ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Μελέτη ακτινοβολημένων ανιχνευτών VERDI με σύστημα μείωσης υποστρώματος Compton Suppression

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασιλική Αναγνωστοπούλου

Συνεργασία: Μαρίλια Σάββα

Επιβλέπων Καθηγητής: Μιχαήλ Κόκκορης
Επιβλέπουσα Ερευνήτρια: Θεοδώρα Βασιλοπούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2022

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Μελέτη ακτινοβολημένων ανιχνευτών VERDI με σύστημα μείωσης υποστρώματος Compton Suppression

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασιλική Αναγνωστοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13η Ιουλίου 2022

.....	.....	.....
Μιχαήλ Κόκκορης	Θεοδώρα Βασιλοπούλου	Μαρία Διακάκη
Καθηγητής	Ερευνήτρια Γ΄	Επίκουρη Καθηγήτρια
ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ	ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»	ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ

.....

Βασιλική Αναγνωστοπούλου

Διπλωματούχος Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασιλική Αναγνωστοπούλου, 2022.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή ΕΜΠ Μιχάλη Κόκκορη, την Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ Μαίρη Διακάκη, την Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ Ρόζα Ζάννη-Βλαστού και όλη την ομάδα Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας που έχουν δημιουργήσει, μέσα από το οποίο είχα την ευκαιρία να εκτεθώ και σε άλλα, πολύ ενδιαφέροντα αντικείμενα της φυσικής, να ακούσω και να μάθω από τις εμπειρίες συμφοιτητών μου και να λάβω στήριξη στην εκπόνηση της δικής μου εργασίας.

Ακόμη, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ερευνήτρια Γ' του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Δώρα Βασιλοπούλου και στον ερευνητή Α' του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Ίωνα Ε. Σταματελάτο που ήταν οι πρώτοι που με καλωσόρισαν στο εργαστήριο του ΙΠΡΕΤΕΑ, υπήρξαν παραπάνω από πρόθυμοι να στηρίξουν τη συγκεκριμένη εργασία στη διάρκεια αυτών των μηνών και με έκαναν να νιώσω ότι είμαι σε ένα περιβάλλον όπου υπήρχε πάντα κάποιος από την ομάδα για να απευθυνθώ για οτιδήποτε χρειαζόταν. Τους ευχαριστώ ιδιαίτερα για τα εύστοχα σχόλια, τις παρατηρήσεις και τις διορθώσεις τους χωρίς τα οποία το παρόν κείμενο δε θα είχε ολοκληρωθεί. Ευχαριστώ επίσης την υπόλοιπη ομάδα του εργαστηρίου για τη θετική διάθεση που πάντα υπήρχε και που πέρα από εξαιρετικοί επιστήμονες, είναι όλοι υπέροχοι άνθρωποι.

Στη μεταδιδακτορική Ερευνήτρια του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Μαρίλια Σάββα, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ από όλους γιατί χωρίς την αμέριστη και έμπρακτη βοήθειά της, δε θα είχε πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία. Την ευχαριστώ για το χρόνο που αφιέρωσε, την αμεσότητά της στο να μου μεταδώσει τις απαραίτητες θεωρητικές και τεχνικές γνώσεις που απαιτούνταν για το συγκεκριμένο αντικείμενο, τις λεπτομερείς διορθώσεις της και κυρίως γιατί ήταν πρόθυμη να επιλύσει με τρόπο αναλυτικό, πολλές φορές χιουμοριστικό και πάντα κατατοπιστικό κάθε απορία με την οποία την βομβάρδισα αυτό το διάστημα. Έμαθα πάρα πολλά από τη συνεργασία μαζί της και την ευχαριστώ για το ειλικρινές της ενδιαφέρον, την κατανόησή της και το δικό της ενθουσιασμό για το αντικείμενο, ο οποίος ήταν πηγή έμπνευσης και για εμένα.

