά <i>cps</i>	Αβεβαιότητα καθαρών <i>cps</i> (1σ, %)
LEGe	6.50	0.30	0.0129	2.30	6.48	0.30
XtRa	12.5	1.94	0.0073	7.21	12.50	1.94

Πίνακας 2.2: Cps για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

Με βάση της καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης (σχέσεις 2.6 και 2.7) για τον κάθε ανιχνευτή υπολογίζονται οι αποδόσεις των ανιχνευτών για τη συγκεκριμένη ενέργεια, οι οποίες είναι ίσες με:

- $\text{eff}(\text{LEGe}) = 0.0294 \pm 2.97\%$ και
- $\text{eff}(\text{XtRa}) = 0.056 \pm 3.39\%$.

Από το πρόγραμμα calceff βρίσκονται οι συντελεστές διόρθωσης για το φαινόμενο της αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια για τους δύο ανιχνευτές:

- για τον LEGe είναι 1.122 και
- για τον XtRa 1.126.

Για την εύρεση του ποσοστού εκπομπής (yield) του ^{234}Th για φωτόνια 63.29keV χρησιμοποιήθηκαν διάφορες βιβλιοθήκες ισοτόπων οι οποίες όμως έδιναν διάφορες τιμές για το ποσοστό αυτό: όπως 0.038 [Radiation decay v.3.6] 0.037 [JEFF 3.1.1]. Ωστόσο, στη Δ.Δ. Ρούνη Π. (2008) έγινε χρήση των δεδομένων της βιβλιοθήκης του κώδικα SPUNAL όπου για τη συγκεκριμένη ενέργεια προβλέπεται ποσοστό εκπομπής ίσο με 0.039. Για να μην υπάρχουν διαφορές οι οποίες να οφείλονται σε διαφορετικές τιμές του ποσοστού εκπομπής, δεδομένου ότι οι τελικά υπολογιζόμενες ραδιενέργειες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες της Δ.Δ. Ρούνη Π., αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί για το ποσοστό εκπομπής η τιμή 0.039. Παράλληλα, εισάγεται επιπλέον αβεβαιότητα λόγω της διαφοράς των τιμών του yield της βιβλιογραφίας, ίση με την τυπική απόκλιση όλων των τιμών του ποσοστού εκπομπής. Τελικά, το ποσοστό εκπομπής του ^{234}Th για φωτόνια 63.29keV είναι $0.039 \pm 1.56\%$.

Οι τελικές τιμές της ραδιενέργειας (R) του δείγματος για το ^{234}Th από τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης, με βάση τη σχέση (2.8) και τους χρησιμοποιούμενους συντελεστές από το πρόγραμμα calceff, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV			
	<i>R</i> (Bq/kg)	Συντελεστής αυταπορρόφησης	<i>R</i> διορθωμένο (Bq/kg)
LEGe	27613	1.122	24611
XtRa	27878	1.126	24758

Πίνακας 2.3: Ραδιενέργεια ραδιενέργειας του ^{234}Th , όπως εκτιμάται από τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

Τελικά, η τιμή της ραδιενέργειας του ^{234}Th , όπως εκτιμάται από τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV, υπολογίστηκε με κατάλληλη στάθμιση, από τη σχέση 2.9. Όσον αφορά στον υπολογισμό των συντελεστών στάθμισης, για κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η απόλυτη αβεβαιότητα της απόδοσης κάθε ανιχνευτή (σ_{eff}) για τη γεωμετρία 2 και η απόλυτη αβεβαιότητα της αντίστοιχης επιφάνειας (σ_{cps}). Από τις δύο αβεβαιότητες υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις (σ) για κάθε μία από τις δύο τιμές της ραδιενέργειας (i) από τη σχέση:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\text{eff},i}^2 + \sigma_{\text{cps},i}^2} \quad \text{σχέση (2.12)}$$

Με βάση την τυπική απόκλιση αυτή υπολογίζονται οι παράγοντες στάθμισης w_i που, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι το αντίστροφο του τετραγώνου της τυπικής απόκλισης. Έτσι, μπορούν να υπολογιστούν όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις (2.9) και (2.10α και β) και να βρεθεί η σταθμισμένη μέση τιμή \bar{R} καθώς και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των μεγεθών αυτών παρατίθενται στο Παράρτημα Α, ενώ προκύπτει η τιμή $\bar{R} = 24700 \text{ Bq/kg} \pm 2.37\%$. Κατά τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε για τη σταθμισμένη τιμή της ραδιενέργειας η τιμή πριν τη στρογγυλοποίηση (24664 Bq/kg). Επισημαίνεται ότι η παραπάνω αβεβαιότητα είναι μόνο η τυχαία.

Η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV είναι ίση με $\text{unc.}(R) = \sqrt{\sigma_{\text{στάθμισης}}^2 + \sigma_{\text{ζύγισης}}^2 + \sigma_{\text{πηγής βραθμονόμενης}}^2 + \sigma_{\text{ποσοστού εκπομπής}}^2} = 3.10\%$

Έτσι, τελικά η ραδιενέργεια ^{234}Th από τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV είναι:

$$\boxed{R(63.29\text{keV}) = 24700 \text{ Bq/kg} \pm 3.10\%}$$

Με γνωστή πλέον την τιμή της ραδιενέργειας του ^{234}Th είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV για τη γεωμετρία 12. Για τη συγκεκριμένη ενέργεια και τη γεωμετρία 12 χρησιμοποιούνται τα φάσματα LS0110412A,B,C [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008] με κατάλληλη στάθμιση των κρούσεων στη

μονάδα του χρόνου-cps (Παράρτημα Α) για τον υπολογισμό της σταθμισμένης μέσης τιμής του ρυθμού καταγραφόμενων παλμών και της αβεβαιότητας που τον συνοδεύει (1σ). Τελικά προκύπτει η τιμή $cps_{12} = 1.30cps \pm 2.76\%$.

Ο υπολογισμός των καθαρών cps_{12} φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV						
	cps_{12} φάσματος	Αβεβαιότητα cps_{12} (1σ, %)	cps υποστρώματος	Αβεβαιότητα υποστρώματος (1σ, %)	Καθαρά cps_{12}	Αβεβαιότητα καθαρών cps (1σ, %)
XtRa	1.30	2.76	0.0073	1.30	1.29	2.78

Πίνακας 2.4: Υπολογισμός καθαρών cps_{12} για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

Η απόδοση φωτοκορυφής για τα συγκεκριμένα φωτόνια (σχέση 2.4) είναι:

$$eff_{12}(63.29keV) = \frac{1.29}{0.039 \cdot 0.01244 \cdot 25998} = 0.1079$$

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας αυτής της απόδοσης φωτοκορυφής πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες λόγω:

- ζύγισης που εκτιμήθηκε σε 0.014%,
- επιφάνειας (cps_{12}) που εκτιμήθηκε σε 2.76%,
- ραδιενέργειας (στάθμιση) που εκτιμήθηκε σε 3.10% και
- ποσοστού εκπομπής που εκτιμήθηκε σε 1.56%.

Έτσι, η αβεβαιότητα της παραπάνω απόδοσης φωτοκορυφής είναι:

$$unc.eff_{12}(63.29keV) = \sqrt{unc.^2_{\zeta\gamma\text{ισης}} + unc.^2_{cps} + unc.^2_{\text{στάθμισης}} + unc.^2_{\text{ποσοστού εκπομπής}}} = 4.45\% .$$

Τελικά, η απόδοση φωτοκορυφής για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV είναι:

$$eff_{12}(63.29keV) = 0.108 \pm 4.45\%$$

2.3.4.1.2 Φωτόνια ενέργειας 92.74keV (^{234}Th)

Η απόδοση για τη γεωμετρία 12 στην ενέργεια αυτή θα γίνει σε δύο βήματα:

- υπολογισμός της ραδιενέργειας του ^{234}Th και του αντίστοιχου σφάλματος,
- υπολογισμός της απόδοσης για τη γεωμετρία 12.

Πρέπει να επισημανθεί ότι για την περίπτωση αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τιμή της ραδιενέργειας του ^{234}Th που υπολογίστηκε μέσω των φωτονίων 63.29keV, θεωρήθηκε όμως σκόπιμο να γίνει νέος υπολογισμός ο οποίος θα επέτρεπε και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω για

τη γεωμετρία 2 βρέθηκαν τα καθαρά counts per second (cps), όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV						
	<i>cps₂</i> <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>cps₂</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>υποστρώματος</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>Καθαρά</i> <i>cps₂</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>καθαρών</i> <i>cps₂ (1σ, %)</i>
LEGe	8.31	4.67	0.0192	3.27	8.29	4.68
XtRa	16.1	1.45	0.0158	3.64	16.0	1.46

Πίνακας 2.5: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών (σχέσεις 2.6 και 2.7) στη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων είναι ίσες με:

- $\text{eff}(\text{LEGe})=0.0307 \pm 2.97\%$ και
- $\text{eff}(\text{XtRa})=0.058 \pm 3.40\%$.

Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι το ^{234}Th εκπέμπει δύο διαφορετικά φωτόνια σε πολύ κοντινές ενέργειες και με πολύ κοντινά ποσοστά εκπομπής (92.80keV με ποσοστό εκπομπής 0.026884 και 92.38keV με ποσοστό εκπομπής 0.027248 [Radiation Decay v.3.6]). Τα φωτόνια αυτά δεν μπορούν να διακριθούν ως ξεχωριστά στην ανάλυση του φάσματος, λόγω της διακριτικής ικανότητας των χρησιμοποιούμενων ανιχνευτικών διατάξεων και επομένως καταμετρώνται σε μία κοινή φωτοκορυφή. Για το λόγο αυτό, ως ποσοστό εκπομπής για την ενέργεια των 92.74keV λαμβάνεται το άθροισμα των ποσοστών εκπομπής των δύο φωτονίων (0.054132 [Radiation Decay v.3.6], 0.052096 [JEFF 3.1.1]). Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται διαφορά στις τιμές που υπάρχουν στις βιβλιοθήκες ισοτόπων των διαφόρων βιβλιογραφικών αναφορών. Όπως και προηγουμένως, χρησιμοποιείται η τιμή που χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL και εκτιμάται η αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής για την κάλυψη των διαφορών της τιμής στις βιβλιογραφικές αναφορές. Έτσι, το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV είναι $0.0531 \pm 2.71\%$.

Οι τελικές τιμές της ραδιενέργειας (σχέση (2.4)) του δείγματος για το ^{234}Th από τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης με βάση τη σχέση (2.8), φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV			
	R (Bq/kg)	Συντελεστής αυταπορρόφησης	R διορθωμένο
LEGe	24806	1.104	22470
XtRa	25434	1.107	22976

Πίνακας 2.6: Ραδιενέργεια του ^{234}Th όπως εκτιμάται από τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) βρίσκεται η σταθμισμένη μέση τιμή \bar{R} καθώς και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει $\bar{R} = 22800 \text{ Bq/kg} \pm 3.07\%$. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των μεγεθών αυτών παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα της ζύγισης 0.014%(1σ), την αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης 1.23%(1σ) και την αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής 2.71%(1σ), η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV είναι 4.28%. Τελικά:

$$R(92.74\text{keV}) = 22800 \text{ Bq/kg} \pm 4.28\%$$

Η παραπάνω τιμή της ειδικής ραδιενέργειας του ^{234}Th δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από αυτήν που εκτιμήθηκε από τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV. Με γνωστή πλέον την τιμή της ραδιενέργειας του ^{234}Th είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για την ενέργεια 92.74keV και τη γεωμετρία 12. Σύμφωνα με τα φάσματα LS0110412A,B,C στον ανιχνευτή XtRa για φωτόνια ενέργειας 92.74keV γίνεται η στάθμιση των cps για τη γεωμετρία 12 (Παράρτημα Α) και προκύπτει η τιμή $\text{cps}_{12} = 1.81 \pm 0.71\%$.

Ο υπολογισμός των καθαρών cps_{12} φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV						
	cps_2 φάσματος	Αβεβαιότητα cps_{12} (1σ, %)	cps υποστρώματος	Αβεβαιότητα υποστρώματος (1σ, %)	Καθαρά cps_{12}	Αβεβαιότητα καθαρών cps_{12} (1σ, %)
XtRa	1.81	0.71	0.0073	7.21	1.80	0.71

Πίνακας 2.7: Υπολογισμός καθαρών cps_{12} για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

Έτσι, η απόδοση του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12 και για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει εκτιμάται σε:

$$\text{eff}_{12}(92.74\text{keV}) = 0.119 \pm 5.12\%$$

2.3.4.1.3 Φωτόνια ενέργειας 143.76keV (^{235}U)

Η απόδοση για τη γεωμετρία 12 στην ενέργεια αυτή θα γίνει σε δύο βήματα:

- i. υπολογισμός της ραδιενέργειας του ^{235}U και του αντίστοιχου σφάλματος,
- ii. υπολογισμός της απόδοσης για τη γεωμετρία 12.

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της απόδοσης είναι ο προσδιορισμός της αντίστοιχης ραδιενέργειας του ^{235}U , ο οποίος έγινε με βάση τις μετρήσεις που είχαν γίνει σε γεωμετρία 2. Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω για τη γεωμετρία 2 βρίσκουμε τα καθαρά counts per second (cps), όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 143.76keV						
	<i>cps₂</i> <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>cps₁₂</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>υποστρώματος</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>Καθαρά</i> <i>cps₂</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>καθαρών</i> <i>cps₂ (1σ, %)</i>
LEGe	1.09	1.15	0.0017	22.0	1.09	1.15
XtRa	2.24	3.09	0.0016	34.9	2.24	3.09

Πίνακας 2.8: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών στη συγκεκριμένη ενέργεια (σχέσεις 2.6 και 2.7) είναι ίσες με:

- $\text{eff}(\text{LEGe})=0.02554 \pm 2.97\%$ και
- $\text{eff}(\text{XtRa})=0.0543 \pm 3.40\%$.

Το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV του ^{235}U βρίσκεται ίσο με 0.105 [Radiation Decay v.3.6], 0.1095 [JEFF 3.1.1] και 0.1094 [M.-M. Βέ, et. al., 2004]. Από τις τιμές αυτές υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση που τη συνοδεύει και αυτές είναι οι τιμές που χρησιμοποιούνται και στους υπολογισμούς. Αυτό γίνεται γιατί για τον υπολογισμό των αποδόσεων στη Δ.Δ. Ρούνη Π. (2008), χρησιμοποιήθηκε ο λόγος των αποδόσεων της γεωμετρίας 12 προς τη γεωμετρία 2. Από τη σχέση (2.3) προκύπτει ότι κατά τη διαδικασία υπολογισμού του λόγου αυτού οι τιμές των ποσοστών εκπομπής απαλείφονται και επομένως δεν υπάρχει ανάγκη για ακριβή καθορισμό της τιμής τους. Επομένως, βρίσκεται ότι το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV είναι $0.108 \pm 2.37\%$.

Με τη βοήθεια του προγράμματος calceff βρίσκουμε τους συντελεστές αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια για τους δύο ανιχνευτές:

- για τον LEGe είναι 1.109
- για τον XtRa είναι 1.112

Η διόρθωση της ραδιενέργειας για αυταπορρόφηση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 143.76keV			
	<i>R</i> (Bq/kg)	Συντελεστής αυταπορρόφησης	<i>R</i> διορθωμένο
LEGe	1928	1.109	1739
XtRa	1861	1.112	1674

Πίνακας 2.9: Ραδιενέργεια του ^{235}U όπως προκύπτει από τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV

Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) υπολογίζεται η σταθμισμένη μέση τιμή \bar{R} καθώς και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των μεγεθών αυτών παρατίθενται στο Παράρτημα Α, ενώ προκύπτει η τιμή $\bar{R} = 1720 \text{ Bq/kg} \pm 2.62\%$.

Λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα της ζύγισης που εκτιμήθηκε ίση με 0.014%(1σ), την αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης που είναι 1.23%(1σ) και την αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής που είναι 2.37%(1σ), η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV είναι 3.74%. Έτσι, η ραδιενέργεια για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV είναι:

$$R(143.76\text{keV}) = 1720 \text{ Bq/kg} \pm 3.74\%$$

Με γνωστή πλέον την τιμή της ραδιενέργειας του ^{235}U είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης για την ενέργεια 143.76keV για τη γεωμετρία 12. Σύμφωνα με το φάσμα LS0110412A στον ανιχνευτή XtRa, για φωτόνια ενέργειας 143.76keV ο αριθμός των καθαρών cps για τη γεωμετρία 12 φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 143.76keV						
	<i>cps</i> ₁₂ φάσματος	Αβεβαιότητα <i>cps</i> ₁₂ (1σ, %)	<i>cps</i> υποστρώματος	Αβεβαιότητα υποστρώματος (1σ, %)	Καθαρά <i>cps</i> ₁₂	Αβεβαιότητα καθαρών <i>cps</i> ₁₂ (1σ, %)
XtRa	0.233	2.67	0.0073	7.21	0.226	2.76

Πίνακας 2.10: Υπολογισμός καθαρών *cps*₁₂ για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV

Έτσι, η απόδοση του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12 και για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει είναι:

$$\text{eff}_{12}(143.76\text{keV}) = 0.0979 \pm 5.22\%$$

2.3.4.1.4 Φωτόνια ενέργειας 163.35keV (^{235}U)

Η απόδοση για τη γεωμετρία 12 στην ενέργεια αυτή θα γίνει σε δύο βήματα:

- i. υπολογισμός της ραδιενέργειας του ^{234}Th και του αντίστοιχου σφάλματος,
- ii. υπολογισμός της απόδοσης για τη γεωμετρία 12.

Πρέπει να επισημανθεί ότι για την περίπτωση αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τιμή της ραδιενέργειας του ^{235}U που υπολογίστηκε μέσω των φωτονίων 143.76 keV, θεωρήθηκε όμως σκόπιμο να γίνει νέος υπολογισμός, ο οποίος θα επέτρεπε και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Με βάση τα φάσματα για τη γεωμετρία 2 που χρησιμοποιήθηκαν και στις άλλες ενέργειες βρίσκουμε τα καθαρά counts per second (cps), όπως φαίνεται παρακάτω:

Φωτόνια ενέργειας 163.35keV						
	cps_2 φάσματος	Αβεβαιότητα cps_2 (1σ, %)	cps υποστρώματος	Αβεβαιότητα υποστρώματος (1σ, %)	Καθαρά cps_2	Αβεβαιότητα καθαρών cps_2 (1σ, %)
LEGe	0.318	3.58	0.0011	33.2	0.317	3.59
XtRa	0.683	9.64	0.0008	69.5	0.682	9.65

Πίνακας 2.11: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών (σχέσεις (2.6) και (2.7)) στη συγκεκριμένη ενέργεια είναι ίσες με:

- $\text{eff}(\text{LEGe}) = 0.0231 \pm 2.97\%$ και
- $\text{eff}(\text{XtRa}) = 0.052 \pm 3.40\%$.

Το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV του ^{235}U βρίσκεται ίσο με 0.0470 [Radiation Decay v.3.6], 0.0507 [JEFF 3.1.1] και 0.0508 [M.-M. Βέ, et. al., 2004]. Από τις τιμές αυτές υπολογίζεται πάλι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση που τη συνοδεύει γιατί και για αυτή την ενέργεια στον κώδικα SPUNAL χρησιμοποιήθηκαν λόγοι αποδόσεων οπότε δεν υπήρχε ανάγκη για ακριβή καθορισμό τους. Έτσι, βρίσκεται ότι το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια 163.35keV είναι $0.047 \pm 2.37\%$.

Από το πρόγραμμα calceff βρίσκονται οι συντελεστές αυταπορρόφησης:

- για τον LEGe είναι 1.115
- για τον XtRa είναι 1.127

Η διόρθωση της ραδιενέργειας με βάση τη σχέση (2.8) για αυταπορρόφηση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 163.35keV			
	<i>R</i> (Bq/kg)	<i>Συντελεστής</i> <i>αυταπορρόφησης</i>	<i>R</i> <i>διορθωμένο</i>
LEGe	1348	1.115	1209
XtRa	1285	1.127	1140

Πίνακας 2.12: Ραδιενέργεια του ^{235}U όπως υπολογίζονται από τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV

Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) υπολογίζεται η σταθμισμένη μέση τιμή \bar{R} καθώς και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει $\bar{R} = 1200 \text{ Bq/kg} \pm 4.24\%$. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των μεγεθών αυτών παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα της ζύγισης που είναι 0.014%(1σ), την αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης που είναι 1.23%(1σ) και την αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής που είναι 2.37%(1σ), η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας είναι 4.42%. Έτσι, η ραδιενέργεια του ^{235}U όπως υπολογίζονται από τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV είναι:

$$R(163.35\text{keV}) = 1200 \text{ Bq/kg} \pm 4.42\%$$

Η παραπάνω τιμή της ειδικής ραδιενέργειας του ^{235}U διαφέρει στατιστικά σημαντικά από αυτήν που εκτιμήθηκε από τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV, κάτι που θα μπορούσε ενδεχομένως να αποδοθεί στα ποσοστά εκπομπής. Με γνωστή πλέον την τιμή της ραδιενέργειας του ^{235}U είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης για την ενέργεια 163.35keV για τη γεωμετρία 12. Σύμφωνα με το φάσμα LS0110412A στον ανιχνευτή XtRa, για φωτόνια ενέργειας 163.35keV ο αριθμός των καθαρών cps για τη γεωμετρία 12 είναι:

Φωτόνια ενέργειας 163.35keV						
	<i>cps</i> ₁₂ <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>cps</i> ₁₂ (1σ, %)	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>υποστρώματος</i> (1σ, %)	<i>Καθαρά</i> <i>cps</i> ₁₂	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>καθαρών</i> <i>cps</i> ₁₂ (1σ, %)
XtRa	0.072	8.00	0.0008	69.5	0.071	8.12

Πίνακας 2.13: Υπολογισμός καθαρών *cps*₁₂ για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV

Έτσι, η απόδοση του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12 και για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει είναι:

$$\text{eff}_{12}(163.35\text{keV}) = 0.097 \pm 10.2\%$$

2.3.4.1.5 Φωτόνια ενέργειας 185.72keV (^{235}U)

Για τα φωτόνια ενέργειας 185.72keV που εκπέμπονται από το ^{185}U δεν έγινε στα πλαίσια της Δ.Ε. υπολογισμός της απόδοσης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τις παραπάνω ενέργειες. Η διπλή φωτοκορυφή που σχηματίζεται περί την ενέργεια των 186keV, οφείλεται και στα φωτόνια ενέργειας 186.25keV του ^{226}Ra , το οποίο συνυπάρχει στο υπόψη δείγμα. Η διπλή αυτή φωτοκορυφή αναλύεται μόνο υπό ορισμένες προϋποθέσεις και με ορισμένους ανιχνευτές. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια που θα πρέπει να αποδίδεται στα φωτόνια ενέργειας 185.72keV του ^{185}U μόνο υπό προϋποθέσεις μπορεί να είναι διαθέσιμη. Επισημαίνεται ότι στα πλαίσια της Δ.Δ. Ρούνη Π. (2008), χρησιμοποιήθηκε ολόκληρη η επιφάνεια της φωτοκορυφής περί τα 186keV αδιακρίτως της προέλευσής τους.

2.3.4.2 Φωτόνια ενέργειας 661.62keV (^{137}Cs)

Τα πειραματικά δεδομένα για τα φωτόνια της ενέργειας αυτής προέρχονται από φάσματα που προέρχονται από δύο δείγματα:

- i. από το φάσμα QCY80412A του παρασκευάσματος QCY8 γεωμετρίας 12 (πιστοποιημένο υλικό) και
- ii. από τα δύο φάσματα SID0412A & SID0412B παρασκευάσματος Sidenor (μη-πιστοποιημένο υλικό).

Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι το ^{137}Cs διασπάται σε $^{137\text{m}}\text{Ba}$ εκπέμποντας β^- ακτινοβολία. Τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV που ανιχνεύονται και ταυτοποιούν το ^{137}Cs είναι του $^{137\text{m}}\text{Ba}$, όταν αυτό στη συνέχεια αποδιεγείρεται σε ^{137}Ba . Στις βιβλιοθήκες ισοτόπων όπου αναζητήθηκαν τιμές για το ποσοστό εκπομπής στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., το ποσοστό εκπομπής των συγκεκριμένων φωτονίων δινόταν με διαφορετικές μορφές και γι' αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σημείο αυτό. Συγκεκριμένα, βρέθηκαν οι τιμές:

- 0.9007 [JEFF 3.1.1] και 0.8998 [Radiation Decay v.3.6], που αντιστοιχούν στην πιθανότητα να εκπεμφθεί ένα φωτόνιο από το $^{137\text{m}}\text{Ba}$ και να προκύψει το ^{137}Ba .

- 0.851 [SPUNAL], 0.852 [Debertin, 1988] και 0.8499 [Bé M.-M. et. al., 2004] που αντιστοιχούν στην πιθανότητα να διασπαστεί το ^{137}Cs σε $^{137\text{m}}\text{Ba}$, σε τέτοια ενεργειακή στάθμη ώστε να εκπεμφθεί φωτόνιο ενέργειας 661.62keV.

Πράγματι, η πιθανότητα το ^{137}Cs να εκπέμψει β^- ακτινοβολία που θα οδηγήσει στην κατάλληλη ενεργειακή στάθμη όπου είναι δυνατή η εκπομπή φωτονίου ενέργειας 661.62keV από το $^{137\text{m}}\text{Ba}$ είναι ίση με 0.9436 [Bé M.-M. et al, 2004]. Τελικά, η

πιθανότητα να διασπαστεί το ^{137}Cs με β^- διάσπαση και στη συνέχεια να εκπεμφθεί το φωτόνιο ενέργειας 661.62keV είναι το γινόμενο των δύο πιθανοτήτων, δηλαδή $0.90 \times 0.9436 = 0.851$.

Στους υπολογισμούς λοιπόν πρέπει να χρησιμοποιείται το ποσοστό που εκφράζει τη δεύτερη περίπτωση. Λαμβάνοντας υπόψη και τη μικρή κύμανση των τιμών από τις διάφορες βιβλιογραφικές πηγές ($0.8499 \div 0.852$), στα πλαίσια της Δ.Ε. αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί ως ποσοστό εκπομπής φωτονίων ενέργειας 661.65keV η τιμή $0.851 \pm 0.12\%$.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της απόδοσης του ανιχνευτή XtRa στη γεωμετρία 12, ξεχωριστά για κάθε ένα από τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν (QCY8 και ραδιενεργός τέφρα Sidenor).

2.3.5.2.1 Φωτόνια ενέργειας 661.62keV από το παρασκεύασμα QCY8

Η ειδική ραδιενέργεια και η αντίστοιχη αβεβαιότητα του δείγματος για το συγκεκριμένο ραδιενεργό παρασκεύασμα υπολογίζεται βάσει των δεδομένων του πιστοποιητικού του ίση με $18.332 \text{ kBq/kg} \pm 1.03\%$ (1σ) [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008]. Η ραδιενέργεια αυτή έχει υπολογιστεί για την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος με το συγκεκριμένο δείγμα.

Στο φάσμα υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa δεν ανιχνεύεται φωτοκορυφή στα 661.62keV, επομένως η επιφάνεια που καταγράφεται στο φάσμα για τη συγκεκριμένη ενέργεια είναι η καθαρή και δεν χρειάζεται περαιτέρω αφαίρεση υποστρώματος. Η επιφάνεια αυτή με βάση το φάσμα QCY80412A σε όρους cps είναι $19.58 \pm 0.364\%$ (1σ).

Η μάζα του δείγματος γεωμετρίας 12 λαμβάνεται από το φάσμα και βρίσκεται ότι είναι 32.78gr. Η ακρίβεια της ζύγισης, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι 0.0029gr, επομένως η αβεβαιότητα της μάζας είναι 0.088% (1σ).

Από τα παραπάνω δεδομένα, με βάση τη σχέση (2.1), υπολογίζεται η απόδοση του ανιχνευτή XtRa για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV, το ραδιενεργό διάλυμα QCY8 και τη γεωμετρία 12:

$$\text{eff}_{12}(661.62\text{keV}) = \frac{19.58}{0.851 \cdot 0.03278 \cdot 18332} = 0.03829$$

Η αβεβαιότητα της απόδοσης αυτής προκύπτει από την αβεβαιότητα της ζύγισης 0.088%, την αβεβαιότητα των κρούσεων 0.364%, την αβεβαιότητα της ραδιενέργειας

της πηγής 1.03% και την αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής 0.12%. Έτσι η συνολική αβεβαιότητα που συνοδεύει την παραπάνω απόδοση είναι :

$$\text{unc. eff}_{12\text{-QCY8}}(661.65\text{keV}) = \sqrt{\text{unc.}_{\text{ζύγισης}}^2 + \text{unc.}_{\text{cps}}^2 + \text{unc.}_{\text{στάθμισης}}^2 + \text{unc.}_{\text{ποσοστού εκπομπής}}^2} = 1.10\%$$

Επομένως η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τα φωτόνια του QCY8 ενέργειας 661.65keV είναι:

$$\text{eff}_{12\text{-QCY8}}(661.62\text{keV}) = 0.0383 \pm 1.10\%$$

2.3.4.2.2 Φωτόνια ενέργειας 661.62keV από το παρασκευάσμα τέφρας

Sidenor

Η απόδοση που εκτιμάται από την τέφρα γίνεται σε δύο βήματα:

- i. υπολογισμός της ραδιενέργειας του ^{137}Cs και του αντίστοιχου σφάλματος,
- ii. υπολογισμός της απόδοσης για τη γεωμετρία 12.

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της απόδοσης είναι ο προσδιορισμός της αντίστοιχης ραδιενέργειας του ^{137}Cs , ο οποίος έγινε με βάση τις μετρήσεις που είχαν γίνει σε γεωμετρία 2. Η ραδιενέργεια του παρασκευάσματος της τέφρας υπολογίζεται από μετρήσεις που είχαν γίνει στους ανιχνευτές HPGe και GeLi [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008].

Για κάθε ανιχνευτή διατίθενται δύο δείγματα διαφορετικής μάζας. Για το λόγο αυτό κατά τη στάθμιση των μετρήσεων του δείγματος στους δύο ανιχνευτές, πρέπει να συνυπολογιστούν η επιφάνεια της φωτοκορυφής (cps) και η μάζα του δείγματος. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια της κάθε φωτοκορυφής εκτός από το χρόνο, διαιρείται και με τη μάζα ώστε τα μεγέθη που υπολογίζονται να είναι συγκρίσιμα και τα συμπεράσματα να μην είναι παραπλανητικά. Η αναγωγή αυτή στη μάζα του δείγματος γίνεται μετά την αφαίρεση του υποστρώματος.

Τα φάσματα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς είναι για τον ανιχνευτή HPGe τα MS082B και MS083B, ενώ για τον ανιχνευτή GeLi τα MS082C και MS083C. Για τον υπολογισμό των καθαρών κρούσεων ανά μονάδα χρόνου χρησιμοποιούνται τα φάσματα υποστρώματος BG2229 και BG1258, αντίστοιχα [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008]. Τέλος, η μάζα των δύο δειγμάτων που μετρήθηκαν στους ανιχνευτές είναι ίση με 403.3gr για τα φάσματα MS082B,C και 401.8gr για τα φάσματα MS083B,C. Οι καθαρές κρούσεις ανά μονάδα χρόνου και μάζας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Φωτόνια ενέργειας 661.62keV						
HPGe	<i>cps₂</i> φάσματος	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>cps₂</i> (1σ, %)	<i>cps</i> υποστρώματος	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>υποστρώματος</i> (1σ, %)	<i>Καθαρά</i> <i>cps₂/kg</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>καθαρών</i> <i>cps₂/kg</i> (1σ, %)
MS082B	933	0.12	0.0025	13.00	2313	0.05
MS083B	998	0.06	0.0025	13.00	2484	0.02
GeLi	<i>cps₂</i> φάσματος	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>cps₂</i> (1σ, %)	<i>cps</i> υποστρώματος	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>υποστρώματος</i> (1σ, %)	<i>Καθαρά</i> <i>cps₂/kg</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>καθαρών</i> <i>cps₂/kg</i> (1σ, %)
MS082C	564	0.12	0.0065	6.36	1399	0.05
MS083C	595	0.12	0.0065	6.36	1480	0.05

Πίνακας 2.14: Υπολογισμός καθαρών *cps₂* για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV

Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) γίνεται η στάθμιση των παραπάνω *cps* (Παράρτημα Α) και προκύπτουν οι τιμές:

- $cps(HPGe)_2 = 2444 \pm 2.96\%$ (1σ)
- $cps(GeLi)_2 = 1438 \pm 2.80\%$ (1σ)

Η απόδοση των δύο ανιχνευτών υπολογίζεται από τις καμπύλες βαθμονόμησης:

- $eff(HPGe)_2 = \exp(0.1913252 - 0.693502 \cdot \ln E - 0.005990163 \cdot (\ln E)^2) \Rightarrow$
 $\Rightarrow eff(HPGe)_2 = 0.01041 \pm 1.79\%$
- $eff(GeLi)_2 = \exp(0.2177231 - 0.779665 \cdot \ln E - 0.004969767 \cdot (\ln E)^2) \Rightarrow$
 $\Rightarrow eff(GeLi)_2 = 0.00637 \pm 1.67\%$

Οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν αυτές τις αποδόσεις είναι το RMS της καμπύλης βαθμονόμησης του εκάστοτε ανιχνευτή για τη γεωμετρία 2 και λαμβάνονται από τα αντίστοιχα αρχεία βαθμονόμησης.

Το φαινόμενο της αυταπορρόφησης παίζει σημαντικό ρόλο και εφαρμόζεται διόρθωση της ραδιενέργειας του δείγματος μόνο για τα φωτόνια που η ενέργεια τους είναι μικρότερη από 200keV. Επομένως, η υπολογιζόμενη ραδιενέργεια για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV δεν χρειάζεται διόρθωση για αυταπορρόφηση.

Η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας προκύπτει από την αβεβαιότητα των κρούσεων στη μονάδα του χρόνου και της μάζας (όπου συνυπολογίζεται η αβεβαιότητα της ζύγισης) και την αβεβαιότητα της απόδοσης για τη γεωμετρία 2 για τον κάθε ανιχνευτή.

Έτσι, με βάση τη σχέση (2.4) είναι ίση με:

- $R(HPGe) = 276066 \pm 3.46\%$ (1σ)
- $R(GeLi) = 265095 \pm 3.26\%$ (1σ)

Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) υπολογίζεται η σταθμισμένη μέση τιμή \bar{R} καθώς και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των μεγεθών αυτών παρατίθενται στο Παράρτημα Α ενώ προκύπτει η τιμή $\bar{R} = 270000 \text{ Bq/kg} \pm 2.37\%$.

Λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης 1.03%(1σ) και την αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής 0.12%, η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας βρίσκεται ίση με 2.59%. Έτσι, η ραδιενέργεια για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV είναι:

$$R(661.62\text{keV}) = 270000 \text{ Bq/kg} \pm 2.59\%$$

Τα φάσματα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης του ανιχνευτή για τη ‘γεωμετρία 12’ είναι τα SID0412A και SID0412B, όπου φαίνεται ότι οι κρούσεις στη μονάδα του χρόνου είναι $500.79 \pm 0.12\%$ (1σ) και $504.15 \pm 0.12\%$ (1σ), αντίστοιχα. Στο φάσμα του υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa, όπως αναφέρθηκε και για τη μέτρηση του QCY8, βρέθηκε ότι δεν υπάρχει φωτοκορυφή στα 661.62keV οπότε η τιμή της επιφάνειας για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής είναι αυτή που φαίνεται στα φάσματα.

Η μάζα του δείγματος γεωμετρίας 12 είναι 41.90gr με ακρίβεια 0.029gr, άρα η αβεβαιότητα της μάζας είναι 0.069%.

Με βάση τη σχέση (2.4) βρίσκουμε ότι οι αποδόσεις φωτοκορυφής για τη ‘γεωμετρία 12’ με βάση τα παραπάνω φάσματα είναι $0.0524 \pm 2.59\%$ και $0.0520 \pm 2.59\%$, αντίστοιχα. Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) γίνεται η στάθμιση των δύο τιμών (Παράρτημα Α) και βρίσκεται η σταθμισμένη μέση τιμή ίση με:

$$\text{eff}_{12\text{-Sidenor}}(661.62\text{keV}) = 0.0522 \pm 1.83\%$$

2.3.4.3 Φωτόνια ενέργειας 1173.24keV και 1332.50keV (^{60}Co)

Για τις ενέργειες αυτές χρησιμοποιήθηκε το δείγμα QCY8. Η ειδική ραδιενέργεια και η αντίστοιχη αβεβαιότητα του δείγματος την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος υπολογίζονται βάσει των δεδομένων του πιστοποιητικού του ίση με $5.643\text{kBq/kg} \pm 0.23\%$ (1σ) [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008]. Η μάζα του δείγματος ‘γεωμετρίας 12’ είναι 0.03278kg και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει είναι 0.088%.

Για το ποσοστό εκπομπής δεν βρέθηκαν διαφορές μεταξύ των τιμών που αναφέρονται στις βιβλιοθήκες ισοτόπων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Δ.Ε., αλλά και στις τιμές που χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL. Η τιμή του ποσοστού για τα φωτόνια ενέργειας 1173.24keV είναι 0.9986, ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 1332.50keV είναι 0.9998. Δεδομένου ότι δεν παρατηρήθηκε καμία διαφορά στις τιμές, θεωρήθηκε ότι δεν εισέρχεται και καμία αβεβαιότητα για το ποσοστό εκπομπής.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης χρησιμοποιήθηκε το φάσμα QCY80412A. Οι επιφάνειες των δύο φωτοκορυφών σε όρους cps και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες είναι:

- $4.548 \pm 0.79\%(1\sigma)$ για τα φωτόνια 1173.24keV και
- $4.174 \pm 0.79\%(1\sigma)$ για τα φωτόνια 1332.50keV.

Η απόδοση του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12 υπολογίζεται όπως και για τα φωτόνια του ^{137}Cs σε διάλυμα QCY8 με βάση τη σχέση (2.1) και είναι:

$$\bullet \text{eff}_{12}(1173.24\text{keV}) = \frac{4.54787}{0.9986 \cdot 0.03278 \cdot 5643} \Rightarrow \boxed{\text{eff}_{12}(1173.24\text{keV}) = 0.0246 \pm 0.826\%}$$

$$\bullet \text{eff}_{12}(1332.50\text{keV}) = \frac{4.1741}{0.9998 \cdot 0.03278 \cdot 5643} \Rightarrow \boxed{\text{eff}_{12}(1332.50\text{keV}) = 0.0226 \pm 0.826\%}$$

2.3.4.4 Φωτόνια ενέργειας 1460.80keV (^{40}K)

Τα πειράματα για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV έγιναν με βάση φυσικό άλας KCl της εταιρείας MERCK με κωδικό Art4935 σε καθαρότητα μεγαλύτερη του 99.55% [Δ.Δ. Ρούνη Π., 2008]. Στο κάλιο του άλατος περιέχεται και το ισότοπο ^{40}K με ισοτοπική αναλογία 0.0117% [ηλεκτρονική βάση δεδομένων NuDat 2.5]. Το ισότοπο αυτό είναι γ-ραδιενεργό και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 1460.80keV με ποσοστό εκπομπής 0.1067. Το ποσοστό αυτό εξακριβώθηκε σε όλες τις χρησιμοποιούμενες στην παρούσα Δ.Ε. βιβλιοθήκες ισοτόπων (Radiation Decay v.3.6, JEFF 3.3.1, Βέ Μ.-Μ. et. al.-2004).

Με βάση το πιστοποιητικό του κατασκευαστή του άλατος και την ισοτοπική σύσταση του ^{40}K βρίσκεται η ειδική ραδιενέργεια του δείγματος που χρησιμοποιείται στα πειράματα. Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Το άλας KCl έχει καθαρότητα $99.55\% \pm 0.01\%$. Δοθέντος ότι η μάζα του δείγματος είναι 39.60gr με αβεβαιότητα 0.073%, η μάζα του καθαρού KCl εκτιμήθηκε σε είναι $39.42\text{gr} \pm 0.073\%$.
- Το ατομικό βάρος του καλίου είναι 39.0983gr/mole και του χλωρίου 35.453gr/mole [el.wikipedia.org]. Επομένως η περιεκτικότητα του KCl σε καλίου

είναι $39.0983/(39.983+35.453)=0.5244$. Έτσι, υπολογίζεται ότι η μάζα του K στο άλας είναι $0.5244 \cdot 39.42 \text{gr} = 20.67 \text{gr}$, δηλαδή 0.529mole .

- Ο αριθμός Avogadro είναι $6.02214 \cdot 10^{23}$ άτομα/mole. Επομένως στη μάζα του άλατος-δείγματος υπάρχουν $3.1844 \cdot 10^{23}$ άτομα καλίου.
- Η ισοτοπική σύσταση για το ^{40}K είναι 0.0117% . Επομένως στη συνολική μάζα του άλατος υπάρχουν $3.7258 \cdot 10^{23}$ άτομα ^{40}K , δηλαδή πυρήνες ^{40}K .
- Ο χρόνος ημιζωής του ^{40}K είναι $1.25 \cdot 10^9$ χρόνια, δηλαδή $3.942 \cdot 10^{16} \text{sec}$. Όταν το πλήθος των πυρήνων ενός ραδιενεργού ισοτόπου είναι γνωστό η ενεργότητα υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$R = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N \quad \text{σχέση (2.13)}$$

όπου R: είναι η ενεργότητα του δείγματος σε Bq, N: ο αριθμός των πυρήνων του ραδιενεργού ισοτόπου και λ: η σταθερά διάσπασης των πυρήνων που είναι ίση με το πηλίκο $\frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, όπου $T_{1/2}$ είναι ο χρόνος ημιζωής του ισοτόπου σε sec. Έτσι, με βάση τη σχέση (2.13) υπολογίζεται η ενεργότητα του δείγματος KCl και βρίσκεται ίση με $16.543 \text{kBq/kg} \pm 0.07\%$ (1σ).

Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι, η τιμή της ειδικής ραδιενέργειας του KCl η οποία είχε εκτιμηθεί στα πλαίσια της Δ.Δ. Ρούνη Π. ήταν ίση με $16.388 \text{kBq/kg} \pm 1\%$ (1σ). Η ραδιενέργεια αυτή είχε υπολογιστεί από τον [Αναγνωστάκης Μ., 1998] όπου χρησιμοποιήθηκε ισοτοπική αναλογία 0.0118% και χρόνος ημιζωής $1.26 \cdot 10^9$ χρόνια. Τα δεδομένα αυτά είχαν ληφθεί από τη βάση δεδομένων [JEFF 2, 1992]. Στην ίδια εργασία είχε γίνει και γ-φασματοσκοπική ανάλυση δείγματος KCl, από το οποίο είχε υπολογιστεί η ειδική ραδιενέργειά του σε $16.023 \text{kBq/kg} \pm 4.1\%$ (3σ). Όπως εύκολα αποδεικνύεται, οι παραπάνω τρεις τιμές δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Στη συνέχεια αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί η τιμή που υπολογίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12 χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα KCl0412A και KCl0412B, καθώς και το φάσμα υποστρώματος BG4201. Ο υπολογισμός των καθαρών cps₁₂ φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 1460.80keV						
	<i>cps</i> ₁₂ φάσματος	Αβεβαιότητα <i>cps</i> ₁₂ (1σ, %)	<i>cps</i> υποστρώματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Καθαρά <i>cps</i> ₁₂	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)
KCl0412A	1.849	0.42	0.0047	6.30	1.844	0.43
KCl0412B	1.846	0.24	0.0047	6.30	1.841	0.24

Πίνακας 2.15: Υπολογισμός καθαρών *cps*₁₂ για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV

Με βάση τις σχέσεις (2.9), (2.10α και β) και (2.12) υπολογίστηκε η σταθμισμένη μέση τιμή των *cps*₁₂ (Παράρτημα Α) και βρέθηκε ίση με *cps*₁₂ = 1.84 ± 0.21%.

Τελικά, ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τη γεωμετρία 12 έγινε από την παρακάτω σχέση:

$$\text{eff}_{12}(1460.80\text{keV}) = \frac{1.8421}{0.1067 \cdot 0.03960 \cdot 16388} = 0.026603$$

Οι αβεβαιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την παραπάνω τιμή της απόδοσης είναι η αβεβαιότητα της ζύγισης 0.073%, η αβεβαιότητα της ραδιενέργειας 0.07% και η αβεβαιότητα των κρούσεων στη μονάδα του χρόνου 0.21%. Έτσι:

$$\text{unc. eff}_{12}(1460.80\text{keV}) = \sqrt{\text{unc.}_{\text{ζύγισης}}^2 + \text{unc.}_{\text{στάθμισης}}^2 + \text{unc.}_{\text{cps}}^2} = 0.223\% .$$

Επομένως η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή ΧiRa σε γεωμετρία 12 για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV είναι:

$$\boxed{\text{eff}_{12}(1460.80\text{keV}) = 0.02660 \pm 0.223\%}$$

2.3.5 Συνολικά αποτελέσματα της παρούσας Δ.Ε. για τη γεωμετρία ανάλυσης φίλτρων 12

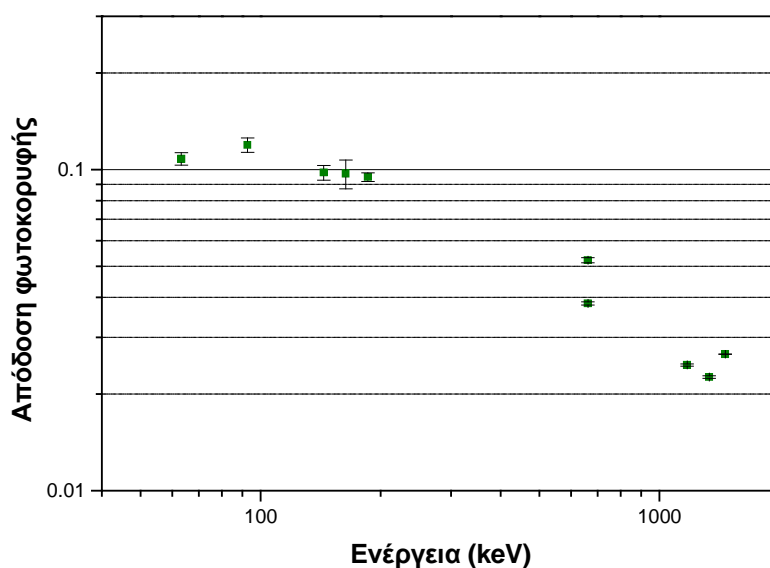
Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν στα πλαίσια της Δ.Ε. για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή ΧiRa για τη γεωμετρία 12, με βάση τα πειράματα που είχαν γίνει στα πλαίσια της Δ.Δ. Ρούνη Π.. Τα αποτελέσματα και οι σχετικές αβεβαιότητες παρατίθενται στον πίνακα 2.16 και στο διάγραμμα 2.1.

Ενέργεια (keV)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)
63.29	0.1079	4.45
92.74	0.1193	5.12
143.96	0.0979	5.22
163.50	0.1022	9.25
661.65	0.03828	1.10
	0.05219 ¹	1.83
1173.24	0.02462	0.826
1332.50	0.02257	0.826
1460.80	0.026603	0.223

Πίνακας 2.16: Οι πειραματικές αποδόσεις για τη γεωμετρία 12

Καταρχήν, πρέπει να επισημανθεί ότι οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις πειραματικές αποδόσεις για τις χαμηλές ενέργειες είναι στις περισσότερες περιπτώσεις της τάξης του 5% και είναι υψηλότερες από ότι για τις υψηλές ενέργειες. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως έχει ήδη αναφερθεί για τον υπολογισμό των αποδόσεων στις υψηλές ενέργειες, χρησιμοποιήθηκαν πιστοποιημένες πηγές.

Γεωμετρία 12



Διάγραμμα 2.1: Οι πειραματικές αποδόσεις για τη γεωμετρία 12

Όσον αφορά στις τιμές της απόδοσης:

- Για τα 661.62keV όπου υπάρχουν δύο πειραματικές τιμές, παρατηρείται ότι η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για την περίπτωση του ραδιενεργού διαλύματος QCY8 είναι μικρότερη κατά περίπου 40% από την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης που

¹ Η τιμή αυτή της απόδοσης φωτοκορυφής αντιστοιχεί στο πείραμα με τη ραδιενεργό τέφρα (Sidenor)

υπολογίζεται με βάση τη ραδιενεργό τέφρα Sidenor. Ωστόσο, η τέφρα αυτή δεν είναι πιστοποιημένη και δεν μπορεί να θεωρηθεί εξασφαλισμένη η ομοιογένειά της, με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση της να μην είναι αξιόπιστα.

- Για τις δύο ενέργειες του ^{60}Co , 1173.24keV και 1332.50keV, εκτιμάται ότι η απόδοση φωτοκορυφής που έχει υπολογισθεί είναι υποεκτιμημένη, λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) για το οποίο δεν έχουν γίνει οι κατάλληλες διορθώσεις στα πειραματικά δεδομένα. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, δύο ή περισσότερα φωτόνια που εκπέμπονται διαδοχικά κατά τη διάσπαση του ίδιου πυρήνα, σε χρόνο μικρότερο από το χρόνο απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης, είναι δυνατόν να προσπίπτουν στον ανιχνευτή και να ανιχνεύονται. Συνεπεία του φαινομένου αυτού είναι τα συγκεκριμένα φωτόνια να οδηγούν στο σχηματισμό μιας φωτοκορυφής η οποία αντιστοιχεί σε ενέργεια ίση με το άθροισμα των ενεργειών που αφήνουν στον ανιχνευτή τα δύο φωτόνια. Έτσι, η καθαρή επιφάνεια που καλύπτουν οι φωτοκορυφές στα 1173.24keV και 1332.50keV στα χρησιμοποιηθέντα φάσματα είναι μειωμένη κατά αυτό το ποσοστό των φωτονίων που συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Με τον τρόπο αυτό υποεκτιμάται η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τις συγκεκριμένες ενέργειες. Το φαινόμενο αυτό τείνει να είναι εντονότερο για μεγάλους ανιχνευτές και γεωμετρίες που είναι πολύ κοντά στον ανιχνευτή, όπως π.χ. γεωμετρίες φίλτρων. Η μεθοδολογία διόρθωσης της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δεν είχε ληφθεί υπόψη κατά τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή XtRa στη γεωμετρία 12.

- Για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV του ^{40}K πρέπει να επισημανθεί ότι δεν είχαν χρησιμοποιηθεί στη βαθμονόμηση του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12, γιατί - όπως γίνεται ξεκάθαρο και στο παραπάνω γράφημα - το αντίστοιχο σημείο δεν ταιριάζει με τα γειτονικά σημεία στις ενέργειες 661.6keV του ^{137}Cs και 1173.32 & 1332.5keV του ^{60}Co . Για το λόγο αυτό το σημείο στα 1460keV είχε θεωρηθεί προβληματικό. Αξίζει να αναφερθεί ότι, αν ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, τα πειραματικά σημεία στις ενέργειες 1173.32 και 1332.5keV θα βρεθούν υψηλότερα και ενδεχομένως θα ταιριάζουν καλύτερα με το σημείο στην ενέργεια των 1460.80keV, αλλά και με το σημείο εξαιτίας της πηγής Sidenor. Στην περίπτωση αυτή βέβαια το σημείο που δεν θα ταιριάζει στην καμπύλη είναι το δεύτερο σημείο στην ενέργεια των 661.65keV που προκύπτει από την πιστοποιημένη πηγή QCY8. Στην περίπτωση αυτή θα έπρεπε να εξετασθεί το ενδεχόμενο το σημείο αυτό να

είναι προβληματικό, εξαιτίας του φαινομένου της τυχαίας σύμπτωσης (random summing) κατά τη συλλογή του σχετικού φάσματος.

Στον παρακάτω πίνακα 2.17 φαίνονται συγκεντρωμένες όλες οι αποδόσεις που υπολογίστηκαν στην παρούσα Δ.Ε. με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες για τη γεωμετρία 12, καθώς και εκείνες που είχαν υπολογιστεί στη Δ.Δ. Ρούνη Π. και χρησιμοποιούνται στην ισχύουσα μέχρι σήμερα καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12. Στην τελευταία στήλη του πίνακα παρουσιάζεται και ο λόγος των αποδόσεων όπως υπολογίστηκαν στην παρούσα Δ.Ε. (eff Δ.Ε.) προς τις αντίστοιχες αποδόσεις που εμφανίζονται στη Δ.Δ. Ρούνη Π. (eff Δ.Δ.).

Ενέργεια (keV)	Παρούσα Δ.Ε.		Δ.Δ. Ρούνη Π.			eff Δ.Ε. / eff Δ.Δ.
	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1.65σ, %)	Αβεβαιότητα (1σ, %)	
63.29	0.1079	4.45	0.1086	1.30	0.79	0.994
92.74	0.1193	5.12	0.1077	2.10	1.27	1.108
143.96	0.0979	5.22	0.0936	4.40	2.67	1.046
163.50	0.1022	9.25	0.09085	13.2	8.00	1.125
661.65	0.03828	1.10	0.03828	0.60	0.36	1.000
	0.05219	1.83				
1173.24	0.02462	0.83	0.02462	1.30	0.79	1.000
1332.5	0.02257	0.83	0.02257	1.30	0.79	1.000
1460.8	0.026603	0.22				

Πίνακας 2.17: Οι αποδόσεις φωτοκορυφής που υπολογίστηκαν στην παρούσα Δ.Ε. σε σύγκριση με εκείνες από τη Δ.Δ. Ρούνη Π.

Παρατηρείται ότι:

- για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV η απόκλιση των δύο αποδόσεων είναι μικρή, της τάξης του 0.6%.
- για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV, 143.96keV και 163.50keV οι αποδόσεις που υπολογίζονται στη Δ.Δ. Ρούνη Π. είναι μικρότερες από ότι εκείνες που υπολογίζονται στην παρούσα Δ.Ε. με αποκλίσεις που κυμαίνονται από περίπου 4% έως περίπου 14%. Οι διαφορές αυτές προφανώς οφείλονται στη διαφορετική μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης που χρησιμοποιήθηκε και πιθανόν έχουν σχέση και με τα ποσοστά εκπομπής φωτονίων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Υπενθυμίζεται ότι στη Δ.Δ. Ρούνη Π. είχε χρησιμοποιηθεί η αναλογία των αποδόσεων για δύο διαφορετικές γεωμετρίες. Οι διαφορές αυτές δεν μελετήθηκαν περαιτέρω στα πλαίσια της Δ.Ε. Πάντως, η μεγάλη διαφορά στις αποδόσεις για την ενέργεια 163.50keV θα πρέπει να συσχετισθεί με τη

μεγάλη διαφορά που παρουσιάζεται στην εκτιμώμενη τιμή της ραδιενέργειας του ^{235}U από τις δύο ενέργειες 143.96keV και 163.50keV, η οποία έχει επισημανθεί σε προηγούμενη παράγραφο

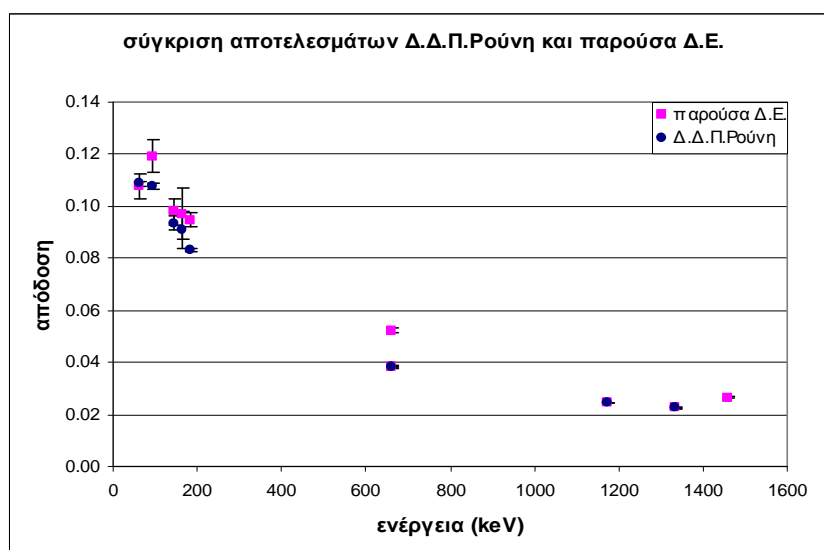
- για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV, 1173.24keV και 1332.5keV δεν υπάρχει καμία απολύτως διαφορά στην τιμή της υπολογιζόμενης απόδοσης φωτοκορυφής δεδομένου ότι ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία. Διαφορές εντοπίζεται μόνο στις αβεβαιότητες.

- για τα φωτόνια ενέργειας 1460.8keV δεν υπάρχει πειραματικό σημείο στη Δ.Δ. Ρούνη Π., επομένως δεν μπορεί να γίνει σύγκριση.

- για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV στην παρούσα Δ.Ε. έγιναν δύο υπολογισμοί απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα δύο πειράματα που αναλύθηκαν παραπάνω (πηγή ραδιενεργού τέφρας και ραδιενεργού παρασκευάσματος QCY8). Ωστόσο, στη Δ.Δ. Ρούνη Π. για τη βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή XiRa χρησιμοποιήθηκε μόνο το σημείο που αντιστοιχεί στο ραδιενεργό διάλυμα QCY8 και άρα μόνο για αυτό γίνεται σύγκριση.

- οι αβεβαιότητες που υπολογίζονται στην παρούσα Δ.Ε. είναι για όλες τις ενέργειες φωτονίων μεγαλύτερες από ότι οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που υπολογίζονται στη Δ.Δ. Ρούνη Π., με διαφορές που κυμαίνονται από περίπου 1% έως περίπου 4%. Αυτό γίνεται γιατί στην παρούσα Δ.Ε. έγινε προσπάθεια να συνυπολογιστούν παράγοντες που εισάγουν αβεβαιότητες, οι οποίοι είχαν αγνοηθεί στη Δ.Δ. Ρούνη Π..

Στο παρακάτω διάγραμμα 2.2 φαίνονται οι παραπάνω αποδόσεις φωτοκορυφής με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν:



Διάγραμμα 2.2: Σύγκριση αποδόσεων Δ.Δ. Ρούνη Π. και παρούσας Δ.Ε.

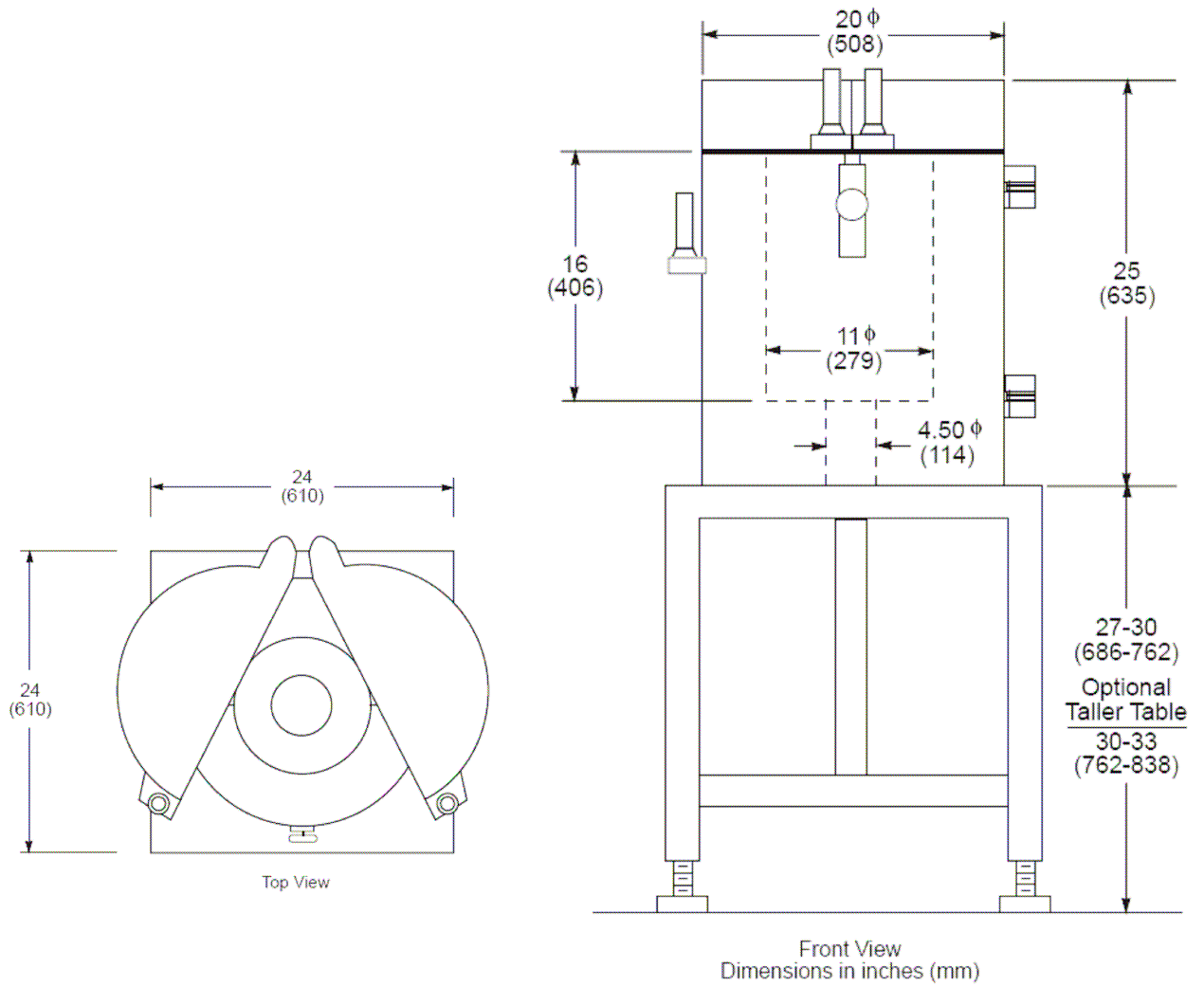
2.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη της υπάρχουσας γεωμετρίας ανάλυσης '12'

Μετά από αυτή την ανάλυση του τρόπου υπολογισμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12, γίνεται αντιληπτό ότι η υπάρχουσα βαθμονόμηση έχει τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

- Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση δεν είναι πιστοποιημένες και ως συνέπεια τα αποτελέσματα που υπολογίζονται με βάση μετρήσεις των πηγών αυτών δεν μπορούν να θεωρηθούν τόσο αξιόπιστα, ώστε με βάση αυτά να γίνει βαθμονόμηση. Είναι διάφορες πηγές που υπήρχαν στο εργαστήριο την περίοδο που έγινε η βαθμονόμηση. Επίσης, επειδή ακριβώς οι πηγές δεν ήταν πιστοποιημένες η αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό της ειδικής τους ραδιενέργειας ήταν τουλάχιστον 3-4%.
- Κατά τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της απόδοσης για τα πειραματικά σημεία, η οποία έγινε με χρήση της 'γεωμετρίας αναφοράς 2', δεν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι συνιστώσες της τυχαίας αβεβαιότητας που θα έπρεπε να έχουν συνυπολογισθεί. Σημαντικότερη τέτοια συνιστώσα είναι η τυχαία αβεβαιότητα της απόδοσης της γεωμετρίας αναφοράς.
- Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δεν έχει σε καμία περίπτωση ληφθεί υπόψη, με αποτέλεσμα για ορισμένες ενέργειες φωτονίων οι αντίστοιχες αποδόσεις να είναι υποεκτιμημένες, όπως για παράδειγμα για τα φωτόνια του ^{60}Co .
- Άμεση συνέπεια των παραπάνω ήταν να εξαιρεθούν από τη βαθμονόμηση πειραματικά σημεία τα οποία εσφαλμένα θεωρήθηκαν προβληματικά, όπως αυτό που αντιστοιχεί στα φωτόνια του ^{40}K (1460.80keV).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης της βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa για τη 'γεωμετρία 12'. Επιπλέον, δεδομένου ότι η ενεργειακή περιοχή που ενδιαφέρει την παρούσα εργασία, είναι η ενεργειακή περιοχή των υψηλών ενεργειών και πιο συγκεκριμένα η περιοχή περί τα 477keV, θα ήταν επιθυμητή η ύπαρξη επιπλέον πειραματικών σημείων, προκειμένου για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης.

Εικόνες κεφαλαίου 2:



Εικόνα 2.8: Οι ακριβείς διαστάσεις της θωράκισης του ανιχνευτή XtRa (σε ίντσες)

Description Product code: QCY.44 Solution number: R8/B/90

This mixed radionuclide gamma-ray reference standard consists of a solution in 4M HCl of the nine radionuclides listed below.

Measurement and Accuracy Reference time: 1200 GMT on 1 February 1988

Mass of solution: 5.4479 grams Density: 1.067 g/ml at 20°C

Parent radionuclide	Gamma-ray energy (MeV)	Gamma-rays per second per gram of solution	Random uncertainty	Systematic uncertainty	Overall uncertainty
Cadmium-109	0.088	633	± 0.1 %	± 3.6 %	± 3.7 %
Cobalt-57	0.122	580	± 0.3 %	± 1.8 %	± 2.1 %
Cerium-139	0.166	649	± 0.3 %	± 3.0 %	± 3.3 %
Mercury-203	0.279	2072	± 0.2 %	± 2.1 %	± 2.3 %
Tin-113	0.392	2101	± 0.1 %	± 4.0 %	± 4.1 %
Strontium-85	0.514	3962	± 0.4 %	± 1.5 %	± 1.9 %
Caesium-137	0.662	2395	± 0.5 %	± 2.6 %	± 3.1 %
Yttrium-88	0.898	6110	± 0.2 %	± 3.6 %	± 3.8 %
Cobalt-60	1.173	3390	± 0.3 %	± 0.4 %	± 0.7 %
Cobalt-60	1.333	3394	± 0.3 %	± 0.4 %	± 0.7 %
Yttrium-88	1.836	6514	± 0.2 %	± 2.6 %	± 2.8 %

Purity At the reference time the solution also contained the following impurities:

Cadmium-113m equal to 4.4×10^{-5} microcuries per gram

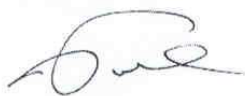
Cobalt-56 equal to 2.4×10^{-6} microcuries per gram

Cobalt-58 equal to 8.6×10^{-7} microcuries per gram

Remarks Further details, including composition of the solution, methods of measurement, decay scheme assumptions, decay tables and definitions of uncertainties, are given in the data sheet accompanying this certificate.

This product meets the quality assurance requirements of NRC Regulatory Guide 4.15 for achieving explicit NBS traceability as defined in NCRP58 (1985).

Approved Signatory



A.G. Tuck

Page 1 of 1

Amersham

This certificate is issued in accordance with the conditions of approval granted by the British Calibration Service which has verified the measurement capability of the laboratory and its traceability to United Kingdom national standards and to the units of measurements realized at the National Physical Laboratory. Copyright of this certificate is owned jointly by the Crown and the issuing laboratory and may not be reproduced other than in full except with the prior written approval of the Superintendent BCS and the issuing laboratory.

Εικόνα 2.9: Το πιστοποιητικό του ραδιενεργού παρασκευάσματος QCY.44

Κεφάλαιο 3:

Προσδιορισμός της απόδοσης του ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ με τη μέθοδο Monte Carlo για την ανίχνευση του ^7Be σε φίλτρα αέρα

3.1 Εισαγωγή

Με βάση τα όσα εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σχετικά με την πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 12, διαπιστώθηκαν προβλήματα τα οποία αφορούν κυρίως στην ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Εκτός της διόρθωσης των προβλημάτων αυτών, η διαδικασία ανάλυσης φίλτρων, γενικά, και μέτρησης των μεταβολών της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα, ειδικότερα, εκτιμήθηκε ότι μπορεί να βελτιωθεί, λαμβάνοντας υπόψη και το ακόλουθο στοιχείο. Καθώς η διάμετρος του ανιχνευτή XtRa (80mm) είναι μικρότερη από την ακμή του διπλωμένου σε ‘γεωμετρία 12’ φίλτρου 8x10”, ένα μέρος του φίλτρου, συμπεριλαμβανομένου και του κεντρικού τμήματος αυτού, βρίσκεται εκτός των ορίων του παραθύρου του ανιχνευτή. Είναι λογικό λοιπόν κανείς να υποθέσει ότι, καλύτερη τοποθέτηση του φίλτρου πάνω στον ανιχνευτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποδοτικότερη ανίχνευση των φωτονίων που εκπέμπονται από τα ραδιενεργά ισότοπα που αποτίθενται σε αυτό. Η διάρκεια ανάλυσης φίλτρου ‘γεωμετρίας 12’ στον ανιχνευτή XtRa, με στόχο τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ^7Be , είναι περίπου 18 ώρες, ενώ μπορεί να χρειαστούν και περισσότερες ώρες στην περίπτωση που η συγκέντρωση του ισότοπου είναι χαμηλή. Γίνεται αντιληπτό ότι η επίτευξη καλύτερης απόδοσης κατά την ανίχνευση φίλτρων 8x10” θα σημαίνει μικρότερο χρόνο χρησιμοποίησης του ανιχνευτή ή/και καλύτερη στατιστική.

Δημιουργήθηκε λοιπόν, η ανάγκη για τη δημιουργία νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου, η οποία να προβλέπει το δίπλωμα του φίλτρου με τέτοιο τρόπο ώστε η ακμή του να είναι μικρότερη ή τουλάχιστον ίση με τη διάμετρο του ανιχνευτή στο παράθυρο μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό η απόδοση αναμένεται να είναι υψηλότερη καθώς δεν θα υπάρχει μέρος του φίλτρου το οποίο να είναι εκτός του ανιχνευτή. Επίσης, το δίπλωμα θα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να ισοκατανέμεται όσο γίνεται το στρώμα από σωματίδια που μαζεύεται με τη δειγματοληψία αέρα, έτσι ώστε η ‘πηγή’ να είναι πιο ομοιόμορφη.

Για τη βαθμονόμηση της νέας αυτής γεωμετρίας θα πρέπει να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της χρήσης μη πιστοποιημένων πηγών, της μη ύπαρξης πολλών πειραματικών σημείων στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης του ^7Be (477.59keV) και της έντονης παρουσίας του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, που μπορεί να είναι σημαντικό κατά την ανάλυση φίλτρων στον ανιχνευτή XtRa. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών αποφασίσθηκε στα πλαίσια της Δ.Ε. η βαθμονόμηση της νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου στον ανιχνευτή XtRa να γίνει με χρήση τεχνικών προσομοίωσης. Η προτεινόμενη λύση περιγράφεται αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο.

Αρχικά, περιγράφεται η νέα γεωμετρία ανιχνευτή-φίλτρου που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., με σκοπό την αποδοτικότερη ανίχνευση του ^7Be , καθώς και την εξάλειψη των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η έως τώρα χρησιμοποιούμενης ‘γεωμετρίας 12’, όπως αυτά περιγράφηκαν προηγούμενα.

Η βαθμονόμηση απόδοσης της νέας γεωμετρίας πραγματοποιείται με τη μέθοδο Monte Carlo και πιο συγκεκριμένα με τον κώδικα PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Γενικά, ο προσδιορισμός της απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης με τη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα (και δεν μπορούν να αποκτηθούν) ή σε περιπτώσεις όπου τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα δεν είναι αξιόπιστα.

Βασική παράμετρος για την εφαρμογή της τεχνικής της προσομοίωσης αποτελούν οι διαστάσεις του ανιχνευτή. Η απόδοση ενός ανιχνευτή εξαρτάται από τις διαστάσεις του (η απόδοση γενικά αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ενεργός όγκος του ανιχνευτή). Για το λόγο αυτό, όταν χρησιμοποιείται η προσομοίωση για την εκτίμηση της απόδοσης, οι διαστάσεις του ανιχνευτή πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένες. Οι παράμετροι που πρέπει να προσδιορίζονται για το σκοπό αυτό είναι:

- η διάμετρος του κρυστάλλου του ανιχνευτή
- το πάχος του κρυστάλλου
- οι διαστάσεις της εσωτερικής οπής για τους ανιχνευτές που διαθέτουν οπή
- το εύρος της νεκρής ζώνης (dead layer) που διαμορφώνεται κατά την τροφοδοσία του ανιχνευτή με την απαραίτητη υψηλή τάση.

Σε ό,τι αφορά στις εξωτερικές διαστάσεις του κρυστάλλου αλλά και της εσωτερικής οπής, μπορεί να γίνει ακριβής μέτρησή τους, ενώ συχνά ο κατασκευαστής του ανιχνευτή παρέχει αυτή την πληροφορία. Αντίθετα, για το εύρος της νεκρής περιοχής, μόνο εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν. Συνήθως, οι εκτιμήσεις αυτές γίνονται

με βάση τα αποτελέσματα πειραμάτων [Dryak P. & Kovar P., 2006], [Vidmar T. et al., 2007], [Jurado Vargas M. & Guerra A.L., 2006].

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που διατίθενται από τον κατασκευαστή. Όσον αφορά στην εκτίμηση των διαστάσεων της νεκρής ζώνης του ανιχνευτή XtRa γίνονται μια σειρά από πειράματα, τα οποία και παρατίθενται, με σκοπό να προσδιορισθούν εκείνες οι διαστάσεις της νεκρής ζώνης για τις οποίες λαμβάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα (σύγκριση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης) για την εξεταζόμενη γεωμετρία. Μετά από τον καθορισμό των διαστάσεων της νεκρής ζώνης, και κατ' επέκταση της ενεργού επιφάνειας του ανιχνευτή, η γεωμετρία ανιχνευτή που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση ακτινοβολιών διαφορετικής ενέργειας από πηγές διαφορετικής γεωμετρίας για τις οποίες δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα ή δεν έχουν γίνει ακόμα βαθμονομήσεις. Πρέπει να επισημανθεί πάντως ότι αυτό ισχύει μόνον εφόσον οι γεωμετρίες αυτές είναι παραπλήσιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του ανιχνευτή.

Τελικά, πραγματοποιείται προσομοίωση της νέας γεωμετρίας, για την περίπτωση των φωτονίων ενέργειας 477.59keV του ^7Be , καθώς και για την ήδη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία 12, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο 2^ο Κεφάλαιο.

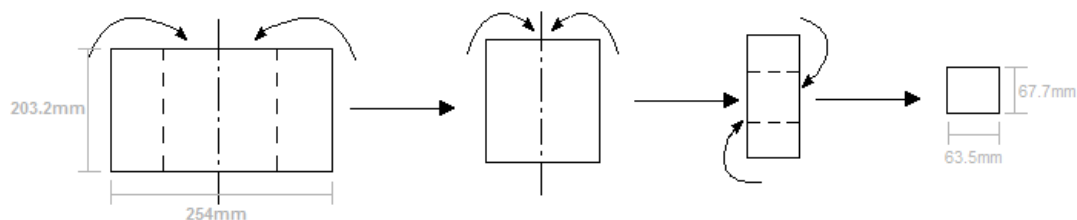
3.2 Η νέα γεωμετρία ανάλυσης φίλτρων αέρα

Για τον καθορισμό των διαστάσεων της νέας γεωμετρίας για την ανάλυση φίλτρων αέρα αποτέλεσαν γνώμονα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 2.4 του 2^{ου} κεφαλαίου. Αρχικά, είναι επιθυμητό οι διαστάσεις του διπλωμένου φίλτρου να μην είναι μεγαλύτερες από τη διάμετρο του ανιχνευτή, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης. Ωστόσο, πρέπει ταυτόχρονα να ληφθεί υπόψη η κατανομή των σωματιδίων στο φίλτρο, ώστε κατά την τοποθέτησή του στον ανιχνευτή να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη. Έτσι, για τη νέα γεωμετρία η οποία εισάγεται στην Δ.Ε.:

- Οι τελικές διαστάσεις του διπλωμένου φίλτρου είναι $10''/4=6.35\text{cm}$ μήκος, $8''/3=6.77\text{cm}$ πλάτος και 0.65cm ύψος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία πηγή όγκου, με διαστάσεις μικρότερες από τη διάμετρο του ανιχνευτή (~80mm).
- Ο τρόπος διπλώματος είναι τέτοιος, ώστε περιοχές από τα άκρα του φίλτρου να αλληλοεπικαλύπτονται από περιοχές από το μέσο του φίλτρου. Με τον τρόπο αυτό, οι

άκρες του φίλτρου που έχουν μικρότερο πλήθος σωματιδίων διπλώνονται και έρχονται στο κέντρο του φίλτρου όπου το πλήθος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο.

Στην παρακάτω εικόνα 3.1 φαίνεται ο τρόπος διπλώματος του φίλτρου, ενώ στην εικόνα 3.2 φαίνεται ένα διπλωμένο σε νέα γεωμετρία φίλτρο σε σύγκριση με ένα φίλτρο διπλωμένο στην ήδη υπάρχουσα γεωμετρία 12:



Εικόνα 3.1: Τρόπος διπλώματος φίλτρου στη νέα γεωμετρία



Εικόνα 3.2: Ένα φίλτρο γεωμετρίας 12 (αριστερά) και ένα νέας γεωμετρίας (δεξιά)

Ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής και κατ' επέκταση η βαθμονόμηση απόδοσης για αυτή τη νέα γεωμετρία, πραγματοποιείται με προσομοίωση Monte Carlo, καθώς δεν υπάρχουν πειραματικά σημεία για τη γεωμετρία αυτή. Όπως ήδη αναφέρθηκε, απαραίτητη προϋπόθεση για την προσομοίωση της γεωμετρίας είναι η γνώση των ακριβών διαστάσεων του ανιχνευτή.

Συνήθως, η επιλογή των διαστάσεων του ανιχνευτή πραγματοποιείται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, κατά την οποία τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, για την εξεταζόμενη γεωμετρία, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ίδια γεωμετρία. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που θα προκύψουν με τον τρόπο αυτό θα οδηγούν σε ικανοποιητική σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοίωσης. Πρέπει στο σημείο αυτό να τονισθεί ιδιαίτερα ότι αυτό δεν σημαίνει ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή θα δώσουν απαραίτητως ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την προσομοίωση του ανιχνευτή για διαφορετική γεωμετρία πηγής. Μάλιστα, όσο περισσότερο αλλάζει η γεωμετρία της πηγής, τόσο μεγαλύτερη απόκλιση μπορεί να παρατηρηθεί ανάμεσα στα πειραματικά

αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Εν κατακλείδι, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι διαστάσεις του ανιχνευτή που προκύπτουν δεν είναι οι πραγματικές διαστάσεις του, αλλά απλώς ένας συνδυασμός διαστάσεων, για τον οποίο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος συγκλίνουν.

Δεδομένου ότι για τη νέα γεωμετρία που εισάγεται δεν υπήρχαν, τουλάχιστον σε πρώτη φάση, πειραματικά δεδομένα, προφανώς δεν υπήρχε δυνατότητα προσδιορισμού των αντίστοιχων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή. Για το λόγο αυτό αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα προσομοίωσης, με άλλες παραπλήσιες γεωμετρίες, οι οποίες να προσεγγίζουν την εξεταζόμενη γεωμετρία φίλτρου αέρα-ανιχνευτή. Οι γεωμετρίες αυτές, με τις οποίες θα ληφθούν τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα, πρέπει να έχουν διαστάσεις μικρότερες από τη διάμετρο του ανιχνευτή και να είναι κατά το δυνατόν πιστοποιημένες. Με βάση αυτά τα κριτήρια επιλέχθηκαν οι πηγές φίλτρου διαμέτρου 47mm και η γεωμετρία 8 του ΕΠΤ-ΕΜΠ, οι οποίες αναλυτικά παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.5. Πριν περιγραφεί η όλη διαδικασία προσομοίωσης-πειράματος-σύγκρισης είναι σκόπιμο να γίνει μία εισαγωγή στη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo και το χρησιμοποιούμενο κώδικα.

3.3 Προσομοίωση Monte-Carlo

Ο συνήθης τρόπος πειραματικού προσδιορισμού της απόδοσης μιας γ-ανιχνευτικής διάταξης, στηρίζεται στην εκμετάλλευση των στοιχείων που προκύπτουν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση πρότυπου δείγματος, γνωστής ραδιενέργειας. Τέτοια διαδικασία βαθμονόμησης περιγράφηκε και εφαρμόστηκε για την περίπτωση της γεωμετρίας 12 στον ανιχνευτή ΧtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ, στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση όμως που δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα γιατί είναι πολύ δύσκολο ή και αδύνατο να γίνουν πειράματα, ή τα πειραματικά δεδομένα δεν είναι αξιόπιστα (για παράδειγμα μη ομοιογενής ή μη πιστοποιημένη πηγή βαθμονόμησης), υπάρχει η δυνατότητα αντιμετώπισης του προβλήματος της βαθμονόμησης με τη βοήθεια κωδίκων προσομοίωσης.

Η τεχνική Monte-Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θεωρητική «επανάληψη» μιας στατιστικής διαδικασίας, όπως είναι η αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη, και είναι χρήσιμη ιδιαίτερα για σύνθετα προβλήματα που δεν μπορούν να

περιγραφούν με υπολογιστικούς κώδικες, οι οποίοι κάνουν χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων και αναλυτικών σχέσεων. Η τεχνική είναι ιδανική για την επίλυση πολύπλοκων, τρισδιάστατων προβλημάτων και χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση σύνθετων φυσικών προβλημάτων σε πολλά πεδία της έρευνας και της τεχνολογίας, όπως για υπολογισμούς θωρακίσεων και ανιχνευτικών συστημάτων, δοσιμετρικούς υπολογισμούς κλπ [Δ.Ε Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Σήμερα, οι μέθοδοι Monte-Carlo χρησιμοποιούνται ευρέως για να λύσουν σύνθετα φυσικά και μαθηματικά προβλήματα [James F., 1980], [Rubinstein R.Y., 1981], [Kalos M.H. and Whitlock P.A., 1986], ιδιαίτερα εκείνα που περιλαμβάνουν πολλαπλές ανεξάρτητες μεταβλητές όπου οι συμβατικές αριθμητικές μέθοδοι θα απαιτούσαν τεράστια ποσά μνήμης και υπολογιστικούς χρόνους.

Η λογική ενός κώδικα Monte Carlo, στην περίπτωση της μελέτης φαινομένων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, στηρίζεται στην παρακολούθηση ενός σωματιδίου ή φωτονίου από τη στιγμή που θα εκπεμφθεί από την πηγή μέχρι να αποθέσει πλήρως την ενέργειά του ή βγει εκτός των ορίων του συστήματος. Η πορεία αυτή του σωματιδίου, η οποία αναφέρεται και ως ιστορία του σωματιδίου, αποτελείται από διάφορες μικρότερες πορείες οι οποίες τερματίζουν όταν το σωματίδιο αλληλεπιδράσει με την ύλη, αλλάζοντας κατεύθυνση κίνησης ή χάνοντας μέρος της ενέργειάς του. Η προσομοίωση της πορείας του σωματιδίου γίνεται με βάση τις πιθανότητες το σωματίδιο να αλληλεπιδράσει με την ύλη, σύμφωνα με κάποιο συγκεκριμένο φαινόμενο (φωτοηλεκτρικό, σκεδάσεις, απορρόφηση, δίδυμη γένεση). Τα χαρακτηριστικά του σωματιδίου ή του φωτονίου επιλέγονται τυχαία με τη βοήθεια γεννητριών τυχαίων αριθμών, σύμφωνα με τις προκαθορισμένες κατανομές πιθανότητας (Probability Distribution Functions). Κάθε φορά που ο κώδικας περατώνει μία ιστορία, επιστρέφει στην αρχή παρακολουθώντας ένα νέο σωματίδιο ή φωτόνιο. Όσο αυξάνεται το πλήθος των ιστοριών τις οποίες παρακολουθεί ο κώδικας, τόσο αυξάνεται και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του, δηλαδή τα μεγέθη προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια.

Η προσομοίωση, συγκρινόμενη με το πείραμα, παρακολουθεί την κίνηση των σωματιδίων ή φωτονίων χωρίς να επηρεάζεται από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος ή άλλα φαινόμενα που συμβαίνουν στη φύση και τα οποία οδηγούν στην αλλοίωση του φάσματος, εισάγοντας συστηματικά σφάλματα. Τέτοια περίπτωση είναι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με την προσομοίωση μπορούν να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα,

ενώ δεν χρειάζονται ειδικά βαθμονομημένες ραδιενεργές πηγές για να τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Λογική συνέπεια των παραπάνω είναι ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν περιγράφουν πάντα με ακρίβεια τα όσα συμβαίνουν στην πραγματικότητα.

3.3.1 Ο κώδικας PENELOPE

Ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την αντιμετώπιση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo είναι ο κώδικας PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons) και συγκεκριμένα η έκδοση του 2005. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και αρχικά ήταν σχεδιασμένος να προσομοιώνει τη διάδοση ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές από ποικίλα υλικά. Η δυνατότητα προσομοίωσης και φωτονίων προστέθηκε αργότερα και για αυτό δεν περιέχεται στο όνομα του κώδικα.

Ο κώδικας PENELOPE αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτίνων, οι οποίες εμπεριέχουν τους μηχανισμούς οι οποίοι διέπουν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης. Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης σημειακών πηγών β^+ , β^- ή γ -ακτινοβολίας (ενέργειας από 50eV έως 1GeV). Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης συγκεκριμένου προβλήματος, αρχικά απαιτείται η περιγραφή του, η οποία εισάγεται μέσω των αρχείων δεδομένων εισόδου. Για τον πλήρη έλεγχο της προσομοίωσης και την επικοινωνία μεταξύ των αρχείων εισόδου και των υπορουτίνων είναι απαραίτητη η σύνταξη κώδικα, ο οποίος είναι γνωστός ως κώδικας χρήστη ή κυρίως πρόγραμμα. Το κυρίως πρόγραμμα παρακολουθεί την εξέλιξη της τροχιάς του κάθε σωματιδίου, με άλλα λόγια την εξέλιξη κάθε ιστορίας, καταγράφοντας σε κατάλληλα αρχεία δεδομένων, αρχεία εξόδου, μεγέθη που ενδιαφέρουν το χρήστη, όπως για παράδειγμα η αποτιθέμενη ενέργεια ή η δόση σε συγκεκριμένες περιοχές. Για τον προσδιορισμό των τιμών των μεγεθών αυτών χρησιμοποιούνται κατάλληλα διαμορφωμένοι εικονικοί ανιχνευτές.

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται περισσότερα στοιχεία σχετικά με τις διάφορες συνιστώσες του κώδικα PENELOPE (κυρίως προγράμματα, υπορουτίνες, αρχεία εισόδου, εικονικοί ανιχνευτές και αρχεία εξόδου).

3.3.1.1 Τα κυρίως προγράμματα του κώδικα *PENELOPE*

Σε ό,τι αφορά στην έκδοση του κώδικα *PENELOPE* που είναι εγκατεστημένη στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, για τη διευκόλυνση του χρήστη, υπάρχουν τρία έτοιμα κυρίως προγράμματα χρήστη (user code) με τις ονομασίες *PENSLAB*, *PENCYL* και *PENMAIN*. Το *PENSLAB* και το *PENCYL* εφαρμόζονται για συγκεκριμένες γεωμετρίες. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα *PENSLAB* χρησιμοποιείται για την προσομοίωση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με επίπεδη πλάκα. Αντίστοιχα, το πρόγραμμα *PENCYL* χρησιμοποιείται για προβλήματα με σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές. Τέλος, το πρόγραμμα *PENMAIN* εφαρμόζεται στην περίπτωση σύνθετων προβλημάτων [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006].

Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιείται το πρόγραμμα *PENMAIN*, το οποίο είναι πιο γενικής μορφής σε σχέση με τα άλλα προγράμματα του κώδικα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πολλών πρακτικών προβλημάτων καθώς δεν περιορίζεται σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία. Στο πρόγραμμα *PENMAIN* η γεωμετρία της κατασκευής περιγράφεται σε κατάλληλο, ξεχωριστό αρχείο εισόδου που ονομάζεται αρχείο γεωμετρίας. Αυτή η διαφορά είναι που επιτρέπει στο *PENMAIN* να προσομοιώνει πολύπλοκες κατασκευές και γεωμετρίες, δίνοντάς του πλεονέκτημα έναντι των άλλων δύο έτοιμων προγραμμάτων. Ο κώδικας χρήστη *PENMAIN* είναι διαθέσιμος σε source μορφή και μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία ενός κώδικα πιο κοντά στις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη.

3.3.1.2 Οι υπορουτίνες του κώδικα *PENELOPE*

Οι υπορουτίνες του κώδικα *PENELOPE* είναι γραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού *FORTRAN* και είναι αυτές που πραγματοποιούν την προσομοίωση του φυσικού φαινομένου. Προκειμένου να γίνεται η προσομοίωση οι υπορουτίνες αυτές πρέπει να συνδέονται (link) με τον κώδικα χρήστη. Κανονικά ο χρήστης δεν θα πρέπει να τροποποιεί τις υπορουτίνες αυτές. Οι υπορουτίνες του κώδικα *PENELOPE* περιέχονται σε μία σειρά από αρχεία:

- Το αρχείο *pelelope.f*: περιέχει τις υπορουτίνες που σχετίζονται με τη φυσική της προσομοίωσης που πραγματοποιεί ο κώδικας χρήστη, δηλαδή με τη διάδοση των σωματιδίων και των φωτονίων στην ύλη.
- Το αρχείο *pengeom.f*: περιέχει τις υπορουτίνες που πραγματοποιούν την επικοινωνία μεταξύ του κυρίως προγράμματος και του αρχείου εισόδου γεωμετρίας, περιγραφή του οποίου γίνεται παρακάτω.

- το αρχείο *penvared.f*: περιέχει μία σειρά από υπορουτίνες που μπορούν να κληθούν από τον κώδικα για τη βελτίωση της στατιστικής κατά την προσομοίωση (variance reduction).
- το αρχείο *timer.f*: περιέχει τις υπορουτίνες που σχετίζονται με την καταγραφή του χρόνου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης .

3.3.1.3 Τα αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE

Για την εκτέλεση του κώδικα PENMAIN απαιτούνται τρία είδη αρχείων δεδομένων εισόδου:

- το αρχείο εισόδου τύπου *.in* που περιγράφει χαρακτηριστικά της προσομοίωσης θέτοντας ουσιαστικά το προς προσομοίωση πρόβλημα. Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται από το χρήστη και παρέχει στο κυρίως πρόγραμμα (PENMAIN, για τη συγκεκριμένη Δ.Ε.) πληροφορίες σχετικά με το είδος και την ένταση της ακτινοβολίας, τον τύπο και τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων εικονικών ανιχνευτών (παράγραφος 3.3.1.4), το πλήθος των ιστοριών που πρόκειται να προσομοιωθούν ή το χρόνο προσομοίωσης. Άλλες πληροφορίες που παρέχει στο πρόγραμμα είναι το ενεργειακό εύρος παρακολούθησης των σωματιδίων ή φωτονίων της προσομοίωσης καθώς και το κατώτερο όριο ενέργειας μέχρι το οποίο γίνεται λεπτομερής παρακολούθηση της ιστορίας των σωματιδίων (cut-off energies). Επίσης, το αρχείο αυτό πληροφορεί τον κώδικα για τα ονόματα των υπόλοιπων αρχείων δεδομένων εισόδου.

- το αρχείο εισόδου τύπου *.geo* (αρχείο γεωμετρίας) που περιγράφει τη γεωμετρία του προβλήματος που επιλύεται με την προσομοίωση παρέχοντας τη δυνατότητα περιγραφής πολύπλοκων γεωμετριών. Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται πάλι από το χρήστη και παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης εποπτείας της γεωμετρίας. Για το σκοπό αυτό, το αρχείο τύπου *.geo* συνδυάζεται και με κατάλληλο απεικονιστικό πρόγραμμα (gview2d ή gview3d). Το γεγονός ότι η γεωμετρία αποτελεί ανεξάρτητο αρχείο, παρέχει ευελιξία στην επίλυση προβλημάτων τα οποία διαφοροποιούνται μόνο ως προς τη γεωμετρία (για παράδειγμα προσομοίωση της ίδιας πηγής ακτινοβολίας σε διαφορετικούς ανιχνευτές).

- το αρχείο εισόδου τύπου *.mat* το οποίο περιέχει φυσικές σταθερές και παραμέτρους (όπως μικροσκοπικές ενεργές διατομές) των υλικών τα οποία εμπλέκονται στο πρόβλημα. Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται από το παρεχόμενο μαζί με τον κώδικα PENELOPE βοηθητικό πρόγραμμα *material.f* ανεξάρτητα και πριν από την προσομοίωση.

3.3.1.4 Οι χρησιμοποιούμενοι εικονικοί ανιχνευτές

Ένας εικονικός ανιχνευτής είναι μια σειρά εντολών μέσα στο κυρίως πρόγραμμα με τις οποίες ο χρήστης ορίζει τμήματα εντός της γεωμετρίας του εξεταζόμενου προβλήματος, στα οποία παρακολουθούνται και καταγράφονται οι τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων της προσομοίωσης. Ανάλογα με το είδος των παρακολουθούμενων παραμέτρων, στο πρόγραμμα PENMAIN έχουν ορισθεί και χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι εικονικών ανιχνευτών:

- **Ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (*impact detector*)**, ο οποίος καταγράφει την ενέργεια των σωματιδίων που εισέρχονται μέσα σε αυτόν. Ως ανιχνευτής αλληλεπίδρασης θεωρείται ένα σώμα ή μια ομάδα σωμάτων, τα οποία έχουν οριστεί από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου (τύπου .in). Τα σώματα αυτά αποτελούν τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνονται μέσα στο αρχείο που περιγράφει τη γεωμετρία της κατασκευής (τύπου .geo). Όταν ένα σωματίδιο ή φωτόνιο εισέλθει μέσα στον ανιχνευτή, τότε καταγράφεται η ενέργεια E που είχε τη στιγμή εισόδου του σε αυτόν. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται το αρχείο εξόδου που περιέχει το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων που εισήλθαν του ανιχνευτή.

- **Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (*energy-deposition detector*)**, ο οποίος καταγράφει την αποτιθέμενη ενέργεια των σωματιδίων ή φωτονίων που εισέρχονται σε αυτόν. Ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας θεωρείται πάλι ένα σώμα ή μια ομάδα σωμάτων, τα οποία έχουν οριστεί από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου (τύπου .in). Τα σώματα αυτά αποτελούν τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνονται μέσα στο αρχείο που περιγράφει τη γεωμετρία της κατασκευής (τύπου .geo), όπως και στην περίπτωση του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης. Όταν η ακτινοβολία εισέλθει μέσα στον ανιχνευτή, τότε καταγράφεται η ενέργεια που αποτίθεται μέσα σε αυτόν. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα επιπλέον αρχείο εξόδου το οποίο περιέχει το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων που απορροφήθηκε μέσα στον ανιχνευτή.

- **Ανιχνευτής δόσης (*dose enclosure*)**, ο οποίος καταγράφει την κατανομή της δόσης σε κάποιο τμήμα της κατασκευής. Ως ανιχνευτής δόσης θεωρείται ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα, το οποίο έχει καθοριστεί από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου (τύπου .in). Σε αντίθεση με τους άλλους δυο ανιχνευτές (αλληλεπίδρασης και ενέργειας) ο ανιχνευτής αυτός δεν αποτελεί τμήμα της κατασκευής και επομένως δεν περιλαμβάνεται μέσα στο αρχείο τύπου .geo. Στον

ανιχνευτή δόσης καταγράφεται αθροιστικά η δόση λόγω της αλληλεπίδρασης σωματιδίων ή φωτονίων με την ύλη εντός των ορίων του ανιχνευτή. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, έχει υπολογιστεί η κατανομή της δόσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή και καταγράφεται στο αντίστοιχο αρχείο εξόδου.

3.3.1.5 Τα αρχεία εξόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE

Τα αρχεία εξόδου περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το περιεχόμενο τους, δηλαδή οι τιμές των παρακολουθούμενων μεγεθών μετά το πέρας ή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθορίζονται από το χρήστη στο κυρίως πρόγραμμα, σε συνδυασμό και με τις παραμέτρους που έχουν καθοριστεί στο αρχείο εισόδου τύπου `.in`. Δεδομένου ότι στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιείται το πρόγραμμα PENMAIN, παρουσιάζονται μόνο τα αρχεία εξόδου του προγράμματος τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Δ.Ε. Το συνολικό πλήθος των αρχείων εξόδου του κώδικα PENELOPE έχει μελετηθεί σε άλλη Δ.Ε. [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006].

- Το αρχείο ***penmain.dat*** περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους της προσομοίωσης. Τέτοιες παράμετροι είναι η ημερομηνία και η ώρα πραγματοποίησης της προσομοίωσης, η περιγραφή της πηγής ακτινοβολίας (τύπος, ενέργεια, θέση), οι παράμετροι των υλικών της κατασκευής και η ονομασία του αρχείου που περιέχει τα διάφορα χαρακτηριστικά των υλικών (τύπου `.mat`), το όνομα του αρχείου που περιέχει τη γεωμετρία της κατασκευής (τύπου `.geo`), το συνολικό πλήθος των ιστοριών που προσομοιώθηκαν, η διάρκεια και η ταχύτητα της προσομοίωσης, ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων ή φωτονίων που εξήλθαν της κατασκευής, που οπισθοσκεδάστηκαν και που απορροφήθηκαν, η μέση τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας (σε eV) στο κάθε σώμα (body) της κατασκευής, όπως αυτά έχουν οριστεί από το χρήστη στο αρχείο γεωμετρίας, η μέση τιμή της ενέργειας που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, η μέση τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

- Στο αρχείο εξόδου ***pm_spc_enddet_#.dat*** περιέχεται το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων που αποθέτουν μέρος ή το σύνολο της ενέργειάς τους εντός των ορίων των χρησιμοποιούμενων εικονικών ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας. Για κάθε ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας προκύπτει ξεχωριστό αρχείο αποτελεσμάτων.

3.3.2 Υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση την προσομοίωση

Στις περιπτώσεις εκείνες που χρησιμοποιείται η προσομοίωση στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, ένα μέγεθος το οποίο συχνά ενδιαφέρει είναι η απόδοση φωτοκορυφής ή απόδοση αιχμής. Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα αρχεία εξόδου του κώδικα χρήστη PENMAIN για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής γ-ανιχνευτικής διάταξης. Για να γίνει ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής στην περίπτωση χρήσης του κώδικα PENMAIN, χρησιμοποιείται ο εικονικός ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας ο οποίος, όπως αναλύθηκε παραπάνω, καταγράφει στο αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet#.dat*, την πιθανότητα απόθεσης σε αυτόν, από τα εισερχόμενα φωτόνια, ενέργειας εντός συγκεκριμένου ενεργειακού εύρους. Τμήμα ενός τέτοιου αρχείου φαίνεται στην εικόνα 3.6 στο τέλος του κεφαλαίου.

Το αρχείο αποτελείται από τρεις στήλες δεδομένων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στις ενεργειακές περιοχές, ενεργειακά κανάλια, στις οποίες έχει διαιρεθεί η συνολική ενεργειακή περιοχή προσομοίωσης (σε eV). Η διαμέριση της συνολικής ενεργειακής περιοχής γίνεται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*, μέσω του ορισμού του συνολικού ενεργειακού εύρους προσομοίωσης και του πλήθους των ενεργειακών καναλιών, βήμα ενέργειας. Η δεύτερη στήλη αναφέρεται στην πιθανότητα ύπαρξης φωτονίου το οποίο να αποθέσει ποσό ενέργειας εντός των ορίων του αντίστοιχου ενεργειακού καναλιού (σε $1/(eV \times \text{particle})$). Αποτελεί δε το λόγο του πλήθους των φωτονίων που απέθεσαν το ποσό αυτό της ενέργειας προς το γινόμενο του πλήθους των συνολικών ιστοριών/φωτονίων που προσομοιώθηκαν επί το εύρος της ενεργειακής διαμέρισης (energy bin) σε eV. Τέλος, η τρίτη στήλη αναφέρεται στο μέγιστο πιθανό απόλυτο σφάλμα (3σ) της πιθανότητας της δεύτερης στήλης.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής σε συγκεκριμένη ενέργεια E , από το αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat* της προσομοίωσης φωτονίων ενέργειας E , χρησιμοποιείται η τιμή της πιθανότητας της δεύτερης στήλης του αρχείου, για την ενεργειακή εκείνη διαμέριση (κανάλι) η οποία αντιστοιχεί στα φωτόνια εκείνα που απέθεσαν όλη την ενέργεια τους στην ανιχνευτική διάταξη. Δεδομένου ότι η πιθανότητα αυτή είναι ανηγμένη στο εύρος της ενεργειακής διαμέρισης (πλάτος καναλιού, eV) η ζητούμενη απόδοση προκύπτει από τη σχέση (3.1).

$$\left(\begin{array}{c} \text{απόδοση φωτοκορυφής} \\ \text{για ορισμένη ενέργεια} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{τιμή 2^{ης} στήλης} \\ \text{για το κανάλι} \\ \text{που περιλαμβάνει} \\ \text{την ενέργεια} \end{array} \right) \times (\text{πλάτος καναλιού}) \quad \text{σχέση (3.1)}$$

Η σχέση (3.1) υπολογίζει την πιθανότητα ανά αρχικά εκπεμπόμενο φωτόνιο, η ενέργεια που θα αποτεθεί στον ανιχνευτή να εμπίπτει στην ενεργειακή περιοχή του υπόψη καναλιού. Για πολύ μικρό εύρος καναλιού, αυτό πρακτικά ταυτίζεται με την πιθανότητα το φωτόνιο να αποθέσει όλη την ενέργειά του.

Η σχετική αβεβαιότητα της τιμής της απόδοσης όπως προκύπτει από την προσομοίωση, υπολογίζεται πάλι μέσω του αρχείου εξόδου pm_spc_enddet_#.dat χρησιμοποιώντας όμως τα δεδομένα της τρίτης στήλης. Η σχέση υπολογισμού είναι:

$$\left(\begin{array}{c} \text{αβεβαιότητα} \\ \text{απόδοσης φωτοκορυφής} \\ \text{για την εκάστοτε ενέργεια} \\ \text{(\%,3σ)} \end{array} \right) = 100 \times \frac{\left(\begin{array}{c} \text{τιμή 3ης στήλης} \\ \text{για την εκάστοτε} \\ \text{ενέργεια} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{τιμή 2ης στήλης} \\ \text{για την εκάστοτε} \\ \text{ενέργεια} \end{array} \right)} \quad \text{σχέση (3.2)}$$

Έτσι, υπολογίζονται η απόδοση φωτοκορυφής για μία συγκεκριμένη ενέργεια και η σχετική αβεβαιότητα που τη συνοδεύει με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Ωστόσο, μία παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής είναι το πλάτος της ενεργειακής διαμέρισης (bin width), που εξαρτάται από το πλήθος των καναλιών στα οποία θα διαιρεθεί το συνολικό ενεργειακό εύρος καταγραφής σωματιδίων του εικονικού ανιχνευτή. Όπως έχει μελετηθεί σε παλαιότερη Δ.Ε. [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008] για μεγάλο πλήθος διαμερίσεων, δηλαδή τελικά μικρό πλάτος διαμέρισης, δεν θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο το περιεχόμενο της γραμμής του αρχείου εξόδου pm_spc_enddet_#.dat, που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια των σωματιδίων που προσομοιώνονται, αλλά και επιπλέον γραμμών/καναλιών, όπως εξηγείται στη συνέχεια. Στον πραγματικό ανιχνευτή, κάτω από τη φωτοκορυφή καταγράφονται όχι μόνο τα φωτόνια με την αρχική ενέργεια, αλλά και μικρό πλήθος φωτονίων με ελαφρά μειωμένη ενέργεια, λόγω προηγούμενης σκέδασης. Για να ληφθούν υπόψη και αυτά τα φωτόνια, το πλήθος των καναλιών που θα πρέπει να συνυπολογιστούν για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής, εξαρτάται από το εύρος της φωτοκορυφής του πραγματικού ανιχνευτή που προσομοιώνεται, δηλαδή από τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή. Η σχέση

υπολογισμού του συνολικού πλήθους καναλιών είναι η εξής [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]:

$$n = \frac{1.5 \times FWHM}{\text{bin width}} \quad \text{σχέση (3.3)}$$

όπου n είναι το συνολικό πλήθος καναλιών που πρέπει να συνυπολογιστούν, bin width είναι το πλάτος του καναλιού σε eV και $FWHM$ είναι η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε eV.

Μετά την περιγραφή των βασικών λειτουργιών ενός κώδικα Monte-Carlo, με ιδιαίτερη έμφαση κυρίως στα χαρακτηριστικά του κώδικα χρήστη PENMAIN, στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η εφαρμογή του συγκεκριμένου κώδικα στην προσομοίωση της νέας γεωμετρίας φίλτρου αέρα στον ανιχνευτή XtRa.

3.4 Προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή XtRa για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή του κυρίως προγράμματος του κώδικα PENELOPE, απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία της προσομοίωσης είναι η λεπτομερής περιγραφή της γεωμετρίας του ανιχνευτή και του προς ανάλυση δείγματος. Χωρίς το αρχείο αυτό δεν μπορεί να γίνει χρήση της προσομοίωσης για τη βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή.

Οι διαστάσεις του εκάστοτε ανιχνευτή στο εσωτερικό του συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή. Σε αρκετές περιπτώσεις ωστόσο χρησιμοποιείται η μέθοδος της ραδιογραφίας για τη μέτρησή τους, την εξακρίβωσή τους ή την επίτευξη λεπτομερέστερης προσέγγισης.

Σημαντική παράμετρος της περιγραφής της γεωμετρίας ενός ανιχνευτή ημιαγωγού υλικού, όπως ο ανιχνευτής Γερμανίου XtRa, είναι το εύρος και το σχήμα της νεκρής ζώνης (dead layer) που δημιουργείται κατά την αντίστροφη πόλωση του κρυστάλλου με τη δημιουργία της ζώνης αντιστάθμισης και εξαρτάται από τον τύπο του ανιχνευτή. Η σημασία της περιοχής αυτής του κρυστάλλου, η ύπαρξη της οποίας είναι αναπόφευκτη, έγκειται στο γεγονός ότι δεν θα παραχθεί σήμα και κατ' επέκταση δεν θα καταγραφεί φωτόνιο το οποίο πραγματοποίησε αλληλεπίδραση εντός των ορίων της. Για τον προσδιορισμό του πάχους της ζώνης αυτής, δεν είναι δυνατή η άμεση μέτρηση και δίνεται, ακόμα και από τον κατασκευαστή, κατ' εκτίμηση. Για το λόγο αυτό πρέπει να γίνεται έλεγχος και εξακρίβωση [Rodenas J. et al., 2003], [Liu Liye et al., 2006], [Schlager M., 2007].

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαστάσεις που δίνει ο κατασκευαστής για τον ανιχνευτή ΧtRa σύμφωνα με το πιστοποιητικό του το οποίο φαίνεται στην εικόνα 3.7 στο τέλος του κεφαλαίου:

Διάμετρος κρυστάλλου	80 mm
Μήκος κρυστάλλου	78 mm
Διάμετρος εσωτερικής οπής	11 mm
Βάθος εσωτερικής οπής	66.5 mm
Νεκρή ζώνη στην άνω πλευρά (front dead layer)	0.4 mm

Πίνακας 3.1: διαστάσεις ανιχνευτή που δίνει ο κατασκευαστής

Σε ό,τι αφορά στη διάμετρο και το μήκος του κρυστάλλου του ανιχνευτή αλλά και στις διαστάσεις της εσωτερικής οπής του, για την προσομοίωση του ανιχνευτή ΧtRa χρησιμοποιούνται οι τιμές του πίνακα 3.1. Ιδιαίτερη αναφορά ωστόσο πρέπει να γίνει στην επιλογή των παραμέτρων της νεκρής ζώνης.

Είναι εμφανές (πίνακας 3.1) ότι ο κατασκευαστής δίνει μία τιμή για τη νεκρή περιοχή που δημιουργείται, μόνο για την άνω πλευρά του κρυστάλλου. Δεδομένου όμως ότι το πάχος της νεκρής ζώνης δίνεται κατ' εκτίμηση, αρχικά θα πρέπει να γίνει έλεγχος της τιμής αυτής. Παράλληλα, θα πρέπει να ελεγχθεί και η πιθανότητα να δημιουργείται νεκρή ζώνη και στις άλλες πλευρές του κρυστάλλου [Rodenas J. et al., 2003], το πάχος της οποίας θα πρέπει να εκτιμηθεί και να ληφθεί υπόψη στις προσομοιώσεις. Το πάχος της νεκρής ζώνης του ανιχνευτή μπορεί να είναι διαφορετικό στις διάφορες περιοχές του ανιχνευτή και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, το είδος και το βάθος της επαφής (P+ contact ή N+ contact) και την εφαρμοζόμενη υψηλή τάση πόλωσης του ανιχνευτή (high voltage).