Δεν θα είχα φτάσει όμως ως εδώ, αν δεν είχα τη στήριξη και την αγάπη των δικών μου ανθρώπων, των φίλων και της οικογένειάς μου. Από θαυμασμό για τους γονείς μου ήθελα να ακολουθήσω μία επιστήμη σαν κι εκείνους και όταν ο δρόμος μου με έφερε προς τη φυσική, μου έδωσαν κάθε υλική και ηθική στήριξη για να τον ακολουθήσω. Είναι πάντα δίπλα μου σε κάθε μου βήμα και χαίρομαι που μπορώ να μοιραστώ αυτήν τη στιγμή μαζί τους. Τους ευχαριστώ για όλα όσα έχουν κάνει για εμένα και κυρίως που με γέμισαν με τη σιγουριά πως μπορώ να κυνηγήσω ό,τι με κάνει πραγματικά ευτυχισμένη.

Ευχαριστώ, τέλος, τους ανθρώπους που μου έκαναν παρέα όσο διάβαζα και προσπαθούσα να ξεχωρίσω τα φαινόμενα σύμπτωσης μεταξύ τους, τους ανθρώπους που - χωρίς να έχουν επαφή με το αντικείμενο - έμαθαν σχεδόν την παρουσίαση απέξω όσο την πρόβαρα μαζί τους, τους ανθρώπους που δε βαρέθηκαν να με ακούν να μιλάω για την εργασία αυτούς τους μήνες. Χωρίς εκείνους θα ήταν πολύ λιγότερο ουσιαστική αυτή η εμπειρία και εύχομαι να τους έχω *πάντα* δίπλα μου σε ό,τι κάνω.

Περίληψη

Τα συστήματα Compton Suppression (CSS) έχουν αναπτυχθεί με στόχο τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος στις μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας ώστε να βελτιωθεί η πιθανότητα ανίχνευσης φωτοκορυφών με χαμηλό ρυθμό κρούσεων. Ο τρόπος με τον οποίο το επιτυγχάνουν είναι ο συνδυασμός ενός πρωτεύοντα ανιχνευτή υψηλής διακριτικής ικανότητας με έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή υψηλής απόδοσης με στόχο την καταγραφή των γεγονότων σκέδασης στον δευτερεύοντα και απόρριψής τους στον πρωτεύοντα. Το παραγόμενο φάσμα έχει μειωμένο συνεχές υπόστρωμα Compton και επιτρέπει την ανίχνευση φωτοκορυφών που δεν είναι ορατές μέσω των συμβατικών γ-φασματοσκοπικών μεθόδων.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται το CSS στο εργαστήριο του ερευνητικού αντιδραστήρα του ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» που αποτελείται από έναν πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 40% κι έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή NaI. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την ανάλυση προϊόντων ενεργοποίησης σε ανιχνευτές VERDI, οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί από την Ομάδα Τεχνολογίας Σύντηξης του ΙΠΡΕΤΕΑ και αποτελούνται από προστατευτική κάψουλα υψηλών αντοχών και χαμηλής ενεργοποίησης, εντός της οποίας εσωκλείονται μεταλλικά ελάσματα γνωστής μάζας. Οι ανιχνευτές VERDI παρέχουν μια καινοτόμο προσέγγιση στη μέτρηση του πλήθους και της ενεργειακής κατανομής νετρονίων στο αντίξοο περιβάλλον του αντιδραστήρα σύντηξης. Η μελέτη των ακτίνων-γ που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση των ενεργοποιημένων υλικών των ανιχνευτών επιτρέπει την ανασύνθεση του φάσματος και της ροής των νετρονίων που έχουν δεχθεί. Καθώς ο ακριβής προσδιορισμός αυτών των παραμέτρων είναι ιδιαίτερης σημασίας στη μελέτη και το σχεδιασμό μελλοντικών αντιδραστήρων σύντηξης, η αξία των ανιχνευτών VERDI αποδεικνύεται πολύτιμη.