Το πρόβλημα της έλλειψης πληροφοριών σχετικά με τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών γερμανίου αναφέρεται σχετικά συχνά στη βιβλιογραφία σε περιπτώσεις που επιχειρείται η προσομοίωσή τους [Dryak P. & Kovar P., 2006], [Vidmar T. et al., 2007], [Jurado Vargas M. & Guerra A.L., 2006]. Βρέθηκε ότι τα στοιχεία σχετικά με το πάχος του dead layer αλλά και την πλευρά του κρυστάλλου στην οποία βρίσκεται όπως παρέχονται από τον κατασκευαστή είναι ενδεικτικές, και θα πρέπει να γίνεται επαλήθευσή τους ή και αλλαγή τους ώστε να βρεθεί η κατάλληλη γεωμετρία του ανιχνευτή για το εύρος των ενεργειών που ενδιαφέρει την εκάστοτε μελέτη. Ενδεικτικά αναφέρονται περιπτώσεις όπου το πραγματικό πάχος της νεκρής

ζώνης εκτιμάται διπλάσιο από αυτό που δίνει ο κατασκευαστής [Rodenas J. et al., 2003].

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η μεθοδολογία εκτίμησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της νεκρής ζώνης, για τον ανιχνευτή XiRa, που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.

3.5 Επιλογή των διαστάσεων του *dead layer*

Για την εύρεση των ακριβών διαστάσεων του *dead layer*, μετά από έρευνα στη βιβλιογραφία [Rodenas J. et al., 2003], [Liu Liye et al., 2006], [Schlager M., 2007], βρέθηκε ότι η συνήθης τακτική περιλαμβάνει τη μελέτη διαφόρων περιπτώσεων γεωμετρίας του κρυστάλλου (τροποποιώντας τη νεκρή ζώνη), μέσω της σύγκρισης δεδομένων που προκύπτουν από την προσομοίωση των περιπτώσεων αυτών με αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ εφαρμόζεται η μεθοδολογία αυτή, ενώ τα βήματά της περιγράφονται ακολούθως:

- Αρχικά, γίνεται μια υπόθεση για τις διαστάσεις της νεκρής ζώνης με βάση άλλες εργασίες, άλλους ανιχνευτές ή άλλες παρόμοιες γεωμετρίες που έχουν ήδη μελετηθεί.
- Γίνεται προσομοίωση της περίπτωσης με βάση αυτή την αρχική υπόθεση και από τα αποτελέσματά της υπολογίζονται μεγέθη, όπως για παράδειγμα η απόδοση φωτοκορυφής, τα οποία συγκρίνονται με αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από πειράματα.
- 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, προκύπτει μία νέα τιμή για τις διαστάσεις του *dead layer* και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι πειραματικές τιμές και εκείνες της προσομοίωσης να συγκλίνουν. Στη βιβλιογραφία βρέθηκε ότι αποδεκτές θεωρούνται αποκλίσεις της τάξης του 1-3% [Schlager M., 2007], αν και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν γίνει δεκτές και μεγαλύτερες αποκλίσεις, της τάξης του 5% [Liu Liye et al., 2006].

Στην παρούσα Δ.Ε. για την εύρεση των διαστάσεων του *dead layer* πραγματοποιήθηκε μια σειρά από προσομοιώσεις με τη βοήθεια του κώδικα PENELOPE και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με πειραματικές τιμές, ώστε να εκτιμηθεί με ακρίβεια το ζητούμενο πάχος. Πρέπει να τονιστεί ότι, ακριβώς επειδή το πάχος του *dead layer* δεν μπορεί να μετρηθεί, η τιμή του αποτελεί εκτίμηση, τέτοια

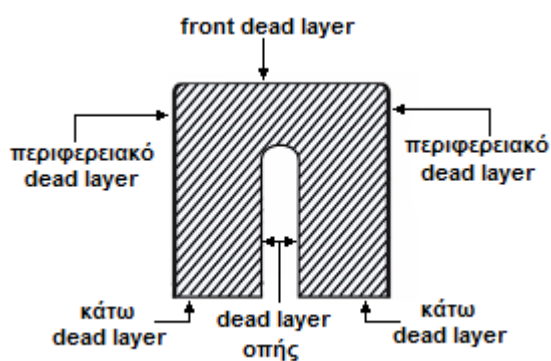
ώστε, για το ενεργειακό εύρος ενδιαφέροντος, οι τιμές της απόδοσης από την προσομοίωση και από τα πειράματα να έχουν αποκλίσεις που να θεωρούνται αποδεκτές στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης. Ως αποδεκτή στην παρούσα Δ.Ε. θεωρείται απόκλιση της τάξης του 2-3%.

Στην παρούσα Δ.Ε. για την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν πρότυπες πηγές και πηγές που διατέθηκαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στα πλαίσια Ασκήσεων Διασύγκρισης (intercomparisons) που έχουν οργανωθεί από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) και το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ). Οι πηγές αυτές μετρήθηκαν στον ανιχνευτή XtRa για τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφής σε διάφορες ενέργειες. Παράλληλα, έγιναν προσομοιώσεις για κάθε περίπτωση και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες αποδόσεις φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Έγινε σύγκριση των τιμών των αποδόσεων και στην περίπτωση που η προσομοίωση υπερεκτιμούσε την απόδοση, για την επόμενη επανάληψη επιλεγόταν μεγαλύτερο πάχος για τη νεκρή ζώνη ή επιπλέον περιοχή του ανιχνευτή χαρακτηριζόταν ως dead layer. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο μεγαλύτερος είναι ο ενεργός όγκος του κρυστάλλου του ανιχνευτή τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοσή του. Αντίθετη λογική ακολουθήθηκε στις περιπτώσεις υποεκτίμησης της απόδοσης από την προσομοίωση.

Δεδομένου ότι για τη νέα γεωμετρία φίλτρων αέρα δεν υπήρχαν πειραματικά δεδομένα, λόγω έλλειψης προτύπων πηγών στη συγκεκριμένη γεωμετρία, η προσέγγιση έπρεπε να γίνει με άλλες γεωμετρίες διαστάσεων που να προσεγγίζουν τις αντίστοιχες της νέας γεωμετρίας. Πρέπει στο σημείο αυτό να τονισθεί ότι οι διαστάσεις του ανιχνευτή που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό δεν είναι απαραίτητα οι πραγματικές διαστάσεις του ανιχνευτή. Πρόκειται για ένα συνδυασμό διαστάσεων του ανιχνευτή που οδηγεί σε σύμπτωση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης για την υπόψη γεωμετρία πηγής. Άλλη γεωμετρία πηγής θα οδηγούσε σε παρόμοιες, αλλά διαφορετικές διαστάσεις ανιχνευτή. Όσο εντονότερη είναι η διαφοροποίηση των εξεταζόμενων γεωμετριών, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίστοιχη διαφοροποίηση των προαναφερθέντων συνδυασμών [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Για το λόγο αυτό, οι πηγές με τις οποίες γίνεται ο έλεγχος των γεωμετρικών διαστάσεων του ανιχνευτή πρέπει να είναι παρόμοιας γεωμετρίας με την πηγή για την οποία ενδιαφέρει η βαθμονόμηση απόδοσης. Για το λόγο αυτό αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν οι δύο γεωμετρίες που αναλύονται παρακάτω:

- φίλτρο διαμέτρου 47mm από υλικό fiber glass (υλικό το οποίο προσομοιώθηκε ως διοξείδιο του πυριτίου SiO₂) διαμέτρου 47mm το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε Άσκηση Διασύγκρισης (Intercomparison) που διοργανώθηκε από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας το 2006 (International Atomic Energy Agency / IAEA-CU-2660-11).
- κυλινδρικό δοχείο ίδιο με εκείνο που χρησιμοποιείται για τη γεωμετρία 2 με τη διαφορά ότι το ραδιενεργό διάλυμα (πηγή) καλύπτει 10mm του συνολικού ύψους του δοχείου. Η γεωμετρία αυτή έχει την κωδική ονομασία ‘γεωμετρία 8’.

Για καλύτερη κατανόηση των μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια και θα αναφέρονται στη νεκρή ζώνη του ανιχνευτή XtRa, στο παρακάτω σκαρίφημα φαίνεται ο κρύσταλλος γερμανίου του ανιχνευτή στον οποίο έχουν τοποθετηθεί οι νεκρές ζώνες.



Εικόνα 3.3: Σκαρίφημα με τις θέσεις των τεσσάρων ειδών dead layer

Δεδομένου ότι dead layer μπορεί να υπάρξει σε όλες τις πλευρές του κρυστάλλου, ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιούνται οι ονομασίες που φαίνονται στο σκαρίφημα.

3.5.1 Τροποποίηση του κυρίως προγράμματος προσομοίωσης

Το κυρίως πρόγραμμα PENMAIN αναφέρεται στην προσομοίωση μόνο σημειακών πηγών. Επομένως, θα πρέπει να γίνει τροποποίησή του ώστε να μπορούν να μελετηθούν και πηγές - γεωμετρίες όγκου [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006], όπως η εξεταζόμενη νέα γεωμετρία φίλτρου αέρα. Για την προσομοίωση σημειακής πηγής ορίζεται από το χρήστη η θέση της πηγής σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων μέσω του αρχείου εισόδου τύπου .in. Το σημείο αυτό αποτελεί την αφετηρία όλων των ιστοριών της προσομοίωσης.

Για την εισαγωγή της γεωμετρίας όγκου, η αφητηρία κάθε ιστορίας επιλέγεται να ορίζεται με τυχαίο τρόπο εντός όμως των ορίων της προσομοιούμενης πηγής. Συγκεκριμένα, ο ορισμός γίνεται στο κυρίως πρόγραμμα με εισαγωγή τριών γεννητριών τυχαίων αριθμών, όσοι δηλαδή και οι άξονες του ορθοκανονικού συστήματος συντεταγμένων. Οι γεννήτριες επιλέγουν τυχαία έναν αριθμό από το 0 έως το 1. Για τον ορισμό ενός σημείου εντός του όγκου της πηγής θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τη διάσταση της πηγής στον κάθε άξονα. Για την περίπτωση των γεωμετριών που προσομοιώνονται στην παρούσα Δ.Ε. οι δύο πρώτοι τυχαίοι αριθμοί πολλαπλασιάζονται με την ακτίνα του φίλτρου ή του κυλινδρικού δοχείου αντίστοιχα (άξονες x και y), ενώ ο τρίτος με το πάχος της πηγής (άξονας z).

Δεδομένου ότι υπάρχει πιθανότητα οι αριθμοί των γεννητριών να είναι τέτοιοι ώστε το ζεύγος (x,y) να είναι εκτός των ορίων της πηγής, πριν την εκτέλεση του κώδικα γίνεται κατάλληλος έλεγχος. Αν το ζεύγος (x,y) ικανοποιεί τη συνθήκη ελέγχου, τότε ο κώδικας συνεχίζει κανονικά. Διαφορετικά επιλέγονται δύο νέοι τυχαίοι αριθμοί μέσω των γεννητριών τυχαίων αριθμών και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Τελικά, ορίζεται πλήρως ένα σημείο το οποίο βρίσκεται μέσα στον όγκο της πηγής και θεωρείται ότι είναι η σημειακή πηγή που αναγνωρίζει ο κώδικας.

Κάθε φορά που προσομοιώνεται μια ιστορία ο κώδικας χρησιμοποιεί διαφορετικό σημείο λόγω των γεννητριών τυχαίων αριθμών. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά ο όγκος της πηγής χωρίζεται σε πολλές σημειακές πηγές οι οποίες προσομοιώνονται. Είναι εμφανές ότι όσες περισσότερες ιστορίες προσομοιωθούν, τόσο περισσότερες σημειακές πηγές ορίζονται και άρα τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η πηγή όγκου.

Η τροποποίηση του κώδικα PENMAIN για το φίλτρο διαμέτρου 47mm και τη γεωμετρία 8 παρουσιάζονται στο παράρτημα Β (κώδικας Β.1 και Β.3, αντίστοιχα).

3.5.2 Έλεγχος του τρόπου ορισμού των πηγών προσομοίωσης

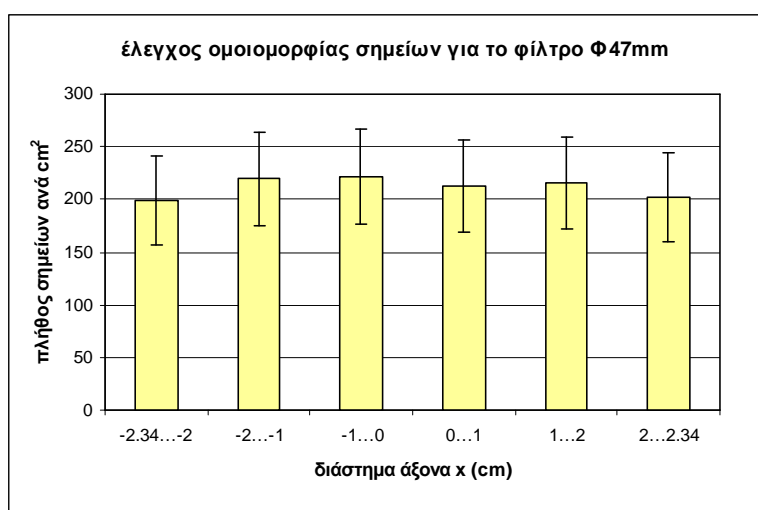
Πριν γίνουν οι προσομοιώσεις για τις βοηθητικές γεωμετρίες με σκοπό την εύρεση των διαστάσεων της νεκρής ζώνης του ανιχνευτή XtRa, πρέπει να γίνει έλεγχος του τρόπου ορισμού της πηγής από το χρήστη, ώστε να διαπιστωθεί ότι τα σημεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως κατανέμονται ομοιογενώς στον όγκο της πηγής.

Με κατάλληλη τροποποίηση στον κώδικα PENMAIN καταγράφονται σε ένα αρχείο εξόδου όλα τα σημεία (x,y,z) που επιλέγουν οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών του κώδικα (κώδικας Β.2 και Β.4 παραρτήματος Β για το φίλτρο διαμέτρου 47mm και το

κυλινδρικό δοχείο γεωμετρίας 8 αντίστοιχα). Η προβολή των σημείων αυτών γίνεται σε δύο τομές (επίπεδο x-y, επίπεδο y-z) ώστε να ελεγχθεί η ομοιογένεια της σχηματιζόμενης γεωμετρίας. Αν προβληθούν όλα τα σημεία μαζί, χάνεται η πληροφορία, καθώς προβάλλονται στις δύο διαστάσεις σημεία που ανήκουν σε όλο τον όγκο της πηγής και το σχήμα που προκύπτει είναι παραπλανητικό. Επιλέγεται για το σκοπό αυτό τυχαία μία τομή στον άξονα των x πάχους 0.1cm και προβάλλονται τα σημεία σε επίπεδο y-z, καθώς και μία τομή στον άξονα των z πάχους 0.1cm μέσα στον όγκο της πηγής και προβάλλονται τα σημεία σε επίπεδο x-y. Στα διαγράμματα 3.10÷3.13, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των παραπάνω τομών για τις δύο γεωμετρίες.

Δεδομένου ότι οι τροποποιήσεις του κώδικα PENMAIN είναι παρόμοιες για τις δύο γεωμετρίες έλεγχος της ομοιογένειας γίνεται μόνο για το φίλτρο διαμέτρου 47mm και μόνο για την απεικόνιση σε επίπεδο x-y.

Για να διαπιστώσουμε ότι όντως τα σημεία στις παραπάνω απεικονίσεις (διαγράμματα 3.10 και 3.11 στο τέλος του κεφαλαίου) είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, το μήκος κατά τον άξονα των x χωρίζεται σε έξι διαστήματα: [-2.35,-2], [-2, -1], [-1, 0], [0, 1], [1, 2] και [2, 2.35]. Υπολογίζεται το πλήθος των σημείων τα οποία περιλαμβάνονται στις επιφάνειες που ορίζονται από τα χρησιμοποιούμενα διαστήματα και ανάγεται στην επιφάνεια αυτή. Η αναγωγή γίνεται για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, καθώς οι επιφάνειες που ορίζονται δεν είναι ίσες μεταξύ τους. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το πλήθος των σημείων ανά μονάδα επιφάνειας μαζί με την αβεβαιότητά του σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ.



Διάγραμμα 3.1: Έλεγχος πλήθους σημείων σε επίπεδο x-y για φίλτρο διαμέτρου 47mm

Προκύπτει ότι η κύμανση του ανηγμένου στην επιφάνεια πλήθους σημείων που λαμβάνει ο κώδικας για το φίλτρο Ø47mm είναι 4.5% και δεν είναι στατιστικά

σημαντική καθώς όλες οι τιμές είναι μέσα στο όρια που θέτουν οι αβεβαιότητες. Επομένως, η πηγή ορίζεται με τρόπο ομοιόμορφο και το τροποποιημένο κυρίως πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των δύο γεωμετριών που επιλέχθηκαν για την εύρεση των διαστάσεων του dead layer του ανιχνευτή XtRa. Επισημαίνεται πάντως ότι η παραπάνω διερεύνηση είναι υποτυπώδης και αποσκοπεί στο να διαπιστώθει αν υπάρχει κάποιο σοβαρό λογικό λάθος στην υλοποίηση του αλγόριθμου δημιουργίας της πηγής όγκου. Πληρέστερη διερεύνηση θα μπορούσε να γίνει με χρήση άλλων μεθόδων, όπως για παράδειγμα με τεστ- χ^2 .

3.5.3 Προσδιορισμός της νεκρής ζώνης με χρήση του φίλτρου διαμέτρου 47mm

Η μεθοδολογία της παραγράφου 3.5 αρχικά εφαρμόζεται για το φίλτρο από υλικό glass-fiber (υλικό το οποίο προσομοιώθηκε ως διοξείδιο του πυριτίου SiO_2) διαμέτρου 47mm και πολύ μικρού πάχους, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε άσκηση διασύγκρισης (Intercomparison) που διοργανώθηκε από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας το 2006 (International Atomic Energy Agency/IAEA-CU-2660-11).

Στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα ισότοπα που περιέχονταν στο συγκεκριμένο φίλτρο, καθώς και οι ενεργότητές τους, συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες (1σ). Επισημαίνεται ότι οι τιμές που παρουσιάζονται δεν είναι στρογγυλοποιημένες, καθώς αποτελούν ενδιάμεσο στάδιο σε υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.

<i>Ραδιοϊσότοπο</i>	<i>Ενεργότητα (Bq/φίλτρο)</i>	<i>Αβεβαιότητα activity (1σ, %)</i>
^{241}Am	0.158	2.11
^{57}Co	3.89	2.86
^{60}Co	2.66	2.78
^{134}Cs	3.26	2.27
^{137}Cs	3.18	2.33
^{54}Mn	2.89	2.56
^{65}Zn	2.57	2.59

Πίνακας 3.2: Πίνακας ενεργότητας από το Intercomparison 2006

Από τα παραπάνω ισότοπα στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιούνται και γίνονται προσομοιώσεις για τα ^{241}Am , ^{137}Cs και ^{54}Mn , τα οποία εκπέμπουν φωτόνια ενέργειας 59.54, 661.62 και 834.83keV αντίστοιχα. Πρόκειται για ισότοπα στα οποία δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Το ^{241}Am χρησιμοποιείται για

τον έλεγχο στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών, για λόγους πληρότητας, ενώ τα ισότοπα ^{137}Cs και ^{54}Mn γιατί είναι σχετικά κοντά στην ενεργειακή περιοχή του ενδιαφέροντος της παρούσας Δ.Ε. (477.59keV, ^7Be).

3.5.3.1 Πειραματικά δεδομένα για το φίλτρο διαμέτρου 47mm

Ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για την περίπτωση των πειραμάτων, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{eff} = \frac{\text{area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{activity}} \quad \text{σχέση (2.1)}$$

όπου η επιφάνεια (area) και ο χρόνος (time) λαμβάνονται από το φάσμα, το ποσοστό εκπομπής (yield) από βιβλιοθήκες ισotόπων και η ενεργότητα (activity) από το πιστοποιητικό.

Η αβεβαιότητα της πειραματικής απόδοσης οφείλεται στην αβεβαιότητα της επιφάνειας, σε όρους cps, που προκύπτει από το αντίστοιχο κάθε φορά φάσμα και την αβεβαιότητα της ενεργότητας του δείγματος που προκύπτει από το πιστοποιητικό της πηγής. Η σχέση υπολογισμού της αβεβαιότητας της απόδοσης είναι η εξής:

$$\text{unc}_{\text{eff}} = \sqrt{\text{unc}_{\text{cps}}^2 + \text{unc}_{\text{activity}}^2} \quad \text{σχέση (3.4)}$$

όπου unc_{cps} είναι η αβεβαιότητα του ρυθμού καταγραφόμενων παλμών, cps, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, όπως προκύπτει από το εκάστοτε φάσμα και $\text{unc}_{\text{activity}}$ η αβεβαιότητα της ενεργότητας του δείγματος, όπως προκύπτει από το πιστοποιητικό του φίλτρου.

Το φίλτρο βρίσκεται μέσα σε σφραγισμένο πλαστικό φάκελο. Προκειμένου να αναλυθεί τοποθετείται πάνω σε βάση από πλεξιγκλάς πάχους 1mm, η οποία τοποθετείται πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή. Το υλικό του καλύμματος του ανιχνευτή δεν δίνεται από τον κατασκευαστή, για το λόγο αυτό υποτέθηκε σε πρώτη φάση ότι είναι από πολυστυρένιο.

Τα φάσματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι τα IAEAFILEA (14/4.74), IAEAFILB (14/4.78), IAEAFILC (14/4.119) και IAEAFILD (14/4.122) Από αυτά τα φάσματα προκύπτουν με στάθμιση οι κρούσεις στη μονάδα του χρόνου και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες για τα τρία παραπάνω ισότοπα, δεδομένα τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.3:

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>cps</i>	<i>Αβεβαιότητα cps (1σ, %)</i>
59.54	0.0158	3.42
661.65	0.227	2.88
834.83	0.205	2.46

Πίνακας 3.3: Cps για το φίλτρο διαμέτρου 47mm

Σύμφωνα με τη σχέση (2.1) υπολογίζεται η πειραματική απόδοση για την περίπτωση του φίλτρου διαμέτρου 47mm. Το ποσοστό εκπομπής του κάθε ισότοπου είναι ίσο με 0.36 για το ^{241}Am , 0.851 για το ^{137}Cs και 0.9998 για το ^{54}Mn [Radiation Decay v.3.6].

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας που συνοδεύει την πειραματική απόδοση φωτοκορυφής γίνεται με βάση τη σχέση (3.4) και φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 3.4. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από τον κώδικα SPUNAL και υπάρχουν στα φάσματα είναι σε 1.65σ, οπότε γίνεται κατάλληλη αναγωγή στο 1σ.

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Αβεβαιότητα cps (1σ, %)</i>	<i>Αβεβαιότητα activity (1σ, %)</i>	<i>Αβεβαιότητα πειραματικής απόδοσης (1σ, %)</i>
59.54	3.42	2.11	1.12
661.65	2.88	2.33	0.29
834.83	2.46	2.56	0.25

Πίνακας 3.4: Υπολογισμός αβεβαιότητας πειραματικής απόδοσης

Έτσι προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 3.5 για την απόδοση φωτοκορυφής.

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής</i>	<i>Αβεβαιότητα πειραματικής απόδοσης (1σ, %)</i>
59.54	0.278	1.12
661.65	0.0792	0.29
834.83	0.0711	0.25

Πίνακας 3.5: Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής φίλτρου διαμέτρου 47mm

3.5.1.2 Προσομοίωση φίλτρου διαμέτρου 47mm με dead layer σε όλη την περιφέρεια του κρυστάλλου

Επιλέγεται, ως αρχική υπόθεση, ο ανιχνευτής να έχει dead layer σε όλες τις πλευρές του κρυστάλλου (εικόνα 3.3). Αυτό έγινε γιατί σε προηγούμενη Δ.Ε. [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008], όπου μελετήθηκε ο ανιχνευτής HPGc του ΕΠΤ-ΕΜΠ, είχε

βρεθεί ότι νεκρές ζώνες υπήρχαν σε όλη την περιφέρεια του κρυστάλλου. Ο ανιχνευτής XtRa έχει μελετηθεί σε προσομοίωση Monte Carlo και σε παλαιότερη Δ.Ε. [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006], επομένως το αρχείο γεωμετρίας υπήρχε ήδη. Το αρχείο αυτό περιείχε τη θωράκιση του ανιχνευτή, τον ίδιο τον ανιχνευτή και μόνο front dead layer, όπως ακριβώς δίνει ο κατασκευαστής. Έτσι, έπρεπε να γίνει τροποποίησή του ώστε να υπάρχουν δεδομένα για dead layer περιφερειακά, κάτω και στην οπή, τα πάχη των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.6. Τροποποιώντας το αρχείο της γεωμετρίας (αρχείο Δ.1 παραρτήματος Δ) εισάγονται τα επιθυμητά dead layers, οι τιμές των οποίων, όπως επελέγησαν για τη συγκεκριμένη περίπτωση, δίνονται στον πίνακα 3.6. Στην εικόνα 3.8 στο τέλος του κεφαλαίου φαίνεται η απεικόνιση του παραπάνω αρχείου γεωμετρίας, δηλαδή η γεωμετρία που δίνεται στον κώδικα για τη συγκεκριμένη περίπτωση ανιχνευτή - φίλτρου.

Front dead layer	0.4 μm
Περιφερειακό dead layer	200 μm
Dead layer οπής	200 μm
Κάτω dead layer	200 μm

Πίνακας 3.6: Επιλογές dead layer σε όλες τις πλευρές του κρυστάλλου

Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι, παρόλο που δεν ήταν διαθέσιμη η πληροφορία για την περιοχή του φίλτρου η οποία καταλαμβάνεται από το ραδιενεργό παρασκευάσμα, έγινε η υπόθεση ότι η ραδιενεργός πηγή καταλαμβάνει όλη τη διατομή του φίλτρου ($\varnothing 47\text{mm}$), το οποίο θεωρήθηκε ως πηγή όγκου. Το φίλτρο βρίσκεται μέσα σε πλαστικό φάκελο ο οποίος μετά από μέτρηση βρέθηκε ότι έχει συνολικό πάχος 0.3mm (0.15mm σε κάθε πλευρά) και προσομοιώθηκε ως Plexiglas. Το ύψος-πάχος της πηγής όγκου μετρήθηκε ίσο με 1.69mm. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται ξεχωριστά για τις ενέργειες των 59.54keV, 661.65keV και 834.83keV αντίστοιχα. Όλα τα αρχεία εισόδου (τύπου .in) για την κάθε ενέργεια που χρησιμοποιήθηκαν από τον κώδικα για την προσομοίωση της κάθε περίπτωσης φωτονίων παρατίθενται στο παράρτημα Γ (αρχεία Γ.1, Γ.2 και Γ.3 αντίστοιχα). Στην προσομοίωση πρέπει να ληφθούν υπόψη η βάση από Plexiglas πάχους 1mm και το κάλυμμα από πολυστυρένιο του ανιχνευτή.

Οι προσομοιώσεις έγιναν με ενεργειακή διαμέριση 1000 καναλιών και για τον υπολογισμό της απόδοσης έπρεπε να ληφθεί υπόψη ο απαραίτητος για κάθε ισότοπο αριθμός καναλιών στο αρχείο εξόδου σύμφωνα με τη σχέση (3.3). Η διακριτική

ικανότητα του ανιχνευτή που απαιτείται στη συγκεκριμένη σχέση λαμβάνεται από τη συνάρτηση βαθμονόμησης εύρους ημίσειας ύψους του ανιχνευτή. Για τον ανιχνευτή XtRa η υπόψη συνάρτηση είναι η:

$$FWHM = 2.435121 + 8.430696 \cdot 10^{-4} \cdot (ch) + 3.320905 \cdot 10^{-8} \cdot (ch)^2 \quad \text{σχέση (3.5)}$$

όπου ch: είναι το κανάλι του φάσματος που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη ενέργεια και προκύπτει από την ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Για τον ανιχνευτή XtRa είναι η εξής:

$$E = -0.37855152 + 4.910633 \cdot 10^{-1} \cdot (ch) - 2.676848320905 \cdot 10^{-8} \cdot (ch)^2 \quad \text{σχέση (3.6)}$$

όπου E: είναι η ενέργεια των φωτονίων σε keV και ch: το ζητούμενο κανάλι.

Τελικά, το πλήθος των καναλιών που συνυπολογίζονται είναι 31 για το ^{241}Am , 4 για το ^{137}Cs και 4 για το ^{54}Mn . Ο υπολογισμός των αποδόσεων φωτοκορυφής για τις ενέργειες αυτές προκύπτει από τη σχέση (3.1), ενώ οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν από τη σχέση (3.2). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.7 μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ δίνεται και η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων.

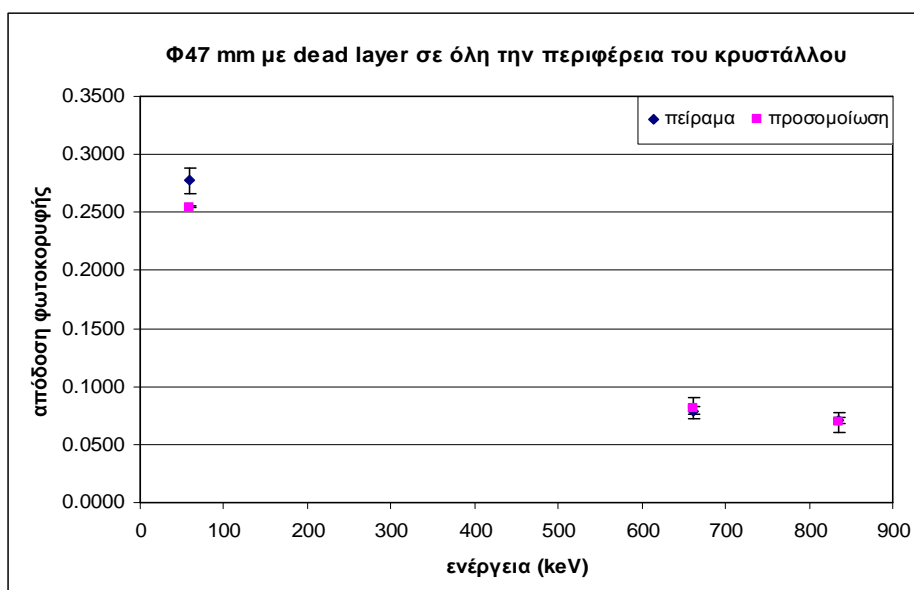
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν τόσοσ ώστε οι αβεβαιότητες της προσομοίωσης να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες πειραματικές (της τάξης των 10min σε υπολογιστή Intel(R) 1.60GHz, 1GB RAM). Με τον τρόπο αυτό οι προσομοιώσεις ήταν σύντομες χωρίς όμως να είναι εις βάρος της στατιστικής του τελικού αποτελέσματος.

Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
59.54	0.2544	0.066	0.278	1.12	-8.39
661.62	0.0807	0.29	0.0792	0.29	1.90
834.83	0.0696	0.21	0.0711	0.25	-2.10

Πίνακας 3.7: Σύγκριση αποδόσεων για φίλτρο $\varnothing 47\text{mm}$ με dead layer σε όλες τις πλευρές

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 3.7 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 2% για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV και 834.83keV, ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV είναι της τάξης του 8.5%. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι παραπάνω αποδόσεις και οι αντίστοιχες σχετικές αβεβαιότητες για φίλτρο διαμέτρου 47mm με dead layer σε όλη την περιφέρεια του κρυστάλλου. Επισημαίνεται ότι το γράφημα αυτό, όπως και όλα τα γραφήματα

απόδοσης-ενέργειας που θα ακολουθήσουν, δεν είναι σε διπλή λογαριθμική κλίμακα ώστε να είναι συγκρίσιμες οι αποκλίσεις των τιμών σε όλη την ενεργειακή περιοχή.

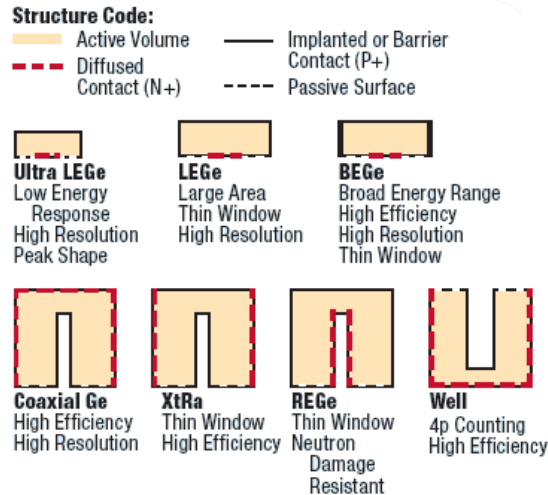


Διάγραμμα 3.2: Συσχέτιση αποδόσεων για φίλτρο διαμέτρου 47mm με dead layer παντού.

Προκύπτει ότι οι αποδόσεις που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση για τις υψηλές ενέργειες βρίσκονται μέσα στα όρια που στην παρούσα Δ.Ε. θεωρούνται αποδεκτά. Για τα φωτόνια των 661.62keV παρατηρείται ότι η απόδοση που υπολογίζεται από την προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πειραματική, ενώ για τα φωτόνια των 834.83keV παρατηρείται το αντίθετο. Στα 59.53keV, ωστόσο, η απόκλιση είναι μεγάλη και στατιστικά σημαντική, με την τιμή της απόδοσης από την προσομοίωση να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πειραματική. Σημειώνεται πάντως ότι τα φωτόνια της ενέργειας αυτής είναι πολύ μακριά από την ενέργεια που ενδιαφέρει στα πλαίσια της Δ.Ε.

3.5.3.3 Προσομοίωση φίλτρου διαμέτρου 47mm με dead layer μόνο μπροστά (front) και περιφερειακά

Στην παρακάτω εικόνα 3.4 φαίνονται οι πληροφορίες που δίνει ο κατασκευαστής για τους ανιχνευτές γερμανίου και τις περιοχές των dead layer [www.canberra.com]. Με βάση την παραπάνω εικόνα, επιλέγεται στο δεύτερο μελετούμενο σενάριο στον ανιχνευτή XtRa να υπάρχει dead layer μόνο στην επάνω πλευρά του κρυστάλλου και περιφερειακά.



Εικόνα 3.4: Περιοχές dead layer που δίνει ο κατασκευαστής [www.canberra.com]

Για το λόγο αυτό η δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε αναφέρεται σε φίλτρο διαμέτρου 47mm χωρίς dead layer στην κάτω βάση του κρυστάλλου καθώς και στην οπή. Για να γίνει αυτή η προσομοίωση έγινε κατάλληλη τροποποίηση στο αρχείο γεωμετρίας (αρχείο Δ.2 παραρτήματος Δ) ώστε να αφαιρεθούν τα δεδομένα που αναφέρονταν στο dead layer της οπής και της κάτω πλευράς του κρυστάλλου.

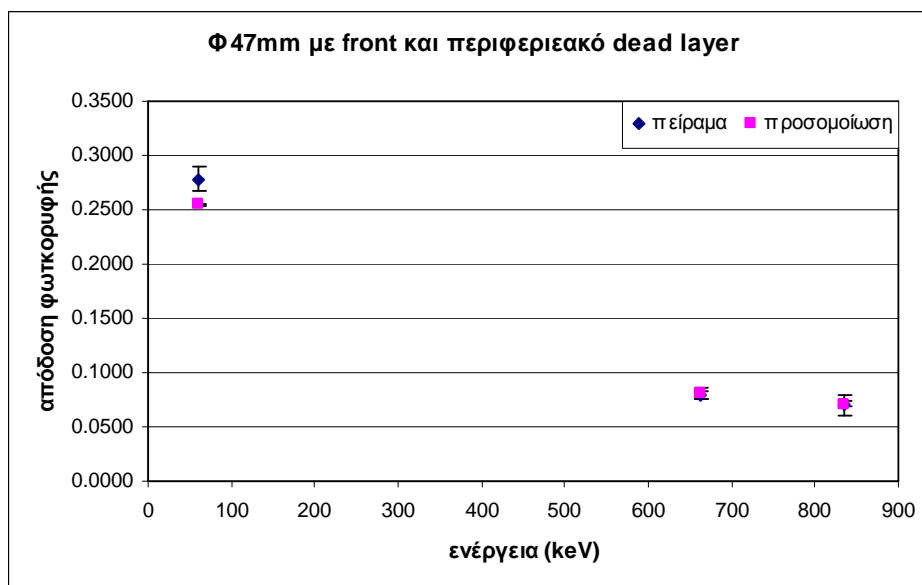
Το dead layer στην κάτω βάση του κρυστάλλου και στην οπή επηρεάζει κυρίως τα φωτόνια υψηλών ενεργειών και επομένως δεν αναμένεται βελτίωση της απόκλισης των αποδόσεων για τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV.

Έγιναν προσομοιώσεις για τα τρία ισότοπα και τις αντίστοιχες ενέργειες των φωτονίων τους, όπως και για την περίπτωση με νεκρή ζώνη σε όλη την περιφέρεια του κρυστάλλου και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.8:

Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
59.54	0.2544	0.066	0.278	1.12	-8.38
661.65	0.08119	0.104	0.0792	0.294	2.47
834.83	0.06987	0.107	0.0711	0.252	-1.67

Πίνακας 3.8: Σύγκριση αποδόσεων για φίλτρο Ø47mm με front και περιφερειακό dead layer

Στο παρακάτω γράφημα (διάγραμμα 3.3) φαίνονται οι παραπάνω τιμές για τις αποδόσεις με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τους.



Διάγραμμα 3.3: Συσχέτιση αποδόσεων για φίλτρο διαμέτρου 47mm με front και peripheral dead layer

Παρατηρείται ότι για τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας η ποσοστιαία απόκλιση των αποδόσεων δεν έχει σημειώσει ιδιαίτερη μείωση κατά απόλυτη τιμή, όπως και αναμενόταν, καθώς δεν μεταβλήθηκε η τιμή του πάχους του front dead layer, από το οποίος κυρίως επηρεάζονται. Αυτό σημαίνει ότι μικρή αλλαγή στο πάχος του front dead layer έχει μεγάλη επίδραση στην εξασθένιση τους. Ωστόσο, δεν συμβαίνει το ίδιο με τα dead layer στις άλλες περιοχές του κρυστάλλου τα οποία επηρεάζουν λιγότερο την εξασθένιση φωτονίων χαμηλών ενεργειών [Jurado Vargas M. & Guerra A.L., 2006]. Δεδομένου όμως ότι η παρούσα Δ.Ε. πραγματοποιείται τη βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για τα φωτόνια του ^7Be που έχουν ενέργεια 477.59keV, η απόκλιση της απόδοσης για τα φωτόνια του ^{241}Am δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς βρίσκεται σε διαφορετική ενεργειακή περιοχή.

Για τα φωτόνια των 661.62keV η απόκλιση αυξήθηκε, με την απόδοση της προσομοίωσης να παραμένει μεγαλύτερη από την πειραματική, ενώ για τα φωτόνια των 834.83keV η απόκλιση μειώθηκε, με την απόδοση της προσομοίωσης να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πειραματική. Οι αποδόσεις που υπολογίζονται με βάση την προσομοίωση και με βάση τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν αποκλίσεις της τάξης του 2% και μπορεί να θεωρηθεί ότι και αυτή η προσομοίωση προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειράματα.

3.5.4 Προσδιορισμός του *dead layer* με χρήση της γεωμετρίας 8

Η σύγκριση πειραματικών αποδόσεων και αποδόσεων με βάση την προσομοίωση γίνεται στη συνέχεια για τη γεωμετρία 8. Η συγκεκριμένη γεωμετρία, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αναφέρεται στο ίδιο κυλινδρικό δοχείο με τη γεωμετρία 2 που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 με τη διαφορά ότι το ραδιενεργό διάλυμα (πηγή) καλύπτει 10mm του συνολικού ύψους του δοχείου. Έγιναν δύο σειρές πειραμάτων με δύο διαφορετικές πηγές:

- ραδιενεργό διάλυμα QCY12 το οποίο παρασκευάστηκε από το ραδιενεργό διάλυμα QCY.48 και το πιστοποιητικό του φαίνεται στην εικόνα 3.9 στο τέλος του κεφαλαίου. Αποτελεί διάλυμα 4M HCl.
- ραδιενεργό παρασκεύασμα προερχόμενο από Άσκηση Διαβαθμονόμησης την οποία πραγματοποίησε η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) το 2006 και το πιστοποιητικό της φαίνεται στην εικόνα 3.10 στο τέλος του κεφαλαίου. Αποτελεί διάλυμα 2M HCl. Σημειώνεται ότι η ενεργότητα των ισοτόπων της συγκεκριμένης πηγής είναι σαφώς μικρότερη από τις αντίστοιχες της προηγούμενης.

Αναφέρεται επίσης ότι για την παρασκευή των χρησιμοποιούμενων πηγών, το αρχικό διάλυμα όπως λαμβάνεται από τον κατασκευαστή της πηγής (διάλυμα 4M) ή τους διοργανωτές της Άσκησης Διαβαθμονόμησης (διάλυμα 2M), τοποθετείται στο δοχείο της εξεταζόμενης γεωμετρίας αφού πρώτα αραιωθεί. Όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια, το διάλυμα 2M HCl παραμένει ασθενέστερο του αντίστοιχου διαλύματος 4M, ακόμα και μετά την αραιώση.

3.5.4.1 Πειραματικά δεδομένα γεωμετρίας 8

Όπως γίνεται σε κάθε γ-φασματοσκοπική ανάλυση, τα δείγματα γεωμετρίας 8 τοποθετούνται στον ανιχνευτή XiRa και αναλύονται. Από την ανάλυση αυτή συλλέγονται φάσματα τα οποία περιέχουν τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τις εξεταζόμενες ενέργειες.

Ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για την περίπτωση της γεωμετρίας 8 γίνεται σύμφωνα με τη σχέση (2.1), ενώ η αβεβαιότητά της με βάση τη σχέση (3.4), όπως αναλύεται στην παράγραφο 3.5.3.1.

3.5.4.1.1 Πειραματικά δεδομένα γεωμετρίας 8 με χρήση της πηγής QCY12 (4M HCl)

Η ραδιενεργός πηγή QCY12 (4M HCl), έχει προκύψει από αραιώση του ραδιενεργού διαλύματος QCY.48, το πιστοποιητικό του οποίου παρατίθεται στην εικόνα 3.9 στο τέλος του κεφαλαίου. Στον πίνακα 3.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του αραιωμένου διαλύματος QCY12 (4M HCl). Συγκεκριμένα, δίνονται τα περιεχόμενα ισότοπα, η ενέργεια (keV) των φωτονίων που εκπέμπουν, η συγκέντρωσή τους (gammas/sec/gr) στο διάλυμα, όπως αυτή προκύπτει μετά την αραιώση, και η αβεβαιότητά της σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Στον πίνακα 3.9, η συγκέντρωση δεν έχει δοθεί με το σωστό πλήθος σημαντικών ψηφίων καθώς στόχος είναι να δοθούν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Συγκέντρωση (gammas/sec/gr)</i>	<i>Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ, %)</i>
²⁴¹ Am	59.54	911.7	1.30
¹⁰⁹ Cd	88.03	523.8	3.10
⁵⁷ Co	122.1	479.3	0.80
¹³⁹ Ce	165.9	575.5	0.70
²⁰³ Hg	279.2	1496.1	0.70
¹¹³ Sn	391.7	1728.8	1.60
⁸⁵ Sr	514.0	3137.6	1.25
¹³⁷ Cs	661.6	1941.4	0.95
⁸⁸ Y	898.0	5050.0	0.80
⁶⁰ Co	1173	2755.3	0.80
⁶⁰ Co	1333	2757.8	0.80
⁸⁸ Y	1836	5338.5	0.70

Πίνακας 3.9: Ισότοπα πιστοποιητικού QCY12 (4M HCl)

Από το πλήθος των ισωτόπων που περιέχει το πρότυπο διάλυμα, στην παρούσα Δ.Ε. για σύγκριση με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται τα ισότοπα ²⁴¹Am, ²⁰³Hg, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr και ¹³⁷Cs που εκπέμπουν φωτόνια με ενέργειες 59.54keV, 279.2keV, 391.7keV, 514.0keV και 661.62keV, αντίστοιχα. Τα ισότοπα αυτά χρησιμοποιήθηκαν, όπως και στην περίπτωση του φίλτρου διαμέτρου 47mm, αφενός λόγω του ότι είναι μονοενεργειακά και επομένως δεν εμπλέκονται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αφετέρου διότι με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πραγματοποίηση σύγκρισης σε μεγάλο εύρος ενεργειών. Παράλληλα, η ύπαρξη

φωτονίων περί την ενέργεια ανίχνευσης του ^7Be (477.59keV), επιτρέπει την εστίαση στην ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας Δ.Ε.

Έγινε ανάλυση του ραδιενεργού διαλύματος QCY12 στον ανιχνευτή XtRa (19 Ιουνίου 2003) και λήφθηκε το φάσμα Q1248A (11/0.157) από όπου υπολογίζονται οι καταγραφόμενες κρούσεις στη μονάδα του χρόνου και η αντίστοιχη αβεβαιότητά τους. Υπολογίζεται η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για κάθε ενέργεια και η αβεβαιότητά της με βάση τις σχέσεις (2.1) και (3.4). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ενέργεια (keV)	cps	Αβεβαιότητα cps (1σ, %)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ, %)	Απόδοση φωτοκορυφής	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ, %)
59.54	148.2	0.176	1.30	0.163	1.31
279.19	28.4	0.539	0.70	0.0975	0.884
391.69	67.9	0.255	1.60	0.076	1.62
514.00	61.8	0.279	1.25	0.0638	1.28
661.65	105.7	0.188	0.95	0.0548	0.968

Πίνακας 3.10: Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για το διάλυμα QCY12 (4M HCl)

3.5.4.1.2 Πειραματικά δεδομένα γεωμετρίας 8 με χρήση της πηγής της άσκησης διαβαθμονόμησης της ΕΕΑΕ (2M HCl)

Η ραδιενεργός πηγή γεωμετρίας 8 (2M HCl) που χρησιμοποιήθηκε, έχει προκύψει από αραιώση της ραδιενεργού πηγής που δόθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στα πλαίσια της άσκησης διαβαθμονόμησης που διοργανώθηκε από την ΕΕΑΕ (1 Ιουλίου 2006). Το πιστοποιητικό της αρχικής πηγής (διαλύματος) παρατίθεται στην εικόνα 3.10 στο τέλος του κεφαλαίου. Τα στοιχεία της αραιωμένης ραδιενεργού πηγής δίνονται στον πίνακα 3.11. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα περιεχόμενα ισότοπα του διαλύματος, η ενέργεια των φωτονίων που εκπέμπουν (keV), η συγκέντρωσή τους (gammas/sec/gr) στο διάλυμα, όπως αυτή έχει προκύψει μετά την αραιώση, και η αβεβαιότητά της σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Πρέπει να σημειωθεί ότι στον πίνακα αυτόν η συγκέντρωση δεν έχει δοθεί με το σωστό πλήθος σημαντικών ψηφίων καθώς στόχος είναι να δοθούν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συγκέντρωση (gammas/sec/gr)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ, %)
²⁴¹ Am	59.54	52.95	3.0
¹⁰⁹ Cd	88.03	74.75	3.0
⁵⁷ Co	122.1	65.52	3.1
¹³⁹ Ce	165.9	77.33	3.0
²⁰³ Hg	279.2	242.37	3.0
¹¹³ Sn	391.7	259.35	3.0
⁸⁵ Sr	514.0	471.13	3.0
¹³⁷ Cs	661.6	288.25	3.0
⁸⁸ Y	898.0	720.76	3.0
⁶⁰ Co	1173	406.33	3.0
⁶⁰ Co	1333	406.85	3.0
⁸⁸ Y	1836	762.24	3.0

Πίνακας 3.11: Ισότοπα πιστοποιητικού ΕΕΑΕ (2M HCl)

Παρατηρείται ότι οι δύο πηγές που χρησιμοποιούνται για τη λήψη των πειραματικών δεδομένων στη γεωμετρία 8, περιλαμβάνουν τα ίδια ισότοπα. Διαφέρουν μόνο οι συγκεντρώσεις τους στο αρχικό διάλυμα, με την πηγή της Άσκησης Διασύγκρισης (2M) να είναι σαφώς ασθενέστερη. Όπως και προηγούμενα, επιλέγονται τα ισότοπα ²⁴¹Am, ²⁰³Hg, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr και ¹³⁷Cs.

Από την ανάλυση του ραδιενεργού διαλύματος της ΕΕΑΕ (2M HCl), γεωμετρίας 8 στον ανιχνευτή XtRa (11 Οκτωβρίου 2006), συλλέχθηκε το φάσμα QMS421B 14/4.211. Από το φάσμα αυτό υπολογίζονται οι καταγραφόμενες κρούσεις στη μονάδα του χρόνου και η αντίστοιχη αβεβαιότητα τους. Υπολογίζεται η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για κάθε ενέργεια και η αβεβαιότητά της με βάση τις σχέσεις (2.1) και (3.4), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.12.

Ενέργεια (keV)	cps	Αβεβαιότητα cps (1σ, %)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ, %)	Απόδοση φωτοκορυφής	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ, %)
59.54	8.70	0.424	1.30	0.164	3.03
279.19	5.49	0.509	0.70	0.103	3.05
391.69	11.65	0.279	1.60	0.083	3.01
514.00	10.44	0.297	1.25	0.058	3.01
661.65	16.69	0.206	0.95	0.066	3.01

Πίνακας 3.12: Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για το διάλυμα της ΕΕΑΕ (2M HCl)

3.5.4.2 Προσομοιώσεις γεωμετρίας 8

Το δοχείο με το ραδιενεργό διάλυμα γεωμετρίας 8 προκειμένου να αναλυθεί τοποθετείται απευθείας πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή από πολυστυρένιο (χωρίς τη χρήση της βάσης από Plexiglas). Χρησιμοποιείται μόνο ένας δακτύλιος από Plexiglas για κεντράρισμα του δοχείου, ο οποίος όμως είναι περιφερειακός και δεν επηρεάζει τα φωτόνια που εναποθέτουν πλήρως την ενέργειά τους στον ανιχνευτή. Έτσι, δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η βάση από Plexiglas στην προσομοίωση από όπου υπολογίζεται η απόδοση φωτοκορυφής.

Για την προσομοίωση της γεωμετρίας 8 (πηγή όγκου) έγινε η τροποποίηση του κυρίως προγράμματος PENMAIN (κώδικας B.3 παραρτήματος Β) σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν και ελέγχθηκαν παραπάνω (παράγραφος 3.5.1 και 3.5.2). Έγινε επίσης, τροποποίηση του αρχείου γεωμετρίας (τύπου .geo) ώστε να περιλαμβάνει την πηγή γεωμετρίας 8. Το αρχείο γεωμετρίας παραμένει το ίδιο είτε πρόκειται για το διάλυμα QCY12 (4M HCl) είτε για το διάλυμα της EEAE (2M HCl) γιατί αυτό που διαφοροποιεί τα δύο διαλύματα είναι η σύσταση και η πυκνότητα και όχι ο όγκος της πηγής (αρχείο Δ.3 παραρτήματος Δ). Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχείου γεωμετρίας της γεωμετρίας 8 φαίνεται στην εικόνα 3.11 στο τέλος του κεφαλαίου. Στην εικόνα αυτή υπάρχει μόνο το τμήμα του δοχείου στο οποίο περιέχεται το ραδιενεργό διάλυμα. Το υπόλοιπο τμήμα δεν απεικονίζεται καθώς δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Για την περιγραφή του δοχείου έπρεπε να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση κωνικότητας και να βρεθεί η εξίσωση του γεωμετρικού κώνου που παριστάνει το δοχείο. Η εξίσωση κωνικότητας του δοχείου έχει ήδη αναφερθεί το κεφάλαιο 2 και είναι η εξής: $R(\text{cm})=0.029z(\text{cm})+3.54$ [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008], όπου R είναι η ακτίνα του δοχείου και σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων ισούται με $R= x^2+y^2$. Από τη σχέση αυτή, σύμφωνα με τη γενική εξίσωση του κώνου $z^2=x^2+y^2$, βρίσκεται η εξίσωση του κώνου που στο αρχείο γεωμετρίας (τύπου .geo) προσομοιώνει το ελαφρώς κωνικό δοχείο της γεωμετρίας 8. Η εξίσωση αυτή του γεωμετρικού κώνου είναι η εξής:

$$x^2 + y^2 - 8.41 \cdot 10^{-4} \cdot z^2 - 0.20532 \cdot z - 12.5316 = 0 \quad \text{σχέση (3.7)}$$

Κατά τη διάρκεια της μελέτης της γεωμετρίας 8 παρατηρήθηκε ότι στη Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ. (2008) είχε ληφθεί διαφορετική εξίσωση για την κωνικότητα του δοχείου. Διαπιστώθηκε ότι κατά τη διαδικασία εύρεσης της κατάλληλης εξίσωσης που περιγράφει τον κώνο στη Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ. (2008) είχε εισαχθεί λανθασμένα ο

συντελεστής του z στη σχέση (3.7). Η εξίσωση του κώνου που είχε χρησιμοποιηθεί ήταν η εξής:

$$x^2 + y^2 - 8.41 \cdot 10^{-4} \cdot z^2 - 0.10226 \cdot z - 12.5316 = 0 \quad \text{σχέση (3.8)}$$

Για να εξακριβωθεί εάν η χρήση των σχέσεων (3.7) και (3.8) οδηγεί σε στατιστικά διαφορετικά αποτελέσματα, ως προς τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής, πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις για τα φωτόνια των 661.62keV του ^{137}Cs , με χρήση των δύο αυτών εξισώσεων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
Δ.Ε.Βασιλοπούλου	0.0571	0.672	0.0548	0.968	0.0614
Παρούσα ΔΕ.	0.0570	0.672	0.0548	0.968	

Πίνακας 3.13: Σύγκριση αποδόσεων με προσομοίωση Βασιλοπούλου

Παρατηρούμε ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 0.06% και επομένως μπορεί να αμεληθεί. Προκύπτει λοιπόν ότι παρά τη μικρή διαφοροποίηση στην εξίσωση κωνικότητας του δοχείου της πηγής, παρατηρούνται μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές της υπολογιζόμενης από την προσομοίωση απόδοσης. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο δεδομένης της μικρής κωνικότητας του δοχείου αλλά και του μικρού πάχους της γεωμετρίας 8.

3.5.4.2.1 Προσομοίωση διαλύματος QCY12 (4M HCl) σε γεωμετρία 8

Η πυκνότητα του διαλύματος QCY12 (4M HCl) είναι 1.04gr/ml, όπως προέκυψε από τη διαδικασία της αραιώσης του πρότυπου διαλύματος QCY.48 [Δ.Δ. Καράγγελος Δ., 2008]. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για όλες τις ενέργειες στις οποίες εκπέμπουν τα ισότοπα που αναφέρθηκαν παραπάνω και για τα οποία υπολογίστηκε η πειραματική απόδοση φωτοκορυφής (^{241}Am , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr και ^{137}Cs που εκπέμπουν φωτόνια με ενέργειες 59.54keV, 279.2keV, 391.7keV, 514.0keV και 661.62keV, αντίστοιχα). Τα αρχεία εισόδου για όλες τις ενέργειες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ (αρχεία Γ.4 έως Γ.8).

Ακόμα, τροποποιήθηκε το αρχείο υλικών (αρχείο τύπο .mat) που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του φίλτρου διαμέτρου 47mm, ώστε αντί για διοξείδιο του πυριτίου, που ήταν το υλικό του φίλτρου, να περιέχει υδατικό διάλυμα HCl σε νερό με αναλογία μάζας που αντιστοιχεί σε 4M HCl.

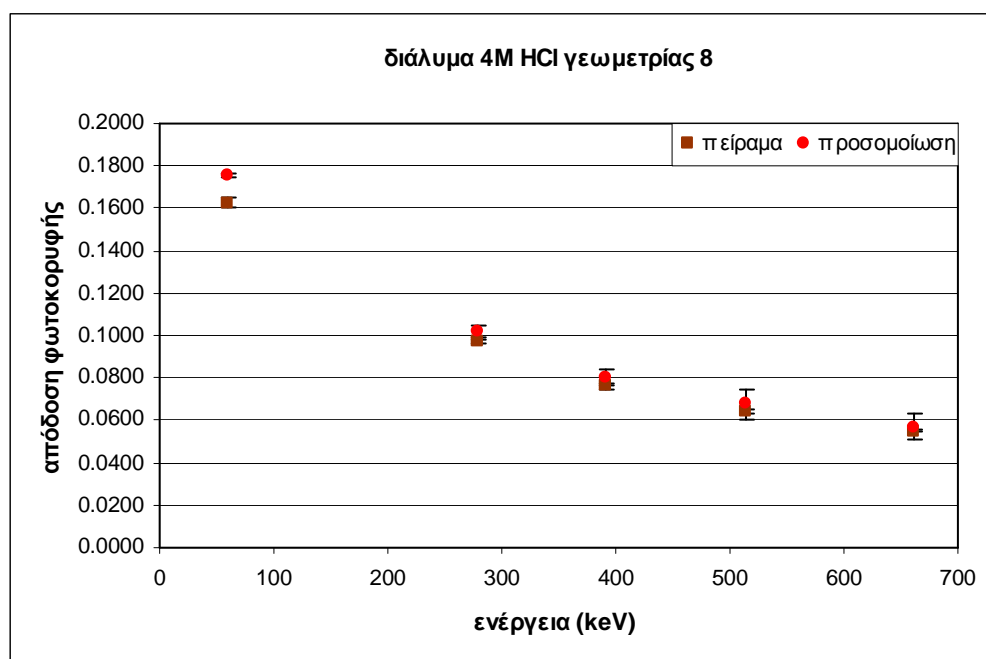
Οι αποδόσεις φωτοκορυφής από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίζονται με βάση τα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.2 και με βάση τη σχέση (3.1). Χρησιμοποιήθηκε ενεργειακή διαμέριση 1000 καναλιών και συνυπολογίστηκε το απαραίτητο για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής πλήθος καναλιών σύμφωνα με τη σχέση (3.3).

Οι αποδόσεις φωτοκορυφής συνοδευόμενες από τις σχετικές αβεβαιότητές τους (1σ) όπως προκύπτουν από την προσομοίωση δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.14. Για λόγους σύγκρισης δίνονται και οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές, ενώ στην τελευταία στήλη δίνεται και η ποσοστιαία απόκλιση των δύο τιμών.

Ενέργεια (keV)	Πλήθος καναλιών	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
59.54	31	0.1754	0.0871	0.163	1.31	7.77
279.19	8	0.1019	0.320	0.0975	0.884	4.54
391.69	6	0.0803	0.345	0.076	1.62	5.54
514.00	5	0.0677	0.704	0.0638	1.28	6.01
661.65	4	0.0571	0.615	0.0548	0.968	4.05

Πίνακας 3.14: Σύγκριση αποδόσεων για γεωμετρία 8 και διάλυμα 4M HCl

Οι παραπάνω αποδόσεις με τις αντίστοιχες αβεβαιότητές τους φαίνονται και στο παρακάτω γράφημα:



Διάγραμμα 3.4: Συσχέτιση αποδόσεων για γεωμετρία 8 και διάλυμα 4M HCl

Προκύπτει ότι για όλες τις ενέργειες φωτονίων, η απόδοση που υπολογίζεται από την προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πειραματική. Για τα φωτόνια υψηλών ενεργειών η ποσοστιαία απόκλιση των αποδόσεων κυμαίνεται από 4.5% έως 6% και είναι εκτός των ορίων που στην παρούσα Δ.Ε. θεωρούνται αποδεκτά.

Οι σχετικά μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στα αποτελέσματα του πίνακα 3.14 δημιούργησαν διάφορους προβληματισμούς. Μία ερμηνεία θα μπορούσε να είναι το φαινόμενο της τυχαίας σύμπτωσης (random summing) κατά την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος (19 Ιουνίου 2003). Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό δύο ή περισσότερα φωτόνια από διαφορετικούς πυρήνες αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή ταυτόχρονα (με χρονική διαφορά μικρότερη από το χρόνο απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης) με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται σαν ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με το άθροισμα των επιμέρους φωτονίων. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε ραδιενεργά διαλύματα μεγάλης ενεργότητας όπου το πλήθος των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι μεγάλο και επομένως είναι μεγάλη και η πιθανότητα ταυτόχρονης αλληλεπίδρασης. Το διάλυμα 4M HCl, όπως φάνηκε και από τον πίνακα 3.9, είναι αρκετά μεγάλης ενεργότητας, με αποτέλεσμα, κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της απόδοσης ενός ανιχνευτή όπως ο XiRa, η παρουσία του φαινομένου της τυχαίας άθροισης να αναμένεται έντονη.

Για τον έλεγχο της παραπάνω υπόθεσης πραγματοποιήθηκε νέα γ-φασματοσκοπική ανάλυση του διαλύματος QCY12 (φάσμα QCYTEST8). Δεδομένου ότι είχε περάσει αρκετό χρονικό διάστημα (μεγαλύτερο από 5 χρόνους ημιζωής των περισσότερων ισοτόπων) από την ημερομηνία παρασκευής του διαλύματος, έγινε μέτρηση μόνο για τα φωτόνια του ^{137}Cs ($T_{1/2}=30.17$ χρόνια [Radiation Decay v.3.6]). Από τη μέτρηση αυτή υπολογίστηκε εκ νέου η απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια και η νέα τιμή φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 3.15. Στον πίνακα αυτό φαίνεται επίσης η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής που προέκυψε από το πείραμα στις 19 Ιουνίου 2003 (πίνακας 3.10), η τιμή που προέκυψε από την προσομοίωση καθώς και οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν (1σ).

661.62keV	<i>Απόδοση φωτοκορυφής</i>	<i>Αβεβαιότητα (1σ, %)</i>
ανάλυση 2009	0.0583	1.27
ανάλυση 2003	0.0548	0.968
προσομοίωση	0.0571	0.615

Πίνακας 3.15: Έλεγχος υπόθεσης random summing (διάλυμα QCY12-4M HCl)

Η απόδοση φωτοκορυφής που εκτιμήθηκε από την προσομοίωση διαφέρει από τη νέα πειραματική απόδοσης (2009) κατά 2.07%, με την τιμή της πειραματικής απόδοσης να είναι μεγαλύτερη, αντίθετα με την περίπτωση σύγκρισης της προσομοίωσης με την παλαιά ανάλυση (2003). Η τιμή της απόδοσης της νέας ανάλυσης του διαλύματος είναι μεγαλύτερη κατά 5.88% από την αντίστοιχη παλαιότερη, γεγονός που ενισχύει την αρχική υπόθεση σχετικά με το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε και το διάλυμα, μικρότερης ενεργότητας, της άσκησης διασύγκρισης της ΕΕΑΕ (2M HCl).

3.5.4.2.2 Προσομοίωση διαλύματος ΕΕΑΕ (2M HCl) σε γεωμετρία 8

Η πυκνότητα του διαλύματος της ΕΕΑΕ (2M HCl), όπως προέκυψε από τη διαδικασία της αραίωσης του πρότυπου διαλύματος της ΕΕΑΕ, είναι 1.033gr/ml. Σε αυτή την περίπτωση η γεωμετρία του δοχείου και της πηγής παραμένει σταθερή, αλλά αλλάζει η πυκνότητα του διαλύματος και η σύστασή του.

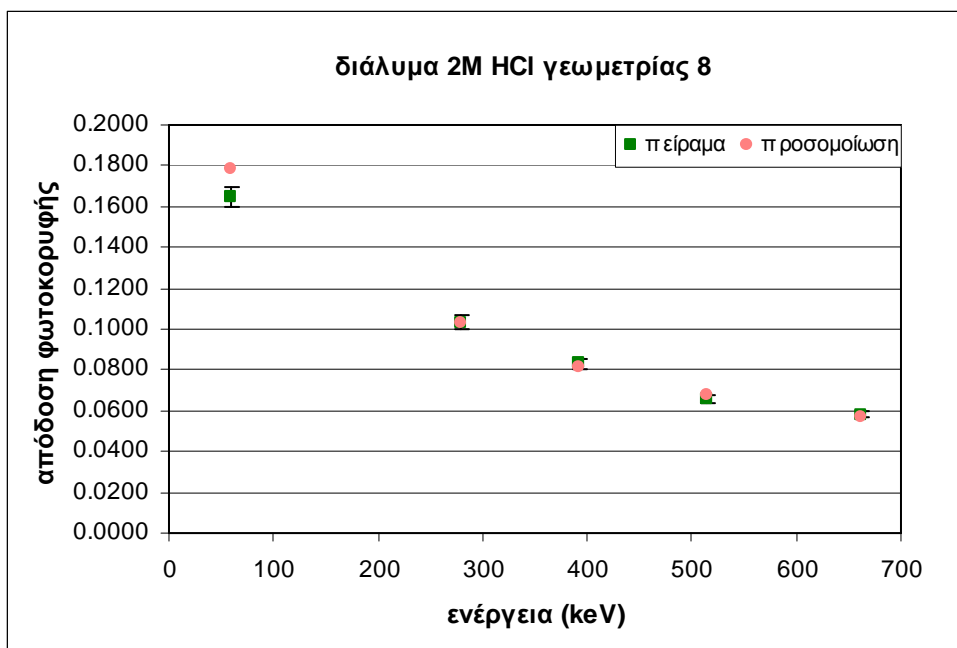
Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για όλα τα ισότοπα που αναφέρθηκαν παραπάνω και για τα οποία υπολογίστηκε η πειραματική απόδοση φωτοκορυφής σύμφωνα με τη μεθοδολογία της παραγράφου 3.4.4.2.1 Τα αρχεία εισόδου για όλες τις ενέργειες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ (αρχεία Γ.9 έως Γ.13). Η διαφορά τους με εκείνα του διαλύματος QCY12 (4M HCl) είναι η ονομασία του αρχείου υλικών.

Οι αποδόσεις φωτοκορυφής συνοδευόμενες από τις σχετικές αβεβαιότητές τους (1σ) όπως προκύπτουν από την προσομοίωση δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.16. Για λόγους σύγκρισης στον πίνακα αυτό δίνονται και οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές, ενώ στην τελευταία στήλη του πίνακα δίνεται και η ποσοστιαία απόκλιση τιμών προσομοίωσης και πειραματικών τιμών της απόδοσης.

Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
59.54	0.1788	0.0947	0.164	3.03	8.77
279.19	0.1026	0.179	0.103	3.05	-0.811
391.69	0.08095	0.0669	0.083	3.01	-2.51
514.0	0.0672	0.315	0.058	3.01	1.92
661.65	0.0572	0.823	0.066	3.01	-1.91

Πίνακας 3.16: Σύγκριση αποδόσεων για γεωμετρία 8 και διάλυμα της ΕΕΑΕ (2M HCl)

Ακολουθεί το γράφημα των αποδόσεων για το διάλυμα της ΕΕΑΕ (2M HCl):



Διάγραμμα 3.5: Συσχέτιση αποδόσεων για γεωμετρία 8 και διάλυμα 2M HCl

Οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των αποδόσεων είναι μικρές, της τάξης του 2-2.5%, και είναι μέσα στα όρια που στην παρούσα Δ.Ε. θεωρούνται αποδεκτά, εκτός από την περίπτωση των φωτονίων του ^{241}Am στα 59.54keV όπου παρουσιάζεται απόκλιση της τάξης του 9%. Υπενθυμίζεται ωστόσο ότι τα φωτόνια της συγκεκριμένης ενέργειας δεν επηρεάζουν την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας Δ.Ε.

Η μεγάλη απόκλιση προσομοίωσης-πειράματος, της τάξης του 9%, που παρατηρείται για τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV του ^{241}Am μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες. Στην περιοχή χαμηλών ενεργειών και στη διαδικασία υπολογισμού της απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης έντονη επίδραση στα τελικά αποτελέσματα έχουν οι ιδιότητες του υλικού με το οποίο αλληλεπιδρούν τα φωτόνια, αλλά και το πάχος του front dead layer. Το πάχος του front dead layer που έχει χρησιμοποιηθεί είναι μικρό (0.4μm), επομένως μπορεί να θεωρηθεί πως η προαναφερθείσα απόκλιση δεν οφείλεται σε αυτό. Ο ακριβέστερος προσδιορισμός του υλικού του καλύμματος του ανιχνευτή θα μπορούσε ωστόσο να διαφοροποιήσει την τιμή της απόδοσης της προσομοίωσης για τα 59.54keV και να οδηγήσει στη σύγκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να γίνουν προσομοιώσεις και για διαφορετικό υλικό καλύμματος.

3.5.5 Διερεύνηση του πολυπροπυλενίου ως υλικό του καλύμματος του ανιχνευτή

Ο κατασκευαστής του ανιχνευτή δεν δίνει πληροφορίες για το υλικό του καλύμματος του ανιχνευτή. Στις μέχρι τώρα προσομοιώσεις έγινε η παραδοχή ότι το κάλυμμα αυτό είναι από πολυστυρένιο. Η επιλογή αυτή ωστόσο είναι αυθαίρετη. Δεδομένου ότι το υλικό αυτό παίζει σημαντικό ρόλο για τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας, έγιναν προσομοιώσεις με χρήση πολυπροπυλενίου ως υλικού του καλύμματος. Η επιλογή αυτή του υλικού έγινε μετά από σχετική ερώτηση στην εταιρία κατασκευής του ανιχνευτή.

Η επίδραση του υλικού του καλύμματος στην απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή όπως υπολογίζεται από την προσομοίωση, μελετήθηκε για φωτόνια ενέργειας 59.54keV. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για γεωμετρία φίλτρου $\varnothing 47\text{mm}$, καθώς σε αυτή τη γεωμετρία τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας είναι πιο εύκολο να ανιχνευθούν αφού το φαινόμενο της αυταπορρόφησης τους είναι λιγότερο έντονο σε σχέση με τη γεωμετρία 8 που έχει μεγαλύτερο όγκο.

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.17:

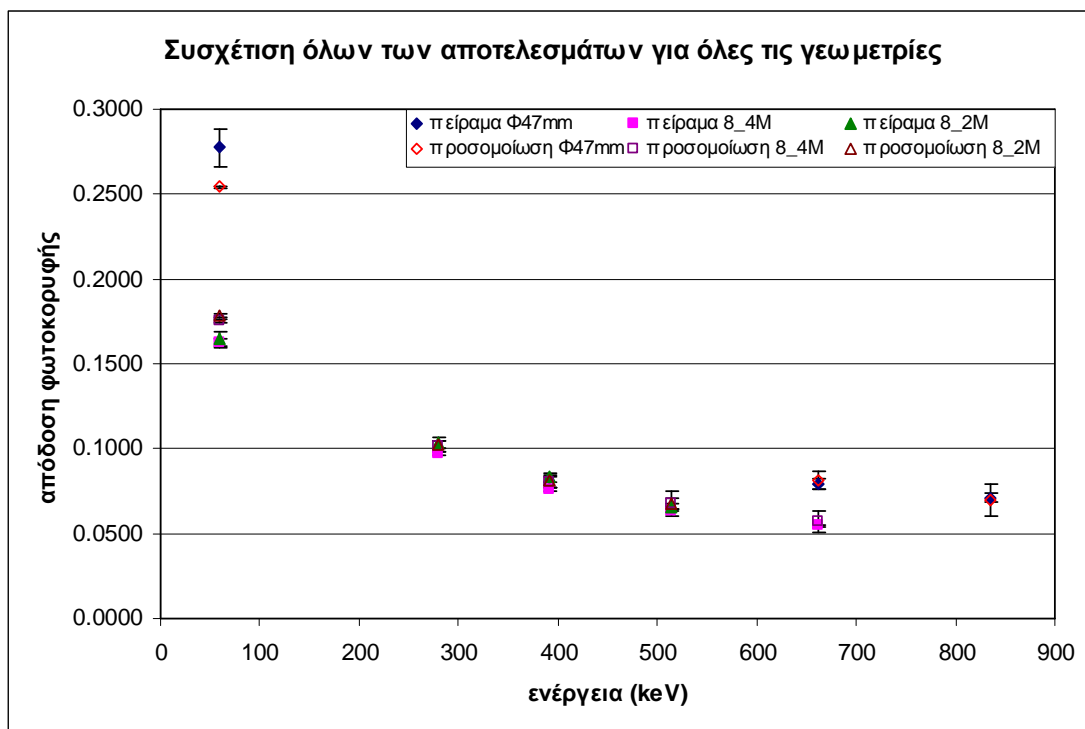
Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
59.54	0.2572	0.0711	0.278	1.12	-7.39

Πίνακας 3.17: Σύγκριση αποδόσεων για φίλτρο $\varnothing 47\text{mm}$ με κάλυμμα από πολυπροπυλένιο

Παρατηρείται ότι η απόκλιση της απόδοσης της προσομοίωσης από την πειραματική, παρόλο που παραμένει στατιστικά σημαντική και εκτός των αποδεκτών στην παρούσα Δ.Ε. ορίων, μειώθηκε. Προσομοιώσεις για τα άλλα φωτόνια ($E > 200\text{keV}$) του φίλτρου διαμέτρου 47mm αλλά και των υπολοίπων γεωμετριών δεν έγιναν γιατί δεν αναμένεται διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.

3.5.6 Συσχέτιση όλων των αποτελεσμάτων και τελικές διαστάσεις dead layer

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα (πειραματικά και μέσω προσομοίωσης) για τις αποδόσεις φαίνονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω γράφημα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα δίνονται οι τιμές της απόδοσης όπως υπολογίστηκαν για τις διάφορες ενέργειες για όλες τις εξεταζόμενες πηγές - γεωμετρίες μέσω πειράματος και προσομοίωσης.



Διάγραμμα 3.6: Συσχέτιση όλων των αποδόσεων για όλες τις γεωμετρίες

Παρατηρείται ότι για τις συγκρίσεις και των τριών περιπτώσεων που αναλύθηκαν παραπάνω (φίλτρο Ø47mm, διάλυμα QCY12 (4M HCl) γεωμετρίας 8 και διάλυμα της ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας 8), οι τιμές που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και εκείνες που προκύπτουν από την προσομοίωση παρουσιάζουν αποκλίσεις της τάξης του 2%. Εξαιρέση αποτελούν τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV, όπου η απόκλιση είναι της τάξης του 8%.

Κεντρικό σημείο της Δ.Ε. είναι το ισότοπο ^7Be που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 477.59keV. Επομένως, βασικό κριτήριο επιλογής για τη σύγκριση των τιμών των δύο αποδόσεων φωτοκορυφής είναι η περιοχή γύρω από τη συγκεκριμένη ενέργεια. Παρατηρείται ότι στην περιοχή από 400÷500keV οι αποκλίσεις των δύο αποδόσεων είναι της τάξης του 2-2.5% για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (φίλτρο Ø47mm και διαλύματα γεωμετρίας 8). Όπως έχει ήδη αναφερθεί απόκλιση τέτοιας τάξης θεωρείται αποδεκτή. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι οι διαστάσεις που έχουν επιλεγεί για το dead layer θεωρείται ότι είναι ικανοποιητικές για να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου αέρα, όπως είναι η 'γεωμετρία 12' και η νέα γεωμετρία που εισάγεται στην Δ.Ε. Πρέπει όμως να επισημανθεί για μία ακόμα φορά ότι η γεωμετρία του ανιχνευτή η οποία επιλέγεται ως βέλτιστη δεν είναι η μοναδική, καθώς είναι πιθανό να υπάρχουν περισσότεροι του ενός συνδυασμοί

διαστάσεων που να οδηγούν μέσω της προσομοίωσης σε τιμές εξίσου κοντά στις πειραματικές.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένες οι διαστάσεις του ανιχνευτή στις οποίες καταλήγει η μελέτη που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους και οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Διάμετρος κρυστάλλου	80 mm
Μήκος κρυστάλλου	78 mm
Διάμετρος εσωτερικής οπής	11 mm
Βάθος εσωτερικής οπής	66.5 mm
Front dead layer	0.4 μm
Peripheral dead layer	200 μm

Πίνακας 3.18: Τελικές διαστάσεις ανιχνευτή

Υπενθυμίζεται και τονίζεται ότι οι προσομοιώσεις και οι συγκρίσεις που περιγράφηκαν παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με γνώμονα τη νέα γεωμετρία η οποία μελετάται στην παρούσα Δ.Ε. και έχει διαστάσεις κοντινές με όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν (φίλτρα $\varnothing 47\text{mm}$, γεωμετρία 8). Εάν επρόκειτο για άλλη γεωμετρία, μεγαλύτερων ή μικρότερων διαστάσεων, οι γεωμετρίες που θα αναλύονταν με σκοπό την εύρεση των διαστάσεων του dead layer θα ήταν διαφορετικές ώστε να ήταν κοντινές στην προς εξέταση γεωμετρία.

3.6 Προσομοιώσεις γεωμετρίας 12

Όπως αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2, τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και τη μέτρηση ^7Be διπλώνονται σε γεωμετρία 12 και αναλύονται στον ανιχνευτή. Με γνωστές πλέον τις διαστάσεις του dead layer έγιναν προσομοιώσεις αρχικά για τη γεωμετρία 12 για να ελεγχθούν οι αποκλίσεις από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής. Για το σκοπό αυτό έγινε η υπόθεση ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή όπως προσδιορίστηκαν προηγουμένως μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση της γεωμετρίας 12.

3.6.1 Τροποποίηση κυρίως προγράμματος για τη γεωμετρία 12

Ο κώδικας PENMAIN προσομοιώνει μόνο σημειακές πηγές και απαιτείται τροποποίηση για την εισαγωγή πηγής όγκου. Για την περίπτωση της γεωμετρίας 12 η απαιτούμενη τροποποίηση είναι διαφορετική από εκείνες που αναφέρθηκαν στην

παράγραφο 3.5.1, καθώς η γεωμετρία 12 είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και όχι κύλινδρος.

Η τροποποίηση ακολουθεί την ίδια λογική με τις προηγούμενες και επομένως εισάγονται στον κώδικα τρεις γεννήτριες τυχαίων αριθμών καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν από τους τρεις άξονες συντεταγμένων του χώρου. Από τους τρεις τυχαίους αριθμούς ο πρώτος πολλαπλασιάζεται με το μήκος, ο δεύτερος με το πλάτος και ο τρίτος με το ύψος. Έτσι, δημιουργείται ένα σημείο μέσα στον όγκο της πηγής γεωμετρίας 12 το οποίο αποτελεί τη σημειακή πηγή που αναγνωρίζει και προσομοιώνει ο κώδικας. Πρέπει να τονιστεί ότι για τη γεωμετρία 12 δεν χρειάζεται να γίνει έλεγχος της θέσης του σημείου, καθώς δεν υπάρχει συνδυασμός που να δίνει σημείο εκτός των ορίων της πηγής. Η τροποποίηση του κώδικα PENMAIN για τη γεωμετρία 12 παρουσιάζεται στο παράρτημα Β (κώδικας Β.5).

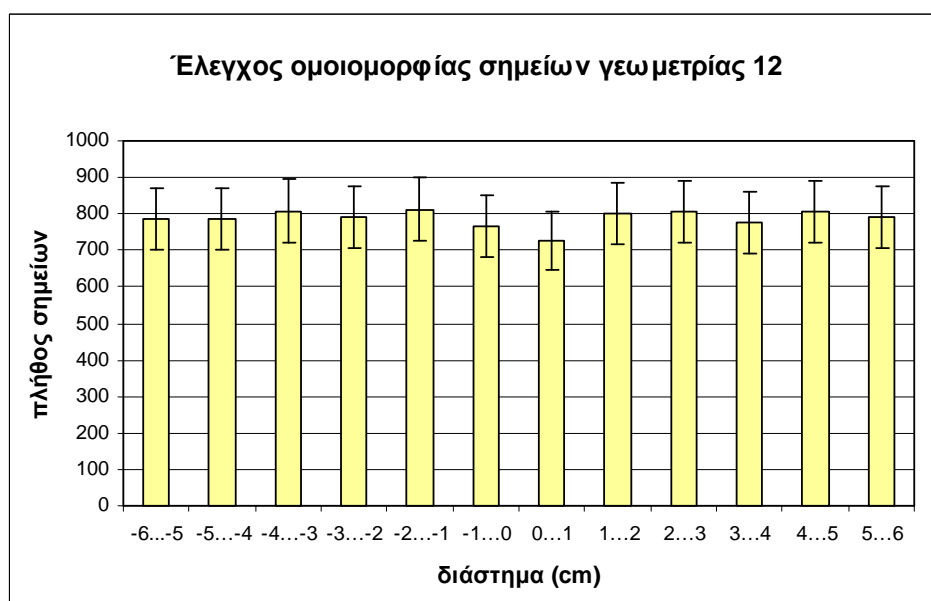
3.6.2 Έλεγχος ομοιομορφίας για τη γεωμετρία 12

Όπως και για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν για την εύρεση των διαστάσεων του dead layer, πρέπει να γίνει έλεγχος του τρόπου ορισμού της πηγής. Ο έλεγχος επαναλαμβάνεται για τη γεωμετρία 12 καθώς ο τρόπος ορισμού της είναι διαφορετικός από τις άλλες δύο γεωμετρίες (φίλτρο Ø47mm και γεωμετρία 8). Οι γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των διαστάσεων του dead layer είναι και οι δύο κυλινδρικές (η κωνικότητα της γεωμετρίας 8 είναι πολύ μικρή). Αντίθετα, η γεωμετρία 12 αναφέρεται σε ορθογώνιο παραλληλόγραμμο.

Με κατάλληλη τροποποίηση στον κώδικα PENMAIN καταγράφονται σε ένα αρχείο εξόδου όλα τα σημεία (x,y,z) που επιλέγουν οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών του κώδικα, όπως έγινε και για τις άλλες γεωμετρίες. Το αρχείο, όμως, που προκύπτει για τη γεωμετρία 12 μετά από το ‘τρέξιμο’ του κώδικα είναι πάρα πολύ μεγάλο (~3GB) και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο. Για το λόγο αυτό επαναλαμβάνεται η διαδικασία για σημεία τα οποία ανήκουν μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο ώστε να χρησιμοποιηθούν και να καταγραφούν λιγότερα σημεία (κώδικας Β.6 παραρτήματος Β). Επίσης, επιλέγεται η διαδικασία αυτή για τη γεωμετρία 12 να γίνει μόνο για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV, ενέργεια που είναι μικρή ώστε να μην απαιτείται μεγάλη διάρκεια αναμονής των απαραίτητων αποτελεσμάτων. Αν όντως υπάρχει ομοιομορφία στα σημεία που χρησιμοποιούνται για τη συγκεκριμένη ενέργεια, θα υπάρχει και για τις υπόλοιπες καθώς η τροποποίηση του κώδικα παραμένει ίδια και η μόνη αλλαγή είναι η ενέργεια των φωτονίων που προσομοιώνονται, στο αρχείο εισόδου (τύπου .in). Η

απεικόνιση των σημείων γίνεται όπως και στις άλλες γεωμετρίες. Τα διαγράμματα που προκύπτουν είναι τα 3.14 και 3.15 στο τέλος του κεφαλαίου.

Για τα δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τα σημεία που επιλέγονται ως σημειακές πηγές στον όγκο της πηγής γεωμετρίας 12 πρέπει να ελεγχθεί η ομοιομορφή κατανομή τους. Επιλέγεται να γίνει έλεγχος της ομοιομορφίας στο διάγραμμα απεικόνισης σε επίπεδο x-y (διάγραμμα 3.14 στο τέλος του κεφαλαίου). Για να γίνει ο έλεγχος, το μήκος κατά τον άξονα των x χωρίζεται σε διαστήματα πάχους 1cm και υπολογίζεται το πλήθος των σημείων που καταγράφονται σε κάθε διάστημα. Προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα με αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ.



Διάγραμμα 3.7: Πλήθος καταγεγραμμένων σε επίπεδο x-y σημείων για τη γεωμετρία 12

Παρατηρείται ότι η κύμανση του πλήθους των τιμών είναι της τάξης του 7% και όλες οι τιμές του πλήθους είναι μέσα στο όρια που θέτουν οι αβεβαιότητες. Επιβεβαιώνεται έτσι η ομοιομορφία ορισμού της πηγής γεωμετρίας 12.

3.6.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τη γεωμετρία 12

Με τη βοήθεια του κώδικα PENELOPE πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για όλες τις ενέργειες που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 2 για την πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της συγκεκριμένης γεωμετρίας, καθώς και για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV του ^7Be που ενδιαφέρουν την παρούσα Δ.Ε. Τα αρχεία εισόδου και το αρχείο γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω προσομοιώσεις παρουσιάζονται στα παραρτήματα Γ (αρχεία Γ.14 ÷ Γ.22) και Δ (αρχείο Δ.4)

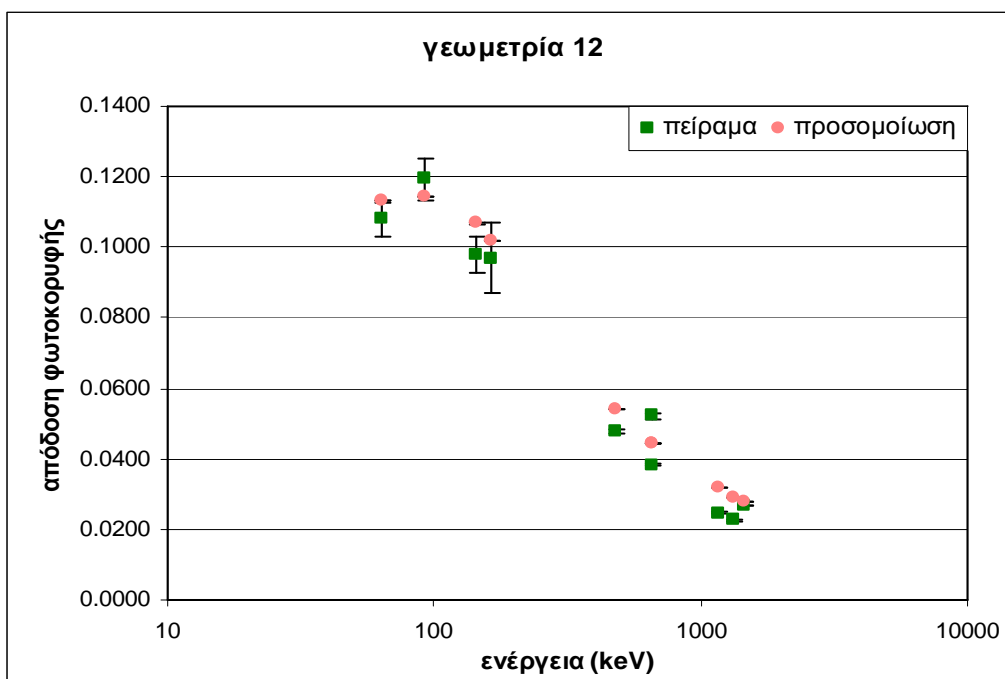
αντίστοιχα. Τρισδιάστατη απεικόνιση του παραπάνω αρχείου γεωμετρίας φαίνεται στην εικόνα 3.13 στο τέλος του Κεφαλαίου.

Οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής υπολογίστηκαν με βάση τη σχέση (3.1) και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες με βάση τη σχέση (3.2). Επιλέχθηκε ενεργειακή διαμέριση 1000 καναλιών και για τον υπολογισμό της απόδοσης συνυπολογίστηκε ο κατάλληλος αριθμός καναλιών σύμφωνα με τη σχέση (3.3). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.19 όπου γίνεται και η σύγκριση των αποδόσεων από την προσομοίωση με τις αντίστοιχες πειραματικές, όπως αυτές προέκυψαν στο κεφάλαιο 2. Στην τελευταία στήλη υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση της απόδοσης της προσομοίωσης από την αντίστοιχη πειραματική. Για την περίπτωση του ${}^7\text{Be}$ πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της πειραματικής απόδοσης προκύπτει από την καμπύλη βαθμονόμησης και ως αβεβαιότητα θεωρείται το RMS της καμπύλης αυτής.

Ενέργεια (keV)	Πλήθος καναλιών	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Πειραματική απόδοση	Αβεβαιότητα (1σ, %)	Απόκλιση αποδόσεων (%)
63.29	30	0.11304	0.0248	0.108	4.45	4.72
92.74	21	0.11448	0.0192	0.119	5.12	-4.00
143.96	14	0.10671	0.0828	0.098	5.22	9.02
163.50	12	0.1018	0.104	0.097	10.2	4.92
477.59	5	0.05427	0.0776	0.0478	1.12	13.6
661.65	4	0.04438	0.194	0.0383	1.10	15.9
				0.0522	1.83	-15.0
1173.24	3	0.03170	0.134	0.0246	0.826	28.8
1332.50	3	0.02925	0.180	0.0226	0.826	29.6
1460.80	3	0.02765	0.157	0.02660	0.223	3.92

Πίνακας 3.19: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για τη γεωμετρία 12 με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα

Οι παραπάνω αποδόσεις συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ φαίνονται και στο διάγραμμα 3.8. Όπως έχει προαναφερθεί, τα διαγράμματα απόδοσης συναρτήσεως της ενέργειας των φωτονίων δεν παρουσιάζονται σε διπλή λογαριθμική κλίμακα ώστε να είναι συγκρίσιμες οι αποκλίσεις των τιμών σε όλη την ενεργειακή περιοχή.



Διάγραμμα 3.8: Συσχέτιση όλων των αποτελεσμάτων για τη γεωμετρία 12

Από τον πίνακα 3.19 και το διάγραμμα 3.8 προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Για όλες τις ενέργειες, με εξαίρεση τα φωτόνια των ισοτόπων ^{137}Cs και ^{60}Co , η αβεβαιότητα που συνοδεύει την πειραματική τιμή είναι τόσο μεγάλη ώστε, ακόμα και για μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της απόδοσης, ο στατιστικός έλεγχος οδηγεί σε στατιστικά μη σημαντικές διαφορές. Με εξαίρεση τα φωτόνια των ισοτόπων ^{137}Cs (661.65keV) και ^{60}Co (1173.24keV και 1332.50keV) και των φωτονίων ενέργειας 163.50keV, οι αποκλίσεις των υπολογιζόμενων αποδόσεων φωτοκορυφής είναι αρκετά μικρές, της τάξης του 3-5%. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.4 τέτοιας τάξης απόκλιση θεωρείται αποδεκτή, όπως έχει βρεθεί και στη βιβλιογραφία [Liu Liye et al., 2006].

- Από τις ποσοστιαίες αποκλίσεις προκύπτει ότι η προσομοίωση σε άλλες περιπτώσεις υπερεκτιμά την απόδοση φωτοκορυφής ενώ σε άλλες την υποεκτιμά σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική τιμή. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν φαίνεται να εισάγεται συστηματικό σφάλμα λόγω του τρόπου υπολογισμού της απόδοσης μέσω της προσομοίωσης. Εξαίρεση στην παρατήρηση αυτή αποτελούν τα φωτόνια του ^{60}Co , για τα οποία παρατηρούνται πολύ μεγάλες αποκλίσεις, πιθανότατα εξαιτίας του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Ο κώδικας προσομοιώνει τα δύο αυτά φωτόνια ξεχωριστά, επομένως το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αναιρείται.

- Για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV όπου υπάρχουν δύο πειραματικές τιμές, παρατηρείται ότι η τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση προσεγγίζει τη μέση τιμή τους.

- Για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV του ^{40}K παρατηρούμε ότι τα δύο σημεία παρουσιάζουν απόκλιση της τάξης του 4%. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι στην προκειμένη περίπτωση η προσομοίωση προσεγγίζει με αρκετά ικανοποιητικό τρόπο τα πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό θεωρείται λανθασμένη η απόρριψη του συγκεκριμένου σημείου κατά τη βαθμονόμηση απόδοσης της γεωμετρίας 12.

Η παραπάνω σύγκριση των τιμών της απόδοσης φωτοκορυφής για τη γεωμετρία 12 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά σημεία, με αποδεκτές αποκλίσεις της τάξης του 4%, με εξαίρεση συγκεκριμένα σημεία, για λόγους που έχουν ήδη σχολιασθεί. Συνάγεται λοιπόν ότι ο συνδυασμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή που επιλέχθηκε με βάση τη νέα γεωμετρία, μπορεί να εφαρμοστεί ικανοποιητικά και για την περίπτωση της γεωμετρίας 12.

3.7 Προσομοιώσεις νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου αέρα

Με δεδομένες τις διαστάσεις του ανιχνευτή XtRa οι οποίες υιοθετήθηκαν για τον προσδιορισμό της απόδοσης για τη νέα γεωμετρία, στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί η βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή για τη γεωμετρία αυτή. Καθώς στην παρούσα Δ.Ε. ενδιαφέρει η ανίχνευση του ^7Be από τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV που εκπέμπει (ποσοστό εκπομπής 0.1042 [Radiation Decay v.3.6]), προσομοιώσεις της νέας γεωμετρίας γίνονται μόνο για αυτή την ενέργεια φωτονίων. Δηλαδή για τη νέα γεωμετρία η απόδοση των συγκεκριμένων φωτονίων δεν θα προκύπτει από καμπύλη βαθμονόμησης, αλλά θα λαμβάνεται άμεσα από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Εξυπακούεται ότι είναι δυνατή η προσομοίωση και για άλλες ενέργειες και η χάραξη τελικά κατάλληλης καμπύλης απόδοσης για τη νέα γεωμετρία.

Για να είναι δυνατή η προσομοίωση της συγκεκριμένης νέας γεωμετρίας για τα φωτόνια του ^7Be , θα πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένες οι διαστάσεις της. Αν και το μήκος και πλάτος του φίλτρου προσδιορίζονται εύκολα μέσω των ονομαστικών του διαστάσεων, δεν συμβαίνει το ίδιο και με το ύψος του λόγω της συμπίεστικότητας του φίλτρου. Επομένως, θα πρέπει να καθοριστεί και αυτή η παράμετρος για να είναι όσο το δυνατό ακριβέστερη η προσομοίωση.

Για την εύρεση του ακριβούς πάχους του διπλωμένου φίλτρου έγιναν μετρήσεις του σε διάφορα σημεία στο φίλτρο, αλλά και σε περισσότερα του ενός φίλτρα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.20:

<i>Πάχος φίλτρου (mm)</i>	6.450	6.700	7.650	7.700	7.875	8.200	8.500
---------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Πίνακας 3.20: Τιμές μέτρησης πάχους νέας γεωμετρίας

Παρατηρείται μεγάλη κύμανση στις τιμές του πάχους του φίλτρου με αποκλίσεις που φτάνουν την τάξη του 30%. Για να βρεθεί η επίδραση της κύμανσης αυτής στην απόδοση φωτοκορυφής που υπολογίζεται από την προσομοίωση έγιναν προσομοιώσεις για όλες τις τιμές του πάχους που μετρήθηκαν και υπολογίστηκε για κάθε προσομοίωση η αντίστοιχη απόδοση. Οι προσομοιώσεις αυτές περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

3.7.1 Επίδραση του πάχους του φίλτρου στον προσδιορισμό της απόδοσης μέσω προσομοίωσης

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αρχικά απαιτείται η τροποποίηση του κυρίως προγράμματος PENMAIN σύμφωνα με όσα έχουν περιγραφεί προηγούμενα (παράγραφος 3.6.1). Το τμήμα του κώδικα που περιλαμβάνει την τροποποίηση αυτή παρουσιάζεται στο παράρτημα Β (κώδικας Β.7). Δεδομένου ότι ο τρόπος ορισμού της πηγής είναι όμοιος με εκείνον για τη γεωμετρία 12, δεν γίνεται έλεγχος της ομοιομορφίας των σημείων. Ο έλεγχος αυτός έγινε για τη γεωμετρία 12 στην παράγραφο 3.6.2.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έγιναν προσομοιώσεις για κάθε τιμή του πάχους του φίλτρου που μετρήθηκε. Το αρχείο εισόδου για τις προσομοιώσεις αυτές παραμένει το ίδιο καθώς έγιναν όλες για τα φωτόνια του ^7Be (477.59keV) και παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ (αρχείο Γ.23). Το αρχείο γεωμετρίας αλλάζει σε κάθε προσομοίωση καθώς αλλάζει το πάχος του φίλτρου. Ωστόσο στο παράρτημα Δ (αρχείο Δ.5) παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα αρχείο γεωμετρίας για πάχος φίλτρου 6.45mm. Η απεικόνιση αυτού του αρχείου γεωμετρίας φαίνεται στην εικόνα 3.14 στο τέλος του κεφαλαίου. Οι προσομοιώσεις έγιναν με ενεργειακή διαμέριση 1000 καναλιών και σύμφωνα με τη σχέση (3.3) για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής συνυπολογίστηκαν 5 κανάλια.

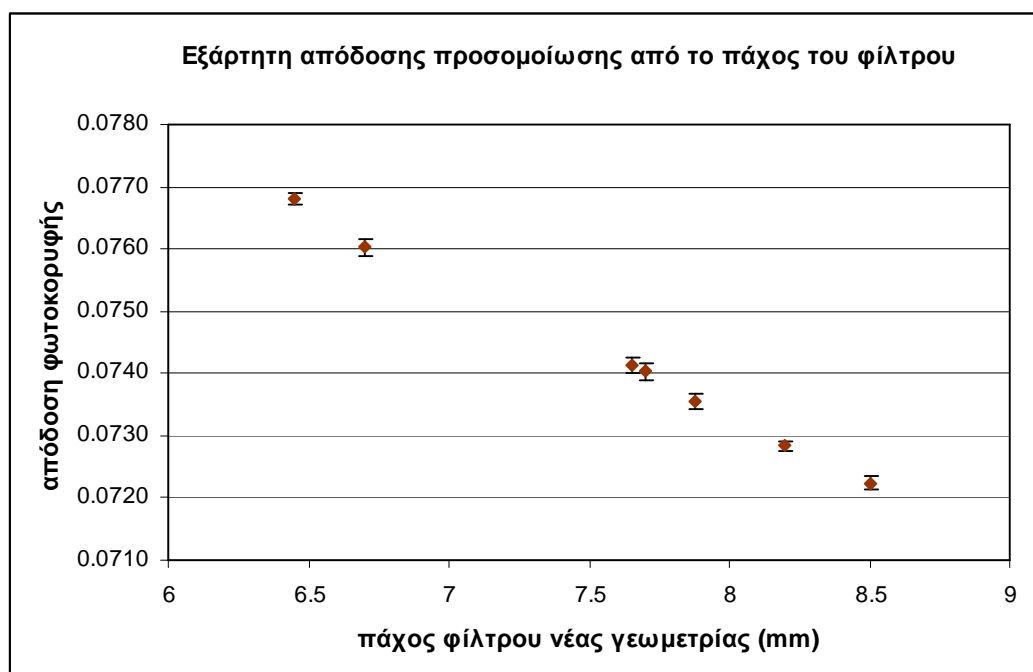
Οι τιμές για την απόδοση που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με βάση τα παραπάνω αρχεία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.21 στον οποίο για κάθε τιμή του

πάχους που πραγματοποιήθηκε προσομοίωση, παρέχεται η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής που προέκυψε συνοδευόμενη από την αβεβαιότητά της (1σ).

Πάχος φίλτρου (mm)	Απόδοση φωτοκορυφής	Αβεβαιότητα (% , 1σ)
6.450	0.07681	0.129
6.700	0.0760	0.198
7.650	0.0741	0.155
7.700	0.0740	0.174
7.875	0.0736	0.169
8.200	0.07284	0.104
8.500	0.0722	0.142

Πίνακας 3.21: Τιμές απόδοσης προσομοίωσης για νέα γεωμετρία

Παρατηρείται έντονη εξάρτηση της απόδοσης που υπολογίζεται από την προσομοίωση από το πάχος του φίλτρου, καθώς για διαφορά στο πάχος της τάξης των 2mm παρατηρείται απόκλιση στην απόδοση της τάξης του 6%, με την τιμή της να μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλώνει το πάχος της πηγής, τόσο αυξάνεται η στερεά γωνία της πηγής ως προς τον ανιχνευτή άρα τόσο μικραίνει η απόδοση. Οι τιμές της απόδοσης φαίνονται και σε μορφή διαγράμματος παρακάτω:



Διάγραμμα 3.9: Εξάρτηση απόδοσης φωτοκορυφής με βάση την προσομοίωση της νέας γεωμετρίας από το πάχος του φίλτρου

Έτσι δημιουργείται η ανάγκη εύρεσης ενός τρόπου τυποποίησης του πάχους του φίλτρου, ώστε να υπάρχει μία συγκεκριμένη τιμή πάχους που να χρησιμοποιείται στην προσομοίωση και να μην εισάγεται συστηματικό σφάλμα λόγω του πάχους αυτού. Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι ένα διπλωμένο φίλτρο δεν παρουσιάζει το ίδιο πάχος σε όλα τα σημεία του, κάτι που εύκολα διαπιστώνεται ότι ισχύει και για τη ‘γεωμετρία 12’ και εισάγει μία ακόμα αβεβαιότητα κατά την ανάλυση του φίλτρου στη ‘γεωμετρία 12’.

3.7.2 Κατασκευή θήκης από Plexiglas – Τελική μορφή νέας γεωμετρίας

Με σκοπό την ύπαρξη μίας σταθερής τιμής για το πάχος του διπλωμένου φίλτρου και κατ’ επέκταση και της απόδοσης του ανιχνευτή, κατασκευάστηκε μία θήκη από Plexiglas στην οποία θα εισάγεται το προς ανάλυση φίλτρο. Προφανώς, η θήκη αυτή θα επιτρέπει την μεγαλύτερη επαναληψιμότητα κατά την τοποθέτηση του φίλτρου για ανάλυση.

Πρόκειται για μια κυλινδρική κατασκευή η οποία στο εσωτερικό της έχει μια υποδοχή ορθογωνικής διατομής. Αποτελείται από μία βάση πάχους 1mm στο κάτω μέρος της, έναν κυλινδρικό δακτύλιο με την ορθογωνική υποδοχή πάχους 6.5mm και ένα κάλυμμα στο πάνω μέρος πάχους 5mm που περιορίζει το πάχος του φίλτρου. Στην εικόνα 3.15 παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα της κατασκευής, ενώ στην εικόνα 3.16 δίνεται το σκαρίφημα της συνολικής κατασκευής η οποία προέκυψε με κόλληση των επιμέρους τμημάτων. Στην ορθογωνική υποδοχή της κατασκευής τοποθετείται το φίλτρο διπλωμένο στη νέα γεωμετρία. Οι διαστάσεις της θήκης επιλέχθηκαν 6.4x6.8x0.65cm, ώστε να χωράει ελαφρώς συμπιεσμένο το φίλτρο διαστάσεων 6.35x6.77cm. Η διάμετρος του κυλινδρικού δακτυλίου είναι ίση με τη διάμετρο του καλύμματος του ανιχνευτή (109mm) ώστε να γίνεται εύκολα το κεντράρισμα της θήκης κατά την τοποθέτησή της στον ανιχνευτή. Πρέπει να επισημανθεί ότι η κάτω επιφάνεια της θήκης πάχους 1mm κατασκευάστηκε από υλικό πολυαιθυλένιο-PET καθώς δεν βρέθηκε στο εμπόριο Plexiglas σε αυτό το πάχος. Η τελική μάζα της θήκης μετρήθηκε ίση με 106.13gr \pm 0.009% (1 σ).

Για την υπόψη γεωμετρία φίλτρου τοποθετημένη πάνω στον ανιχνευτή XtRa έγινε προσομοίωση για ενέργεια φωτονίων 477.59keV. Καθώς τα φίλτρα είναι τύπου ινών γυαλιού (glass-fiber), η υποδοχή της θήκης του φίλτρου θεωρήθηκε ότι είναι πλήρης από SiO₂. Ως αρχείο εισόδου (τύπου.in) χρησιμοποιήθηκε το αρχείο Γ.23 (παράρτημα Γ). Στο αρχείο Δ.6 παραρτήματος Δ παρατίθεται το σχετικό αρχείο

γεωμετρίας, απεικόνιση του οποίου φαίνεται στην εικόνα 3.17 στο τέλος του κεφαλαίου. Η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής υπολογίσθηκε σε:

$$\text{eff}_{\text{simul.}}(477.59\text{keV}) = 0.07531 \pm 0.057\%$$

Μετά τη μελέτη και της περίπτωσης χρήσης της θήκης από Plexiglas, το νέο ζεύγος ενέργειας-απόδοσης φωτοκορυφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλέον για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ισοτόπου ^7Be .

Στα πλαίσια της παρούσης Δ.Ε. γίνεται βαθμονόμηση απόδοσης με τη βοήθεια προσομοίωσης μόνο για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV του ^7Be . Για άλλες ενέργειες θα πρέπει να γίνει επέκταση της μεθόδου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.

3.7.3 Πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της νέας γεωμετρίας

Εκτός από τη θήκη που κατασκευάστηκε για τη σταθεροποίηση του πάχους του φίλτρου και τη χρήση στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων αέρα, κατασκευάστηκε και δεύτερη ίδια θήκη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πρότυπης πηγής με χρήση άλατος KCl, με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την ενέργεια των φωτονίων του ^{40}K .

Η πρότυπη πηγή KCl παρασκευάστηκε από φυσικό άλας KCl της εταιρείας MERCK με κωδικό Art4935 σε καθαρότητα μεγαλύτερη του $99.55\% \pm 0.01\%$. Η καθαρή ποσότητα άλατος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της πρότυπης πηγής μετρήθηκε ίση με $36.42\text{gr} \pm 0.009\%$ (1σ) και καταλαμβάνει όλο τον όγκο της ορθογωνικής υποδοχής συνολικού όγκου 28.288 cm^3 . Επομένως η πυκνότητα του άλατος είναι 1.287gr/cm^3 . Με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3.4.4 υπολογίζεται η ενεργότητα του άλατος, ίση με $16.418\text{kBq/kg} \pm 0.01\%$.

Στην παρακάτω εικόνα 3.5 φαίνεται φωτογραφία της πρότυπης πηγής KCl:



Εικόνα 3.5: Πρότυπη πηγή KCl (θήκη από Plexiglas)

Με την πρότυπη πηγή KCl έγινε πείραμα και πραγματοποιήθηκε και κατάλληλη προσομοίωση.

Κατά το πείραμα με την πρότυπη πηγή KCl συλλέχθηκε το φάσμα KCLCAPc. Από το φάσμα αυτό λαμβάνονται οι τιμές της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, σε μονάδες cps, καθώς και η αντίστοιχη αβεβαιότητα. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.22:

Φάσμα	cps	Αβεβαιότητα cps (%, 1σ)
KCLCAPc	2.30	0.727

Πίνακας 3.22: Cps για την πρότυπη πηγή KCl με θήκη από Plexiglas

Από τις κρούσεις στη μονάδα του χρόνου που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα 3.22 αφαιρούνται οι κρούσεις στη μονάδα του χρόνου του υποστρώματος με χρήση του φάσματος υποστρώματος του ανιχνευτή XtRa BG4201. Ο υπολογισμός φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

cps	Αβεβαιότητα cps (%, 1σ)	cps υποστρώματος	Αβεβαιότητα υποστρώματος (%, 1σ)	Καθαρά cps	Αβεβαιότητα καθαρών cps (%, 1σ)
2.30	0.727	0.0047	6.30	2.30	0.729

Πίνακας 3.23: Υπολογισμός καθαρών cps για την πρότυπη πηγή KCl με θήκη από Plexiglas

Η απόδοση φωτοκορυφής και η αβεβαιότητα που τη συνοδεύει υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.1) και (3.4). Το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι:

$$\text{eff}_{\text{exper.}}(\text{KCl}) = 0.0359 \pm 0.73\%$$

Παράλληλα με το παραπάνω πείραμα πραγματοποιήθηκε και προσομοίωση για τα φωτόνια του ^{40}K ενέργειας 1460.80keV. Το αρχείο εισόδου τύπου .in παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ (αρχείο Γ.24), ενώ το αρχείο γεωμετρίας παραμένει το ίδιο με την περίπτωση προσομοίωσης των φωτονίων του ^7Be (αρχείο Δ.6 παραρτήματος Δ, εικόνα 3.17 στο τέλος του κεφαλαίου). Η ενεργειακή διαμέριση ήταν πάλι 1000 κανάλια και σύμφωνα με τη σχέση (3.3) υπολογίζεται το απαραίτητο πλήθος καναλιών ίσο με 3. Η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η αβεβαιότητά της σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ είναι:

$$\text{eff}_{\text{simul.}}(\text{KCl}) = 0.03842 \pm 0.14\%$$

Όπως προκύπτει, οι δύο τιμές, προσομοίωσης και πειράματος, παρουσιάζουν απόκλιση ίση με 6.5%, στατιστικά σημαντική, με την απόδοση φωτοκορυφής που υπολογίζεται από την προσομοίωση να είναι μεγαλύτερη. Η απόκλιση αυτή είναι εκτός των ορίων που στην παρούσα Δ.Ε. θεωρούνται αποδεκτά. Ωστόσο, αναφέρεται σε διαφορετική ενεργειακή περιοχή την ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας Δ.Ε. (περί τα 477.59keV, ^7Be).