Οι ανιχνευτές VERDI που αναλύονται στην εργασία ήταν ακτινοβολημένοι με πηγή πλάσματος δευτερίου-δευτερίου (D-D) στο Joint European Torus (JET). Στο πλαίσιο αυτό, διερευνάται η βελτίωση που εισάγει στην ανιχνευτική ικανότητα της διάταξης το σύστημα Compton Suppression για τη μελέτη τέτοιων δειγμάτων. Επίσης υπολογίζεται η ενεργότητα των ανιχνευτών στο τέλος της ακτινοβόλησης - μέγεθος καθοριστικό για την ανασύνθεση του φάσματος των νετρονίων στη συνέχεια - και συγκρίνονται οι υπολογισμοί αυτοί με υπάρχοντα δεδομένα από προηγούμενες αναλύσεις των ίδιων δειγμάτων. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρέχουν σημαντικά πειραματικά δεδομένα, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την επιβεβαίωση των υπολογιστικών εργαλείων και κωδίκων που αξιοποιούνται στο JET και σε μελέτες τεχνολογίας σύντηξης.

Abstract

Compton Suppression Systems (CSS) have been developed to reduce the Compton continuum in gamma-spectroscopy measurements, offering enhanced detection possibilities for low count rate photopeaks. This is achieved by means of a primary detector coupled to a secondary high efficiency detector which collects and rejects signals caused by photons incident on the secondary detector due to Compton scattering on the primary one. The signal created in this process has a suppressed continuum and thus accentuates peaks which are otherwise indetectable with ordinary gamma spectroscopic methods.

In the present work, the Compton Suppression System in the laboratory of INRASTES at NCSR "Demokritos" is employed for the analysis of activation products in VERDI detectors, developed by the Fusion Technology Group at INRASTES. Consisting of a robust, low activation capsule, these specimens offer a novel approach in the placement of metallic foils - suitable for neutron activation measurents - in the harsh environment of a fusion device. The study of the gamma rays resulting from their de-excitation allows for the reconstruction of the neutron energy spectrum and neutron flux that they have received. The accurate determination of these parameters is highly important in the design and study of future fusion reactors with the ultimate goal of energy production from such systems.

The VERDI detectors studied in this work were irradiated in a deuterium-deuterium (D-D) plasma source at the Joint European Torus (JET). In this scope, the improvement of the detection capabilities using a Compton Suppression System to study these specimens is investigated. Another aspect of the present thesis is the calculation of the induced radioactivity of the VERDI detectors at the end of irradiation, which is a very important factor for the reconstruction of the neutron spectrum and the comparison of these results with existing analyses of the same samples. The results from this project provide important experimental data that will be used for the validation of computational tools and codes used at JET and in fusion technology studies.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες 4
Περίληψη 5
Abstract 6
Περιεχόμενα 7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 1
Κεφάλαιο 2: Ανιχνευτές VERDI για μετρήσεις νετρονίων σε αντιδραστήρες σύντηξης 2
2.1. Θερμοπυρηνική σύντηξη 2
2.1.1. Σταθερότητα των πυρήνων και πυρηνικές αντιδράσεις 2
2.1.2. Βασικές αντιδράσεις σύντηξης 3
2.1.3. Προϋποθέσεις πραγματοποίησης αντιδράσεων σύντηξης 4
2.2. Αντιδραστήρες ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης 5
2.2.1. Πλεονεκτήματα παραγωγής ενέργειας μέσω σύντηξης 5
2.2.2. Προκλήσεις στην κατασκευή και τη λειτουργία αντιδραστήρων σύντηξης 6
2.2.3. Ο αντιδραστήρας σύντηξης Joint European Torus (JET) 7
2.3. Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη 8
2.3.1. Μέθοδος νετρονικής ενεργοποίησης 9
2.4. Εφαρμογή της νετρονικής ενεργοποίησης στο πλαίσιο της σύντηξης μέσω των ανιχνευτών VERDI 10
2.4.1. Γενικές πληροφορίες για τους ανιχνευτές VERDI 10
2.4.2. Υλικά μεταλλικών ελασμάτων-στόχων 11
2.4.3. Υλικά περιβλήματος και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών 12
2.4.4. Οι ανιχνευτές VERDI που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Ε. 12
Κεφάλαιο 3: Η μέθοδος της γ-φασματοσκοπίας με σύστημα Compton Suppression 16
3.1. Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη 16
3.1.1. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο 16
3.1.2. Φαινόμενο Compton 17
3.1.3. Δίδυμη γένεση 17
3.2. Εξασθένηση ακτίνων-γ μέσα στην ύλη 18
3.2.1. Αυτοαπορρόφηση ακτίνων-γ 19
3.3. Κύρια είδη ανιχνευτών γ-φασματοσκοπίας 20
3.3.1. Ενεργειακές ζώνες υλικών 20
3.3.2. Ανιχνευτές ημιαγωγών 22