3.8 Αβεβαιότητα νέας βαθμονόμησης

Με βάση τη μελέτη της νέας γεωμετρίας βρέθηκε το νέο ζεύγος ενέργειας-απόδοσης φωτοκορυφής για την περίπτωση γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης δειγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ισοτόπου ^7Be :

$$\{477.59\text{keV}, 0.07531 \pm 0.057\% (1\sigma)\}$$

Η αβεβαιότητα που συνοδεύει την παραπάνω τιμή της απόδοσης είναι μόνο η αβεβαιότητα λόγω της προσομοίωσης. Πρόκειται για την αβεβαιότητα που παρέχεται από τον κώδικα στο αρχείο εξόδου pm_spc_enddet#.dat, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3.1.5 (εικόνα 3.6 στο τέλος του κεφαλαίου). Στην πραγματικότητα, η συνολική αβεβαιότητα της απόδοσης είναι υψηλότερη και θα πρέπει να περιλαμβάνει επιπλέον και τη συστηματική αβεβαιότητα η οποία εισάγεται μέσω των δεδομένων που χρησιμοποιεί ο κώδικας PENELOPE, όπως οι τιμές των πυρηνικών δεδομένων και οι ενεργές διατομές, και φυσικά την αβεβαιότητα που εισάγεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά πηγών και ανιχνευτών, τα οποία δεν είναι πάντα γνωστά με ακρίβεια. Για τα δεδομένα αυτά δεν παρέχονται αβεβαιότητες και επομένως η συστηματική αβεβαιότητα δεν μπορεί να υπολογισθεί. Σε πρώτη προσέγγιση, ως μία εκτίμηση της συστηματικής αβεβαιότητας της απόδοσης λόγω της προσομοίωσης, θα μπορούσε να θεωρηθεί η μέγιστη απόκλιση των πειραματικών τιμών από τις αντίστοιχες τιμές της

προσομοίωσης που έχουν διαπιστωθεί προηγουμένως για τις “παραπλήσιες” γεωμετρίες. Η απόκλιση αυτή εκτιμάται σε ~2.5% (παράγραφοι 3.5.3.3 και 3.5.4.2.2). Εναλλακτικά, θα μπορούσε να θεωρηθεί η απόκλιση της πειραματικής τιμής από την τιμή της προσομοίωσης για τη νέα γεωμετρία, για τα φωτόνια του ^{40}K , που είναι περί το 6.5% (παράγραφος 3.7.3). Μία άλλη μέθοδος [Vargas M.J., et al, 2002] για να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι να σχεδιασθούν και να πραγματοποιηθούν μία σειρά από προσομοιώσεις, με τροποποίηση κάθε φορά των διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών μέσα στα όρια των τιμών τους. Εκτιμώντας κάθε φορά την απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή μπορεί να βρεθεί η περιοχή τιμών μέσα στην οποία θα κυμαίνεται. Η περιοχή αυτή της κύμανσης θα δίνει μία πληροφορία σχετικά με τη συστηματική αβεβαιότητα που εισάγεται λόγω της αβεβαιότητας στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών και πηγών. Μία τέτοια διερεύνηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στο μέλλον.

3.9 Σύγκριση της απόδοσης της νέας γεωμετρίας με την απόδοση της γεωμετρίας 12

Για την υπάρχουσα γεωμετρία 12 η απόδοση φωτοκορυφής για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV λαμβάνεται από τη συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή XtRa και είναι:

$$\text{eff}_{12,\text{exp.}}(477.59\text{keV}) = 0.0477 \pm 1.118\% (1\sigma)$$

όπου ως αβεβαιότητα θεωρείται η μέση τετραγωνική απόκλιση της αναδρομής (RMS).

Με χρήση κώδικα Monte Carlo για τη νέα γεωμετρία φίλτρων αέρα προέκυψε, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υψηλότερη απόδοση φωτοκορυφής για τα φωτόνια του ^7Be ενέργειας 477.59keV:

$$\text{eff}_{\text{νέα,simul.}}(477.59\text{keV}) = 0.07531 \pm 0.057\% (1\sigma)$$

Από τη σύγκριση των δύο τιμών παρατηρείται μία βελτίωση της απόδοσης για την ανίχνευση των φωτονίων ενέργειας 477.59keV της τάξης του 40%. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται ότι η νέα γεωμετρία οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση κατά την ανίχνευση των φωτονίων του ^7Be . Η μεγαλύτερη αυτή απόδοση παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ισότοπου σε δείγματα μικρής ενεργότητας, καθώς και την επίτευξη ικανοποιητικής στατιστικής για συντομότερους χρόνους φασματοσκοπικής ανάλυσης.

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι, με τη νέα βαθμονόμηση, πέραν της υψηλότερη απόδοσης, η διαδικασία διπλώματος και συσκευασίας του φίλτρου που υιοθετήθηκε

επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη επαναληψιμότητα κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων με προφανείς επιπτώσεις στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της, κάτι που επιτρέπει την παρακολούθηση της κύμανσης της συγκέντρωσης του ^7Be στον αέρα με μεγαλύτερη ευκολία και ασφάλεια.

Προφανώς το θέμα της συστηματικής αβεβαιότητας η οποία εισάγεται κατά τη βαθμονόμηση μέσω προσομοίωσης δεν θεωρείται ότι έχει κλείσει, όμως η μεγαλύτερη απόδοση που επιτυγχάνεται κατά τις αναλύσεις των φίλτρων αέρα, καθώς και η καλύτερη επαναληψιμότητα κατά την τοποθέτηση του φίλτρου στον ανιχνευτή, θα μπορέσει να οδηγήσει σε μείωση της τυχαίας αβεβαιότητας κατά τον υπολογισμό της ραδιενέργειας του ^7Be και θα διευκολύνει την παρακολούθηση της κύμανσής του στην ατμόσφαιρα.

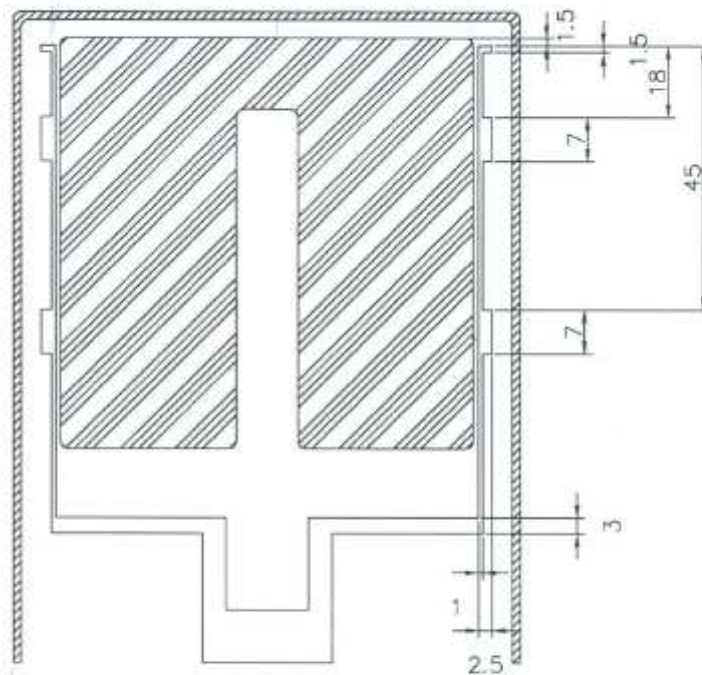
Εικόνες κεφαλαίου 3:

```
# Results from PENMAIN. Output from energy-deposition detector # 1
# 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).

1.240000E+03  2.056558E-07  2.305602E-08
1.720000E+03  2.478784E-07  2.531213E-08
2.200000E+03  2.447189E-07  2.515032E-08
2.680000E+03  2.487401E-07  2.535609E-08
3.160000E+03  2.306447E-07  2.441647E-08
...
2.620000E+04  2.510379E-07  2.547292E-08
2.668000E+04  2.625271E-07  2.604923E-08
2.716000E+04  2.510379E-07  2.547292E-08
2.764000E+04  2.570697E-07  2.577709E-08
```

Εικόνα 3.6: Τμήμα του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_1.dat*

S/N 00078



Ge Crystal Details

Entrance Window Thickness: 0.4 μm eq. Ge
 Outer Electrode Thickness: 0.75 mm estimated
 Inner Electrode Thickness: 0.3 μm
 Crystal Diameter: 80 mm
 Crystal Length: 78 mm
 Core Hole Diameter: 11 mm
 Core Hole Depth: 66.5 mm

Detector Chamber Material Details

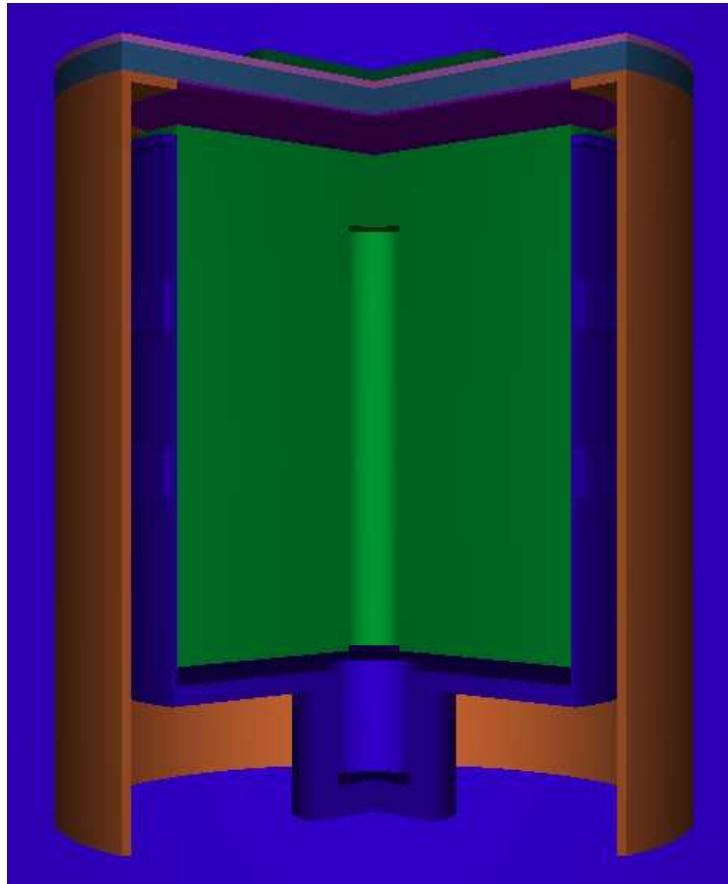
Ge front to inside of endcap distance: 5 mm
 Cryostat Window Material: Carbon Epoxy Thickness: 0.5 mm
 Endcap Material: Al Thickness: 1.5 mm
 Crystal Holder Material: Al

CONFIDENTIAL

Unauthorized duplication of information herein is strictly prohibited.

INNER DRAWING X tra			Appr.:
Date: 03/04/07		Doc: MCNPGX-type	
MAT:		Auth.: Mar	
SCALE: not to scale		Bestelnr: b 0007B	
TOL:		Aantal:	

Εικόνα 3.7: Το πιστοποιητικό του κατασκευαστή του ανιχνευτή ΧiRa



Εικόνα 3.8: Ο ανιχνευτής XtRa με το φίλτρο διαμέτρου 47mm σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Certificate of calibration of mixed radionuclide
gamma-ray reference solution

PM 11827

ISSUED BY: Amersham plc
Radiation & Radioactivity
Calibration Laboratory
The Grove Centre
White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire
HP7 9LL

ISSUED FOR: AEA Technology QSA GmbH
Isotrak
Gieselweg 1
D-38110 Braunschweig
Germany

Description Product code: QCY48

Solution number: R3/10/45

This mixed radionuclide gamma-ray reference standard consists of a solution in 4M HCl of the ten radionuclides listed below.

Measurement and accuracy Reference time: 1200 GMT on 1 March 2003

Mass of solution: 5.3992 grams

Parent radionuclide	Gamma-ray Energy (keV)	Gamma-rays per second per gram	Combined Type A uncertainty	Combined Type B uncertainty	Expanded uncertainty	Calibration start date	Calibration finish date
Americium-241	59.54	1128	± 0.1 %	± 1.3 %	± 2.6 %	08/04/1998	08/04/1998
Cadmium-109	88.03	648	± 0.3 %	± 3.1 %	± 6.2 %	16/12/2002	23/12/2002
Cobalt-57	122.1	593	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	29/08/2002	30/08/2002
Cerium-139	165.9	712	± 0.1 %	± 0.7 %	± 1.4 %	06/11/2002	07/11/2002
Mercury-203	279.2	1851	± 0.1 %	± 0.7 %	± 1.4 %	21/01/2003	21/01/2003
Tin-113	391.7	2139	± 0.1 %	± 1.6 %	± 3.2 %	15/11/2001	15/11/2001
Strontium-85	514.0	3882	± 0.1 %	± 1.3 %	± 2.5 %	11/09/2002	13/09/2002
Caesium-137	661.6	2402	± 0.1 %	± 1.0 %	± 1.9 %	06/01/2003	07/01/2003
Yttrium-88	898.0	6248	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.6 %	26/09/2002	30/09/2002
Cobalt-60	1173	3409	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	18/12/2001	18/12/2001
Cobalt-60	1333	3412	± 0.1 %	± 0.8 %	± 1.5 %	18/12/2001	18/12/2001
Yttrium-88	1836	6605	± 0.1 %	± 0.7 %	± 1.3 %	26/09/2002	30/09/2002

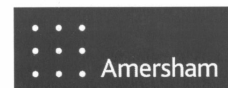
The calibration date is provided for added information only, and must not be confused with the reference date. It is the reference date that must be used in all calculations relating to the values of activity.

Approved Signatory



Date of issue

13th February 2003



B D D Singleton

Page 1 of 2 pages

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

Εικόνα 3.9: Πιστοποιητικό QCY.48 (QCY12) (4MHCl)



**Isotope Products
Laboratories**

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661•309•1010

An Eckert & Ziegler Company

Fax 661•257•8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION MULTINUCLIDE STANDARD SOLUTION

Customer: ECKERT & ZIEGLER/ISOTOPE PROD. EUROPE	Source No.: 1195-22-11
P.O. No.: 34168	Reference Date: 1-Jul-06 12:00 PST
Catalog No.: 7601	Contained Radioactivity: 1.084 μ Ci 40.11 kBq

Physical Description:

A. Mass of solution:	10.25743 grams in 10 mL flame-sealed ampoule
B. Chemical form:	Multinuclide in 2M HCl
C. Carrier content:	See attached sheet
D. Density:	1.033 g/mL @ 20°C

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Conc. (nCi/g)	Gammas per second per gram	Total Uncert.
60	Am-241	432.17 \pm 0.66 years	36.0	3.067	40.85	3.0 %
88	Cd-109	462.6 \pm 0.7 days	3.63	42.94	57.67	3.0 %
122	Co-57	271.79 \pm 0.09 days	85.6	1.596	50.55	3.1 %
166	Ce-139	137.640 \pm 0.023 days	79.9	2.018	59.66	3.0 %
279	Hg-203	46.595 \pm 0.013 days	81.5	6.201	187.0	3.0 %
392	Sn-113	115.09 \pm 0.04 days	64.9	8.335	200.1	3.0 %
514	Sr-85	64.849 \pm 0.004 days	98.4	9.983	363.5	3.0 %
662	Cs-137	30.17 \pm 0.16 years	85.1	7.064	222.4	3.0 %
898	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	94.0	15.99	556.1	3.0 %
1173	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.86	8.485	313.5	3.0 %
1333	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.98	8.485	313.9	3.0 %
1836	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	99.4	15.99	588.1	3.0 %

Method of Calibration:

This source was prepared from weighed aliquots of solutions whose concentrations in μ Ci/g were determined by gamma spectrometry.

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- IPL participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- Overall uncertainty is calculated at the 99% confidence level.
- This source has a working life of 1 year.


Quality Control

16-Jun-06
Date

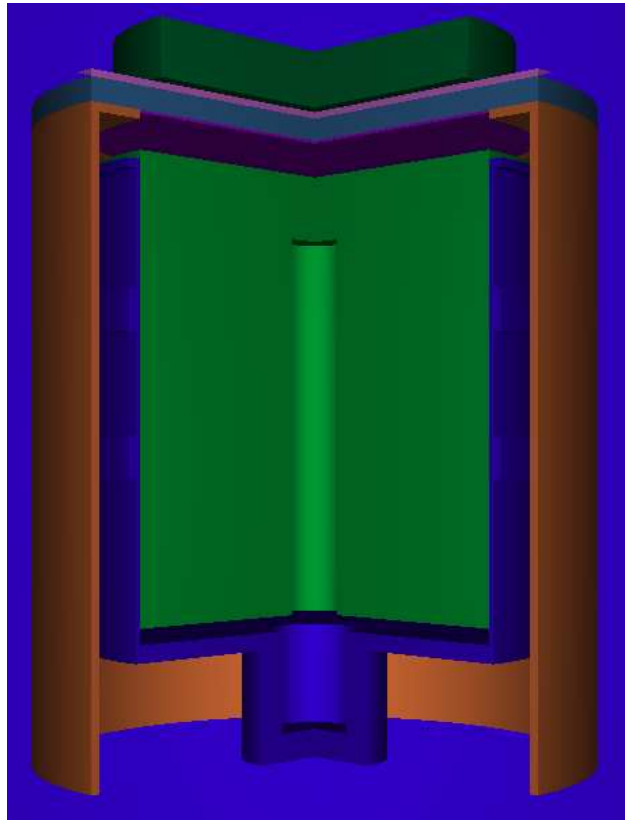
IPL Ref. No.: 1195-22

ISO 9001 CERTIFIED

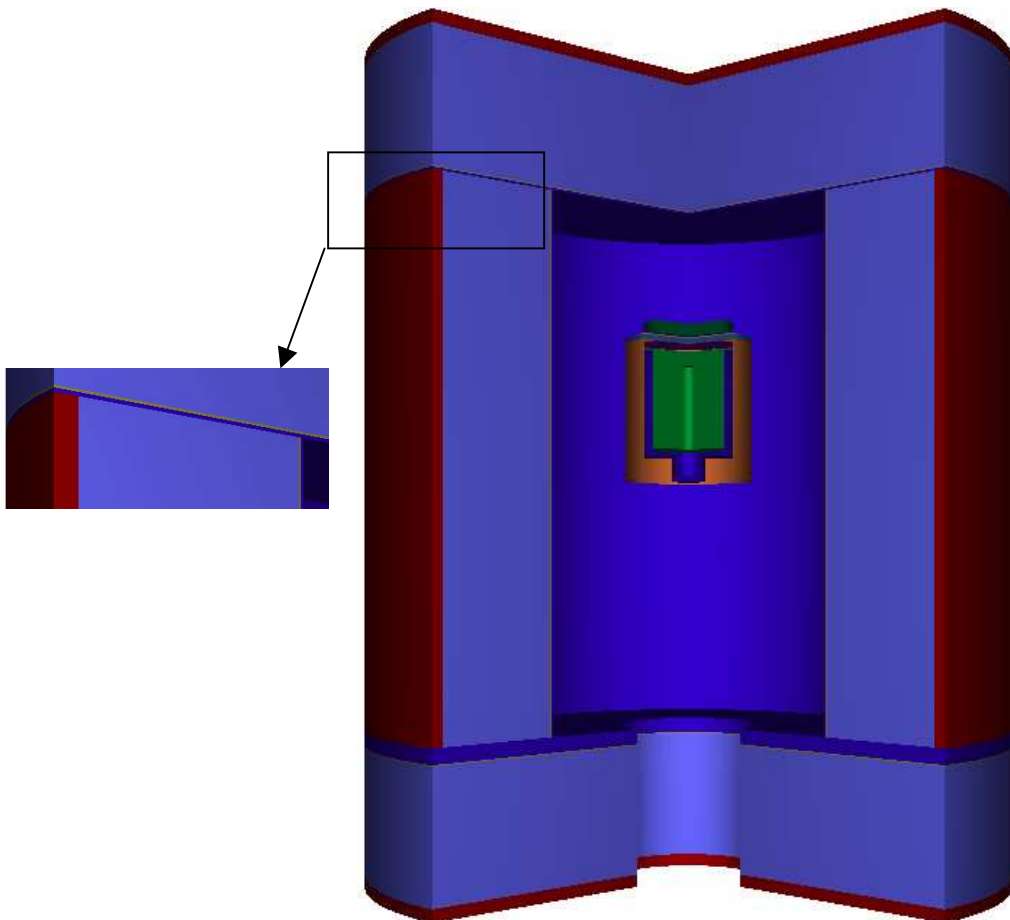
Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

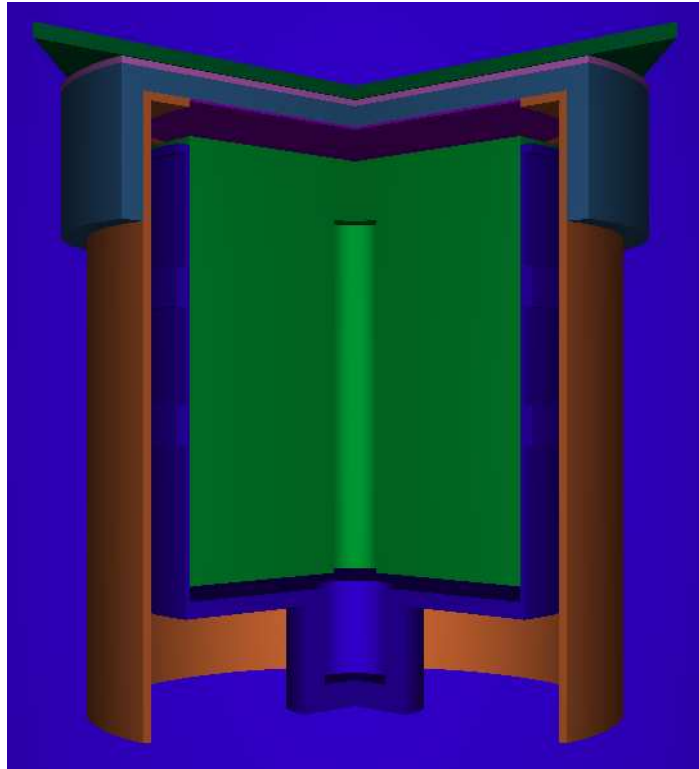
Εικόνα 3.10: Πιστοποιητικό διαλύματος EEAE (2M HCl)



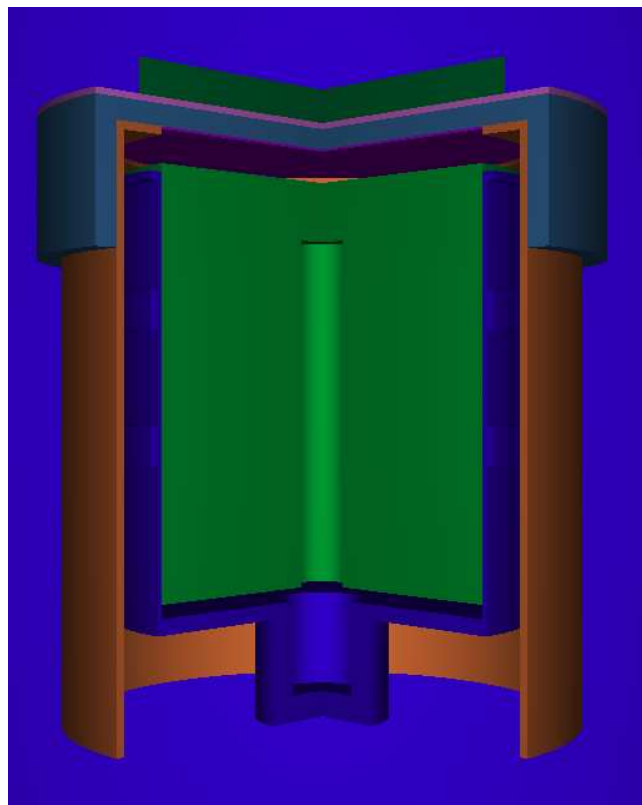
Εικόνα 3.11: Ο ανιχνευτής XtRa με το δοχείο γεωμετρίας 8 σε τρισδιάστατη απεικόνιση



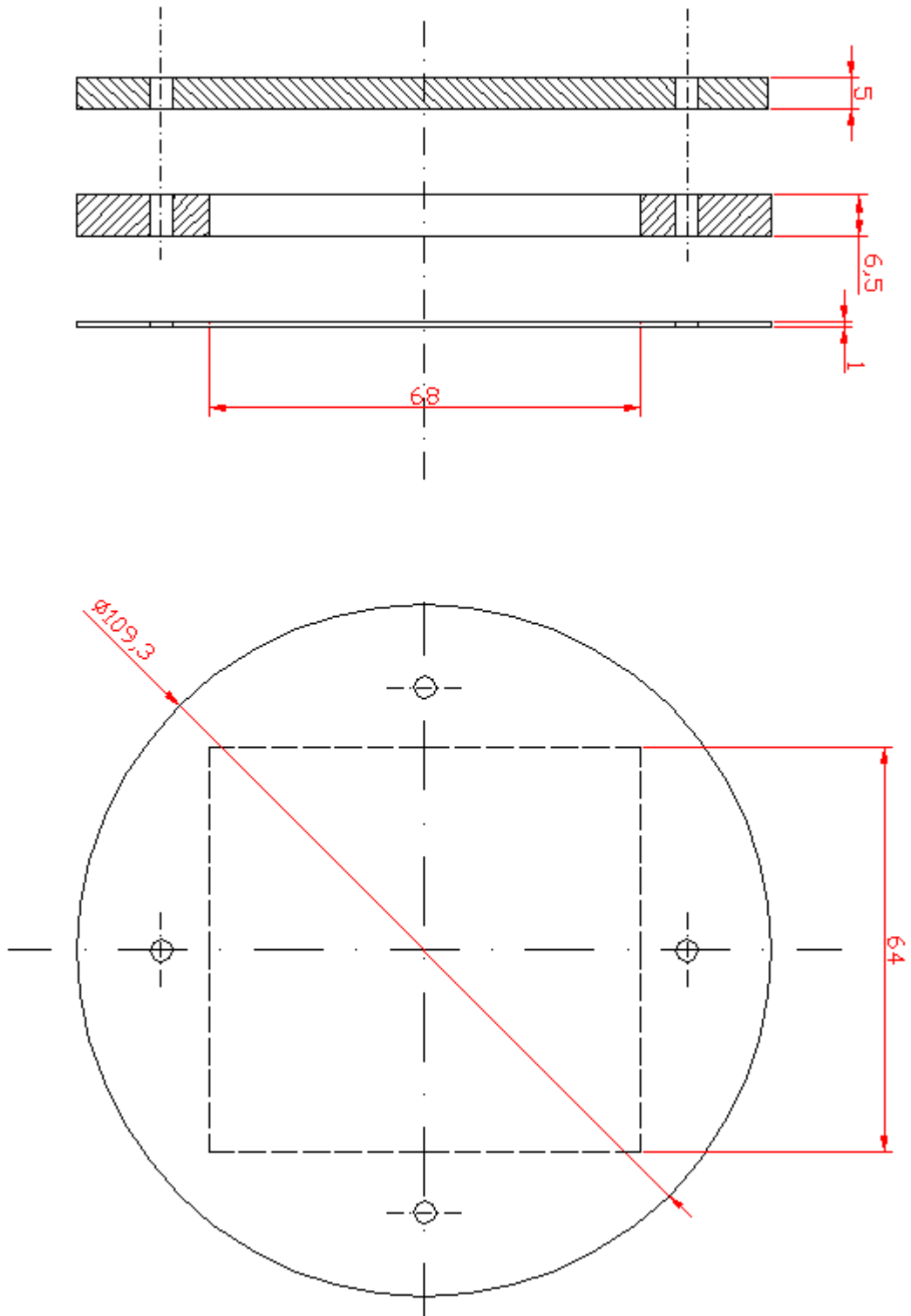
Εικόνα 3.12: Ο ανιχνευτής XtRa με το δοχείο γεωμετρίας 8 και τη θωράκιση σε τρισδιάστατη απεικόνιση



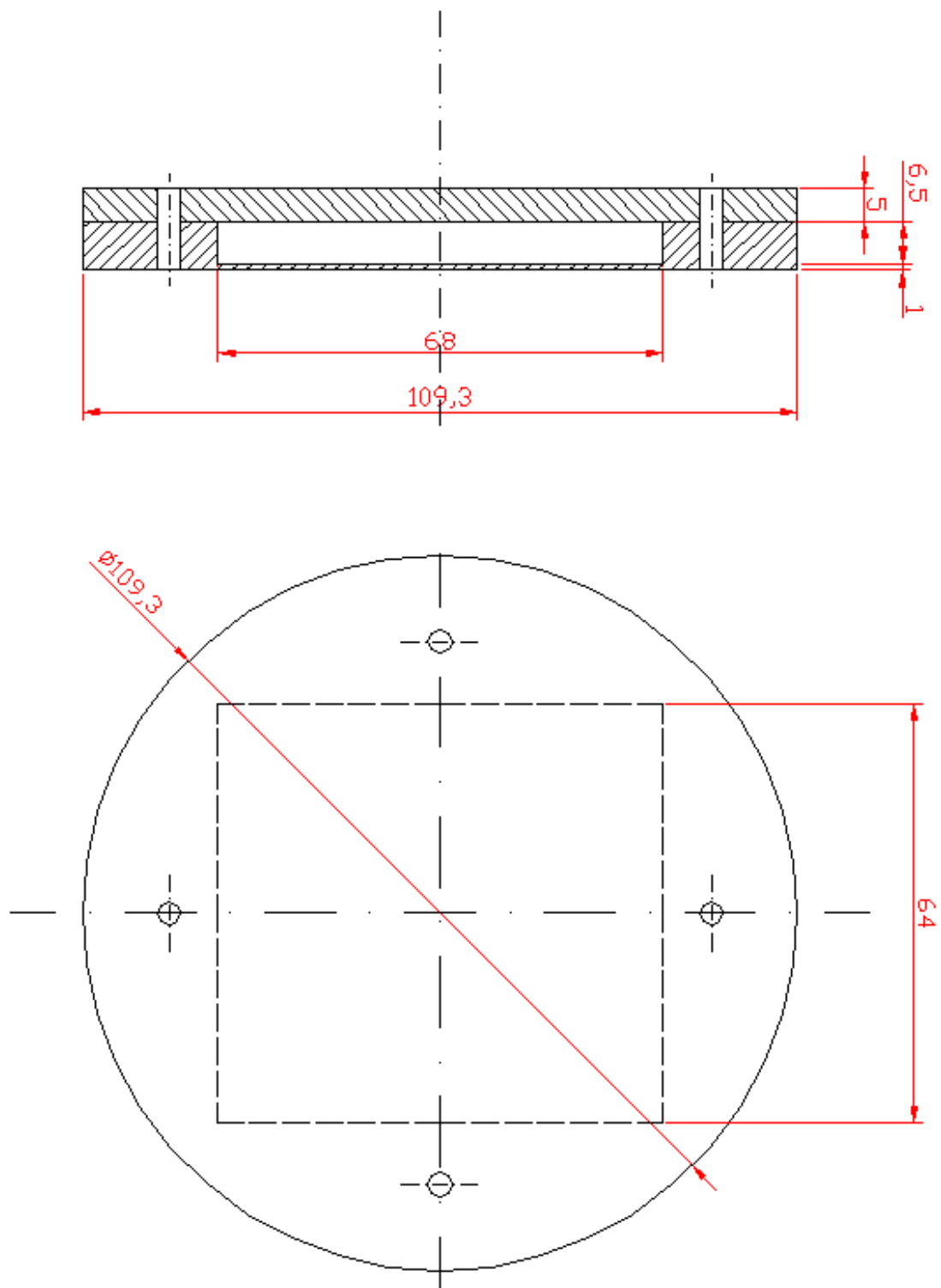
Εικόνα 3.13: Ο ανιχνευτής XtRa με το φίλτρο διπλωμένο σε γεωμετρία 12 σε τρισδιάστατη απεικόνιση



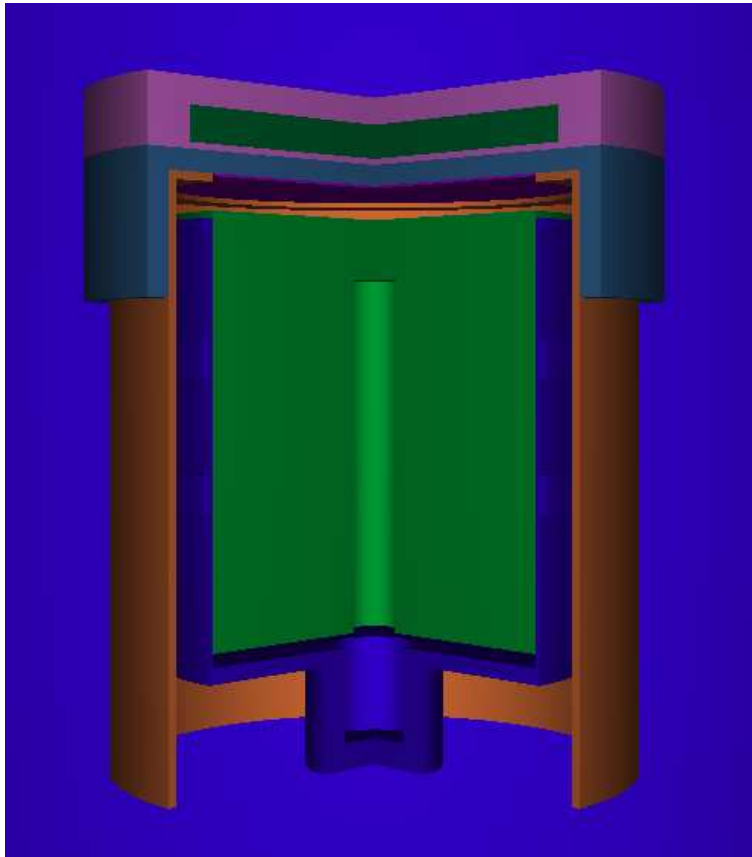
Εικόνα 3.14: Ο ανιχνευτής XtRa με το φίλτρο διπλωμένο στη νέα γεωμετρία σε τρισδιάστατη απεικόνιση



Εικόνα 3.15: Σχέδιο θήκης από Plexiglas στα τρία κατασκευαστικά τμήματα

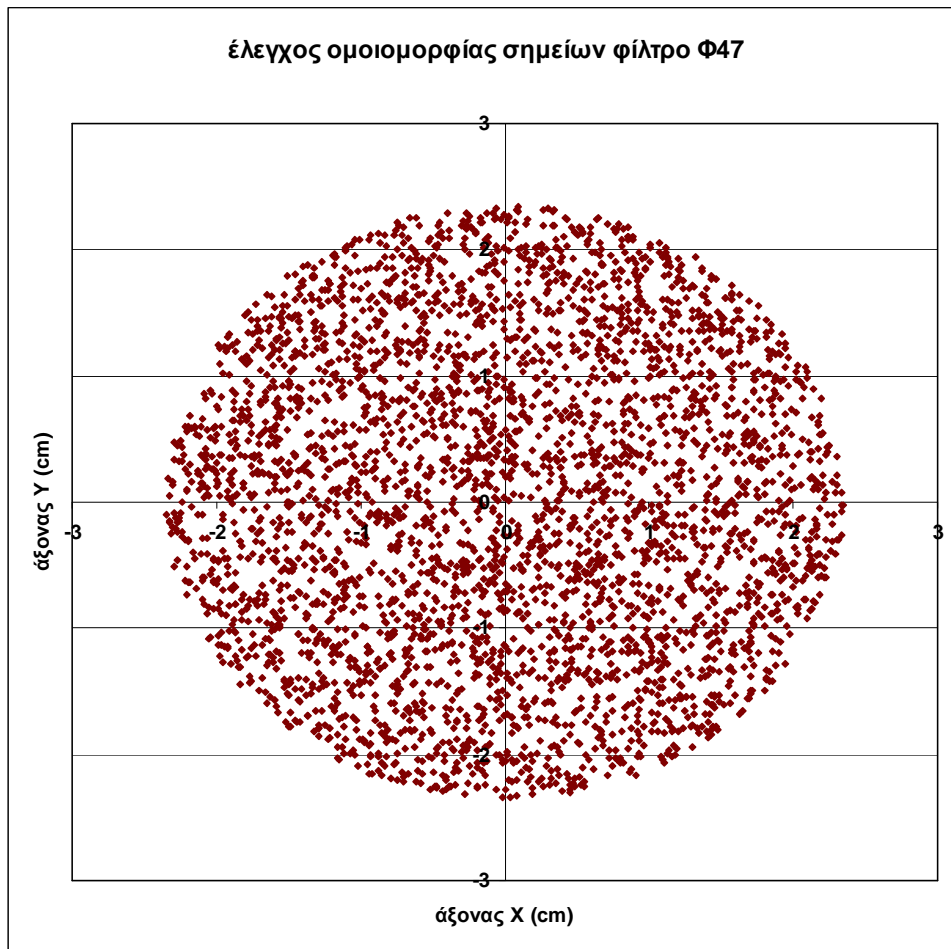


Εικόνα 3.16: Σχέδιο θήκης από Plexiglas

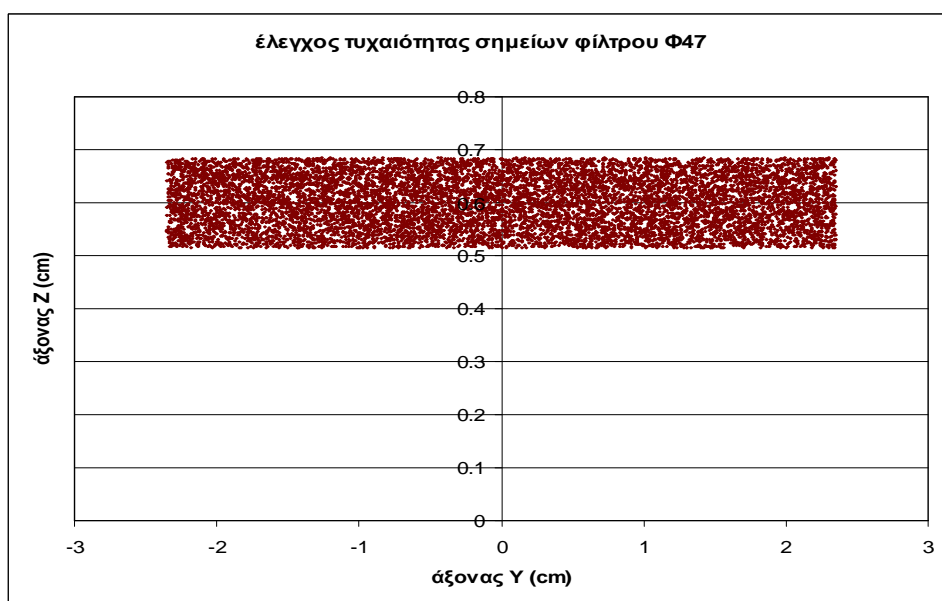


Εικόνα 3.17: Ο ανιχνευτής XtRa με το φίλτρο διπλωμένο στη τελική νέα γεωμετρία με θήκη από Plexiglas σε τρισδιάστατη απεικόνιση

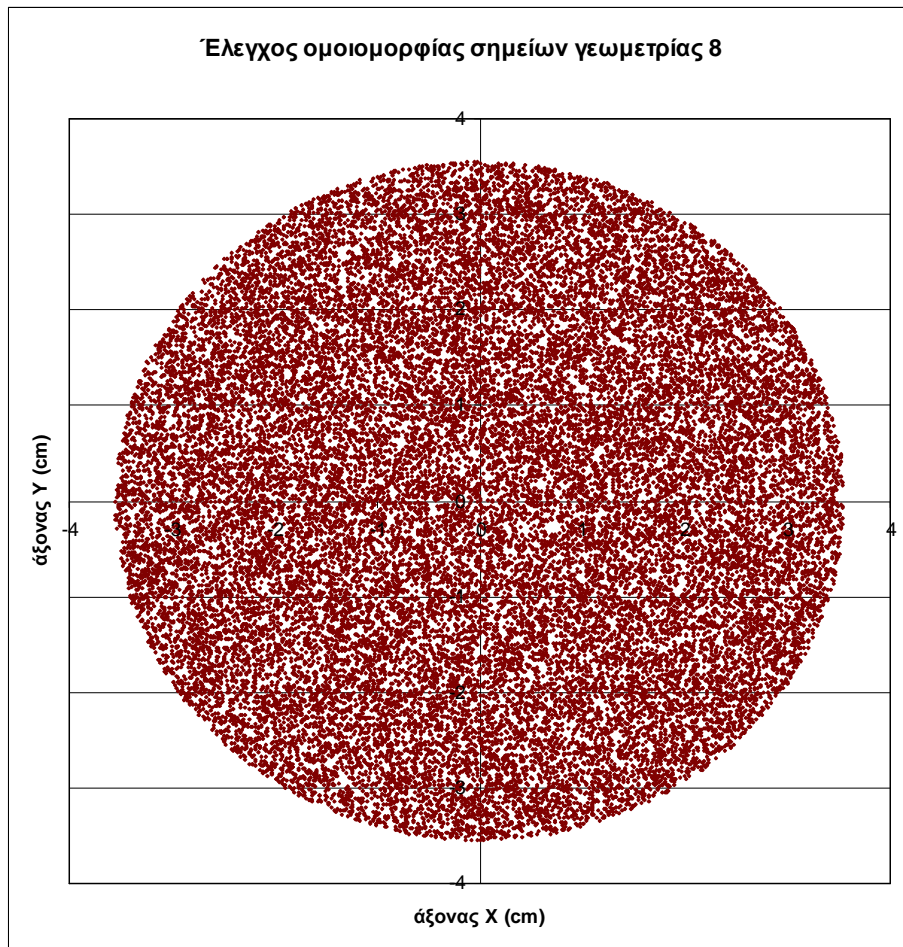
Διαγράμματα κεφαλαίου 3:



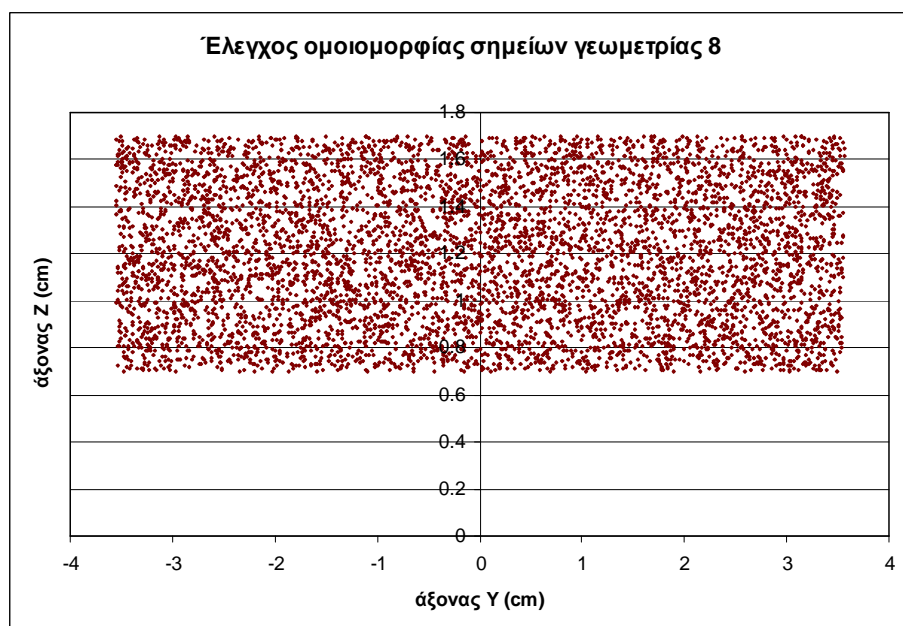
Διάγραμμα 3.10: Έλεγχος ομοιομορφίας σημείων για φίλτρο διαμέτρου 47mm στο επίπεδο x-y



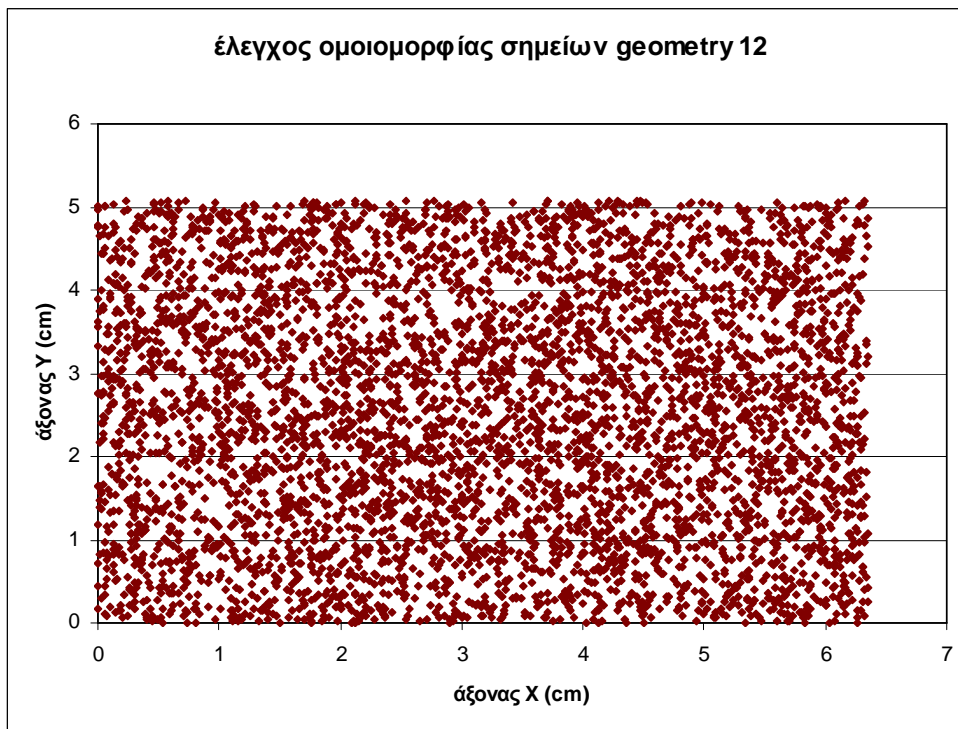
Διάγραμμα 3.11: Έλεγχος ομοιομορφίας σημείων για φίλτρο διαμέτρου 47mm στο επίπεδο y-z



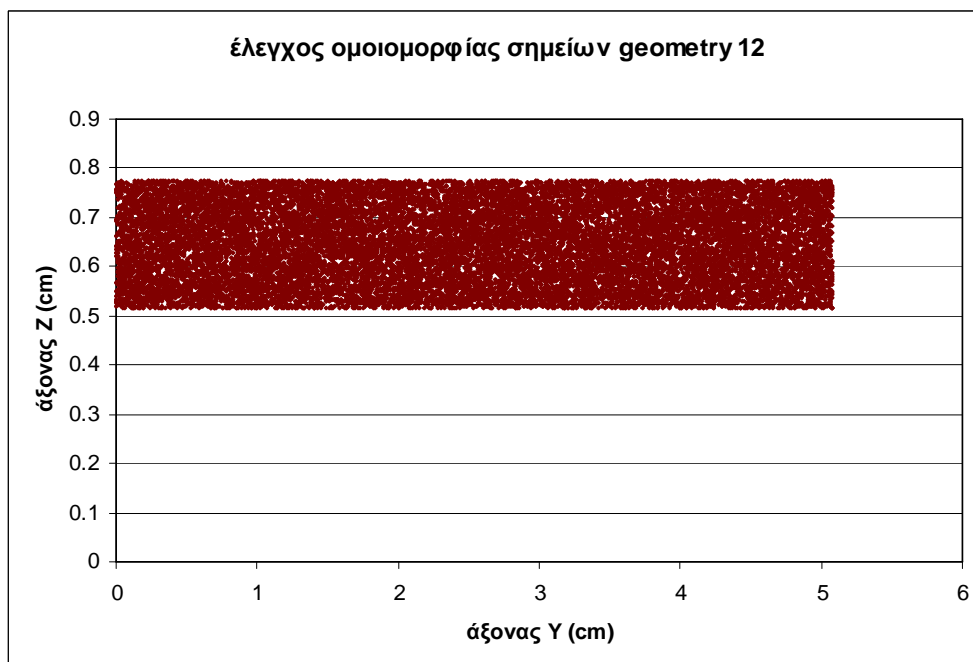
Διάγραμμα 3.12: Έλεγχος ομοιομορφίας σημείων για διάλυμα γεωμετρίας 8 στο επίπεδο x-y



Διάγραμμα 3.13: Έλεγχος ομοιομορφίας σημείων για διάλυμα γεωμετρίας 8 στο επίπεδο y-z



Διάγραμμα 3.14: Έλεγχος ομοιομορφίας σημείων για φίλτρο γεωμετρίας 12 στο επίπεδο x-y



Διάγραμμα 3.15: Έλεγχος ομοιομορφίας σημείων για φίλτρο γεωμετρίας 12 στο επίπεδο y-z

Κεφάλαιο 4:

Σύγκριση της νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρων αέρα με την ισχύουσα γεωμετρία 12

4.1 Εισαγωγή

Μετά από τη μελέτη - βαθμονόμηση της νέας γεωμετρίας φίλτρου - ανιχνευτή με χρήση του κώδικα PENELOPE, είναι πλέον δυνατή η χρησιμοποίησή της κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φίλτρων αέρα και η παρακολούθηση της μεταβολής της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα. Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζεται η τροποποιημένη διαδικασία λήψης και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα, με βάση τη νέα γεωμετρία. Σε σχέση με το ισχύον πρωτόκολλο (παράγραφος 2.3), η προτεινόμενη διαδικασία διαφέρει μόνο στον τρόπο διπλώματος του φίλτρου διαστάσεων $8 \times 10''$. Όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 3, με τον τρόπο αυτό η απόδοση ανίχνευσης για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV είναι αισθητά υψηλότερη. Με την υψηλότερη απόδοση επιτυγχάνεται μείωση του απαιτούμενου χρόνου ανάλυσης του φίλτρου ή / και καλύτερη στατιστική (μικρότερη αβεβαιότητα) στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be . Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αποδοτικότερη παρακολούθηση των μεταβολών της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ισοτόπου σε μικρή κλίμακα χρόνου, μεταβολές οι οποίες κυρίως ενδιαφέρουν το ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται οι δειγματοληψίες αέρα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. Τα φίλτρα που λήφθηκαν, αναλύθηκαν και στις δύο γεωμετρίες (γεωμετρία 12 και νέα). Τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων συγκρίνονται και προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τη βελτίωση που επιτυγχάνεται με τη νέα γεωμετρία ανάλυσης.

Τέλος, δεδομένου του ενδιαφέροντος μελέτης της μεταβολής της συγκέντρωσης του ισοτόπου σε μικρή κλίμακα χρόνου, γίνεται εφαρμογή της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με τη νέα γεωμετρία για την περίπτωση δειγματοληψίας διαδοχικών φίλτρων αέρα σε διάστημα χρόνου 24 ωρών. Μελετάται έτσι η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ^7Be και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της προτεινόμενης νέας γεωμετρίας για τέτοιου είδους μετρήσεις.

4.2 Νέα διαδικασία δειγματοληψίας και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης φίλτρων αέρα

Η προτεινόμενη διαδικασία λήψης φίλτρων οδηγεί στην ελαφρά τροποποίηση του υπάρχοντος πρωτοκόλλου δειγματοληψίας και ανάλυσης, σε ό,τι αφορά στο σκέλος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Ακολούθως, περιγράφονται τα σημαντικότερα βήματα της προτεινόμενης διαδικασίας:

- Για τη δειγματοληψία χρησιμοποιείται η αντλία αέρα τύπου DH-50810E της εταιρείας F&J Specialty Products Inc. που είναι εγκατεστημένη στην ταράτσα του κτηρίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ και η οποία περιγράφηκε στο κεφαλαίο 2 (παράγραφος 2.3.1). Στην αντλία αυτή τοποθετούνται τα φίλτρα από ίνες γυαλιού (glass-fiber) τυποποιημένων διαστάσεων 8x10” τύπου FR810M της εταιρείας F&J Specialty Products Inc. και γίνεται δειγματοληψία αέρα για 4 ώρες, όπως προβλέπεται και από το υπάρχον πρωτόκολλο.

- Μετά το πέρας των 4 ωρών, το φίλτρο απομακρύνεται από την αντλία και διπλώνεται στα μέσα των πλευρών του (γεωμετρία 12). Για τη γεωμετρία αυτή υπάρχει διαθέσιμη πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης.

- Το φίλτρο (γεωμετρίας 12) εισάγεται σε πλαστικό φάκελο και τοποθετείται στον ανιχνευτή XtRa για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Σκοπός είναι η μέτρηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών ισοτόπων του ^{222}Rn , όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.3). Η ανάλυση αυτή διαρκεί 2 ώρες, διάστημα κατά το οποίο ολοκληρώνεται η ραδιενεργός διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών ισοτόπων του ^{222}Rn , τα οποία έχουν συλλεχθεί στο φάσμα. Η ανάλυση του φίλτρου στη ‘γεωμετρία 12’ γίνεται για οικονομία χρόνου. Καθώς τα θυγατρικά του ραδονίου είναι βραχύβια κρίθηκε σκόπιμο να μην καταναλώνεται χρόνος αμέσως μετά τη δειγματοληψία για προσεκτικό δίπλωμα και σφράγισμα του φίλτρου στο δοχείο της νέας γεωμετρίας. Άλλωστε, η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου, η οποία είναι της τάξης των λίγων Bq/m^3 , επιτρέπει άνετα τον ακριβή προσδιορισμό τους στο χρονικό διάστημα των δύο ωρών που διαρκεί η ανάλυση. Επιπλέον, υπενθυμίζεται ότι στα πλαίσια της Δ.Ε. δεν προσδιορίστηκε η συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης για τη νέα γεωμετρία, αλλά μόνο η απόδοση για την ενέργεια των 477.59keV.

- Μετά το πέρας της ανάλυσης αυτής και τον πρακτικό μηδενισμό της συγκέντρωσης των θυγατρικών ισοτόπων του ^{222}Rn , το φίλτρο απομακρύνεται από τον ανιχνευτή και διπλώνεται στη νέα γεωμετρία, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.7.2. Στο σημείο αυτό ακριβώς διαφοροποιείται η προτεινόμενη διαδικασία λήψης και ανάλυσης φίλτρων αέρα από το υπάρχον πρωτόκολλο.

- Το διπλωμένο στη νέα γεωμετρία φίλτρο εισάγεται σε πλαστικό φάκελο, σφραγίζεται αεροστεγώς, τοποθετείται στη θήκη από Plexiglas (παράγραφος 3.7.2) και στη συνέχεια στον ανιχνευτή XtRa για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ^7Be με τυχαία αβεβαιότητα επιφάνειας φωτοκορυφής η οποία να μην ξεπερνά το 10% (1σ). Το γεγονός ότι τα θυγατρικά του ραδονίου έχουν διασπασθεί πλήρως συμβάλλει στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος του φάσματος και τη βελτίωση του κατωτέρου ορίου ανίχνευσης στην ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης του ^7Be , επιτρέποντας την αποδοτικότερη ανίχνευσή του.

Κατά τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις φίλτρων αέρα με τη νέα γεωμετρία παρατηρήθηκε ότι για την επίτευξη στατιστικής της τάξης του 10% απαιτείται αισθητά μικρότερος χρόνος ανάλυσης (6-8 ώρες) σε σχέση με ό,τι προβλέπει το υπάρχον πρωτόκολλο (12-18 ώρες) για συγκέντρωση του ^7Be περί τα 10mBq/m^3 . Βέβαια, ο απαιτούμενος χρόνος ανάλυσης εξαρτάται από τη συγκέντρωση του ^7Be στο εξεταζόμενο φίλτρο.

4.3 Σύγκριση της υπολογιζόμενης συγκέντρωσης ^7Be με τις δύο γεωμετρίες

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν καταδείχθηκαν οι διαφορές των μεθόδων - πειραματικής και μέσω προσομοίωσης - υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής, για την περίπτωση της ανάλυσης φίλτρων αέρα. Στις παραγράφους που ακολουθούν ελέγχεται η επίδραση των διαφορών αυτών στους τελικούς υπολογισμούς της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα. Για το σκοπό αυτό μελετάται η απόκλιση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^7Be μεταξύ των αναλύσεων που έγιναν με τις δύο γεωμετρίες.

Για την πραγματοποίηση της σύγκρισης διενεργήθηκε σειρά δειγματοληψιών και αναλύσεων φίλτρων αέρα. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. λήφθηκαν δείγματα (φίλτρα αέρα) τα οποία στη συνέχεια αναλύθηκαν και με τις δύο γεωμετρίες ('γεωμετρία 12' και νέα γεωμετρία) και υπολογίστηκε η συγκέντρωση του ^7Be σε αυτά. Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων έγινε χρήση της σχέσης (2.2) η οποία τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε η τελική συγκέντρωση του ^7Be να εκφράζεται σε Bq/m^3 .

$$\text{activity}[\text{Bq/m}^3] = \frac{\text{area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{eff} \cdot \text{volume}} \quad \text{σχέση (4.1)}$$

όπου

area : η επιφάνεια της σχηματιζόμενης στο εκάστοτε φάσμα φωτοκορυφής που αντιστοιχεί σε ενέργεια φωτονίων ίση με 477.59keV,

time : η διάρκεια γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης του φίλτρου,

yield : το ποσοστό εκπομπής του ^7Be για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV,

volume: ο όγκος του αέρα που έχει διέλθει μέσα από το εκάστοτε φίλτρο και

eff : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τα φωτόνια του ^7Be .

Καθώς κάθε φίλτρο αναλύθηκε περισσότερες από μία φορές στον ίδιο ανιχνευτή χρειάστηκε να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις λόγω της ραδιενεργού διάσπασης του ^7Be .

Τα μεγέθη επιφάνεια (area) και χρόνος (time) λαμβάνονται, όπως σε κάθε περίπτωση πειραματικού υπολογισμού συγκέντρωσης ισοτόπου σε δείγμα, από το εκάστοτε φάσμα. Το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV του ^7Be βρέθηκε στις βιβλιοθήκες ισοτόπων ίσο με 0.1042 [Radiation Decay v.3.6], 0.1044 [M.-M. Βέ, et. al., 2004] και 0.1044 [JEFF 3.1.1]. Στη βιβλιοθήκη ισοτόπων που χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL για τα συγκεκριμένα φωτόνια βρέθηκε η τιμή 0.1034. Όπως έγινε και κατά τον επαναπροσδιορισμό των αβεβαιοτήτων της γεωμετρίας 12 στο κεφάλαιο 2, για το ποσοστό εκπομπής του ^7Be χρησιμοποιείται η τιμή του SPUNAL και εισάγεται επιπλέον αβεβαιότητα λόγω των διαφορετικών τιμών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Έτσι, για το ποσοστό εκπομπής του ^7Be για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV χρησιμοποιήθηκε η τιμή $0.1034 \pm 0.46\%$.

Η συγκέντρωση του ισοτόπου στα φίλτρα υπολογίστηκε με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Η διαφορά της μεθόδου υπολογισμού έγκειται στο γεγονός ότι τα φίλτρα αναλύθηκαν σε δύο διαφορετικές γεωμετρίες ανάλυσης και στις διαφορετικές τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής που χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά. Οι τρεις υπολογισμοί που έγιναν περιγράφονται ακολούθως:

- Ο πρώτος υπολογισμός λαμβάνει ως δεδομένα τις κρούσεις ανά μονάδα χρόνου (cps) από τα φάσματα φίλτρων γεωμετρίας 12 και την απόδοση που προκύπτει από την ισχύουσα καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και ενέργεια. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μέχρι τώρα για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των ισοτόπων που υπάρχουν στα φίλτρα αέρα που συλλέγονται. Η χρησιμοποιούμενη απόδοση στην περίπτωση αυτή είναι $0.0477 \pm 1.118\%$ (1σ), όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 (παράγραφο 3.9).

- Ο δεύτερος υπολογισμός λαμβάνει ως δεδομένα το ρυθμό καταγραφόμενων γεγονότων από τα φάσματα των φίλτρων της νέας γεωμετρίας και ως απόδοση φωτοκορυφής την τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση για τη νέα γεωμετρία. Η τιμή αυτή της απόδοσης είναι $0.07531 \pm 0.057\%$ (1σ), όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 (παράγραφο 3.7.2).

- Ο τρίτος τρόπος υπολογισμού της συγκέντρωσης του ^7Be στο φίλτρο λαμβάνει ως δεδομένα τις ίδιες κρούσεις ανά μονάδα χρόνου με τον πρώτο (για τη γεωμετρία 12), αλλά ως απόδοση φωτοκορυφής χρησιμοποιείται η τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση για τη γεωμετρία 12 για ενέργεια φωτονίων ίση με 477.59keV. Η τιμή αυτή της απόδοσης είναι $0.05427 \pm 0.078\%$ (1σ), όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 (παράγραφος 3.6.3).

Με σκοπό την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε για τη σύγκριση των δύο γεωμετριών φίλτρων αέρα έγιναν δειγματοληψίες και αναλύσεις φίλτρων, όπως περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

4.3.1 Δειγματοληψίες φίλτρων με σκοπό τη σύγκριση της συγκέντρωσης του ^7Be στις δύο γεωμετρίες

Τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν ως πειραματικά δεδομένα για τη σύγκριση των δύο γεωμετριών είναι φίλτρα τα οποία μετά τη δειγματοληψία, αρχικά διπλώθηκαν και αναλύθηκαν σε γεωμετρία 12 και στη συνέχεια διπλώθηκαν στη νέα γεωμετρία και αναλύθηκαν ξανά. Στον παρακάτω πίνακα 4.1 δίνονται τα στοιχεία των δειγματοληψιών. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται η ονομασία του φίλτρου. Στη δεύτερη στήλη καταγράφεται η ημερομηνία της δειγματοληψίας, ενώ στις επόμενες δύο καταγράφεται η ώρα έναρξης και η διάρκεια της δειγματοληψίας. Στην πέμπτη στήλη δίνεται ο συνολικός όγκος αέρα που πέρασε από το εκάστοτε φίλτρο, ενώ στις επόμενες τρεις στήλες παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σχετικής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα κατά της διάρκεια της δειγματοληψίας. Τα δεδομένα για τη θερμοκρασία και την πίεση παρέχονται από την ίδια την αντλία, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο περιγραφής της αντλίας στο κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.3). Όσον αφορά τη σχετική υγρασία, λαμβάνεται από το διαδικτυακό τόπο www.meteo.ntua.gr.

Φίλτρο	Ημερομηνία	Ώρα έναρξης	Διάρκεια (min)	Όγκος αέρα (m ³)	Θερμοκρασία αέρα (°C)	Πίεση αέρα (mmHg)	Σχετική υγρασία (%)
A0316	09/10/2008	08:40	241	327.56	18.7 ÷ 24.9	732.4 ÷ 736.9	53.5 ÷ 41.2
A0317	16/10/2008	08:25	343	467.03	15.2 ÷ 24.9	731.4 ÷ 736.2	65.4 ÷ 50.2
A0318	20/10/2008	08:50	240	328.24	17.2 ÷ 26.1	732.8 ÷ 737.5	71.0 ÷ 52.1
A0319	03/11/2008	08:20	240	324.74	19.2 ÷ 27.3	730.8 ÷ 735.3	57.0 ÷ 41.4
A0320	10/11/2008	09:00	242	339.78	14.8 ÷ 18.1	735.7 ÷ 740.5	74.6 ÷ 99.4
A0321	18/11/2008	08:40	240	336.28	13.4 ÷ 17.5	726.5 ÷ 731.3	84.0 ÷ 56.9
A0353	26/05/2009	10:42	182	254.19	26.4 ÷ 30.4	727.1 ÷ 739.1	37.1 ÷ 30.0
A0354	17/06/2009	10:42	240	312.22	32.5 ÷ 37.4	728.4 ÷ 732.2	25.6 ÷ 22.9
A0355	22/06/2009	09:52	244	327.56	27.9 ÷ 32.8	722.3 ÷ 726.5	---- ²

Πίνακας 4.1: Στοιχεία δειγματοληψίας φίλτρων που αναλύθηκαν και στις δύο γεωμετρίες φίλτρου αέρα

Σημειώνεται ότι στο ΕΠΤ-ΕΜΠ γίνονται συστηματικές δειγματοληψίες αέρα τα τελευταία δύο χρόνια. Ωστόσο, στον πίνακα 4.1 αναφέρονται μόνον εκείνες οι δειγματοληψίες για τις οποίες πραγματοποιήθηκε διπλή ανάλυση του φίλτρου (στη ‘γεωμετρία 12’ και στη νέα γεωμετρία).

4.3.2 Αναλύσεις φίλτρων με σκοπό τη σύγκριση της συγκέντρωσης του ⁷Be στις δύο γεωμετρίες

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ η ονομασία των φασμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση φίλτρων αέρα ακολουθεί συγκεκριμένο αλγόριθμο. Τα φάσματα ονομάζονται Axxxxn, όπου το A σηματοδοτεί τα φίλτρα αέρα, xxxx είναι ο αύξων αριθμός του φίλτρου και n ο αύξων αριθμός του φάσματος του υπόψη φίλτρου. Ως παράδειγμα αναφέρεται το φάσμα A0320a. Πρόκειται για το φάσμα της πρώτης ανάλυσης του τριακοσιοστού εικοστού φίλτρου αέρα που λήφθηκε από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Συνήθως, η πρώτη ανάλυση κάθε φίλτρου αναφέρεται στη δίωρη μέτρηση προσδιορισμού της συγκέντρωσης των θυγατρικών ισοτόπου του ²²²Rn, ενώ οι υπόλοιπες αναλύσεις - εφόσον υπάρχουν - στις αναλύσεις προσδιορισμού της συγκέντρωσης του ⁷Be. Στην παρούσα Δ.Ε. τα φάσματα που φέρουν το χαρακτήρα b στο τέλος του ονόματός τους έχουν αναλυθεί σε γεωμετρία 12, ενώ τα φάσματα που έχουν ληφθεί από την ανάλυση του φίλτρου στη νέα γεωμετρία αναφέρονται με το χαρακτήρα c.

² Για την περίπτωση του φίλτρου A0355 πρέπει να ειπωθεί ότι η εγκατάσταση μέτρησης της υγρασίας στο ΕΜΠ (www.meteo.ntua.gr) είχε τεθεί εκτός λειτουργίας, λόγω προβλήματος, κατά το χρονικό διάστημα 18 ÷ 24/06/2009, επομένως δεν υπήρχε τιμή για τη σχετική υγρασία κατά την ημερομηνία δειγματοληψίας αέρα με το συγκεκριμένο φίλτρο.

Από την ανάλυση των φίλτρων του πίνακα 4.1 προκύπτουν τα φάσματα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.2. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε γεωμετρία, δίνεται η ημερομηνία ανάλυσης του φίλτρου και ο κωδικός SPUNAL του φάσματος.

	Φάσματα γεωμετρίας 12 (τύπου Axxxxb)		Φάσματα νέας γεωμετρίας (τύπου Axxxxc)	
<i>Φίλτρο</i>	<i>Ημερομηνία ανάλυσης</i>	<i>Φάσμα</i>	<i>Ημερομηνία ανάλυσης</i>	<i>Φάσμα</i>
A0316	09/10/2008	14/6.17	12/10/2008	14/6.18
A0317	16/10/2008	14/6.20	17/12/2008	14/6.21
A0318	20/12/2008	14/6.23	22/12/2008	14/6.24
A0319	03/11/2008	14/6.26	05/11/2008	14/6.27
A0320	10/11/2008	14/6.31	11/11/2008	14/6.32
A0321	18/11/2008	14/6.34	21/11/2008	14/6.35
A0353	26/05/2009	14/6.152	27/05/2009	14/6.153
A0354	17/06/2009	14/6.157	18/06/2009	14/6.158
A0355	22/06/2009	14/6.161	23/06/2009	14/6.162

Πίνακας 4.2: Ληφθέντα φάσματα από την ανάλυση των χρησιμοποιούμενων στη σύγκριση φίλτρων αέρα

Από τα φάσματα που φαίνονται στον πίνακα 4.2 λαμβάνονται τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ^7Be στο κάθε φίλτρο, με βάση τη σχέση (4.1). Στον παρακάτω πίνακα 4.3 φαίνονται τα δεδομένα αυτά. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται, για κάθε φίλτρο, ο χρόνος ανάλυσης και η επιφάνεια, σε όρους cps, της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής που αντιστοιχεί σε ενέργεια 477.59keV, συνοδευόμενη από την αβεβαιότητά της (1σ).

	Φάσματα γεωμετρίας 12 (τύπου Axxxxb)			Φάσματα νέας γεωμετρίας (τύπου Axxxxc)		
<i>Φίλτρο</i>	<i>time (sec)</i>	<i>cps</i>	<i>Αβεβαιότητα (%, 1σ)</i>	<i>time (sec)</i>	<i>cps</i>	<i>Αβεβαιότητα (%, 1σ)</i>
A0316	247947	0.0080	6.97	87365	0.0109	8.36
A0317	55075	0.017	8.71	28396	0.025	7.70
A0318	144172	0.0097	7.94	67505	0.014	7.94
A0319	141913	0.0141	5.82	167929	0.0189	3.76
A0320	68727	0.016	7.52	75549	0.022	5.03
A0321	226791	0.0020	28.4	264853	0.0028	18.4
A0353	64229	0.016	7.52	61517	0.020	5.94
A0354	52429	0.019	7.33	20171	0.029	7.33
A0355	58562	0.0080	6.97	20223	0.0109	8.36

Πίνακας 4.3: Cps των φασμάτων για τα χρησιμοποιούμενα στη σύγκριση φίλτρα αέρα

Από τα δεδομένα του πίνακα 4.3 επαληθεύεται η αρχική υπόθεση ότι η νέα γεωμετρία, παρέχοντας υψηλότερη απόδοση φωτοκορυφής για τα φωτόνια του ^7Be , οδηγεί σε αποτελέσματα καλύτερης στατιστικής. Για παράδειγμα, για την περίπτωση του φίλτρου A0318 παρατηρείται ότι, ενώ η αβεβαιότητα της επιφάνειας της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής είναι ίδια (7.94%) και για τις δύο αναλύσεις, ο χρόνος ανάλυσης του φίλτρου σε γεωμετρία 12 είναι υπερδιπλάσιος από τον αντίστοιχο σε νέα γεωμετρία (144172sec έναντι 67505sec). Το ίδιο παρατηρείται και για το φίλτρο A0354, όπου η αβεβαιότητα των cps παραμένει ίδια (7.33%) και ο χρόνος ανάλυσης του φίλτρου νέας γεωμετρίας είναι υποπολλαπλάσιος του αντίστοιχου για ‘γεωμετρία 12’ (20171sec έναντι 52429sec). Παράλληλα, παρατηρείται ότι για φίλτρα με συγκρίσιμους χρόνους ανάλυσης στις δύο γεωμετρίες, η αβεβαιότητα των cps για την περίπτωση της νέας γεωμετρίας είναι μικρότερη από την αντίστοιχη για γεωμετρία 12. Τέτοιο φίλτρο είναι το A0353, για το οποίο, παρόλο που οι χρόνοι ανάλυσης στις δύο γεωμετρίες είναι συγκρίσιμοι (61517sec έναντι 64229sec), η αβεβαιότητα της επιφάνειας της εξεταζόμενης φωτοκορυφής είναι σαφώς μικρότερη για την περίπτωση ανάλυσης με χρήση της νέας γεωμετρίας (7.52% έναντι 5.94%).

Τονίζεται άλλη μια φορά ότι η διαπίστωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση της μεταβολής της συγκέντρωσης του ^7Be σε μικρή κλίμακα χρόνου και την εξαγωγή εκμεταλλεύσιμων αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η μεταβολή αυτή δεν είναι έντονη.

4.3.3 Αποτελέσματα σύγκρισης της συγκέντρωσης του ^7Be στις δύο γεωμετρίες

Μετά από τις αναλύσεις των φίλτρων μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις του ^7Be , σύμφωνα με τις τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού που περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.3. Από τους υπολογισμούς αυτούς προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.4. Στον πίνακα αυτό για κάθε φίλτρο δίνεται η τιμή της συγκέντρωσης του ισοτόπου:

- για τη γεωμετρία 12, με βάση την ισχύουσα πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης στον ανιχνευτή XtRa ($R_{\text{exp.12}}$),
- για τη νέα γεωμετρία με τη βαθμονόμηση μέσω προσομοίωσης ($R_{\text{simul.new}}$) και
- για τη γεωμετρία 12 με βάση τη βαθμονόμηση μέσω προσομοίωσης ($R_{\text{simul.12}}$).

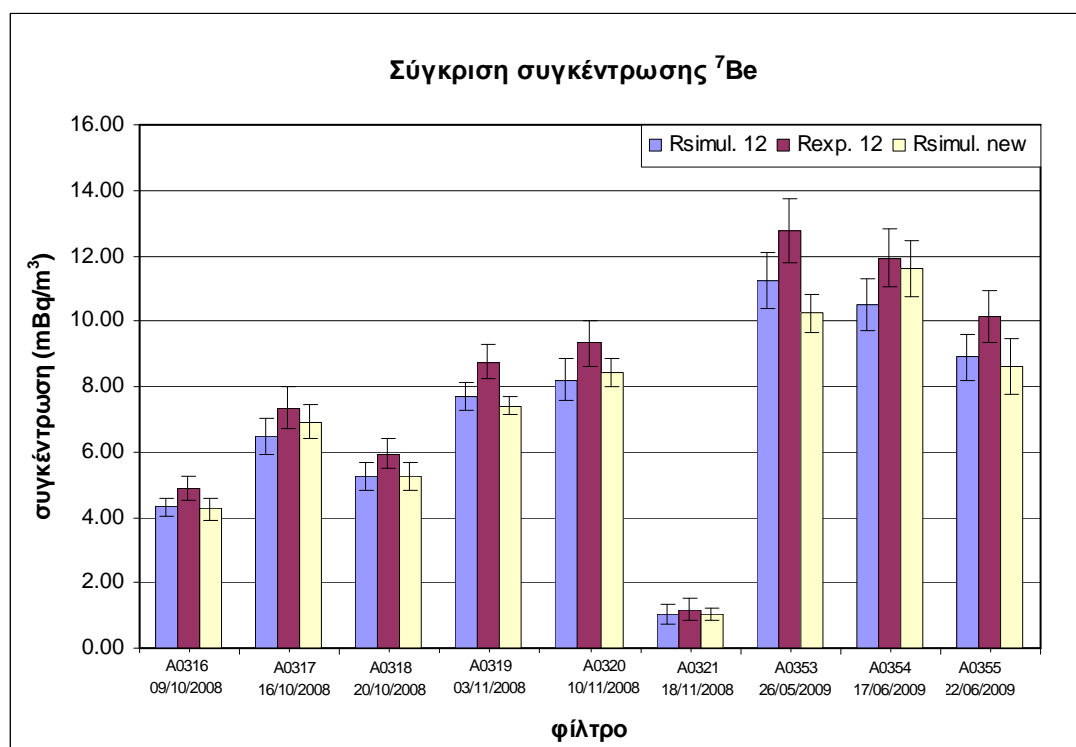
Όλες οι τιμές της συγκέντρωσης είναι εκφρασμένες σε mBq/m^3 και συνοδεύονται από τις σχετικές αβεβαιότητες τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων έχουν ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα της επιφάνειας της

σηματιζόμενης φωτοκορυφής, της απόδοσης φωτοκορυφής και η αβεβαιότητα λόγω του ποσοστού εκπομπής. Επισημαίνεται ότι οι τιμές του πίνακα 4.4 δεν παρουσιάζονται με το σωστό πλήθος σημαντικών ψηφίων καθώς σκοπός είναι η μεταξύ τους σύγκριση και όχι οι τιμές καθαυτές.

Φίλτρο	$R_{exp.12}$ [mBq/m ³]	Unc. $R_{exp.12}$ (%, 1σ)	$R_{simul.new}$ [mBq/m ³]	Unc. $R_{simul.new}$ (%, 1σ)	$R_{simul.12}$ [mBq/m ³]	Unc. $R_{simul.12}$ (%, 1σ)
A0316	4.93	7.07	4.29	8.38	4.34	6.99
A0317	7.40	8.79	6.99	7.71	6.51	8.72
A0318	6.00	8.03	5.32	7.95	5.28	7.95
A0319	8.82	5.94	7.48	3.79	7.76	5.84
A0320	9.40	7.61	8.50	5.05	8.27	7.53
A0321	1.18	28.4	1.05	18.4	1.04	28.4
A0353	12.9	7.61	10.3	5.96	11.3	7.53
A0354	12.0	7.43	11.7	7.35	10.6	7.35
A0355	10.2	7.85	8.66	9.95	8.97	7.77

Πίνακας 4.4: Σύγκριση συγκέντρωσης ⁷Be σε φίλτρα γεωμετρίας 12 και νέας

Οι τιμές της συγκέντρωσης του ⁷Be του πίνακα 4.4 με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες φαίνονται και στο διάγραμμα 4.1:



Διάγραμμα 4.1: Συγκέντρωση ⁷Be σε φίλτρα αέρα υπολογισμένη με τρεις τρόπους

Από την παρατήρηση των τιμών του πίνακα 4.4 και του διαγράμματος 4.1, διαπιστώνεται κύμανση της συγκέντρωσης του ^7Be , στοιχείο το οποίο είναι αναμενόμενο, δεδομένης της μεγάλης χρονικής περιόδου που καλύπτουν μετρήσεις. Η ελάχιστη τιμή της συγκέντρωσης μετρήθηκε στο φίλτρο A0321 για το οποίο συλλέχθηκε σε ημέρα που υπήρχε βροχόπτωση, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα να είναι μειωμένη (μηχανισμός υγρής απόθεσης washout). Αντίθετα, οι μέγιστες συγκεντρώσεις σημειώνονται σε περιόδους μετεωρολογικά σταθερές (χωρίς βροχοπτώσεις) όπως είναι οι καλοκαιρινοί μήνες. Τα συμπεράσματα αυτά, είναι σε συμφωνία και με τα συμπεράσματα παλαιότερης εργασίας η οποία εκπονήθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009].

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.4 και του διαγράμματος 4.1 οι τιμές της συγκέντρωσης του ^7Be όταν χρησιμοποιείται η ισχύουσα 'γεωμετρία 12' και η ισχύουσα πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης είναι αρκετά υψηλότερες των τιμών που εκτιμώνται με χρήση της νέας γεωμετρίας ανάλυσης και βαθμονόμησης. Αντίθετα, δεν φαίνεται να υπάρχει συστηματική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με χρήση αποδόσεων οι οποίες έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις. Η σύγκριση των τιμών των αποδόσεων όπως προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν πραγματοποιείται ακολούθως μέσω της χρήσης κατάλληλων στατιστικών δεικτών, οι οποίοι εξάλλου θα οδηγήσουν στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Η σύγκριση των τιμών των συγκεντρώσεων του ^7Be του πίνακα 4.4 και του διαγράμματος 4.1 γίνεται με δύο τρόπους και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 4.5. Χρησιμοποιούνται οι λόγοι των συγκρινόμενων συγκεντρώσεων, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται και ο στατιστικός έλεγχος U-test, προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι συγκρινόμενες τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Αναφέρεται ότι σε κάθε περίπτωση η σύγκριση γίνεται ως προς τη συγκέντρωση που υπολογίζεται με χρήση της νέας γεωμετρίας. Για κάθε φίλτρο που λήφθηκε (πρώτη στήλη του πίνακα 4.5) παρέχονται οι λόγοι των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων που προκύπτουν για τη γεωμετρία 12 προς τις συγκεντρώσεις που προκύπτουν με τη νέα γεωμετρία (δεύτερη και τέταρτη στήλη). Η τρίτη και πέμπτη στήλη του πίνακα περιέχουν τις τιμές της μεταβλητής ελέγχου U, για την πραγματοποίηση του στατιστικού ελέγχου U-test.

Με το στατιστικό έλεγχο U-test, ελέγχεται το κατά πόσο δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, όταν είναι γνωστές οι τιμές τους και οι αβεβαιότητές που τις συνοδεύουν. Ο στατιστικός έλεγχος στηρίζεται στη σύγκριση της μεταβλητής ελέγχου

U με δεδομένη τιμή η οποία προκύπτει από την υπόθεση ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή ($\mu=0$, $\sigma=1$) και το επίπεδο εμπιστοσύνης που επιλέγεται, 95% για την παρούσα ΔΕ.

Η τιμή της παραμέτρου U παρέχεται από τη σχέση (4.2):

$$U = \frac{|R_1 - R_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad \text{σχέση (4.2)}$$

όπου:

- R_1 : η συγκέντρωση του ^7Be που υπολογίζεται με βάση την απόδοση φωτοκορυφής από την προσομοίωση της νέας γεωμετρίας,
- R_2 : η συγκέντρωση που υπολογίζεται με χρήση της γεωμετρίας 12 (με βάση την πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης της γεωμετρίας 12 ή την αντίστοιχη προσομοίωση),
- σ_1 : είναι η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης με βάση την προσομοίωση της νέας γεωμετρίας και
- σ_2 : είναι η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης με χρήση της γεωμετρίας 12 (κατ' αντιστοιχία με τη συγκέντρωση).

Προκειμένου οι συγκρινόμενες τιμές να μη διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, θα πρέπει η τιμή της μεταβλητής U να είναι μικρότερη από την τιμή 1.96 (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Παράλληλα, προκειμένου οι δύο τιμές να διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, θα πρέπει η τιμή της μεταβλητής U να είναι μεγαλύτερη από 2.576 (επίπεδο εμπιστοσύνης 99%).

	<i>Σύγκριση συγκεντρώσεων με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ($R_{simul.12}$, R_{new})</i>		<i>Σύγκριση συγκεντρώσεων με βάση την υπάρχουσα πειραματική βαθμονόμηση και τη νέα ($R_{exp.12}$, R_{new})</i>	
<i>Φίλτρο</i>	<i>Λόγος $R_{simul.12}/R_{new}$</i>	<i>Παράμετρος U</i>	<i>Λόγος $R_{exp.12}/R_{new}$</i>	<i>Παράμετρος U</i>
A0316	1.013	0.116	1.151	1.295
A0317	0.931	0.612	1.059	0.488
A0318	0.992	0.075	1.127	1.057
A0319	1.037	0.520	1.179	2.249
A0320	0.973	0.301	1.106	1.084
A0321	0.986	0.043	1.121	0.327
A0353	1.096	0.947	1.247	2.201
A0354	0.902	0.986	1.026	0.246
A0355	1.036	0.281	1.178	1.309

Πίνακας 4.5: Λόγοι υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ^7Be και τιμές παραμέτρου U

Από τις τιμές των λόγων του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι, γενικά, οι συγκεντρώσεις που υπολογίζονται με βάση τις δύο προσομοιώσεις (γεωμετρία 12 και νέα γεωμετρία) σε κάθε περίπτωση δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Η σύγκριση των συγκεντρώσεων που υπολογίζονται με βάση την ισχύουσα βαθμονόμησης γεωμετρίας 12 και τη νέα γεωμετρία δείχνει ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις (υψηλότερες τιμές για το U) αν και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να τεκμηριωθεί η στατιστικά σημαντική διαφορά ($U > 2.576$). Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δείγματος A0353. Για το δείγμα αυτό, η σύγκριση των τιμών των συγκεντρώσεων όπως προκύπτουν από την ισχύουσα γεωμετρία και τη νέα γεωμετρία εμφανίζουν απόκλιση της τάξης του 24%, ωστόσο, ο στατιστικός έλεγχος αποδεικνύει ότι οι δύο συγκεντρώσεις δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι διαφέρουν στατιστικά σημαντικά ($U = 2.201 < 2.576$). Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να προκύψει συμπέρασμα.

Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι οι συγκεντρώσεις που υπολογίζονται με βάση την ισχύουσα πειραματική απόδοση για τη γεωμετρία 12 είναι πάντα υψηλότερες σε σχέση με τις άλλες δύο τιμές. Σε σχέση με τη συγκέντρωση που υπολογίζεται με βάση την προσομοίωση της γεωμετρίας 12 παρατηρούνται αποκλίσεις της τάξης του 13%, ενώ αποκλίσεις που κυμαίνονται από 6% έως 25% παρατηρούνται σε σχέση με τις συγκεντρώσεις με βάση τη νέα γεωμετρία. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί ένδειξη ότι η πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa για τη 'γεωμετρία 12', συγκριτικά με τις τιμές της απόδοσης από τις άλλες μεθόδους, υποεκτιμά την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για την ενέργεια των φωτονίων του ^7Be . Η διαφορά αυτή αποδίδεται στη χρήση των φωτονίων του ^{60}Co (1173.3keV και 1332.5keV) κατά την εύρεση της πειραματικής καμπύλης. Όπως εξηγήθηκε και στο κεφάλαιο 2, τα φωτόνια αυτά συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης που οδηγεί στο σχηματισμό μικρότερων φωτοκορυφών (summing out effect). Έτσι, η πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για τη 'γεωμετρία 12' έχει μεγαλύτερη κλίση και οδηγεί σε συστηματικά μικρότερες τιμές απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή. Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι, οι ελαφρώς υψηλές τιμές της συγκέντρωσης του ^7Be στον αέρα, σε σχέση με τις τιμές της βιβλιογραφίας, οι οποίες είχαν διαπιστωθεί τόσο στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., όσο και στα πλαίσια παλαιότερων Δ.Ε. [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009], είχαν προβληματίσει και ήταν ένας από τους λόγους που οδήγησαν στην προσπάθεια νέας βαθμονόμησης για την ανάλυση των φίλτρων αέρα. Ως παράδειγμα δίνεται η τιμή

12.9mBq/m³ για το φίλτρο A0353, η οποία είναι υψηλή, συγκρινόμενη με την τιμή ~11mBq/m³ που είναι η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης του ⁷Be η οποία ευρέθη σε εκτενέστατη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στα πλαίσια της [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009].

Εν κατακλείδι, η μέθοδος που χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ⁷Be σε φίλτρα αέρα 'γεωμετρίας 12' οδηγεί σε συστηματικά σφάλματα και υπερεκτιμημένες τιμές ενεργότητας του ισότοπου ⁷Be, αλλά και αυξημένα τυχαία σφάλματα, που φαίνεται ότι βελτιώνονται με τη νέα γεωμετρία.

4.4 Εφαρμογή της νέας γεωμετρίας σε κύκλο φίλτρων αέρα

Μετά από τη μελέτη και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται με τη νέα γεωμετρία φίλτρων αέρα, έγινε χρήση της σε ημερήσιο κύκλο δειγματοληψιών φίλτρων αέρα που πραγματοποιήθηκε την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε. και συγκεκριμένα στις 2 Ιουλίου 2009. Με τον όρο 'ημερήσιος κύκλος φίλτρων' εννοείται η διαδικασία διαδοχικής δειγματοληψίας φίλτρων αέρα, κάθε 4 ώρες, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στη μελέτη της ημερήσιας κύμανσης του ⁷Be στον ατμοσφαιρικό αέρα. Με τη νέα αυξημένη απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 477.59keV δίνεται η δυνατότητα αποδοτικότερης ανίχνευσης της ημερήσιας κύμανσης της συγκέντρωσης του ⁷Be. Κύκλοι φίλτρων πραγματοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε τακτά χρονικά διαστήματα τα τελευταία δύο χρόνια.

Στον ημερήσιο κύκλο φίλτρων που πραγματοποιήθηκε στις 2 Ιουλίου 2009 ακολουθήθηκε η νέα προτεινόμενη διαδικασία λήψης φίλτρων αέρα και γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης (παράγραφος 4.2). Η συνολική διάρκεια της δειγματοληψίας ήταν 28 ώρες και πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα 02/07/2009 08:10 έως 03/07/2009 12:31. Ο καιρός καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος αυτού ήταν αίθριος.

Λήφθηκαν 7 διαδοχικά φίλτρα τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.6. Στον πίνακα αυτόν φαίνονται επίσης η ημερομηνία λήψης του φίλτρου καθώς και η ώρα έναρξης και διάρκεια δειγματοληψίας με το εκάστοτε φίλτρο. Κάθε δειγματοληψία είχε διάρκεια 4 ώρες, όπως ορίζεται από το αντίστοιχο πρωτόκολλο. Παράλληλα, παρουσιάζονται και οι τιμές της θερμοκρασίας, πίεσης και σχετικής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Στον πίνακα

4.6 δίνονται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή για τα χαρακτηριστικά αυτά του αέρα. Οι τιμές για τη θερμοκρασία και την πίεση λαμβάνονται από τις ενδείξεις της αντλίας, ενώ η σχετική υγρασία από το διαδικτυακό τόπο www.meteo.ntua.gr.

Φίλτρο	Ημερομηνία	Ωρα έναρξης	Διάρκεια (min)	Όγκος αέρα (m ³)	Θερμοκρασία αέρα (°C)	Πίεση αέρα (mmHg)	Σχετική υγρασία (%)
A0357	02/07/2009	08:10	241	317.32	25.1 ÷ 31.4	726.9 ÷ 730.6	52.9 ÷ 67.5
A0358	02/07/2009	12:15	240	317.72	27.1 ÷ 32.3	727.0 ÷ 731.2	52.5 ÷ 55.8
A0359	02/07/2009	16:25	240	315.34	27.4 ÷ 31.8	725.1 ÷ 736.6	54.9 ÷ 67.9
A0360	02/07/2009	20:25	240	315.60	24.4 ÷ 27.9	724.3 ÷ 735.6	64.5 ÷ 69.7
A0361	03/07/2009	00:25	240	323.48	23.1 ÷ 24.9	725.0 ÷ 729.9	67.0 ÷ 76.1
A0362	03/07/2009	04:25	240	321.60	22.5 ÷ 29.2	723.8 ÷ 727.8	59.0 ÷ 76.4
A0363	03/07/2009	08:30	241	313.35	26.9 ÷ 32.3	722.8 ÷ 734.7	45.2 ÷ 60.2

Πίνακας 4.6: Φίλτρα που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του κύκλου φίλτρων στις 02/07/2009

Στο τέλος κάθε δειγματοληψίας το εκάστοτε φίλτρο απομακρύνεται από την αντλία αέρα και αντικαθίσταται από το επόμενο. Το χρησιμοποιημένο φίλτρο διπλώνεται σε γεωμετρία 12, τοποθετείται σε πλαστικό φάκελο και αναλύεται στον ανιχνευτή XtRa για 2 ώρες, με σκοπό τη μέτρηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών ισοτόπων του ²²²Rn κατά τη διάρκεια της ραδιενεργού απομείωσής τους, σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα (παράγραφος 4.2). Μετά το πέρας των 2 ωρών το φίλτρο απομακρύνεται από τον ανιχνευτή. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για κάθε ένα από τα φίλτρα του κύκλου (πίνακας 4.6).

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων του πίνακα 4.6 για προσδιορισμό του ⁷Be πραγματοποιείται μετά το πέρας των 28 ωρών του κύκλου. Τα φίλτρα διπλώνονται στη νέα γεωμετρία, τοποθετούνται στη θήκη από Plexiglas (παράγραφος 3.7.2) και αναλύονται διαδοχικά στον ανιχνευτή XtRa. Η συνθήκη περάτωσης της ανάλυσης αυτής είναι η μείωση της αβεβαιότητας του μεγέθους επιφάνεια (area) σε λιγότερο από 10% (1σ).

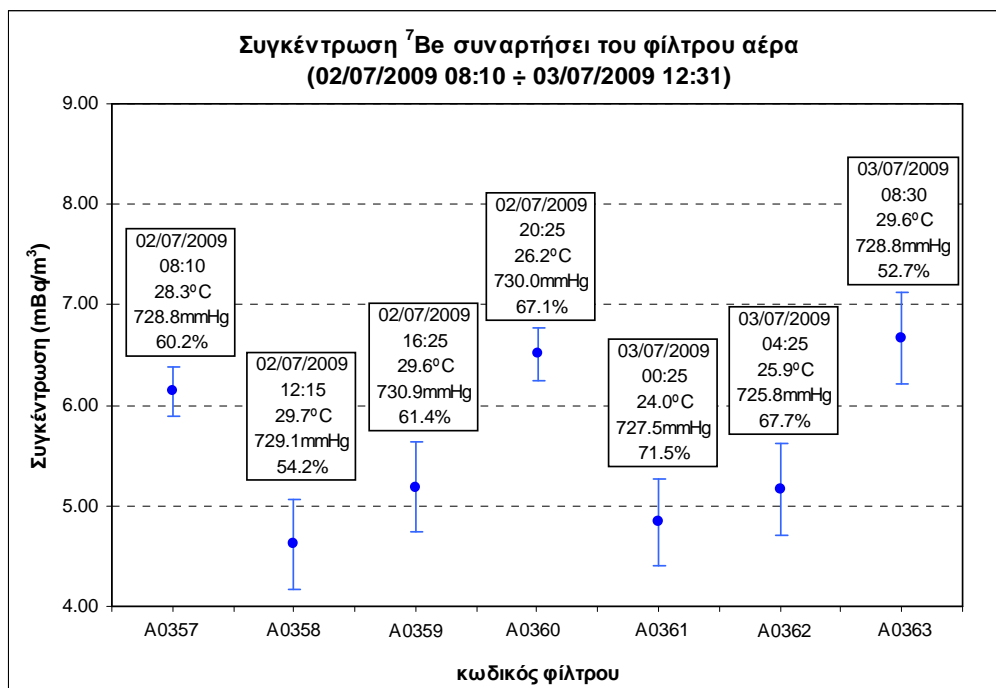
Από την ανάλυση των φίλτρων του πίνακα 4.6 προκύπτουν τα αντίστοιχα φάσματα σύμφωνα με τον αλγόριθμο ονοματολογίας που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.2. Η ονομασία των φασμάτων αυτών προκύπτει με την προσθήκη του γράμματος b στο τέλος του αριθμού του φίλτρου καθώς πρόκειται για το δεύτερο φάσμα που συλλέγεται για κάθε φίλτρο. Από τα φάσματα λαμβάνονται οι τιμές του ρυθμού καταγραφόμενων γεγονότων (cps) και υπολογίζεται η συγκέντρωση του ⁷Be σε

κάθε φίλτρο. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα δεδομένα της επιφάνειας, σε μονάδες cps, της σχηματιζόμενης στα 477.59keV φωτοκορυφής και η συγκέντρωση του ^7Be σε κάθε φίλτρο σύμφωνα με τη σχέση (4.1). Επιπλέον, δίνονται οι αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ που συνοδεύουν τα δεδομένα αυτά. Για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας της συγκέντρωσης συνυπολογίζονται η αβεβαιότητα της επιφάνειας (area), όπως προκύπτει από το εκάστοτε φάσμα, η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής για τον ανιχνευτή XiRa και τη νέα γεωμετρία (0.17%, 1σ) και η αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής (0.46%, 1σ). Κατά τον υπολογισμό της συγκέντρωσης έχουν γίνει και οι κατάλληλες διορθώσεις λόγω της απομείωσης (decay) του ^7Be κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, της ανάλυσης αλλά και του ενδιάμεσου χρόνου.

Φάσμα	Κωδικός SPUNAL φάσματος	cps φάσματος	Αβεβαιότητα (1σ,%)	Συγκέντρωση ^7Be [mBq/m ³]	Αβεβαιότητα (1σ,%)
A0357b	14/6.173	0.0147	3.94	6.14	3.97
A0358b	14/6.176	0.011	9.70	4.62	9.71
A0359b	14/6.177	0.012	8.67	5.19	8.68
A0360b	14/6.178	0.0141	3.94	6.51	3.97
A0361b	14/6.179	0.0106	8.85	4.84	8.86
A0362b	14/6.181	0.0111	8.73	5.16	8.74
A0363b	14/6.183	0.0138	6.79	6.67	6.81

Πίνακας 4.7: Cps και συγκέντρωση ^7Be στα φίλτρα που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου φίλτρων στις 02/07/2009

Στο παρακάτω διάγραμμα 4.2 φαίνονται οι συγκεντρώσεις του ^7Be του παραπάνω πίνακα 4.7, όπως υπολογίζονται για κάθε φίλτρο που λήφθηκε κατά τη διάρκεια του κύκλου. Για κάθε φίλτρο στο διάγραμμα δίνονται η ημερομηνία και ώρα έναρξης της δειγματοληψίας καθώς και οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών του ατμοσφαιρικού αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας (θερμοκρασία, πίεση και σχετική υγρασία).



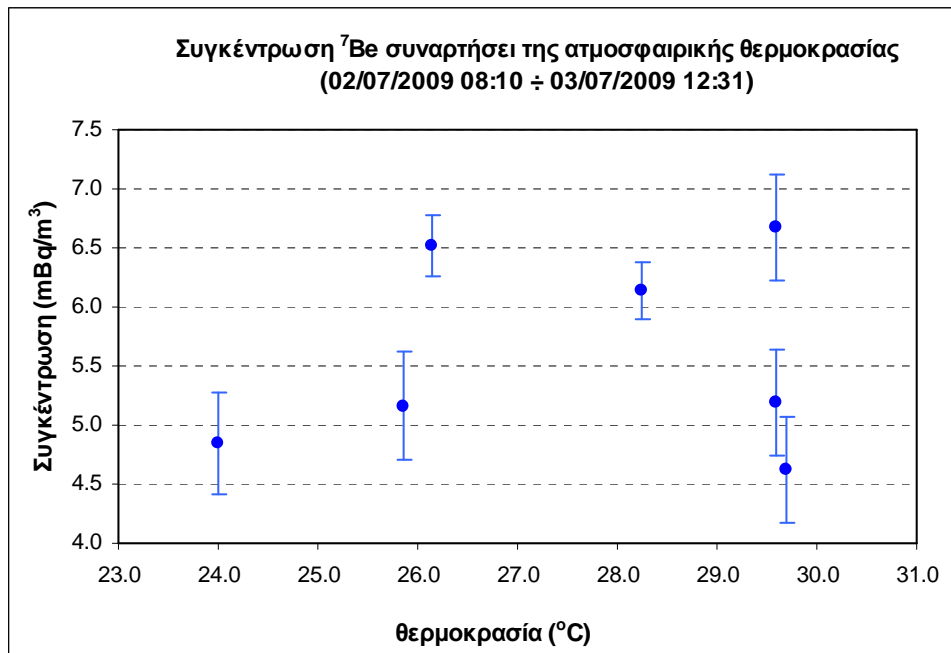
Διάγραμμα 4.2: Συγκέντρωση του ^7Be συναρτήσεσι του φίλτρου αέρα

Από τις παραπάνω τιμές της συγκέντρωσης του ^7Be είναι πολύ εύκολο να διαπιστωθεί με ένα U-test ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά τουλάχιστον μεταξύ των ακραίων τιμών $6.67 \pm 6.81\%(1\sigma)$ και $4.62 \pm 9.71\%(1\sigma)$ με $U = 3.2 > 2.576$, κάτι το οποίο σημαίνει ότι στην περίπτωση αυτή διαπιστώνεται κύμανση της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της ημέρας.

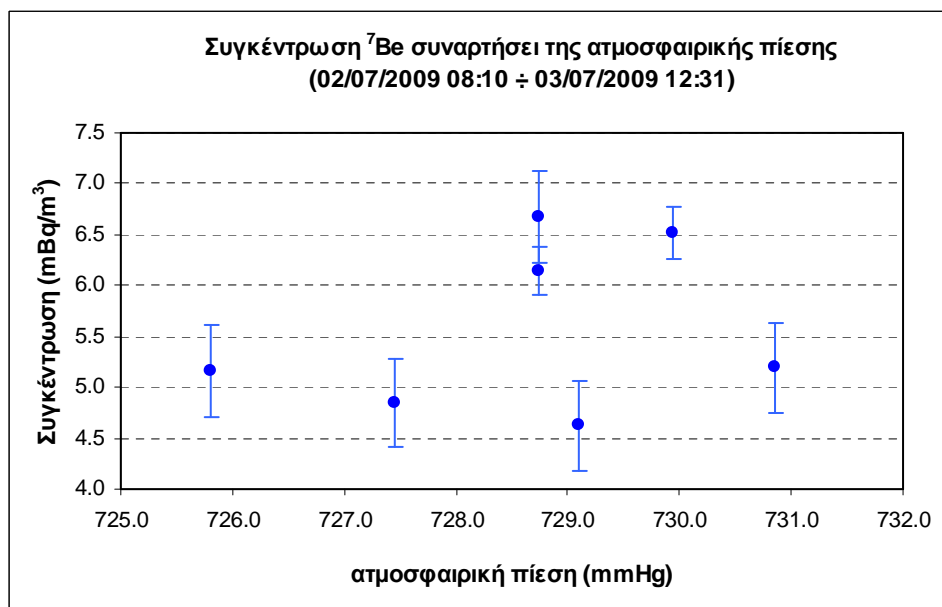
Σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από το διάγραμμα 4.2 είναι ότι, με την προτεινόμενη νέα γεωμετρία, υπάρχει πράγματι η δυνατότητα παρακολούθησης των ημερήσιων μεταβολών της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα δεδομένου ότι προέκυψαν στατιστικά διαφορετικές συγκεντρώσεις στα διαφορετικά δείγματα και μάλιστα με μειωμένους χρόνους φασματοσκοπικής ανάλυσης. Επιπλέον, η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ^7Be όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.2 παρουσιάζει ομοιότητες τόσο με αντίστοιχες δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν παλαιότερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [Δ.Ε. Παπανδρέου Σ., 2009] όσο και σε αντίστοιχες μετρήσεις που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία [Ioannidou A. et al, EAC 2008]. Το κοινό στοιχείο των εργασιών αυτών είναι ότι αναφέρονται σε μετρήσεις κατά τη διάρκεια μιας τυπικής καλοκαιρινής ημέρας.

Στα διαγράμματα 4.3 έως 4.5 που ακολουθούν δίνεται η συγκέντρωση του ισοτόπου, συναρτήσεσι της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σχετικής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα. Για την απεικόνιση της συγκέντρωσης συναρτήσεσι των

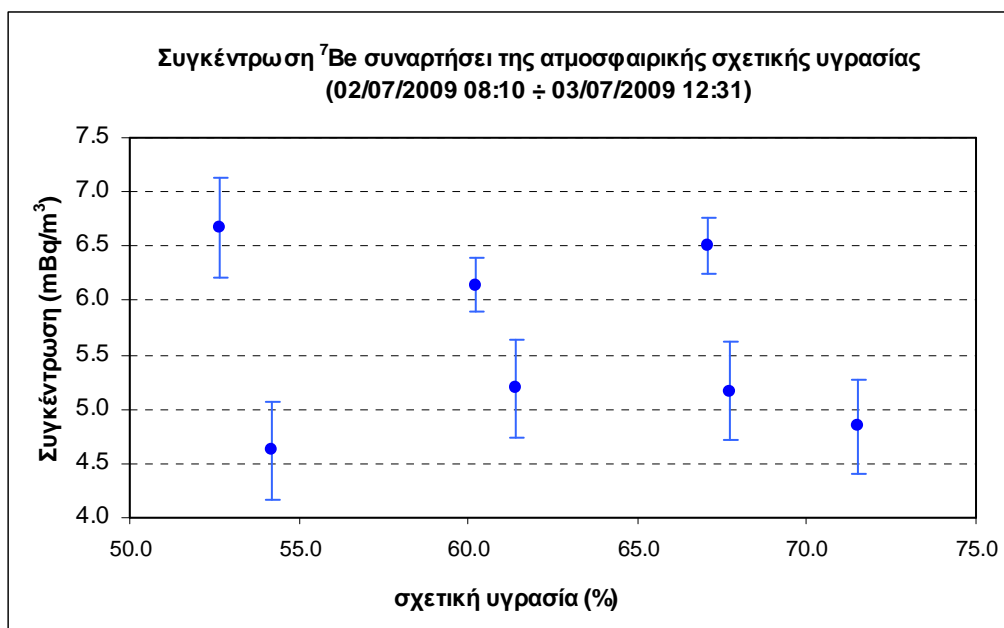
μετεωρολογικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές των τιμών του πίνακα 4.6.



Διάγραμμα 4.3: Συγκέντρωση του ^7Be συναρτήσει της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας



Διάγραμμα 4.4: Συγκέντρωση του ^7Be συναρτήσει της ατμοσφαιρικής πίεσης



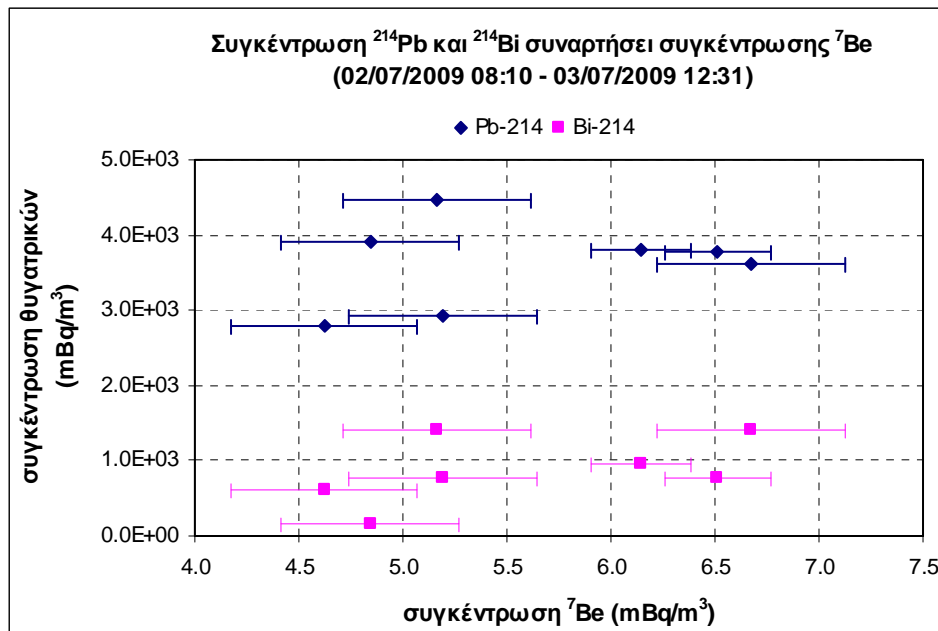
Διάγραμμα 4.5: Συγκέντρωση του ⁷Be συναρτήσει της ατμοσφαιρικής σχετικής υγρασίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα της συγκέντρωσης του ⁷Be συναρτήσει της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σχετικής υγρασίας, με χρήση κατάλληλου στατιστικού τεστ ($H_0: \rho=0$, $H_1: \rho \neq 0$) προκύπτει ότι δεν τεκμηριώνεται στατιστικά η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης του ισοτόπου και των χαρακτηριστικών του ατμοσφαιρικού αέρα, κάτι που άλλωστε φαίνεται και στα διαγράμματα. Συγκεκριμένα οι τιμές της παραμέτρου t ήταν:

- για τη συσχέτιση συγκέντρωσης ⁷Be με τη θερμοκρασία του αέρα: $t = 0.358$.
- για τη συσχέτιση συγκέντρωσης ⁷Be με την ατμοσφαιρική πίεση: $t = 0.608$.
- για τη συσχέτιση συγκέντρωσης ⁷Be με την υγρασία του αέρα: $t = 0.528$.

Η μη διαπίστωση της συσχέτισης θα μπορούσε ενδεχομένως να αποδοθεί στο μικρό πλήθος μετρήσεων σε συνδυασμό με τη στατιστική των μετρήσεων. Τα διαγράμματα αναφέρονται σε μία μόνο ημέρα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξαχθεί γενικευμένο συμπέρασμα για τον τρόπο που συνδέονται τα εξεταζόμενα μεγέθη. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται συσχετίσεις μεταξύ της συγκέντρωσης του ⁷Be και των μεγεθών που εξετάστηκαν παραπάνω [Meresova J., 2008], [Ioannidou A. et al., 2005], [Yu K.N & Lee L.Y.L., 2002]. Ωστόσο, ο τρόπος δειγματοληψίας και μέτρησης διαφέρει από τον χρησιμοποιούμενο στην παρούσα Δ.Ε. Πιο συγκεκριμένα, η συνήθης πρακτική που ακολουθείται στη βιβλιογραφία προβλέπει δειγματοληψίες πολλών ωρών ή και ημερών, ενώ οι συσχετίσεις που υπολογίζονται αφορούν στις μέσες εβδομαδιαίες ή και μηνιαίες τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών.

Τέλος, παρόλο που τα θυγατρικά ισότοπα του ^{222}Rn δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας Δ.Ε. στο παρακάτω διάγραμμα, για λόγους πληρότητας, παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών ισωτόπων ^{214}Pb και ^{214}Bi για κάθε φίλτρο του ημερήσιου κύκλου φίλτρων συναρτήσει της συγκέντρωσης του ^7Be .