3.3.3. Ανιχνευτές σπινθηρισμού 23
3.3.4. Σύγκριση ανιχνευτών HPGe και NaI 24
3.4. Συλλογή και ανάλυση σήματος ανιχνευτών 25
3.4.1. Ηλεκτρονικά συστήματα γ-φασματοσκοπίας 25
3.4.2. Λογισμικά ανάλυσης γ-φασματοσκοπίας 26
3.5. Συστήματα Compton Suppression 26
3.5.1. Γενικά στοιχεία των συστημάτων Compton Suppression 26
3.5.2. Λειτουργίες συστήματος 29
3.5.2.1. Λειτουργία αντισύμπτωσης 29
3.5.2.2. Λειτουργία σύμπτωσης 30
3.5.2.3. Παράλληλη λειτουργία 30
3.5.3. Συντελεστές χαρακτηρισμού απόκρισης του συστήματος Compton Suppression 31
3.5.2.1. Reduction Factor (RF) 31
3.5.2.2. Peak Reduction Factor (R_p) 31
3.5.2.3. Total Area Suppression Factor (TASF) 32
3.6. Φαινόμενα σύμπτωσης που επηρεάζουν τη λειτουργία της γ-φασματοσκοπικής διάταξης 32
3.6.1. Πραγματική σύμπτωση 32
3.6.2. Τυχαία άθροιση 34
3.6.3. Φαινόμενα σύμπτωσης που επιδρούν στη λειτουργία του συστήματος Compton Suppression 34
3.7. Βαθμονόμηση γ-φασματοσκοπικής διάταξης 35
3.7.1. Ενεργειακή βαθμονόμηση 35
3.7.2. Βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής 35
3.7.2.1. Είδη απόδοσης ανιχνευτή 35
3.7.2.2. Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης γ-φασματοσκοπικής διάταξης 36
3.7.2.3. Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης συστήματος Compton Suppression 39
Κεφάλαιο 4: Μελέτη απόκρισης του συστήματος Compton Suppression στην ανάλυση των VERDI ανιχνευτών 40
4.1. Η διάταξη CSS του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» 40
4.1.1. Ο πρωτεύων ανιχνευτής (HPGe) 40
4.1.2. Ο δευτερεύων ανιχνευτής (NaI) 40
4.1.3. Η ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος 42
4.2. γ-φασματοσκοπική ανάλυση ανιχνευτών VERDI 42
4.3. Μελέτη συνεχούς υποστρώματος Compton 44