Διάγραμμα 4.6: Συγκέντρωση θυγατρικών ισωτόπων ^{214}Pb και ^{214}Bi συναρτήσει της συγκέντρωσης του ^7Be

Από το παραπάνω διάγραμμα των συγκεντρώσεων των θυγατρικών ^{214}Pb και ^{214}Bi του ραδονίου, με κατάλληλο στατιστικό τεστ ($H_0: \rho=0$, $H_1: \rho \neq 0$), προκύπτει ότι σε ημερήσιο επίπεδο δεν τεκμηριώνεται στατιστικά συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών αυτών και της συγκέντρωσης του ^7Be . Συγκεκριμένα οι τιμές της παραμέτρου t ήταν:

- για τη συσχέτιση συγκέντρωσης ^7Be με τη συγκέντρωση ^{214}Pb : $t = 0.602$.
- για τη συσχέτιση συγκέντρωσης ^7Be με τη συγκέντρωση ^{214}Bi : $t = 1.307$.

4.5 Συμπεράσματα

Με τη χρήση της νέας γεωμετρίας φίλτρων αέρα, δίνεται η δυνατότητα αποδοτικότερης ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 477.59keV του ^7Be , μέσω της αυξημένης απόδοσης ανίχνευσής τους από τον ανιχνευτή XtRa. Η νέα γεωμετρία επιτρέπει επιπλέον καλύτερη επαναληψιμότητα στην τοποθέτηση των φίλτρων στον ανιχνευτή. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, για τον ίδιο χρόνο ανάλυσης των φίλτρων, επιτυγχάνεται μικρότερη τυχαία αβεβαιότητα στη συγκέντρωση του ^7Be στον αέρα, η

οποία δίνει μεγαλύτερες δυνατότητες για τη μελέτη των παραμέτρων που επιδρούν στην κύμανση της συγκέντρωσης του στην ατμόσφαιρα.

Όσον αφορά στη συστηματική αβεβαιότητα των μετρήσεων του ^7Be με χρήση της νέας γεωμετρίας, καταρχήν πρέπει να επισημανθεί ότι κανείς δεν μπορεί να ισχυρισθεί ότι έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι συνιστώσες της. Ωστόσο, τα αποτελέσματα συγκέντρωσης του ^7Be τα οποία προκύπτουν από τις δειγματοληψίες με χρήση της νέας γεωμετρίας είναι πλησιέστερα στις αναμενόμενες από τη βιβλιογραφία τιμές, από ότι είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την ισχύουσα βαθμονόμηση της γεωμετρίας 12. Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει ότι το συστηματικό σφάλμα της βαθμονόμησης της νέας γεωμετρίας είναι χαμηλότερο. Άλλωστε, για την ισχύουσα βαθμονόμηση της γεωμετρίας 12 έχει καταδειχθεί ότι παρουσιάζει πρόβλημα λόγω της συστηματικής αβεβαιότητας στη βαθμονόμηση, κυρίως από το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης των φωτονίων του ^{60}Co , η οποία δεν λαμβάνεται μέχρι σήμερα υπόψη κατά τους υπολογισμούς της συνολικής αβεβαιότητας για τις αναλύσεις αυτές.

Κεφάλαιο 5:

Προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ^7Be στο νερό της βροχής

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά περιγράφεται αρχικά η διαδικασία της υγρής απόθεσης του ^7Be στη γη και παρουσιάζονται οι λόγοι που καθιστούν την παρακολούθηση της συγκέντρωσής του στο νερό της βροχής σημαντική. Εξηγείται γιατί γίνονται αναλύσεις βρόχινου νερού για το συγκεκριμένο ισότοπο και περιγράφεται η διαδικασία δειγματοληψίας και ανάλυσης βρόχινου νερού στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάλυσης δειγμάτων νερού που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και η βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για την ανάλυση δειγμάτων βρόχινου νερού που έγινε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. Η βαθμονόμηση αυτή έγινε με χρήση του κώδικα PENELOPE. Τέλος, περιγράφεται ως εφαρμογή η ανάλυση δειγμάτων νερού τα οποία συλλέχθηκαν σε ένα περιστατικό βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας (04/07/2009).

5.2 Μέτρηση του ^7Be σε νερό της βροχής

Εκτός από τη μέτρηση του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα, η μέτρηση της συγκέντρωσής του γίνεται και στη βροχή και το χιόνι γιατί, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, το συγκεκριμένο ισότοπο αποτίθεται στη γη είτε άμεσα, μέσω της βαρύτητας (ξηρή απόθεση - dry deposition) είτε έμμεσα μέσω των υγρών κατακρημνίσεων (υγρή απόθεση - wet deposition). Υπάρχουν δύο μηχανισμοί υγρής απόθεσης του ^7Be στη γη. Ο ένας αναφέρεται στην περίπτωση όπου το ισότοπο υπάρχει ήδη στις σταγόνες της βροχής (μηχανισμός υγρής απόθεση rainout). Ο δεύτερος περιγράφει την περίπτωση οι πυρήνες ^7Be να υπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα και να παρασύρονται από τις σταγόνες της βροχής (μηχανισμός υγρής απόθεσης washout). Η απόθεση των πυρήνων του ισότοπου στη γη συνήθως γίνεται και με τους δύο τρόπους. Ειδικά για τη χιονόπτωση, επειδή η νιφάδες του χιονιού έχουν μεγαλύτερη ικανότητα σύρωσης της ατμόσφαιρας κατά την πτώση τους, το φαινόμενο του washout είναι εντονότερο από ότι στη βροχή.

Κοινή συνιστώσα των δύο μηχανισμών υγρής απόθεσης του ^7Be είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του ισοτόπου στο νερό της βροχής. Παρατηρείται μάλιστα ότι στις πρώτες στιγμές της βροχής η συγκέντρωση αυτή είναι αυξημένη, ενώ στη συνέχεια τείνει να μειωθεί. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το γεγονός ότι οι σταγόνες της βροχής παρασύρουν τους πυρήνες του ισοτόπου έχει ως αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου να μειώνεται το πλήθος των πυρήνων που παραμένουν διαθέσιμοι στον ατμοσφαιρικό αέρα για να λάβουν μέρος στους μηχανισμούς υγρής απόθεσης. Επομένως, η ποσότητα του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ μειώνεται με το χρόνο βροχόπτωσης και άρα και η συγκέντρωσή του στις σταγόνες της βροχής. Πολύ ενδιαφέρουσα είναι η σχετική εργασία των [Yoichi Ishikawa et al., 1995], στην οποία διαπιστώνεται ότι η μέγιστη τιμή της ραδιενέργειας ^7Be σε χιονόνερο παρουσιάζεται κατά το πρώτο τετράωρο της χιονόπτωσης (~4Bq/l). Στη συνέχεια, η ραδιενέργεια μειώθηκε περί το 1-2Bq/l.

Οι λόγοι για τους οποίους μελετάται η συγκέντρωση του ^7Be στις υγρές κατακρημνίσεις είναι οι ίδιοι με τους λόγους για τους οποίους μελετάται και στις ξηρές κατακρημνίσεις. Όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 2, το συγκεκριμένο ισότοπο θεωρείται ένας σημαντικός ιχνηλάτης (tracer) για τη μελέτη της κίνησης των αερίων μαζών και τον προσδιορισμό μοντέλων παγκόσμιας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Η γνώση της συγκέντρωσης του ισοτόπου στο βρόχινο νερό είναι πολύ σημαντική παράμετρος, όταν πρόκειται να μελετηθεί η διάβρωση του εδάφους σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης [Sepulveda A. et al., 2008] και η συσχέτιση της απόθεσης του ισοτόπου με τη βροχόπτωση [Rodenas C. et al., 1997]. Επίσης είναι απαραίτητη στην περίπτωση που μελετάται η προέλευση των αερίων μαζών που προκάλεσαν το επεισόδιο κατακρήμνισης, καθώς και ο χρόνος παραμονής τους πάνω από θαλάσσιες ή χερσαίες περιοχές [Likuku A.S., 2006].

5.3 Δειγματοληψία και ανάλυση βρόχινου νερού στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Δειγματοληψία νερού γίνεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για πολλά χρόνια. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα γίνεται προσπάθεια η δειγματοληψία αυτή να γίνεται με πιο συστηματικό τρόπο. Τα φαινόμενα χιονόπτωσης για την περιοχή της Αθήνας, όπου βρίσκεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ, είναι πιο σπάνια σε σχέση με τα φαινόμενα βροχόπτωσης. Για το λόγο αυτό στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία δειγματοληψίας και ανάλυσης βρόχινου νερού μόνο. Για την περίπτωση ανάλυσης

χιονιού η διαδικασία δεν είναι πολύ διαφορετική και θα περιλαμβάνει επιπλέον το λιώσιμο του χιονιού και την ανάλυσή του σαν βρόχινο νερό.

Για τη μελέτη του νερού της βροχής στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι τοποθετημένα στην ταράτσα του κτηρίου Κ του εργαστηρίου, ειδικά δοχεία συλλογής καθώς και ένας αυτοσχέδιος μετρητής ύψους βροχής. Με τα δοχεία συλλέγεται το βρόχινο νερό και μέσω του μετρητή είναι δυνατή η εκτίμηση του ύψους βροχής σε mm.

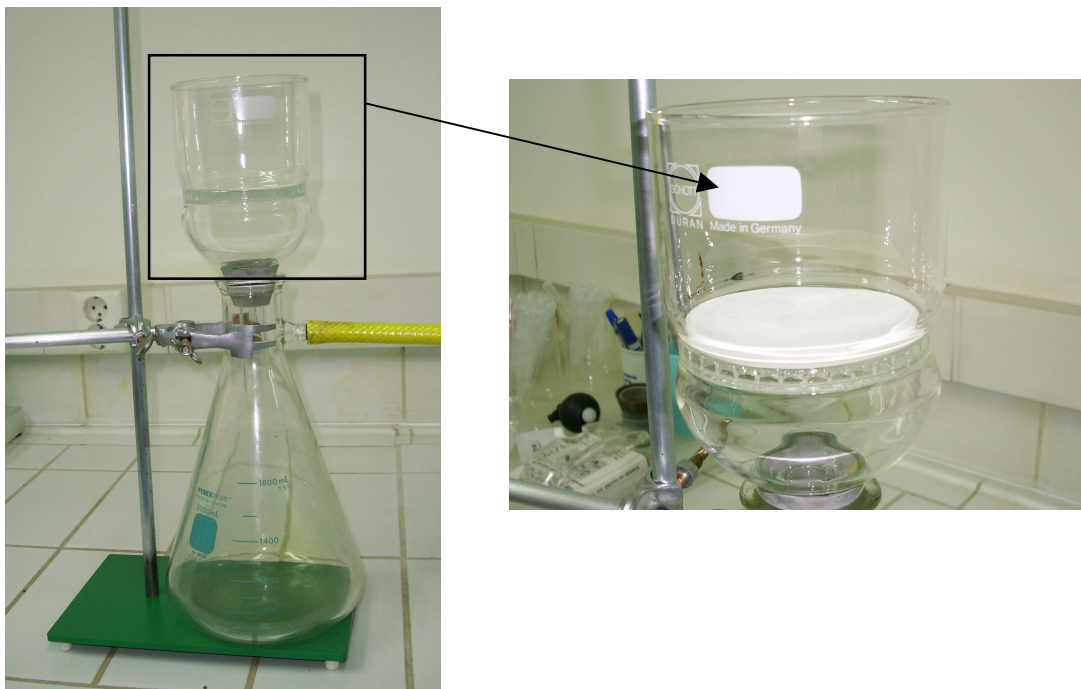
Τα βήματα που ακολουθούνται με σκοπό τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ^7Be στο βρόχινο νερό είναι τα εξής:

- συλλογή βρόχινου νερού
- φιλτράρισμα του βρόχινου νερού, μέσα από κατάλληλα φίλτρα, με σκοπό την κατακράτηση των σωματιδίων που υπάρχουν στο νερό
- γ-φασματοσκοπική ανάλυση φίλτρων και προσδιορισμός του ^7Be στα φίλτρα
- γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φιλτραρισμένου νερού με σκοπό την ανίχνευση του ^7Be στο νερό

Αναλυτικότερα, σε περίπτωση βροχόπτωσης, το βρόχινο νερό συλλέγεται στα δοχεία που είναι τοποθετημένα στην ταράτσα του κτιρίου Κ. Πρόκειται για πέντε δοχεία διαστάσεων 55x30x20cm και συνολικής επιφάνειας $\sim 1\text{m}^2$. Τα δοχεία αυτά πρέπει να έχουν προηγουμένως ξεπλυθεί με νερό της βρύσης και νιτρικό οξύ (HNO_3) 1%. Μετά το πέρας της βροχής το νερό απομακρύνεται συσκευάζεται σε ειδικά πλαστικά δοχεία χωρητικότητας ενός λίτρου και σφραγίζεται μέχρι την ανάλυσή του, η οποία εξυπακούεται θα πρέπει να γίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα.

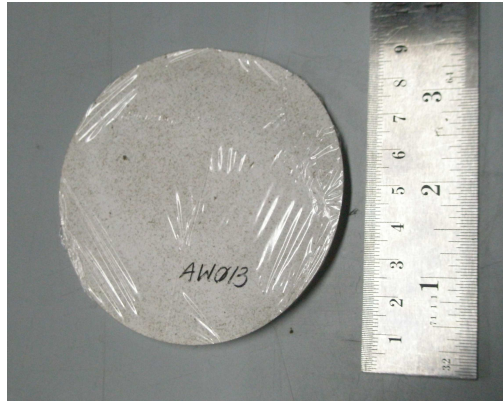
Η διαδικασία ανάλυσης βρόχινου νερού είναι πιο πολύπλοκη από εκείνη που ακολουθείται για τον ατμοσφαιρικό αέρα. Το νερό που συλλέγεται, αρχικά, αναγκάζεται να περάσει μέσα από συγκεκριμένου είδους φίλτρα. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιούνται κυκλικά χάρτινα φίλτρα της εταιρείας Whatman με διάμετρο 90mm και πάχος 0.2mm (Catalogue Number: 1442 090). Τα φίλτρα αυτά τοποθετούνται για φιλτράρισμα σε δοχεία με κατάλληλη διαμόρφωση της εταιρείας Schott Duran® (Catalogue Number: 21 341 44), όπου και σταθεροποιούνται (εικόνα 5.1). Το βρόχινο νερό εισάγεται πάνω από το φίλτρο και έχει την τάση, λόγω της βαρύτητας να περάσει μέσα από το φίλτρο. Με χρήση ανεξάρτητου κυκλώματος νερού το οποίο είναι συνδεδεμένο με βρύση και εξαιτίας του φαινομένου Bernoulli, δημιουργείται κάτω από το φίλτρο υποπίεση, που διευκολύνεται τη διέλευση του νερού της βροχής μέσα από το φίλτρο. Κατά τη διέλευση του νερού από το φίλτρο, κατακρατείται το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων που περιέχονται στο βρόχινο νερό και επομένως και οι πυρήνες

${}^7\text{Be}$. Ανάλογα με την ποσότητα του νερού και το σωματιδιακό φορτίο που φέρει, το φίλτρο μπορεί να στομώσει και να σταματήσει η ροή του νερού. Αυτό συμβαίνει γιατί η δυνατότητα διέλευσης υγρού μέσω του φίλτρου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης σωματιδίων-σκόνης στην επιφάνειά του. Οι πόροι του φίλτρου επομένως φράσσονται και το νερό δεν μπορεί να διέλθει από το φίλτρο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερα του ενός φίλτρα. Σύμφωνα με τις αναλύσεις που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, απαιτείται περίπου ένα φίλτρο για κάθε δύο λίτρα βρόχινου νερού. Στην εικόνα 5.1 φαίνεται η παραπάνω διάταξη καθώς και το τοποθετημένο στην ειδική διαμόρφωση χάρτινο φίλτρο:



Εικόνα 5.1: Η διάταξη φιλτραρίσματος νερού στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Μετά την κατακράτηση των σωματιδίων του νερού από τα φίλτρα, τα τελευταία αφήνονται να στεγνώσουν στον αέρα για μία ημέρα. Αφού στεγνώσουν, συσκευάζονται με χρήση μεμβράνης (κοινή μεμβράνη τροφίμων). Στην εικόνα 5.2 φαίνεται ένα χρησιμοποιημένο και συσκευασμένο φίλτρο:



Εικόνα 5.2: Χρησιμοποιημένο και συσκευασμένο φίλτρο βρόχινου νερού

Το επόμενο βήμα της μελέτης βρόχινου νερού είναι η γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων. Τα συσκευασμένα φίλτρα τοποθετούνται πάνω στον ανιχνευτή ΧtRa και συλλέγεται το αντίστοιχο φάσμα. Από τη φωτοκορυφή του ${}^7\text{Be}$ στα 477.59keV, και μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης απόδοσης η οποία θα πρέπει να έχει προηγηθεί, υπολογίζεται η συγκέντρωση του ${}^7\text{Be}$ στα φίλτρα (σε Bq). Εφόσον είναι γνωστή η ποσότητα του νερού που έχει διέλθει μέσα από τα φίλτρα (σε λίτρα), είναι εύκολο στη συνέχεια να προσδιορισθεί η ραδιενέργεια του ${}^7\text{Be}$ στο βρόχινο νερό (σε Bq/λίτρο), σύμφωνα με τη σχέση (2.2), όπως και στην περίπτωση των φίλτρων αέρα. Ο παραπάνω υπολογισμός στηρίζεται στην παραδοχή ότι όλο το ${}^7\text{Be}$ έχει κατακρατηθεί στα φίλτρα. Μία παραδοχή που θα πρέπει να ελεγχθεί στη συνέχεια με την ανάλυση και το νερού που έχει διέλθει από τα φίλτρα.

Μετά την κατακράτηση των σωματιδίων στα φίλτρα, το νερό τοποθετείται σε ειδικό υδατόλουτρο αποσταγμένου νερού ώστε να υποστεί ελαφρά εξάτμιση (στους $\sim 80^\circ\text{C}$). Η διάρκεια της εξάτμισης ποικίλει, ανάλογα με τον όγκο του νερού. Σκοπός της εξάτμισης είναι η μείωση του όγκου του νερού ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε τυποποιημένα δοχεία γεωμετρίας 2 και όγκου $\sim 280\text{ml}$ για να αναλυθεί. Με την ήπια εξάτμιση του νερού αναμένεται αύξηση της συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ που ενδεχομένως παραμένει στο νερό, ανάλογη με τη μείωση του όγκου του νερού. Επίσης, δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις στο βρόχινο νερό είναι πολύ μικρές (πολύ λίγα Bq/l) η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε η ραδιενέργεια του δείγματος που προκύπτει να είναι ανιχνεύσιμη και μάλιστα με καλή στατιστική. Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ${}^7\text{Be}$ γίνεται πάλι σύμφωνα με τη σχέση (2.2), δεδομένου ότι πρόκειται για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Στην εικόνα 5.3 φαίνεται το χρησιμοποιούμενο στο ΕΠΤ-ΕΜΠ υδατόλουτρο.



Εικόνα 5.3: Υδατόλουτρο του ΕΠΤ-ΕΜΠ με αποσταγμένο νερό

5.4 Βαθμονόμηση απόδοσης φίλτρων βρόχινου νερού με χρήση κώδικα Monte Carlo

Για την ανάλυση του βρόχινου νερού χρησιμοποιούνται και τα δύο προϊόντα της επεξεργασίας του (χάρτινα φίλτρα και δοχεία τυποποιημένης γεωμετρίας 2). Για τη γεωμετρία 2 υπάρχει η σχετική καμπύλη βαθμονόμηση απόδοσης για τον ανιχνευτή XtRa η οποία έχει γίνει με χρήση πρότυπων πηγών βαθμονόμησης. Για τα χάρτινα φίλτρα, ωστόσο, δεν υπάρχει βαθμονόμηση. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. επιλέχθηκε η βαθμονόμηση απόδοσης των φίλτρων αυτών για την ενέργεια των 477.59 του ^7Be να γίνει με χρήση του κώδικα PENELOPE.

Οι διαστάσεις των χάρτινων φίλτρων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση βρόχινου νερού (διάμετρος 90mm, πάχος 0.2mm) είναι παραπλήσιες με εκείνες της νέας γεωμετρίας φίλτρων αέρα (65x68x6.5mm). Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε ότι οι διαστάσεις του ανιχνευτή XtRa (ακριβείς διαστάσεις dead layer) στις οποίες κατέληξε η διερεύνηση του κεφαλαίου 3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την περίπτωση των προσομοιώσεων για γεωμετρία φίλτρων νερού.

Για την προσομοίωση των φίλτρων νερού πρέπει, όπως σε κάθε προσομοίωση που παρουσιάστηκε στην παρούσα Δ.Ε., να γίνει τροποποίηση του κυρίως προγράμματος PENMAIN ώστε να λαμβάνει πηγή όγκου. Η τροποποίηση αυτή είναι όμοια με εκείνη για το φίλτρο διαμέτρου 47mm που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των διαστάσεων του dead layer του ανιχνευτή XtRa και παρουσιάζεται στο παράρτημα Β (κώδικας Β.9). Όπως και στις άλλες περιπτώσεις προσομοίωσης πρέπει να γίνει έλεγχος του τρόπου ορισμού, από το χρήστη, της πηγής όγκου (κώδικας Β.10). Δεδομένου ότι η τροποποίηση του κυρίως προγράμματος είναι όμοια με εκείνη του φίλτρου $\varnothing 47\text{mm}$, στο σημείο αυτό δεν παρουσιάζεται ο έλεγχος.

Το αρχείο εισόδου και το αρχείο γεωμετρίας για τη συγκεκριμένη προσομοίωση παρουσιάζονται στα παραρτήματα Γ και Δ, αντίστοιχα (αρχείο Γ.25 και Δ.7 αντίστοιχα). Τρισδιάστατη απεικόνιση του παραπάνω αρχείου γεωμετρίας παρουσιάζεται στην εικόνα 5.5 στο τέλος του κεφαλαίου. Στο αρχείο γεωμετρίας περιγράφεται ένα μόνο φίλτρο βρόχινου νερού. Ωστόσο, το πάχος των φίλτρων αυτών είναι πολύ μικρό (0.2mm) και δεν διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε περίπτωση ανάλυσης περισσότερων του ενός φίλτρων.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης, σύμφωνα και με τη μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.2, προκύπτει η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για ανίχνευση των φωτονίων ενέργειας 477.59keV σε χάρτινα φίλτρα διαμέτρου 90mm από τον ανιχνευτή XtRa, ίση με:

$$\text{eff}_{\text{water filter}}(477.59\text{keV}) = 0.08168 \pm 0.106\% (1\sigma)$$

Η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τα χάρτινα φίλτρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας του ^7Be πάνω στο φίλτρο, σύμφωνα με τη σχέση (2.2) και κατά συνέπεια στο νερό της βροχής. Μια εφαρμογή του υπολογισμού αυτού παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

5.5 Προσδιορισμός ραδιενέργειας του ^7Be σε νερό βροχής

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε. πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερού βροχής κατά τη βροχόπτωση της 04/07/2009. Η βροχόπτωση αυτή στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου είχε διάρκεια ~50min (12:40-13:30) και ήταν μεγάλης έντασης, με συνολικό ύψος βροχής ~11mm. Η δειγματοληψία έγινε σε δύο διαφορετικά σημεία. Το ένα δείγμα ελήφθη στο κτήριο Κ, με τη μεθοδολογία που έχει περιγραφεί προηγουμένως και το άλλο από την περιοχή του Περιστερίου, χωρίς όμως να ακολουθηθεί τυποποιημένη διαδικασία. Τα δύο δείγματα τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά πλαστικά δοχεία και ζυγίστηκαν. Οι καθαρές μάζες νερού ήταν $0.602\text{kg} \pm 0.33\%$ και $1.658\text{kg} \pm 0.12\%$ αντίστοιχα.

Ακολουθώντας τη διαδικασία της παραγράφου 5.3, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στα δοχεία με την κατάλληλη διαμόρφωση για την κατακράτηση των σωματιδίων με χρήση χάρτινων φίλτρων. Χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο για κάθε δείγμα. Τα φίλτρα έλαβαν την ονομασία AW12 και AW13, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, το βρόχινο νερό εξατμίστηκε στο υδατόλουτρο. Από την εξάτμιση προέκυψαν τα δείγματα τυποποιημένης γεωμετρίας 2 WRC011 από το δείγμα

βρόχινου νερού από το Περιστέρι και WRC012 από το δείγμα βρόχινου νερού από το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Τα δείγματα γεωμετρίας 2 ζυγίστηκαν στον ίδιο ζυγό με τα δείγματα βρόχινου νερού και βρέθηκε ότι η καθαρή μάζα τους είναι $0.2829\text{kg} \pm 0.71\%$ και $0.2822\text{kg} \pm 0.71\%$, αντίστοιχα. Όλα τα παραπάνω δεδομένα από την επεξεργασία των δειγμάτων βρόχινου νερού φαίνονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα 5.1. Για κάθε θέση δειγματοληψίας δίνεται η μάζα του δείγματος που συλλέχθηκε, η καθαρή μάζα του βρόχινου νερού, το φίλτρο που προέκυψε, καθώς και η ονομασία και καθαρή μάζα των δοχείων γεωμετρίας 2 που προέκυψαν από την εξάτμιση του βρόχινου νερού.

Τόπος δειγματοληψίας	Μάζα δείγματος (kg)	Μάζα νερού (kg)	Φίλτρο	Δείγμα γεωμετρίας 2	Καθαρή μάζα δείγματος γεωμετρίας 2 (kg)
Περιστέρι	1.790	1.658	AW12	WRC011	0.283
ΕΠΤ-ΕΜΠ	0.666	0.602	AW13	WRC012	0.282

Πίνακας 5.1: Δεδομένα επεξεργασία βρόχινου νερού από τη βροχόπτωση στις 04/07/2009

Σύμφωνα με τη μέθοδο δειγματοληψίας και ανάλυσης βρόχινου νερού που παρουσιάστηκε παραπάνω, τα φίλτρα και τα δοχεία γεωμετρίας 2 πρέπει να αναλυθούν με την τεχνική της γ-φασματοσκοπίας. Η ανάλυση αυτή περιγράφεται στις παρακάτω παραγράφους. Επισημαίνεται ότι η ημερομηνία δειγματοληψίας βροχής (04/07/2009) είναι μία μέρα μετά με ημέρα ολοκλήρωσης του ημερήσιου κύκλου φίλτρων που παρουσιάστηκε στο 4^ο κεφάλαιο. Η μέση τιμή της ραδιενέργειας του ^7Be στον ατμοσφαιρικό αέρα την 02/07/2009 στην περιοχή Ζωγράφου ήταν $6.7\text{mBq/m}^3 \pm 6.81\%$.

5.5.1 γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων νερού

Τα δύο φίλτρα που προέκυψαν από την κατακράτηση των σωματιδίων των δύο δειγμάτων νερού τοποθετήθηκαν διαδοχικά στον ανιχνευτή XtRa για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν τα φάσματα AW12a και AW13a. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα φίλτρα, τα φάσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των φίλτρων καθώς και οι κωδικοί SPUNAL των φασμάτων αυτών.

Φίλτρο	Ημερομηνία ανάλυσης	Φάσμα	Κωδικός SPUNAL
AW12	16/07/2009	AW12a	14/6.183
AW13	23/07/2009	AW13a	14/6.188

Πίνακας 5.2: Φάσματα και κωδικοί SPUNAL ανάλυσης φίλτρων βρόχινου νερού

Σύμφωνα με τη σχέση (2.2) και με χρήση της απόδοσης φωτοκορυφής που υπολογίστηκε από την προσομοίωση (παράγραφος 5.4.1) υπολογίστηκε η ραδιενέργεια του ^7Be σε κάθε φίλτρο. Στον παρακάτω πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι επιφάνειες σχηματιζόμενης φωτοκορυφής στα 477.59keV, σε μονάδες cps, που λαμβάνονται από τα παραπάνω φάσματα, συνοδευόμενες από την αβεβαιότητα τους (1σ), καθώς και η υπολογιζόμενη ειδική ραδιενέργεια του ^7Be (σε Bq/kg νερού) με τη συνολική αβεβαιότητά της σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ . Στην αβεβαιότητα αυτή συνυπολογίζονται η αβεβαιότητα των cps, όπως προκύπτει από το αντίστοιχο φάσμα, η αβεβαιότητα της καθαρής μάζας νερού του κάθε δείγματος, η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής (0.106%), όπως προκύπτει από την προσομοίωση και η αβεβαιότητα του ποσοστού εκπομπής του ^7Be για φωτόνια ενέργειας 477.59keV (0.46%, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.3). Στις υπολογιζόμενες τιμές συγκέντρωσης έχει γίνει και διόρθωση decay καθώς τα φίλτρα αναλύθηκαν 10 ημέρες μετά τη βροχόπτωση (χρόνος υποδιπλασιασμού του ^7Be =53.44days [Radiation Decay v.3.6]).

Φάσμα	Τόπος δειγματοληψίας	cps	Αβεβαιότητα (% , 1σ)	Συγκέντρωση ^7Be (Bq/kg νερού)	Αβεβαιότητα (% , 1σ)
AW12a	Περιστέρι	0.0015	28.1	0.13	28.1
AW13a	ΕΠΤ-ΕΜΠ	0.0005	67.3	0.14	67.3

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός της ραδιενέργειας του ^7Be στα φίλτρα βρόχινου νερού

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα 5.3 καταρχήν παρατηρείται ότι οι τιμές της συγκέντρωσης, όπως υπολογίζονται από τα δύο δείγματα, δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση (της τάξης του 6%) και αποδεικνύεται ότι δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Οι μεγάλες τιμές αβεβαιότητας που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα είναι απόρροια της πολύ μικρής συγκέντρωσης του ^7Be στο βρόχινο νερό.

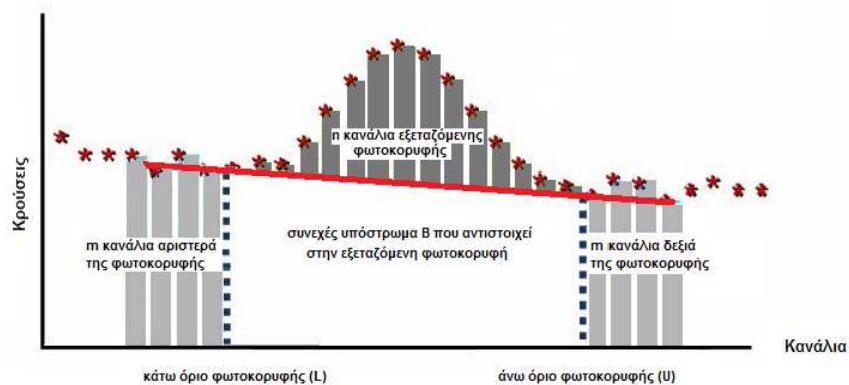
Πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή $\sim 0.13\text{Bq/kg}$ της ραδιενέργειας του ^7Be στη βροχή που προσδιορίστηκε είναι χαμηλή, συγκρινόμενη με αντίστοιχες τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία και οι οποίες κυμαίνονται από 0.7 ± 0.3 έως 3.2 ± 0.7 Bq/lt [Juri Ayub J. et al., 2009]. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι την ημέρα που συλλέχθηκαν τα υπόψη δείγματα βροχής είχαν προηγηθεί σημαντικές βροχοπτώσεις σε άλλες περιοχές του λεκανοπεδίου Αττικής με αποτέλεσμα να είναι γενικά μειωμένη η ποσότητα του ^7Be στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, πρέπει να επισημανθεί ότι η ποσότητα νερού που συλλέχθηκε αντιστοιχεί σε αρκετά μεγάλο ύψος βροχής ($\sim 11\text{mm}$).

Δεδομένου ότι, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία, το μεγαλύτερο ποσοστό του ${}^7\text{Be}$ καταπίπτει με τα πρώτα χιλιοστά βροχής, ενώ στα επόμενα χιλιοστά η ποσότητα του ${}^7\text{Be}$ που ανιχνεύεται είναι αισθητά μειωμένη, είναι ενδεχόμενο η χαμηλή τιμή της ραδιενέργειας του ${}^7\text{Be}$ που ανιχνεύθηκε στο νερό να οφείλεται στη μεγάλη “αραίωσή” του στο νερό που συλλέχθηκε. Πάντως, το θέμα θεωρείται ότι παραμένει ανοικτό και θα πρέπει να ακολουθήσει διερεύνηση του θέματος με την ανάλυση και του νερού το οποίο είχε περάσει από τα φίλτρα. Στα πλαίσια της Δ.Ε. δεν κατέστη δυνατόν λόγω χρονικών περιορισμών να αναλυθούν τα δείγματα νερού. Πάντως, έγινε διερεύνηση της δυνατότητας ανίχνευσης του ${}^7\text{Be}$ σε δείγμα γεωμετρίας 2, στις διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

5.5.2 Δυνατότητες ανίχνευσης του ${}^7\text{Be}$ με γ -φασματοσκοπική ανάλυση νερού σε τυποποιημένη γεωμετρία 2

Από παλαιότερες αναλύσεις δειγμάτων νερού βροχής που είχαν γίνει, χωρίς επεξεργασία του νερού της βροχής (μέσω εξάτμισης) είχε παρατηρηθεί ότι δεν μπορούσε, με τις χρησιμοποιούμενες διατάξεις και γεωμετρίες, να ανιχνευθεί ${}^7\text{Be}$ σε δοχεία βρόχινου νερού γεωμετρίας 2. Αντίθετα, σε δείγματα νερού βροχής που είχαν υποστεί μεγάλη επεξεργασία συγκέντρωσης είχε ανιχνευθεί ${}^7\text{Be}$. Η παρατήρηση αυτή είναι λογική καθώς οι συνολικοί πυρήνες ${}^7\text{Be}$ που αναμένεται να υπάρχουν στο βρόχινο νερό είναι λίγοι. Μάλιστα, στην περίπτωση που το νερό έχει προηγουμένως φιλτραριστεί, το πλήθος των πυρήνων που παραμένει στο βρόχινο νερό είναι ακόμα μικρότερο. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. αποφασίσθηκε να εκτιμηθεί το κατώτερο όριο ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 477.59keV του ${}^7\text{Be}$ στον ανιχνευτή XtRa για γεωμετρία ανάλυσης ‘2’.

Ως κατώτερο όριο ανίχνευσης, L_D , ορίζεται εκείνο το όριο επιφάνειας (area) της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής που, σε συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης, ανιχνεύεται μετά βεβαιότητας. Εναλλακτικά, αν πρόκειται να μετρηθεί ένα δείγματα (a priori εκτίμηση), το κατώτερο όριο ανίχνευσης αποτελεί την ελάχιστη επιφάνεια που πρέπει να έχει μία φωτοκορυφή ώστε να ανιχνευτεί με βεβαιότητα, σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Για καλύτερη κατανόηση των μεγεθών που απαιτούνται για τον υπολογισμό του L_D παρατίθεται το ακόλουθο σχήμα, όπου για μία φωτοκορυφή φαίνονται τα n κανάλια στα οποία κατανέμεται, τα m κανάλια αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής για εκτίμηση του υποστρώματος, καθώς και το συνεχές υπόστρωμα B που αντιστοιχεί στην υπόψη φωτοκορυφή.



Εικόνα 5.4: Σκαρίφημα φωτοκορυφής σε άξονες κανάλια-κρούσεις

Από τη στατιστική αποδεικνύεται ότι η τιμή του L_D σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και σε όρους επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [Gilmore G. & Hemingway J., 1995]:

$$L_D = 2.71 + 3.29 \left[B \cdot \left(1 + \frac{n}{2m} \right) \right]^{1/2} \quad \text{σχέση (5.1)}$$

όπου

- B: το συνεχές υπόστρωμα που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη φωτοκορυφή (εικόνα 5.4). Υπολογίζεται με τη μέθοδο του τραπεζιού με χρήση m καναλιών αριστερά και δεξιά από τα n κανάλια στα οποία κατανέμεται η φωτοκορυφή.
- m : το πλήθος των καναλιών αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής τα οποία χρησιμοποιούνται και για τον προσδιορισμό του συνεχούς υποστρώματος B (εικόνα 5.4).
- n : το πλήθος των καναλιών στα οποία κατανέμεται η εξεταζόμενη φωτοκορυφή, δηλαδή των καναλιών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μεγέθους area (εικόνα 5.4).

Όπως φαίνεται από τη σχέση (5.1), για τον υπολογισμό του κατώτερου ορίου ανίχνευσης απαιτείται ο υπολογισμός του υποστρώματος. Ο υπολογισμός του L_D αυτός έγινε με χρήση του φάσματος WT075b (14/6.112) από την ανάλυση δείγματος νερού βροχής γεωμετρίας 2, το οποίο είχε συλλεχθεί σε δειγματοληψία που είχε γίνει στο παρελθόν (03/04/2009) και κατά την οποία δεν είχε ανιχνευθεί ^7Be .

Όπως προκύπτει από την ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή XtRa (σχέση (2.7)), το κεντροειδές της φωτοκορυφής που σχηματίζεται στα 477.59keV είναι στο κανάλι 972. Με βάση την αρχή ότι μία φωτοκορυφή κατανέμεται σε κανάλια

$\pm 1.5\text{FWHM}$ από το κεντροειδές, η φωτοκορυφή στα 477.59keV εκτείνεται σε 10 κανάλια (από το κανάλι $L=967$ έως το κανάλι $U=977$). Από το παραπάνω φάσμα υπολογίστηκε η συνολική επιφάνεια της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής (integral) στα 477.59keV είναι ίση με 2948 κρούσεις (πριν την αφαίρεση συνεχούς υποστρώματος).

Το υπόστρωμα σε μονάδες κρούσεων δίνεται από τη σχέση (5.2):

$$B = n \cdot \left(\frac{C_{L-1} + C_{U+1}}{2} \right) \quad \text{σχέση (5.2)}$$

όπου

C_{L-1} : είναι το περιεχόμενο του πρώτου καναλιού πριν τη φωτοκορυφή (σε όρους κρούσεων) και

C_{U+1} : είναι το περιεχόμενο του πρώτου καναλιού μετά τη φωτοκορυφή (σε όρους κρούσεων).

Από το ίδιο φάσμα βρίσκονται τα απαραίτητα περιεχόμενα καναλιών και υπολογίζεται το υπόστρωμα σε ενέργεια 477.59keV ίσο με 2785 κρούσεις. Επομένως μπορεί να υπολογιστεί το κατώτερο όριο ανίχνευσης με βάση τη σχέση (5.1) ίσο με $L_D=286$ κρούσεις.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται συνήθως για την ανιχνευτική ικανότητα μίας διάταξης είναι το κατώτερο όριο ανίχνευσης ραδιενέργειας, MDA, το οποίο υπολογίζεται μέσω της σχέσης (2.2) τροποποιημένης ώστε να ως επιφάνεια να λαμβάνεται το L_D :

$$\text{MDA} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{kg νερού}} \right] = \frac{L_D}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{eff} \cdot \text{mass}} \quad \text{σχέση (5.3)}$$

Ο απαιτούμενος χρόνος και η μάζα του δείγματος λαμβάνονται από το φάσμα WT075b, ίσος με 402165sec και 284.8gr αντίστοιχα, το ποσοστό εκπομπής έχει ήδη βρεθεί, ίσο με $0.1034 \pm 0.46\%$ και η απόδοση φωτοκορυφής βρίσκεται από την καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή XtRa για τη γεωμετρία 2, ίση με $0.0286 \pm 2.85\%$. Έτσι, μπορεί να εφαρμοσθεί η σχέση (5.3) και υπολογίζεται το κατώτερο όριο ανίχνευσης ραδιενέργειας ίσο με MDA = 0.84 Bq/kg νερού.

Από αναλύσεις δειγμάτων βρόχινου νερού που έχουν γίνει στο παρελθόν στον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε γεωμετρία 2, έχει διαπιστωθεί ότι η οποία κύμανση του υποστρώματος στην περιοχή περί τα 477.59keV , που θα μπορούσε σε ορισμένες περιπτώσεις να εκληφθεί ως φωτοκορυφή, έχει πάντα επιφάνεια μικρότερη από το

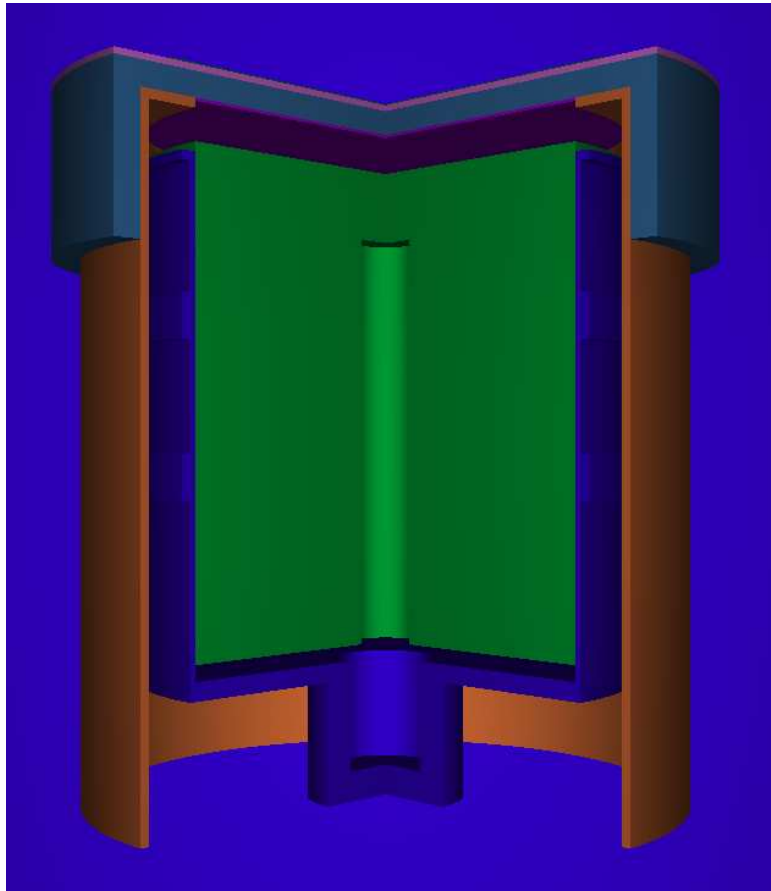
κατώτερο όριο ανίχνευσης της ανιχνευτικής διάταξης και κατά συνέπεια καλώς δεν θεωρείται από το λογισμικό SPUNAL ως φωτοκορυφή.

5.6 Συμπεράσματα από την ανάλυση βρόχινου νερού στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Από την προσπάθεια ανάλυσης δειγμάτων νερού βροχής, με στόχο τον ποσοτικό προσδιορισμό του ^7Be που έγινε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. προέκυψαν τα παρακάτω ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

- i. Η ανάλυση των φίλτρων, μέσα από τα οποία έχει φιλτραριστεί το νερό της βροχής, οδηγεί σε μάλλον χαμηλές τιμές της ραδιενέργειας του ^7Be ($\sim 0.13\text{Bg/kg}$) και μέτρια στατιστική και γεννάει υποψίες για προβλήματα στη μεθοδολογία ανάλυσης.
- ii. Η εκτίμηση του κατώτερου επίπεδου ανίχνευσης του ^7Be στο νερό της βροχής ($\sim 0.84\text{Bg/kg}$), μέσω της φασματοσκοπικής ανάλυσής του σε γεωμετρία 2, έδειξε ότι στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να υπάρχει αξιόλογη ποσότητα ^7Be στο νερό, η οποία δεν θα μπορεί να ανιχνευθεί. Συνεπώς, δεν μπορεί να αποκλεισθεί ότι μία ποσότητα ^7Be , η οποία μπορεί να είναι σημαντική ως ποσοστό, μπορεί να διέρχεται από το φίλτρο και να παραμένει στο νερό και τελικά να μην ανιχνεύεται.
- iii. Η καλύτερη λύση τελικά για την ανάλυση του νερού φαίνεται ότι είναι το φιλτράρισμα του νερού και η εν συνεχεία εξάτμισή του, που οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης του ^7Be σε αυτό, σε επίπεδα που θα μπορούσαν τελικά να ανιχνευθούν. Εξυπακούεται ότι, όσο μεγαλύτερη ποσότητα νερού είναι διαθέσιμη, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η αντίστοιχη συγκέντρωση. Πάντως στο σημείο αυτό απαιτείται συστηματική διερεύνηση.

Εικόνες κεφαλαίου 5:



Εικόνα 5.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση φίλτρων βρόχινου νερού τοποθετημένων στον ανιχνευτή XiRa

Κεφάλαιο 6:

Συμπεράσματα και μελλοντικά βήματα

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη της Διπλωματικής Εργασίας, με επίκεντρο τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή. Σχολιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα επιμέρους συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή, με γνώμονα την εκπλήρωση ή μη των αρχικών στόχων. Τέλος, διατυπώνονται σκέψεις και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

Βασικός στόχος της παρούσας Δ.Ε. ήταν η βελτίωση των τεχνικών γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, των φίλτρων που συλλέγονται κατά τις δειγματοληψίες αέρα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, με στόχο τον προσδιορισμό του ^7Be στα ατμοσφαιρικά αερολύματα. Η μοναδική γεωμετρία ανάλυσης φίλτρων αέρα $8 \times 10''$ η οποία μέχρι την εκπόνηση της Δ.Ε. ήταν σε χρήση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ήταν γνωστή ως ‘γεωμετρία 12’. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. έγινε ενδελεχής διερεύνηση της διαδικασίας που είχε ακολουθηθεί στο παρελθόν για τη βαθμονόμηση απόδοσης για τη ‘γεωμετρία 12’ με σκοπό τον εντοπισμό των αδυναμιών που ενδεχομένως είχε η βαθμονόμηση αυτή. Οι σημαντικότερες αδυναμίες οι οποίες διαπιστώθηκαν ήταν:

- i. Στην ισχύουσα βαθμονόμηση της ‘γεωμετρίας 12’ είχαν χρησιμοποιηθεί τα φωτόνια του ισοτόπου ^{60}Co για τα οποία είναι πολύ έντονο το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, χωρίς να γίνει καμία σχετική διόρθωση. Ως αποτέλεσμα η καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης, τουλάχιστον στην περιοχή υψηλών ενεργειών, παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση από την πραγματική, με συνέπεια την υπερεκτίμηση της ραδιενέργειας των ισοτόπων που εκπέμπουν στην ενεργειακή αυτή περιοχή.
- ii. Στην ισχύουσα βαθμονόμηση της ‘γεωμετρίας 12’ δεν είχαν ληφθεί υπόψη όλες οι συνιστώσες της αβεβαιότητας που θα έπρεπε. Για παράδειγμα, ενώ είχε ακολουθηθεί η προσέγγιση του υπολογισμού της απόδοσης, μέσω της συσχέτισής της με την απόδοση σε μία γεωμετρία αναφοράς (‘γεωμετρία 2’) δεν είχε ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα της απόδοσης στη γεωμετρία αναφοράς.

Με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητα των μετρήσεων του ^7Be στον αέρα, εισήχθη μία νέα γεωμετρία φασματοσκοπικής ανάλυσης των φίλτρων, προκειμένου να

βελτιωθεί η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων που εκπέμπει το ^7Be καθώς και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Για τη βελτίωση της επαναληψιμότητας, σύμφωνα με τη νέα γεωμετρία, τα φίλτρα τοποθετούνται σε τυποποιημένη θήκη, η οποία εξασφαλίζει σταθερό πάχος πηγής και θέση ως προς τον ανιχνευτή. Η νέα γεωμετρία φίλτρου προβλέπει το δίπλωμα του φίλτρου με τέτοιο τρόπο ώστε η ακμή του είναι μικρότερη από τη διάμετρο του ανιχνευτή στο παράθυρο μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό η απόδοση είναι υψηλότερη, καθώς δεν υπάρχει μέρος του φίλτρου το οποίο να είναι εκτός του ανιχνευτή. Επίσης, το δίπλωμα είναι τέτοιο, ώστε ισοκατανέμεται το στρώμα από σωματίδια που μαζεύεται με τη δειγματοληψία αέρα και η ‘πηγή’ είναι πιο ομοιόμορφη.

Λόγω έλλειψης πειραματικών σημείων για τη νέα γεωμετρία αυτή, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση η τεχνική της προσομοίωσης Monte-Carlo και συγκεκριμένα ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE. Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης αυτής ήταν απαραίτητος ο λεπτομερής προσδιορισμός των διαστάσεων και των χαρακτηριστικών (dead layer) του ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ, που χρησιμοποιείται κατά τις αναλύσεις. Για το σκοπό αυτό έγιναν μία σειρά από προσομοιώσεις, με διάφορες επιλογές για το dead layer του ανιχνευτή, και μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που ελαχιστοποιούν τις διαφορές μεταξύ αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος. Ως αποδεκτό όριο διαφορών στα πλαίσια της Δ.Ε. τέθηκε το 2-3%. Πρέπει να τονιστεί ότι ο συνδυασμός αυτός δεν αντιπροσωπεύει τις ακριβείς διαστάσεις του ανιχνευτή, αλλά εκείνες για τις οποίες συγκλίνουν τα πειραματικά δεδομένα, με εκείνα της προσομοίωσης, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία προσομοίωσης και για άλλες παρόμοιες γεωμετρίες. Εάν η γεωμετρία της πηγής είναι πολύ διαφορετική, τότε θα υπάρχει άλλος συνδυασμός χαρακτηριστικών που θα ικανοποιεί τη συνθήκη σύγκλισης.

Μετά την επιλογή των χαρακτηριστικών του ανιχνευτή ακολούθησε η βαθμονόμηση απόδοσης για τη νέα γεωμετρία ανάλυσης φίλτρου και για την ενέργεια των 477.59keV που εκπέμπει το ^7Be . Επιπλέον, με χρήση προσομοίωσης έγινε και βαθμονόμηση απόδοσης της ‘γεωμετρίας 12’.

Ακολούθησαν συγκρίσεις των βαθμονομήσεων με τις τρεις μεθόδους, οι οποίες έδειξαν ότι η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων του ^7Be από τον ανιχνευτή XtRa για τη νέα γεωμετρία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για τη γεωμετρία 12, κατά ~40%. Με την υψηλότερη απόδοση επιτυγχάνεται μείωση του απαιτούμενου χρόνου

ανάλυσης του φίλτρου ή/και καλύτερη στατιστική (μικρότερη αβεβαιότητα) στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ^7Be . Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη μέτρηση της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου ισοτόπου σε δείγματα μικρής ενεργότητας, καθώς και την αποδοτικότερη παρακολούθηση των μεταβολών της συγκέντρωσης του ισοτόπου σε μικρή κλίμακα χρόνου, μεταβολές οι οποίες κυρίως ενδιαφέρουν το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Παράλληλα με την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης, λόγω της κατασκευής θήκης από Plexiglas, η διαδικασία διπλώματος και συσκευασίας του φίλτρου που υιοθετήθηκε επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη επαναληψιμότητα κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων, με προφανείς επιπτώσεις στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της.

Όσον αφορά στη συστηματική αβεβαιότητα η οποία συνοδεύει την απόδοση που εκτιμάται κατά την προσομοίωση, αυτή είναι δύσκολο να υπολογισθεί. Ωστόσο, έγιναν ορισμένες σκέψεις οι οποίες οδήγησαν σε εκτίμηση του επιπέδου της συστηματικής αυτής αβεβαιότητας. Επισημαίνεται πάντως ότι για την παρακολούθηση μεταβολών της συγκέντρωσης του ^7Be στην ατμόσφαιρα, εφόσον χρησιμοποιείται τυποποιημένο πρωτόκολλο δειγματοληψίας-ανάλυσης, πρωτεύοντα ρόλο παίζει η τυχαία αβεβαιότητα κατά την ανάλυση, η οποία έχει ελαττωθεί εξαιτίας της νέας βαθμονόμησης.

Στο 4^ο κεφάλαιο της Δ.Ε. πραγματοποιήθηκε ως εφαρμογή η ανάλυση μίας σειράς από φίλτρα αέρα τα οποία συλλέχθηκαν με το τυποποιημένο πρωτόκολλο δειγματοληψίας-ανάλυσης για προσδιορισμό του ^7Be στον αέρα. Τα φίλτρα αναλύθηκαν και με χρήση των τριών βαθμονομήσεων, συγκεκριμένα:

- i. γεωμετρία 12 για ανάλυση φίλτρων (ισχύουσα πειραματική βαθμονόμηση)
- ii. γεωμετρία 12 (βαθμονόμηση μέσω προσομοίωσης)
- iii. νέα γεωμετρία ανάλυσης φίλτρων (βαθμονόμηση μέσω προσομοίωσης)

Όπως αποδείχθηκε οι τιμές της ραδιενέργειας του ^7Be στον αέρα δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, κυρίως λόγω του σχετικά μεγάλου τυχαίου σφάλματος των μετρήσεων. Ειδικότερα, για τις τιμές που προέκυψαν από την ισχύουσα βαθμονόμηση 'γεωμετρίας 12', διαπιστώνεται ότι σε κάθε περίπτωση ήταν υψηλότερες των τιμών που προκύπτουν από τις άλλες βαθμονομήσεις και μάλιστα υψηλές, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας. Αυτό είναι συμβατό με την παρατήρηση που έχει γίνει προηγουμένως, σχετικά με την υπερεκτίμηση της ραδιενέργειας η οποία γίνεται όταν χρησιμοποιείται η ισχύουσα βαθμονόμηση της 'γεωμετρίας 12'. Αυτό αποτελεί

και μία ένδειξη ότι η συστηματική αβεβαιότητα των μετρήσεων του ^7Be με χρήση της νέας γεωμετρίας και της νέας απόδοσης, παρόλο που δεν έχει προσδιορισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια, είναι χαμηλότερη από τη συστηματική αβεβαιότητα που εισάγεται κατά τις αναλύσεις με την ισχύουσα βαθμονόμηση της γεωμετρίας 12.

Στην παρούσα Δ.Ε. έγιναν και μετρήσεις του ^7Be στα πλαίσια ενός ημερήσιου κύκλου δειγματοληψιών. Οι μετρήσεις έγιναν με τη νέα γεωμετρία και βαθμονόμηση, με στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας παρακολούθησης σχετικά μικρής διακύμανσης της ραδιενέργειας του ^7Be . Από τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι υπάρχει διακύμανση μέσα στα πλαίσια μίας ημέρας και είναι δυνατή η παρακολούθηση της διακύμανσης αυτής.

Στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του ΕΠΤ-ΕΜΠ πραγματοποιούνται δειγματοληψίες νερού βροχής και γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις του, με στόχο τον προσδιορισμό του ^7Be . Για το λόγο αυτό το νερό φιλτράρεται μέσα από κατάλληλα φίλτρα τα οποία εν συνεχεία αναλύονται, ενώ αναλύεται επίσης και το νερό μετά από το φιλτράρισμα. Στα πλαίσια της Δ.Ε. βαθμονομήθηκε η γεωμετρία ανάλυσης των φίλτρων νερού με χρήση της τεχνικής προσομοίωσης Monte-Carlo. Κατά την ανάλυση δείγματος νερού βροχής που ακολούθησε, διαπιστώθηκε ότι η συγκέντρωση του ^7Be που προσδιορίστηκε στο νερό ήταν πολύ χαμηλή, σε σχέση με αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας. Ακολούθησαν διάφοροι προβληματισμοί και, από υπολογισμούς που έγιναν, προέκυψε ότι θα μπορούσε να έχει παραμείνει στο νερό που απομένει μετά από το φιλτράρισμα αρκετά υψηλή ποσότητα ^7Be , χωρίς όμως να υπερβαίνει το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσής του στο νερό, ώστε να ανιχνεύεται. Για το λόγο αυτό κρίθηκε ότι για τον προσδιορισμό του ^7Be στο νερό της βροχής, η διαδικασία διέλευσης του νερού μέσα από το φίλτρο δεν είναι επαρκής, αλλά θα πρέπει να συνοδεύεται από ανάλυση και του νερού. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα θα πρέπει να το νερό να έχει υποστεί επεξεργασία, ώστε να έχει μειωθεί ο όγκος του νερού (για παράδειγμα με εξάτμιση) με αντίστοιχη αύξηση της ειδικής ραδιενέργειας του ^7Be , έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευσή του.

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα Δ.Ε. οδήγησε σε βελτίωση της ποιότητας των μετρήσεων του ^7Be στα ατμοσφαιρικά αερολύματα που γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και έβαλε τις βάσεις για την ανίχνευση του ^7Be και στο βρόχινο νερό. Η εργασία αυτή θα μπορούσε να συνεχισθεί στο μέλλον με:

- i. τον περαιτέρω έλεγχο της ακρίβειας της βαθμονόμησης της νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου, με χρήση προτύπων πηγών.
- ii. την ανάπτυξη μεθοδολογίας για το λεπτομερή προσδιορισμό της συστηματικής αβεβαιότητας της απόδοσης για τη νέα γεωμετρία.
- iii. την επέκταση της βαθμονόμησης απόδοσης για τη νέα γεωμετρία ανάλυσης, προκειμένου να προσδιορισθεί η συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης για την ενεργειακή περιοχή 0-2000MeV. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με χρήση τεχνικών προσομοίωσης σε συνδυασμό με πρότυπες πηγές και πειραματική βαθμονόμηση.
- iv. τη διερεύνηση της δυνατότητας προσδιορισμού και των βραχύβιων θυγατρικών του ^{222}Rn στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ με χρήση της νέας γεωμετρίας ανάλυσης.
- v. τη βελτίωση της τεχνικής ανίχνευσης του ^7Be στο νερό, που απομένει μετά από το φιλτράρισμα του βρόχινου νερού. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην επεξεργασία του νερού.

Στόχος όλων των παραπάνω βελτιώσεων θα είναι η πραγματοποίηση συστηματικών μετρήσεων ακριβείας του ^7Be στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και στο νερό της βροχής, που θα αποσκοπεί στη διερεύνηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν την κινητική του στην ατμόσφαιρα.

Παράρτημα Α:

Στάθμιση cps και R

Πριν παρουσιαστούν οι υπολογισμοί που έγιναν στην παράγραφο 2.3.4 πρέπει να αναφερθεί ότι στο παρόν παράρτημα διατηρούνται τα δεκαδικά ψηφία των τιμών για να αποφευχθεί η εισαγωγή σφαλμάτων λόγω στρογγυλοποίησης στο ενδιάμεσο αυτό στάδιο.

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV:

Γεωμετρία 2:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.1 βρίσκουμε τις καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (counts per seconds-cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 2 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV						
	<i>cps</i> <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>Καθαρά</i> <i>cps</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>
LEGe	6.4952	0.0129	6.4823	0.30	2.303	0.304
XtRa	12.511	0.0073	12.5038	1.94	7.212	1.94

Πίνακας Α.1: Cps για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

Με βάση της καμπύλες βαθμονόμησης για τον κάθε ανιχνευτή υπολογίζονται οι αποδόσεις των ανιχνευτών στη συγκεκριμένη ενέργεια, οι οποίες είναι ίσες με: $\text{eff}(\text{LEGe})=0.0294 \pm 2.97\%$ και $\text{eff}(\text{XtRa})=0.056 \pm 3.39\%$.

Με τη βοήθεια του προγράμματος calceff βρίσκουμε τους συντελεστές αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια για τους δύο ανιχνευτές και βρίσκουμε ότι για τον LEGe είναι 1.122 και για τον XtRa 1.126.

Το ποσοστό εκπομπής του ^{234}Th για φωτόνια 63.29keV υπολογίστηκε ίσο με $0.039 \pm 1.56\%$.

Η στάθμιση των τελικών τιμών της ραδιενέργειας, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV								
	R διορθωμένο	$cps\ unc.$ (1σ , %)	$eff\ unc.$ (1σ , %)	σ_i	w_i ($\times 10^{-6}$)	$w_i \cdot R_i$	$R_i - \bar{R}$	$w_i (R_i - \bar{R})^2$
LEGe	24611	0.304	2.967	733.01	1.85607	0.04568	-53.91	0.0053938
XtRa	24758	1.941	3.395	968.16	1.06685	0.02641	93.79	0.0093840

Πίνακας A.2: Στάθμιση ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας που υπολογίζεται με βάση τη σχέση (2.7) είναι: $\bar{R} = 24664 \frac{Bq}{kg}$.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας που συνοδεύει την σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας υπολογίζονται πρώτα οι δύο μεταβλητότητες με βάση τις σχέσεις (2.8α και β): internal variance = 342123 και external variance = 5056.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις σ :

- internal uncertainty = 584.91 \Rightarrow 2.37%
- external uncertainty = 71.10 \Rightarrow 0.29% .

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν για τη στάθμιση διαφορετικών μετρήσεων σαν αβεβαιότητα της τιμής προς στάθμιση επιλέγεται το 2.37%.

Γεωμετρία 12:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.1 βρίσκουμε την καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής, σε μονάδες cps για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 12 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 63.29keV							
	cps_{12} φάσματος	$cps_{12}\ unc.$ (1σ , %)	σ	w_i	$w_i \cdot cps_i$	$cps_i - \bar{cps}$	$w_i (cps_i - \bar{cps})^2$
LS0110412A	1.2554	0.73	0.00913	11996.70	15060.30	-0.04	22.8897
LS0110412B	1.3202	0.79	0.01040	9242.76	12202.29	0.02	4.1342
LS0110412C	1.3354	0.79	0.01052	9033.26	12063.21	0.04	11.9494

Πίνακας A.3: Στάθμιση cps_{12} για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή των cps, εδώ η στάθμιση έχει γίνει μόνο ως προς την αβεβαιότητα του μεγέθους cps, με βάση τη σχέση (2.7) είναι: $cps_{12} = 1.30$.

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις είναι:

internal variance = $3.30 \cdot 10^{-5}$ \rightarrow internal uncertainty = 0.00575 \Rightarrow 2.76% και

external variance = 0.00129 \rightarrow external uncertainty = 0.0359 \Rightarrow 2.76% .

Επομένως η αβεβαιότητα των cps_{12} είναι 2.76%.

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV:

Γεωμετρία 2:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.2 βρίσκουμε τις καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (counts per seconds-cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 2 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV						
	<i>cps₂</i> <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>Καθαρά</i> <i>cps</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>
LEGe	8.31117	4.67	0.0192	3.27	8.2920	4.68
XtRa	16.05943	1.45	0.0158	3.64	16.0437	1.46

Πίνακας A.4: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών στη συγκεκριμένη ενέργεια είναι ίσες με $\text{eff}(\text{LEGe})=0.03069 \pm 2.97\%$ και $\text{eff}(\text{XtRa})=0.0579 \pm 3.40\%$.

Με τη βοήθεια του προγράμματος calceff βρίσκουμε τους συντελεστές αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια για τους δύο ανιχνευτές και βρίσκουμε ότι για τον LEGe είναι 1.104 και για τον XtRa 1.107.

Το ποσοστό εκπομπής του ^{234}Th για φωτόνια 92.74keV υπολογίστηκε ίσο με $0.0531 \pm 2.71\%$.

Η στάθμιση των τελικών τιμών της ραδιενέργειας, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV								
	<i>R</i> <i>διορθωμένο</i>	<i>cps unc.</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>eff unc.</i> <i>(1σ, %)</i>	σ_i	w_i <i>(x10⁻⁶)</i>	$w_i \cdot R_i$	$R_i - \bar{R}$	$w_i (R_i - \bar{R})^2$
LEGe	22470	4.677	2.967	1244.61	0.6456	0.01451	-345.46	0.077044
XtRa	22976	1.456	3.395	848.73	1.3882	0.03190	160.65	0.035826

Πίνακας A.5: Στάθμιση ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας με βάση τη σχέση (2.7) είναι ίση με: $\bar{R} = 22815 \text{ Bq/kg}$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της παραπάνω σταθμισμένης τιμής είναι: $\text{internal variance} = 491693.95 \rightarrow \text{internal uncertainty} = 701.21 \Rightarrow 3.07\%$ και $\text{external variance} = 55497.60 \rightarrow \text{external uncertainty} = 235.58 \Rightarrow 1.03\%$. Επομένως, η αβεβαιότητα της σταθμισμένης μέσης ραδιενέργειας είναι $3.07\% (1\sigma)$.

Γεωμετρία 12:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.2 γίνεται η στάθμιση των κρούσεων στη μονάδα του χρόνου (cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 12 η οποία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 92.74keV							
	cps_{12} φάσματος	$cps_{12} unc.$ (1σ, %)	σ_i	w_i	$w_i \cdot cps_i$	$cps_i - \overline{cps}$	$w_i (cps_i - \overline{cps})^2$
LS0110412A	1.81	1.27	0.02300	1889.78	3415.63	0.00	0.010851
LS0110412B	1.79	1.09	0.01952	2625.81	4697.24	-0.02	0.624523
LS0110412C	1.82	1.03	0.01873	2849.27	5180.56	0.01	0.503274

Πίνακας A.6: Στάθμιση των cps_{12} για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή των cps με βάση τη σχέση (2.7) είναι: $cps_{12} = 1.81$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της σταθμισμένης μέσης τιμής είναι $internal\ variance = 0.000136 \rightarrow internal\ uncertainty = 0.0117 \Rightarrow 0.65\%$ και $external\ variance = 0.000163 \rightarrow external\ uncertainty = 0.0128 \Rightarrow 0.71\%$.

Επομένως, η αβεβαιότητα των cps_{12} είναι 0.71%.

Φωτόνια ενέργειας 143.76keV:

Γεωμετρία 2:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.3 βρίσκουμε τις καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (counts per seconds-cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 2 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 143.76keV						
	<i>cps</i> φάσματος	<i>Αβεβαιότητα</i> στο 1σ (%)	<i>cps</i> υποστρώματος	<i>Αβεβαιότητα</i> στο 1σ (%)	<i>Καθαρά</i> <i>cps</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> στο 1σ (%)
LEGe	1.0926	1.15	0.0017	22.0	1.0910	1.15
XtRa	2.2403	3.09	0.0016	34.9	2.2388	3.09

Πίνακας A.7: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών στη συγκεκριμένη ενέργεια είναι ίσες με $\text{eff}(\text{LEGe})=0.02554 \pm 2.97\%$ και $\text{eff}(\text{XtRa})=0.0543 \pm 3.40\%$.

Με τη βοήθεια του προγράμματος calceff βρίσκουμε τους συντελεστές αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια για τους δύο ανιχνευτές και βρίσκουμε ότι για τον LEGe είναι 1.109 και για τον XtRa 1.112.

Το ποσοστό εκπομπής του ^{235}U για φωτόνια 143.76keV υπολογίστηκε ίσο με $0.108 \pm 2.37\%$.

Η στάθμιση των τελικών τιμών της ραδιενέργειας, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 143.76keV								
	<i>R</i> διορθωμένο	<i>cps unc.</i> (1σ , %)	<i>eff unc.</i> (1σ , %)	σ_i	w_i ($\times 10^{-4}$)	$w_i \cdot R_i$	$R_i - \bar{R}$	$w_i (R_i - \bar{R})^2$
LEGe	1739	1.154	2.967	55.350	3.264	0.56753	22.23	0.1613201
XtRa	1674	3.093	3.395	76.864	1.693	0.28327	-42.87	0.3111009

Πίνακας A.8: Στάθμιση ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 143.76keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας με βάση τη σχέση (2.7) είναι ίση με: $\bar{R} = 1716 \text{ Bq/kg}$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της σταθμισμένης τιμής είναι: $\text{internal variance} = 2017.46 \rightarrow \text{internal uncertainty} = 44.92 \Rightarrow 2.62\%$ και $\text{external variance} = 953.09 \rightarrow \text{external uncertainty} = 30.87 \Rightarrow 1.80\%$. Επομένως, η τιμή της αβεβαιότητας της τιμής προς στάθμιση είναι $2.62\%(1\sigma)$.

Φωτόνια ενέργειας 163.35keV:

Γεωμετρία 2:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.4 βρίσκουμε τις καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (counts per seconds-cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 2 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 163.35keV						
	<i>cps₂</i> <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>Καθαρά</i> <i>cps₂</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>
LEGe	0.3177	3.58	0.0011	33.2	0.3166	3.59
XtRa	0.6826	9.64	0.0008	69.5	0.6818	9.65

Πίνακας A.9: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών στη συγκεκριμένη ενέργεια είναι ίσες με $\text{eff}(\text{LEGe})=0.02313\pm 2.97\%$ και $\text{eff}(\text{XtRa})=0.0523\pm 3.40\%$.

Το ποσοστό εκπομπής για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV του ^{235}U υπολογίστηκε ίσο με $0.047\pm 2.37\%$.

Από το πρόγραμμα calceff βρίσκουμε ότι οι συντελεστές αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια είναι για τον LEGe 1.115 και για τον XtRa 1.127.

Η στάθμιση των τελικών τιμών της ραδιενέργειας, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 163.35keV								
	<i>R</i> <i>διορθωμένο</i>	<i>cps unc.</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>eff unc.</i> <i>(1σ, %)</i>	σ_i	w_i <i>(x10⁻⁴)</i>	$w_i \cdot R_i$	$R_i - \bar{R}$	$w_i (R_i - \bar{R})^2$
LEGe	1209	3.589	2.967	56.313	3.1534	0.38133	13.14	0.054458
XtRa	1140	9.648	3.395	116.572	0.7359	0.08388	-56.31	0.233364

Πίνακας A.10: Στάθμιση ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 163.35keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας με βάση τη σχέση (2.7) είναι:

$$\bar{R} = 1196 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της σταθμισμένης τιμής είναι: internal variance = 2571.15 → internal uncertainty = 50.71 ⇒ 4.24% και external variance = 740.03 → external uncertainty = 27.20 ⇒ 2.27%. Επομένως, η αβεβαιότητα της τιμής προς στάθμιση είναι 4.24%(1σ).

Φωτόνια ενέργειας 185.72keV:

Γεωμετρία 2:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.1.5 βρίσκουμε τις καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (counts per seconds-cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 2 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 185.72keV						
	<i>cps₂</i> <i>φάσματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>cps</i> <i>υποστρώματος</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>	<i>Καθαρά</i> <i>cps₂</i>	<i>Αβεβαιότητα</i> <i>στο 1σ (%)</i>
LEGe	5.8697	0.24	0.0071	4.97	5.8626	0.24
XtRa	14.4450	0.55	0.0111	5.03	14.4339	0.55

Πίνακας A.11: Cps γεωμετρίας 2 για τα φωτόνια ενέργειας 185.72keV

Οι αποδόσεις των ανιχνευτών στη συγκεκριμένη ενέργεια είναι ίσες με $\text{eff}(\text{LEGe})=0.02049 \pm 2.97\%$ και $\text{eff}(\text{XtRa})=0.0500 \pm 3.40\%$.

Το ποσοστό εκπομπής του ^{235}U για φωτόνια 185.72keV βρέθηκε υπολογίστηκε ίσο με $0.54 \pm 1.57\%$.

Με τη βοήθεια του προγράμματος calceff βρίσκουμε τους συντελεστές αυταπορρόφησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια για τους δύο ανιχνευτές και βρίσκουμε ότι για τον LEGe 1.123 είναι και για τον XtRa 1.127.

Η στάθμιση των τελικών τιμών της ραδιενέργειας, διορθωμένες ως προς το φαινόμενο της αυταπορρόφησης, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 185.72keV								
	<i>R</i> <i>διορθωμένο</i>	<i>cps unc.</i> <i>(1σ, %)</i>	<i>eff unc.</i> <i>(1σ, %)</i>	σ_i	w_i <i>(x10⁻⁴)</i>	$w_i \cdot R_i$	$R_i - \bar{R}$	$w_i (R_i - \bar{R})^2$
LEGe	2300	0.243	2.967	68.466	2.1333	0.49063	-8.47	0.0152978
XtRa	2320	0.546	3.395	79.771	1.5715	0.36456	11.50	0.0207667

Πίνακας A.12: Στάθμιση ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 185.72keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας με βάση τη σχέση (2.7) είναι:

$$\bar{R} = 2308 \text{ Bq/kg}$$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της παραπάνω σταθμισμένης τιμής είναι: internal variance = 2688 → internal uncertainty = 51.95 ⇒ 2.25% και external variance = 97.35 → external uncertainty = 9.87 ⇒ 0.43%. Άρα, η αβεβαιότητα της τιμής προς στάθμιση είναι 2.25%(1σ).

Φωτόνια ενέργειας 661.62keV:

Γεωμετρία 2:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.2.2 για τη ραδιενεργή τέφρα βρίσκουμε τις καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου και στη μονάδα μάζας για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 2 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 661.62keV						
HPGe	<i>cps</i> ₂ φάσματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	<i>cps</i> υποστρώματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Καθαρά <i>cps</i> ₂ /kg	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)
MS082B	933	0.12	0.002486	13.00	2313	0.05
MS083B	998	0.06	0.002486	13.00	2484	0.02
GeLi						
GeLi	<i>cps</i> ₂ φάσματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	<i>cps</i> υποστρώματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Καθαρά <i>cps</i> ₂ /kg	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)
MS082B	564	0.12	0.0065	6.36	1399	0.05
MS083B	595	0.12	0.0065	6.36	1480	0.05

Πίνακας A.13: Υπολογισμός καθαρών *cps*₂ για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV

Η στάθμιση των παραπάνω κρούσεων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 661.62keV								
HPGe	<i>cps</i> ₂ /kg	<i>cps</i> ₂ unc. (1σ, %)	mass unc. (1σ, %)	σ_i	w_i	$w_i \cdot cps_i$	$cps_i - \overline{cps}$	$w_i (cps_i - \overline{cps})^2$
MS082B	2313	0.05	0.01	1.14295	0.76550	1770.85	-131.16	13168.46
MS083B	2484	0.02	0.01	0.63084	2.5129	6243.00	39.96	4011.57
GeLi								
GeLi	<i>cps</i> ₂ /kg	<i>cps</i> ₂ unc. (1σ, %)	mass unc. (1σ, %)	σ_i	w_i	$w_i \cdot cps_i$	$cps_i - \overline{cps}$	$w_i (cps_i - \overline{cps})^2$
MS082C	1399	0.05	0.01	0.69137	2.0921	2927.48	-38.49	3099.609
MS083C	1480	0.05	0.01	0.72197	1.9185	2838.94	41.97	3380.081

Πίνακας A.14: Στάθμιση καθαρών *cps*₂ για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή των *cps* με βάση τη σχέση (2.7) είναι:

- $cps(HPGe)_2=2444$
- $cps(GeLi)_2=1438$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις είναι:

- για τον HPGe:

internal variance = 0.3050309 → internal uncertainty = 0.55230 ⇒ 0.02% και

external variance = 5240.44 → external uncertainty = 72.391 ⇒ 2.96% .

- για τον GeLi:

internal variance = 0.249341 → internal uncertainty = 0.49934 ⇒ 0.03% και

external variance = 1615.65 → external uncertainty = 40.1952 ⇒ 2.80% .

Επομένως, η αβεβαιότητα των cps₂ είναι:

- unc.cps(HPGe)₂=2.96% (1σ)
- unc.cps(GeLi)₂=2.80% (1σ)

Το φαινόμενο της αυταπορρόφησης παίζει σημαντικό ρόλο και εφαρμόζεται διόρθωση της ραδιενέργειας του δείγματος μόνο για τα φωτόνια που η ενέργεια τους είναι μικρότερη από 200keV. Επομένως η υπολογιζόμενη ραδιενέργεια για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV δεν χρειάζεται διόρθωση για αυταπορρόφηση.

Η στάθμιση των τελικών τιμών της ραδιενέργειας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 661.62keV							
	R (Bq/kg)	R unc. (1σ, %)	σ_i	w_i ($\times 10^{-8}$)	$w_i \cdot R_i$	$R_i - \bar{R}$	$w_i (R_i - \bar{R})^2$
LEGe	276066	3.46	9548.57	1.097	0.003028	6034.81	0.3994386
XtRa	265095	3.26	8635.33	1.341	0.003556	-4935.65	0.3266862

Πίνακας A.15: Στάθμιση ραδιενέργειας για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της ραδιενέργειας με βάση τη σχέση (2.7) είναι:

$$\bar{R} = 270031 \text{ Bq/kg}$$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της σταθμισμένης τιμής είναι:
 internal variance = 41020084 → internal uncertainty = 6405 ⇒ 2.37% και external
 variance = 29785700 → internal uncertainty = 5458 ⇒ 2.02% . Άρα, η αβεβαιότητα της
 τιμής προς στάθμιση είναι 2.37%(1σ).

Γεωμετρία 12:

Από τα φάσματα που αναφέρονται στην παράγραφο 2.3.4.2.2 βρίσκονται τα cps για τη συγκεκριμένη ενέργεια και τη γεωμετρία 12 και υπολογίζεται η αντίστοιχη απόδοση φωτοκορυφής. Η στάθμιση των δύο τιμών φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 661.62keV							
	eff_{12}	eff_{12} unc. (1σ, %)	σ	w_i	$w_i \cdot eff_i$	$eff_i - \bar{eff}$	$w_i (eff_i - \bar{eff})^2$
SID0412A	0.0524	2.59	0.00135	549359.4	28573.16	0.0002	0.01646
SID0412B	0.0520	2.59	0.00135	542070.8	28382.98	0.0001	0.01668

Πίνακας A.16: Στάθμιση απόδοσης για Sidenor, γεωμετρία 12 και φωτόνια ενέργειας 661.62keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή της απόδοσης με βάση τη σχέση (2.7) είναι:
 $\bar{\text{eff}}_{12} = 0.05219$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της παραπάνω σταθμισμένης τιμής είναι: $\text{internal variance} = 9.16 \cdot 10^{-7} \rightarrow \text{internal uncertainty} = 0.000957 \Rightarrow 1.83\%$
και $\text{external variance} = 3.04 \cdot 10^{-8} \rightarrow \text{external uncertainty} = 0.000174 \Rightarrow 0.33\%$

Φωτόνια ενέργειας 1460.80keV:

Γεωμετρία 12:

Με βάση τα φάσματα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.4.4 υπολογίζονται οι καθαρές κρούσεις στη μονάδα του χρόνου (counts per seconds-cps) για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και για τη γεωμετρία 12 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 1460.80keV						
	<i>cps</i> ₁₂ φάσματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	<i>cps</i> υποστρώματος	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)	Καθαρά <i>cps</i> ₁₂	Αβεβαιότητα στο 1σ (%)
KCI0412A	1.849	0.42	0.0047	6.30	1.844	0.43
KCI0412B	1.846	0.24	0.0047	6.30	1.841	0.24

Πίνακας A.17: Υπολογισμός καθαρών *cps*₁₂ για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV

Η στάθμιση των *cps*₁₂ φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Φωτόνια ενέργειας 1460.80keV							
	<i>cps</i> ₁₂	<i>cps unc.</i> (1σ, %)	σ_i	w_i	$w_i \cdot cps_i$	$cps_i - \overline{cps}$	$w_i (cps_i - \overline{cps})^2$
KCI0412A	1.84	0.43	0.007824	16337.24	30131.35	0.0022	0.078867
KCI0412B	1.84	0.24	0.004464	50191.17	92423.21	-0.0007	0.025671

Πίνακας A.18: Στάθμιση *cps*₁₂ για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV

Η σταθμισμένη μέση τιμή των *cps*₁₂ με βάση τη σχέση (2.7) είναι: $cps_{12} = 1.84$

Οι μεταβλητότητες και οι τυπικές αποκλίσεις της παραπάνω σταθμισμένης τιμής είναι: $\text{internal variance} = 1.503 \cdot 10^{-5} \rightarrow \text{internal uncertainty} = 0.0039 \Rightarrow 0.21\%$ και $\text{external variance} = 1.571 \cdot 10^{-6} \rightarrow \text{external uncertainty} = 0.0013 \Rightarrow 0.07\%$. Άρα, η αβεβαιότητα της τιμής προς στάθμιση είναι 0.21%(1σ).

Παράρτημα Β:

Τροποποιήσεις κωδίκων (τύπου .f)

Κώδικας Β.1: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για πηγή όγκου για το φίλτρο Ø47mm

```
C ---- Initial position ...
      RR2=2.35D0*2.35D0
4444  X=RAND(1.0D0)*2.35D0
      Y=RAND(2.0D0)*2.35D0
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      Z=RAND(3.0D0)*0.199D0+0.515D0
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
```

Κώδικας Β.2: Τροποποίηση του κώδικα PENMAIN για έλεγχο ομοιομορφίας σημείων για το φίλτρο διαμέτρου 47mm

```
C ---- Initial position ...
      OPEN (98,FILE='SHMEIA_X_Y-Z.DAT')
      OPEN (99,FILE='SHMEIA_Z_X-Y.DAT')
      RR2=2.35D0*2.35D0
4444  X=RAND(1.0D0)*2.35D0
      Y=RAND(2.0D0)*2.35D0
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      Z=RAND(3.0D0)*0.169D0+0.515D0
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
      IF(X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
      WRITE (98,*) X, Y, Z
      ENDIF
      IF(Z.GE.0.59949D0.AND.Z.LE.0.59951D0) THEN
      WRITE (99,*) X, Y, Z
      ENDIF
```

Κώδικας B.3: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για πηγή όγκου για τη γεωμετρία 8

```
C ---- Initial position ...
C **** Modification of random sampling in a geometry 8 volume source
C **** with varying radius {3.54-3.74cm}, 1.0cm height, positioned
C **** 0.7cm over the detector window
4444 ZZ=RAND(1.D0)
      ZH=ZZ*1.D0
      Z=ZH+0.7D0
      R=ZH*0.029D0+3.54D0
      X=RAND(2.0D0)*R
      Y=RAND(3.0D0)*R
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RR2=R*R
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
```

Κώδικας B.4: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για τον έλεγχο ομοιομορφίας σημείων
για τη γεωμετρία 8

```
C ---- Initial position ...
      OPEN (98,FILE='SHMEIA_X_Y-Z.DAT')
      OPEN (99,FILE='SHMEIA_Z_X-Y.DAT')
C **** Modification of random sampling in a geometry 8 volume source
C **** with varying radius{3.54-3.74cm},1.0cm height, positioned
C **** 0.7cm over the detector window
4444 ZZ=RAND(1.D0)
      ZH=ZZ*1.D0
      Z=ZH+0.7D0
      R=ZH*0.029D0+3.54D0
      X=RAND(2.0D0)*R
      Y=RAND(3.0D0)*R
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RR2=R*R
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
      IF(X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
      WRITE (98,*) X, Y, Z
      ENDIF
      IF(Z.GE.1.099D0.AND.Z.LE.1.101D0) THEN
      WRITE (99,*) X, Y, Z
      ENDIF
```

Κώδικας B.5: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για γεωμετρία 12

```
C ---- Initial position ...
C **** Cube with dimensions: length=12.7cm, width=10.16cm,
C **** height=0.26cm, at 0.015cm from the Plexiglas cup of 0.1cm
height
C **** (0.015+0.1+0.4=0.53cm from the detector window)
4444 X=RAND(1.0D0)*6.35D0
      Y=RAND(2.0D0)*5.08D0
      ZZ=RAND(3.0D0)*0.26D0
      Z=ZZ+0.4+0.1+0.015
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
```

Κώδικας B.6: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για τον έλεγχο ομοιομορφίας σημείων
για τη γεωμετρία 12

```
C ---- Initial position ...
      OPEN (98,FILE='SHMEIA_X_Y-Z.DAT')
      OPEN (99,FILE='SHMEIA_Z_X-Y.DAT')
C **** Cube with dimensions:
length=12.7cm,width=10.16cm,height=0.26cm,
C **** at 0.015cm from the Plexiglas cup with 0.1cm height
C **** (0.015+0.1+0.4=0.53cm from the detector window)
4444 X=RAND(1.0D0)*6.35D0
      Y=RAND(2.0D0)*5.08D0
      ZZ=RAND(3.0D0)*0.26D0
      Z=ZZ+0.4+0.1+0.015
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
      WRITE (98,*) X, Y, Z
      ENDIF
      IF(Z.GE.0.62999D0.AND.Z.LE.0.63001D0) THEN
      WRITE (99,*) X, Y, Z
```


Κώδικας B.7: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για τη νέα γεωμετρία

```
C ---- Initial position ...
C          ****          Cube          with          dimensions:
length=7.05cm,width=6.63cm,height=0.76cm,
C **** at 0.03cm from the Plexiglas cup with 0.1cm height
C **** (0.03+0.1+0.4=0.53cm from the detector window)
4444      X=RAND(1.0D0)*3.515D0
          Y=RAND(2.0D0)*3.525D0
          ZZ=RAND(3.0D0)*0.76D0
          Z=ZZ+0.4+0.1+0.03
          BX=RAND(4.0D0)
          BY=RAND(5.0D0)
          IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
          IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
```

Κώδικας B.8: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για έλεγχο ομοιομορφίας σημείων για τη νέα γεωμετρία

```
C ---- Initial position ...
          OPEN (98,FILE='SHMEIA_X_Y-Z.DAT')
          OPEN (99,FILE='SHMEIA_Z_X-Y.DAT')
C **** Cube with dimensions:
length=7.05cm,width=6.63cm,height=0.76cm,
C **** at 0.03cm from the Plexiglas cup with 0.1cm height
C **** (0.03+0.1+0.4=0.53cm from the detector window)
4444      X=RAND(1.0D0)*3.515D0
          Y=RAND(2.0D0)*3.525D0
          ZZ=RAND(3.0D0)*0.76D0
          Z=ZZ+0.4+0.1+0.03
          BX=RAND(4.0D0)
          BY=RAND(5.0D0)
          IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
          IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
          IF(X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
            WRITE (98,*) X, Y, Z
          ENDIF
          IF(Z.GE.0.9099D0.AND.Z.LE.0.9101D0) THEN
            WRITE (99,*) X, Y, Z
          ENDIF
```

Κώδικας B.9: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για φίλτρα νερού

```
C ---- Initial position ...
C **** water filter φ90mm, height=0.2mm(200μm) on the Plexiglas cup
C **** (αμελείται η μεμβράνη) of 0.1cm height
C **** (0.1+0.4=0.5cm from the detector window)
RR2=4.5D0*4.5D0
4444 X=RAND(1.0D0)*4.5D0
      Y=RAND(2.0D0)*4.5D0
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
      ZZ=RAND(3.0D0)*0.02D0
      Z=ZZ+0.4+0.1
```

Κώδικας B.10: Τροποποίηση κώδικα PENMAIN για έλεγχο ομοιομορφίας σημείων για τα φίλτρα νερού

```
C ---- Initial position ...
      OPEN (98,FILE='SHMEIA_X_Y-Z.DAT')
      OPEN (99,FILE='SHMEIA_Z_X-Y.DAT')
RR2=4.5D0*4.5D0
4444 X=RAND(1.0D0)*4.5D0
      Y=RAND(2.0D0)*4.5D0
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      Z=RAND(3.0D0)*0.02D0+0.515D0
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y
      IF(X.GE.-0.001D0.AND.X.LE.0.001D0) THEN
      WRITE (98,*) X, Y, Z
      ENDIF
      IF(Z.GE.0.5099D0.AND.Z.LE.0.5100D0) THEN
      WRITE (99,*) X, Y, Z
      ENDIF
```

Παράρτημα Γ:

Αρχεία εισόδου (τύπου ,in)

Φίλτρο διαμέτρου 47mm:

Αρχείο Γ.1: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV

```
TITLE  Xtra φ47 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 59.54e3    [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0  0  0    [Coordinates of the source]
SDIREC  0  0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180        [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10         [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\main\pencyl\ to the working directory.
PFNAME  xtra_volume.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra47.geo      [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 6.0e4 100    [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45              [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18              [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 6.0e4 1000    [Energy window and number of channels]
EDBODY 14                [Active body; one line for each body]
EDBODY 15                [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat        [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat        [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60               [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9            [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5            [Allotted simulation time, in sec]
```

Αρχείο Γ.2: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV

```

TITLE  xtra φ47 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6162e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME xtra_volume.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra47.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 6.7e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 6.7e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.3: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 834.83keV

```

TITLE  xtra φ47 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 834.83e3  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0     [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
  ..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME xtra_volume.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra47.geo      [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 8.35e5 100  [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45              [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18              [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 8.35e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14             [Active body; one line for each body]
EDBODY  15             [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat      [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat      [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   600           [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9         [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5         [Allotted simulation time, in sec]

```

Δοχεία γεωμετρίας 8:
4MHCl:

Αρχείο Γ.4: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV

```
TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 59.54e3 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0  [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0    [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180     [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10      [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFILENAME geom8_4M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra8.geo     [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 6.0e4 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 6.0e4 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14           [Active body; one line for each body]
EDBODY  15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat    [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat    [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60           [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9        [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5        [Allotted simulation time, in sec]
```

Αρχείο Γ.5: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 279.19keV

```

TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 2.7919e5  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0    [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
  ..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME  geom8_4M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra8.geo   [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 2.8e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 2.8e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14           [Active body; one line for each body]
EDBODY  15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat   [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat   [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60          [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9       [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5       [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.6: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 391.69keV

```
TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3.9169e5  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0  0  0   [Coordinates of the source]
SDIREC  0  0     [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10       [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_4M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 4.0e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 4.0e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14           [Active body; one line for each body]
EDBODY 15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60        [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9      [Desired number of simulated showers]
TIME   2.0e5     [Allotted simulation time, in sec]
```


Αρχείο Γ.7: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 514.00keV

```
TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 5.14e5     [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0     [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT  180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_4M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 5.2e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45            [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18            [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 5.2e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14           [Active body; one line for each body]
EDBODY  15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat    [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat    [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60           [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9        [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5        [Allotted simulation time, in sec]
```

Αρχείο Γ.8: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 661.65keV

```

TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0    [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0     [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180     [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10     [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_4M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 6.7e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 6.7e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14           [Active body; one line for each body]
EDBODY 15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60        [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9     [Desired number of simulated showers]
TIME   2.0e5     [Allotted simulation time, in sec]

```

2MHCI:

Αρχείο Γ.9: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 59.54keV

```
TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 59.54e3 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0  [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0    [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180    [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10      [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFILENAME geom8_2M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 6.0e4 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDT   1e3 6.0e4 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14 [Active body; one line for each body]
EDBODY  15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60 [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

Αρχείο Γ.10: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 279.19keV

```

TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 2.7919e5  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0     [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
  ..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_2M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 2.8e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 2.8e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14            [Active body; one line for each body]
EDBODY 15            [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60        [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9      [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5     [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.11: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 391.69keV

```
TITLE Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3.9169e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_2M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 4.0e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDT 1e3 4.0e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

Αρχείο Γ.12: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 514.00keV

```

TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 5.14e5    [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0    [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180       [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_2M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 5.2e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 5.2e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14          [Active body; one line for each body]
EDBODY  15          [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60        [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9      [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5     [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.13: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 661.65keV

```

TITLE  Xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0    [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0     [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180     [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10      [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom8_2M.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra8.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 6.7e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 6.7e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14           [Active body; one line for each body]
EDBODY 15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60        [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9     [Desired number of simulated showers]
TIME   2.0e5     [Allotted simulation time, in sec]

```

Φίλτρα γεωμετρίας 12:

Αρχείο Γ.14: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 63.29keV

```
TITLE Xtra geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 63.29e3 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom12.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra12.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 6.4e4 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDT 1e3 6.4e4 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 1800 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```


Αρχείο Γ.15: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 92.74keV

```

TITLE  XtRa geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 92.74e3 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0   [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0    [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180    [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10     [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom12.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra12.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 9.3e4 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 9.3e4 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14           [Active body; one line for each body]
EDBODY 15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  1800      [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9     [Desired number of simulated showers]
TIME   2.0e5     [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.16: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 143.96keV

```

TITLE  XtRa geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.4396e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0  0  0      [Coordinates of the source]
SDIREC  0  0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10      [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR  1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3      [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME  geom12.mat      [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra12.geo      [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 1.44e5 100      [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45      [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18      [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET  1e3 1.44e5 1000      [Energy window and number of channels]
EDBODY  14      [Active body; one line for each body]
EDBODY  15      [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat      [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat      [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   300      [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9      [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5      [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.17: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 163.50keV

```

TITLE  XtRa geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.635e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0  [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0    [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180    [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10     [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME  geom12.mat      [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra12.geo     [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 1.64e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45            [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18            [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET  1e3 1.64e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14            [Active body; one line for each body]
EDBODY  15            [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat     [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat     [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   1800         [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9         [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5         [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.18: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV

```

TITLE  Xtra geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 4.7759e5  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0     [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom12.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra12.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 4.8e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 4.8e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14           [Active body; one line for each body]
EDBODY 15           [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  1800      [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9      [Desired number of simulated showers]
TIME   2.0e5      [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.19: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 661.62keV

```

TITLE  XtRa geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6162e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom12.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra12.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 6.7e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDT 1e3 6.7e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.20: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 1173.24keV

```

TITLE Xtra geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.17324e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom12.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra12.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 1.18e6 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDT 1e3 1.18e6 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 600 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.21: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 1332.50keV

```

TITLE  XtRa geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.3325e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0   [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0     [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180     [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10      [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME  geom12.mat      [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra12.geo     [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 1.4e6 100  [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45             [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18             [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET  1e3 1.4e6 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY  14             [Active body; one line for each body]
EDBODY  15             [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat     [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat     [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   1800         [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9        [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5        [Allotted simulation time, in sec]

```

Αρχείο Γ.22: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV

```

TITLE  Xtra geom12 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.4608e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom12.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra12.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 1.4610e6 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 1.4610e6 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 1800 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

```


Φίλτρα νέας γεωμετρίας:

Αρχείο Γ.23: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV

```
TITLE Xtra new geom simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 4.7759e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 10 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME geom13.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra13_6.45mm.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 4.8e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDT 1e3 4.8e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14 [Active body; one line for each body]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 1800 [Dumping period, in sec]

NSIMSH 5.0e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

Αρχείο Γ.24: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 1460.80keV

```

TITLE  Xtra new geom simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.4608e6  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0    [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180       [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10        [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pency1\ to the working directory.
PFNAME  geom13_KCl.mat      [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  xtra13_6.5mm.geo    [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 1.47e6 100      [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45                  [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18                  [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 1.47e6 1000     [Energy window and number of channels]
EDBODY  14                  [Active body; one line for each body]
EDBODY  15                  [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat          [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat          [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   1800               [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9              [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5              [Allotted simulation time, in sec]

```

Φίλτρα βρόχινου νερού:

Αρχείο Γ.25: Αρχείο εισόδου για τα φωτόνια ενέργειας 477.59keV

```
TITLE  xtra water filters simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 4.7759e5   [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0      [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0        [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180        [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   10         [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME water_filter.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra_water_filter.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 4.8e5 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45           [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18           [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 4.8e5 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 14            [Active body; one line for each body]
EDBODY 15            [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat    [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat    [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   1800         [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9        [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5        [Allotted simulation time, in sec]
```

Παράρτημα Δ:

Αρχεία γεωμετρίας (τύπου .geo)

Αρχείο Δ.1: Τροποποίηση στο αρχείο γεωμετρίας για το φίλτρο διαμέτρου 47mm με dead layer σε όλες τις πλευρές

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
  XtRa Geometry Data from Canberra
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1)  PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2)  PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.050000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3)  CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4)  PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.150000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5)  CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6)  PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.110000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7)  CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8)  PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.800000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9)  PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.950000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10)  CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11)  PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.900000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12)  CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
```


(συνέχεια αρχείου Δ.1)

```
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 32), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 33), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 22) Shield Side 3/4
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 33), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 23) Shield Side 4/4
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 24) Shield Down 1/4
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 36), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 25) Shield Down 2/4
MATERIAL( 7)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 38), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 26) Shield Down 3/4
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 38), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 27) Shield Down 4/4
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 28) Polystyrene Cap
MATERIAL( 8)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 29) Plexiglas
MATERIAL( 9)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 30) Ge Dead Layer peripheral
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(+1)
```

(συνέχεια αρχείου Δ.1)

```
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 31) Ge Dead Layer hole
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 32) Ge Dead Layer down
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 33) source volume
MATERIAL( 10)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 51), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 52), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE ( 90) whole xtra
MATERIAL( 0)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 7)
BODY ( 8)
BODY ( 9)
BODY ( 10)
BODY ( 11)
BODY ( 12)
BODY ( 13)
BODY ( 14)
BODY ( 15)
BODY ( 16)
BODY ( 17)
BODY ( 18)
BODY ( 19)
BODY ( 20)
BODY ( 21)
BODY ( 22)
BODY ( 23)
BODY ( 24)
BODY ( 25)
BODY ( 26)
BODY ( 27)
BODY ( 28)
BODY ( 29)
BODY ( 30)
BODY ( 31)
BODY ( 32)
BODY ( 33)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Αρχείο Α.2: Αρχείο γεωμετρίας φίλτρου διαμέτρου 47mm με front και περιφερειακό dead layer

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XtRa Geometry Data from Canberra
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.0500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1100000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.8000000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.9500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10) CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.2500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.2500000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11) PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.9000000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.1000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.1000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) PLANE Z8=-3.60
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 3.6000000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14) PLANE Z9=-5.3
```


Αρχείο 4.3: Αρχείο γεωμετρίας για τη γεωμετρία 8

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XtRa Geometry Data from Canberra
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.0500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1100000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.8000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.9500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10) CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11) PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.9000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.100000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.100000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) PLANE Z8=-3.60
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 3.6000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14) PLANE Z9=-5.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 5.3000000000000000E+00, 0)
```


Αρχείο Δ.4: Αρχείο γεωμετρίας για τη γεωμετρία 12

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XtRa Geometry Data from Canberra
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.0500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1100000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.8000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.9500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10) CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11) PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.9000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.100000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.100000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) PLANE Z8=-3.60
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 3.6000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14) PLANE Z9=-5.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 5.3000000000000000E+00, 0)
```


Αρχείο 4.5: Αρχείο γεωμετρίας για τη νέα γεωμετρία για πάχος φίλτρου 6.45mm

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XtRa Geometry Data from Canberra
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.0500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1100000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.8000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.9500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10) CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.2500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.2500000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11) PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.9000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.1000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.1000000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) PLANE Z8=-3.60
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 3.6000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14) PLANE Z9=-5.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 5.3000000000000000E+00, 0)
```


Αρχείο 4.6: Αρχείο γεωμετρίας για τη νέα γεωμετρία με θήκη από Plexiglas

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
  Xtra Geometry Data from Canberra
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.050000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.150000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.110000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.850000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.800000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.950000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10) CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.250000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11) PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.900000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.100000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.100000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) PLANE Z8=-3.60
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 3.600000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14) PLANE Z9=-5.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 5.300000000000000E+00, 0)
```


Αρχείο 4.7: Αρχείο γεωμετρίας για φίλτρα νερού

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
  Xtra Geometry Data from Canberra
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) PLANE Z1=0.0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) PLANE Z2=-0.05
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.0500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) CYLINDER R1=4.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.0000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) PLANE Z3=-0.15
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) CYLINDER R2=5.00
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 5.0000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) PLANE Z4=-11
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.1100000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) CYLINDER R3=4.85
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.8500000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) PLANE Z5=-0.8
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.8000000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) PLANE Z6=-0.95
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 0.9500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10) CYLINDER R4=4.25
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.2500000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.2500000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11) PLANE Z7=-2.90
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 2.9000000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) CYLINDER R5=4.10
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 4.1000000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 4.1000000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) PLANE Z8=-3.60
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 3.6000000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14) PLANE Z9=-5.3
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 1)
Z-SCALE=( 5.3000000000000000E+00, 0)
```


Βιβλιογραφία

1. Αθανασίου Ν., “Προσομοίωση της Αλληλεπίδρασης Φωτονιακών Ακτινοβολιών και Ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE-Εφαρμογή και Προβλήματα Υπολογισμού Θωρακίσεων και Βαθμονόμησης Ανιχνευτικών Διατάξεων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
2. Αναγνωστάκης Μ., “ γ -Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χαμηλών Ραδιενεργειών στην Περιοχή Χαμηλών Ενεργειών”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.
3. Αναγνωστάκης Μ., βοήθημα στο μάθημα “Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα και Αναλύσεις”, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
4. Βασιλοπούλου Θ., “Προσδιορισμός Συντελεστών Διόρθωσης Απόδοσης Ανιχνευτή HPGe Λόγω Του Φαινομένου της Πραγματικής Σύμπτωσης μέσω Προσομοίωσης Monte Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
5. Βιβλιοθήκη ισοτόπων *Radiation Decay* v.3.6 έκδοση 2001.
6. Βιβλιοθήκη ισοτόπων *JEFF 3.1.1* έκδοση 2007.
7. Ηλεκτρονική βάση δεδομένων “NuDat 2.5”,
www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=19&n=21
8. Καράγγελος Δ., “Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
9. Παπανδρέου Σ., “Προσδιορισμός του Ισοτόπου Κοσμικής Προέλευσης Be-7 στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
10. Ρούνη. Π., “Ανίχνευση Ιχνοστοιχείων σε Δείγματα Περιβαλλοντικής Σημασίας με χρήση Μεθόδων Πυρηνικής Τεχνολογίας”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
11. Al- Azmi D., Sayed A. M., Yatim H.A., “Variations in ^7Be concentrations in the atmosphere of Kuwait during the period 1994 to 1998”, *Applied Radiation and Isotopes* 55 (2001), 413-417.

12. Aldahan A., Possnert G., Vintersved I., “*Atmospheric interactions at northern high latitudes from weekly Be-isotopes in surface air*”, Applied Radiation and Isotopes 54 (2001), 345-353.
13. Azahra M., Camacho Garcia A., Gonzalez-Gomez C., Lopez-Penalver J.J., Bardouni T. El, “*Seasonal ⁷Be concentrations in near- surface air of Granada (Spain) in period 1993- 2001*”, Applied radiation and isotopes 59 (2003), 159-164.
14. Bé M.-M. et al., βιβλιοθήκη ισοτόπων “*Tables des Radionucléides*”, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Pavillon de Breteuil, Sèvres, 2004.
(www.nucleide.org/EDDEP_WG/DDEPdata.htm)
15. Cannizzaro F., Greco G., Raneli M., Spitale M. C. and Tomarchio E., “*Concentration measurements of ⁷Be at ground level air at Palermo, Italy—comparison with solar activity over a period of 21 years*”, Journal of Environmental Radioactivity 72 (2004), 259-271.
16. Cornejo Diaz N. and Jurado Vargas M., “*DETEFF: An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 586 (2008) 204–210.
17. Daish S.R., Dale A.A., Dale C.J., May R., Rowe J.E., “*The temporal variations of ⁷Be, ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po in air in England*”, Journal of Environmental Radioactivity 84 (2005) 457-467.
18. Debertin K. and Helmer R.G., “*Gamma- And X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*”, 1988.
19. Debertin K. and Grosswendt B., “*Efficiency calibration of semiconductor detectors by primary standard sources and Monte Carlo calculations*”, Nuclear Instruments and Methods 203 (1982), 343-352.
20. Dryak P., Kovar P., “*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 (2006), 1346–1349.
21. Durana L., Chudy M., Masarik J., “*Investigation of ⁷Be in the Bratislava atmosphere*”, Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, vol.207, No 2 (1996), 345-356.

22. Gilmore G., Hemingway J., *“Practical Gamma-Ray Spectrometry”*, John Wiley & Sons, Chichester (1995).
23. Gregory J.C., *“Atmospheric radioactive isotopes at orbital altitudes”*, Radiation Measurements, Vol. 26, No. 6, pp. 841-850, 1996.
24. Hotzl H., Rosner G. and Winkler R., *“Correlation of ⁷Be concentrations in surface air and precipitation with the solar cycle”*, Naturwissenschaften 78 (1991), 215-217.
25. Hurtado S., Garcia-Leon M., Garcia-Tenorio R., *“GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration”*, Applied Radiation and Isotopes 61 (2004), 139–143.
26. International Organization for Standardization, Geneva, *“International Organization for Standardization, Guide to the expression of Uncertainty in Measurements”*, 1995.
27. Ioannidou A., Manolopoulou M., Papastefanou C., *“Temporal changes of Be-7 and Pb-210 concentrations in surface air at temperate latitudes (40°N)”*, Applied Radiation and Isotopes 63 (2005), 277–284.
28. Ioannidou A. & Papastefanou C., *“Precipitation scavenging of ⁷Be and ¹³⁷Cs radionuclides in air”*, Journal of Environmental Radioactivity 85 (2006), 121-136.
29. Ioannidou A., Stoulos St., Manolopoulou M. & Papastefanou C., *“Diurnal variations of radioactive aerosols in the urban area of the city of Thessaloniki, Greece”*, European Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, Abstract T07A017P.
30. James F., *“Monte Carlo Theory and Practice Data Handling Division”*, CERN, Geneva (1980).
31. Jurado Vargas M., Guerra A.L., *“Application of PENELOPE code to the efficiency calibration of coaxial germanium detectors”*, Applied Radiation and Isotopes 64 (2006), 1319–1322.
32. Juri Ayub J., Di Gregorio D.E., Velasco H., Huck H., Rizzotto M., Lohaiza F., *“Short-term seasonal variability in ⁷Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina”*, Journal of Environmental Radioactivity 100 (2009), 977–981.
33. Kalos M.H. & Whitlock P.A., *“Monte Carlo Methods”*, Wiley-Interscience, New York (1986).
34. Keyser, Ronald M., Haywood, Susan E., and Upp, Daniel L, *“Performance of the True Coincidence Correction Method in Gamma Vision”*

http://www.ortec-online.com/papers/ans_tcc.pdf

35. Lal D & Peters B., “*Cosmic ray produced radioactivity on the Earth*”, Handbuch der Physik 46 (1967), 551-612.
36. Lal D. & Peters D., “*On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology*”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 12 (1958), 306-328.
37. Likuku A.S., “*Factors influencing ambient concentrations of ^{210}Pb and ^7Be over the city of Edinburgh*”, Journal of Environmental Radioactivity 87 (2006), 289-304.
38. Liu Liye, Ma Jizeng, Didier Franck, Loic de Carlan, Zhang Binqun, “*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 A 564 (2006), 608-613.
39. Meresova J., “*Study of Radioactivity of Atmospheric Aerosol Particles and its Elemental Contents*”, PhD. Thesis, Faculty of mathematics, physics and informatics, Comenius University, Department of Nuclear Physics and Biophysics, Bratislava, 2008.
40. Papastefanou C., Ioannidou A., “*Aerodynamic Size Association of ^7Be in Ambient Aerosols*”, Journal of Environmental Radioactivity 26 (1995), 273-282.
41. Papastefanou C. & Ioannidou A., “*Beryllium-7 and solar activity*”, Applied Radiation and Isotopes 61 (2004), 1493-1495.
42. Peyres V., Garcia-Torano E., “*Efficiency calibration of an extended-range Ge detector by a detailed Monte Carlo simulation*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 (2007), 296-298.
43. Rindi A., Charalambous S., “*Airborne radioactivity produced at high- energy accelerators*”, Nuclear Instruments and Methods 47 (1967), 227-232.
44. Rodenas J., Pascual A., Zarza I., Serradell V., Ortiz J., Ballesteros L., “*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 A 496 (2003), 390-399.
45. Ródenas J., Gallardo S., Ballester S., Primaulta V. and Ortizb J., “*Application of the monte carlo method to the analysis of measurement geometries for the calibration*”

- of a HPGe detector in an environmental radioactivity laboratory*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 263 (2007), 144–148.
46. Rodenas C., Gomez J., Quindos L.S., Fernandez P.L. and Soto J., “*⁷Be Concentrations in Air, Rain Water and Soil in Cantabria (Spain)*”, Applied Radiation and Isotopes 48 (1997), 545-548.
47. Rubinstein R.Y., “*Simulation and the Monte Carlo Methods*”, John Wiley and Sons Inc. (1981).
48. Sepulveda A., Schuller P., Walling D.E., Castillo A., “*Use of ⁷Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall*”, Journal of Environmental Radioactivity 99 (2008), 35-49.
49. Schlager M., “*Precise modeling of coaxial germanium detectors in preparation for a mathematical calibration*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 (2007), 137–140.
50. Vargas M.J., Timón A. F., Díaz N. C., Sánchez D. P., “*Influence of the geometrical characteristics of an HpGe detector on its efficiency*”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 253, No. 3 (2002), 439–443.
51. Vidmar T., Korun M., Vodenik Br., “*A method for calculation of true coincidence summing correction factors for extended sources*”, Applied Radiation and Isotopes 65 (2007), 243-246.
52. Yoichi Ishikawa, Hiroshi Murakami, Tsutomu Sekine & Kenji Yoshihara, “*Precipitation scavenging studies of radionuclides in air using cosmogenic ⁷Be*”, Journal of Environmental Radioactivity 26 (1995), 19-36.
53. Young J.A. and Silker W.B., “*Aerosol deposition velocities on the Pacific and Atlantic oceans calculated from ⁷Be measurements*”, Earth and Planetary Science Letters 50 (1980), 92-104.
54. Yu K. N. & Lee L.Y.L., “*Measurements of atmospheric ⁷Be properties using high-efficiency gamma spectroscopy*”, Applied Radiation and Isotopes 57 (2002), 941–946.
55. <http://www.canberra.com>
56. <http://www.fjspecialty.com/airsamp/it100006.htm>