4.4. Μελέτη ανιχνευόμενων φωτοκορυφών ... 45
4.4.1. Υπολογισμός συντελεστή R_p ... 46
4.4.2. Υπολογισμός συντελεστή TASF ... 48
4.5. Επίδραση του CSS στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ... 50
4.6. Βαθμονόμηση του συστήματος Compton Suppression με σημειακές πηγές ... 50
4.6.1. Σημειακές πηγές βαθμονόμησης ... 50
4.6.2. Ενεργειακή βαθμονόμηση συστήματος Compton Suppression ... 52
4.6.3. Βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής συστήματος Compton Suppression ... 53
4.6.3.1. Βαθμονόμηση απόδοσης για συμβατικό τρόπο λειτουργίας ... 53
4.6.3.2. Βαθμονόμηση απόδοσης για λειτουργία αντισύμπτωσης ... 56
Κεφάλαιο 5: Προσομοιώσεις Monte Carlo για μεταφορά απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου ... 60
5.1. Ανάγκη μεταφοράς απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου ... 60
5.2. Η μαθηματική μέθοδος Monte Carlo και η χρήση της για μεταφορά απόδοσης ... 61
5.3. Ο κώδικας PENELOPE ... 62
5.3.1. Γενικά στοιχεία ... 62
5.3.2. Αρχεία εισόδου ... 63
5.3.3. Εικονικοί ανιχνευτές ... 64
5.3.4. Αρχεία εξόδου ... 65
5.4. Μέθοδος υπολογισμού απόδοσης και αντίστοιχης αβεβαιότητας με τον κώδικα PENELOPE 66
5.5. Επιβεβαίωση γεωμετρικού μοντέλου της διάταξης μέσω του κώδικα PENELOPE ... 68
5.5.1. Προσδιορισμός των διαστάσεων ανιχνευτή HPGe μέσω προσομοίωσης ... 68
5.5.2. Έλεγχος υπάρχοντος γεωμετρικού μοντέλου της διάταξης ... 69
5.6. Υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς απόδοσης μέσω του κώδικα PENELOPE ... 71
Κεφάλαιο 6: Υπολογισμός ενεργότητας ανιχνευτών VERDI ... 76
6.1. Υπολογισμός ενεργότητας δειγμάτων κατά τη μέτρηση ... 76
6.1.1. Προσδιορισμός αναλογίας $^{102m}Rh/^{102}Rh$ στους VERDI ανιχνευτές ... 81
6.1.1.1 Αναγωγή αναλογίας $^{102m}Rh/^{102}Rh$ στις μετρήσεις του Απριλίου ’20 και σύγκριση με πειραματικές τιμές ... 83
6.1.1.2 Αναγωγή αναλογίας $^{102m}Rh/^{102}Rh$ στο τέλος της ακτινοβόλησης το Δεκέμβριο ’19 ... 84
6.1.2. Σταθμισμένες μέσες τιμές ενεργότητας για κάθε ισότοπο ... 84
6.2. Εκτίμηση ειδικής ενεργότητας δειγμάτων στο τέλος της ακτινοβόλησης και σύγκριση με προηγούμενη μέτρηση των ίδιων δειγμάτων ... 85
Κεφάλαιο 7: Σύνοψη ... 88
Βιβλιογραφία ... 92

Παραρτήματα 95
Παράρτημα Α – Τεχνικά σχέδια διάταξης Compton Suppression System 95
Παράρτημα Β – Πιστοποιητικά σημειακών πηγών βαθμονόμησης 95
Παράρτημα Γ – Στατιστικά μεγέθη 95

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τα συστήματα Compton Suppression (CSS) έχουν αναπτυχθεί με στόχο τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος στις μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας ώστε να βελτιωθεί η πιθανότητα ανίχνευσης φωτοκορυφών με χαμηλό ρυθμό κρούσεων. Ο τρόπος με τον οποίο το επιτυγχάνουν είναι ο συνδυασμός ενός πρωτεύοντα ανιχνευτή υψηλής διακριτικής ικανότητας με έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή υψηλής απόδοσης με στόχο την καταγραφή των γεγονότων σκέδασης στον δευτερεύοντα και απόρριψής τους στον πρωτεύοντα. Το παραγόμενο φάσμα έχει μειωμένο συνεχές υπόστρωμα Compton και επιτρέπει την ανίχνευση φωτοκορυφών που δεν είναι ορατές μέσω των συμβατικών γ-φασματοσκοπικών μεθόδων.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται το CSS στο εργαστήριο του ερευνητικού αντιδραστήρα του Ινστιτούτου Πυρηνικών & Ραδιολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας & Ασφάλειας (ΙΠΡΕΤΕΑ) στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών (ΕΚΕΦΕ) «Δημόκριτος» που αποτελείται από έναν πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 40% κι έναν δευτερεύοντα ανιχνευτή NaI. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την ανάλυση προϊόντων ενεργοποίησης σε ανιχνευτές VERDI, οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί από την Ομάδα Τεχνολογίας Σύντηξης του ΙΠΡΕΤΕΑ και αποτελούνται από προστατευτική κάψουλα υψηλών αντοχών και χαμηλής ενεργοποίησης, εντός της οποίας εσωκλείονται μεταλλικά ελάσματα γνωστής μάζας. Οι ανιχνευτές VERDI παρέχουν μια καινοτόμο προσέγγιση στη μέτρηση του πλήθους και της ενεργειακής κατανομής νετρονίων στο αντίξοο περιβάλλον του αντιδραστήρα σύντηξης. Η μελέτη των ακτίνων-γ που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση των ενεργοποιημένων υλικών των ανιχνευτών επιτρέπει την ανασύνθεση του φάσματος και της ροής των νετρονίων που έχουν δεχθεί. Καθώς ο ακριβής προσδιορισμός αυτών των παραμέτρων είναι ιδιαίτερης σημασίας στη μελέτη και το σχεδιασμό μελλοντικών αντιδραστήρων σύντηξης, η αξία των ανιχνευτών VERDI αποδεικνύεται πολύτιμη.

Οι ανιχνευτές VERDI που αναλύονται στην εργασία ήταν ακτινοβολημένοι με πηγή πλάσματος δευτερίου-δευτερίου (D-D) στο Joint European Torus (JET) στην καμπάνια του 2019. Στο πλαίσιο αυτό, διερευνάται η βελτίωση που εισάγει στην ανιχνευτική ικανότητα της διάταξης το σύστημα Compton Suppression για τη μελέτη τέτοιων δειγμάτων. Επίσης υπολογίζεται η ενεργότητα των ανιχνευτών στο τέλος της ακτινοβόλησης και συγκρίνονται οι υπολογισμοί αυτοί με υπάρχοντα δεδομένα από προηγούμενες αναλύσεις των ίδιων δειγμάτων λίγους μήνες μετά το τέλος της ακτινοβόλησης.

Αρχικά, παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για τον τομέα της τεχνολογίας σύντηξης και για τα δείγματα που μελετήθηκαν (2ο Κεφάλαιο). Αναλύεται η μέθοδος της γ-φασματοσκοπίας, στην οποία στηρίχθηκε η ανάλυση των ανιχνευτών VERDI, και συγκεκριμένα δίνεται ο τρόπος λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων Compton Suppression (3ο Κεφάλαιο). Στη συνέχεια, η εργασία εστιάζει στη μελέτη της απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ κατά την ανάλυση των VERDI ανιχνευτών (4ο Κεφάλαιο) και περιγράφεται ο τρόπος βαθμονόμησής της καθώς και η διαδικασία προσομοίωσης της απόδοσης μέσω υπολογιστικού κώδικα (5ο Κεφάλαιο). Παρουσιάζεται έπειτα ο υπολογισμός της ενεργότητας των δειγμάτων στο τέλος της ακτινοβόλησής τους και συγκρίνονται οι τιμές αυτές με προηγούμενες μετρήσεις των ίδιων ανιχνευτών (6ο Κεφάλαιο). Στο τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις αυτές όσον αφορά στη μελέτη απόκρισης του CSS και την ενεργότητα των ανιχνευτών VERDI που προσδιορίστηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, και σχολιάζονται οι προοπτικές για μελλοντικές μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο (7ο Κεφάλαιο).

Κεφάλαιο 2: Ανιχνευτές VERDI για μετρήσεις νετρονίων σε αντιδραστήρες σύντηξης

2.1. Θερμοπυρηνική σύντηξη

2.1.1. Σταθερότητα των πυρήνων και πυρηνικές αντιδράσεις

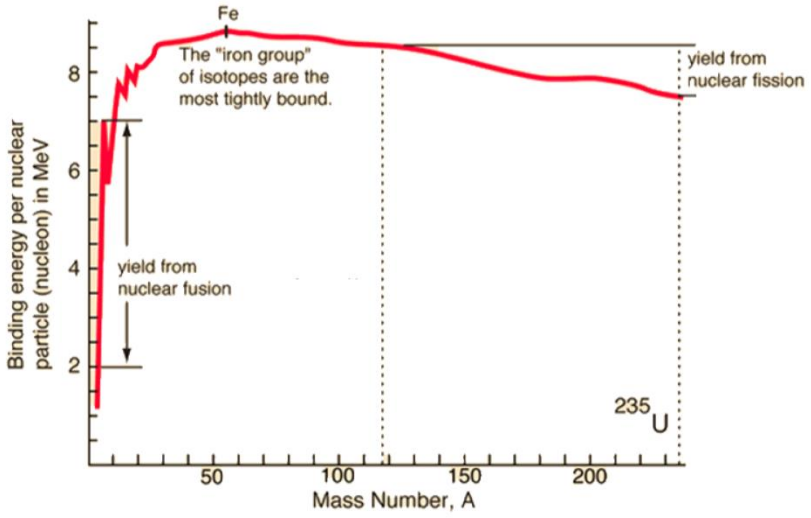
Οι σταθεροί πυρήνες στη φύση οφείλουν την ύπαρξή τους στο γεγονός ότι ως δέσμια συστήματα έχουν χαμηλότερη ενέργεια από τα επιμέρους νουκλεόνια που τους αποτελούν (νετρόνια και πρωτόνια), επομένως είναι ενεργειακά προτιμητέες καταστάσεις. Αυτή η ενεργειακή διαφορά ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης ενός πυρήνα (E_b) και χάρη στη σχέση του Einstein, μπορεί να γραφεί συναρτήσει της ταχύτητας του φωτός (c) και του ελλείμματος μάζας (Δm) ανάμεσα στη μάζα του πυρήνα και στη συνολική μάζα των επιμέρους νουκλεονίων που τον αποτελούν, ως εξής [1]:

$$E_b = \Delta m \cdot c^2 \quad (1)$$

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{nucleus} \quad (2)$$

όπου
E_b: η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα
Δm: το έλλειμμα μάζας
Z: ατομικός αριθμός πυρήνα
A: μαζικός αριθμός πυρήνα
m_p: η μάζα του πρωτονίου
m_n: η μάζα του νετρονίου
$m_{nucleus}$: η μάζα του πυρήνα

Πολύ σημαντική παράμετρος στη μελέτη πυρηνικών αντιδράσεων είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για κάθε πυρήνα (E_b/A) η οποία φαίνεται στην Εικόνα 1 και δίνει σημαντική πληροφορία για τη σταθερότητα των ισοτόπων που απαντώνται στη φύση καθώς και για τις αντιδράσεις μέσω των οποίων μπορεί κανείς να αξιοποιήσει τις διαφορές στις ενέργειες σύνδεσης των πυρήνων για την παραγωγή ενέργειας. Από τους ελαφρείς πυρήνες είναι εφικτή η παραγωγή ενέργειας μέσω σύντηξής τους σε βαρύτερους πυρήνες, ενώ αντίθετα οι πυρήνες με υψηλό μαζικό αριθμό μπορούν να αποδώσουν ενέργεια με τη διαδικασία της σχάσης αν διασπαστούν σε θραύσματα ελαφρύτερων πυρήνων. Και στις δύο περιπτώσεις εκλύεται ενέργεια ως θερμότητα λόγω της κινητικής ενέργειας των προϊόντων της αντίδρασης.



Εικόνα 1. Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο [Mev] συναρτήσει μαζικού αριθμού A [2]

2.1.2. Βασικές αντιδράσεις σύντηξης

Η πυρηνική σύντηξη είναι η διαδικασία μέσω της οποίας δύο ή περισσότεροι πυρήνες έρχονται αρκετά κοντά υπό κατάλληλες συνθήκες σχηματίζοντας έναν νέο βαρύτερο πυρήνα και εκλύοντας ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Είναι η αντίδραση που συμβαίνει σε όλα τα άστρα, όπως ο Ήλιος, και χάρη σε αυτήν σχηματίζονται όλοι οι σταθεροί πυρήνες στη φύση με αλλεπάλληλες αντιδράσεις σύντηξης, ξεκινώντας από τους ελαφρείς πυρήνες, όπως το υδρογόνο και το ήλιο, έως τους βαρύτερους σταθερούς πυρήνες, όπως ο σίδηρος και το νικέλιο.

Η ενέργεια που εκλύεται ισούται με την ενέργεια σύνδεσης του σύνθετου πυρήνα και οφείλεται στο ότι αυτός είναι πιο σταθερός από τους δύο αρχικούς πυρήνες, οπότε εκλύεται ενέργεια ίση με το έλλειμμα μάζας ανάμεσα στα προϊόντα και στα αντιδρώντα. Η εκλυόμενη ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια των προϊόντων, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα, ώστε να αξιοποιηθεί στη συνέχεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τον τρόπο που αυτό γίνεται σε όλες τις βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας.

Η κυριότερη αντίδραση σύντηξης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας βασίζεται σε δύο ισότοπα του υδρογόνου (H): το σταθερό δευτέριο (D), με ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο, και το ραδιενεργό τρίτιο (T), με ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Ο λόγος που επιλέγεται αυτή η αντίδραση σύντηξης είναι πως έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα πραγματοποίησης και τα προϊόντά της έχουν τη μεγαλύτερη κινητική ενέργεια σε σχέση με τις άλλες αντιδράσεις [3]:

$$\mathrm{D} + \mathrm{T} = {}^{4}\mathrm{He}\ (3.52\ \mathrm{MeV}) + \mathrm{n}\ (14.07\ \mathrm{MeV}) \qquad (3)$$

Το δευτέριο βρίσκεται στα αποθέματα νερού της Γης σε αναλογία 1 άτομο δευτερίου (D) ανά περίπου 6500 άτομα υδρογόνου (H) [3] με τη μορφή D_2O («βαρύ νερό») και μπορεί να εξαχθεί με διάφορες μεθόδους. Το τρίτιο, ωστόσο, βρίσκεται σε αναλογία 1 άτομο τριτίου (T) ανά 10^{18} άτομα υδρογόνου (H)

στο νερό [4] και άρα για την παραγωγή του απαιτείται βομβαρδισμός Li με νετρόνια μέσω των εξής αντιδράσεων:

$$^{6}\mathrm{Li} + \mathrm{n} = {}^{4}\mathrm{He}\ (2.05\ \mathrm{MeV}) + \mathrm{T}\ (2.73\ \mathrm{MeV}) \qquad (4)$$

$$^{6}\mathrm{Li} + \mathrm{n} = {}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{T} + \mathrm{n} + \mathrm{Q}\ (-2.47\ \mathrm{MeV}) \qquad (5)$$

Η πρώτη αντίδραση πραγματοποιείται με αργά νετρόνια ενώ η δεύτερη με ταχέα και στην περίπτωση αυτή σε κάθε αντίδραση δεν «καταναλώνονται» νετρόνια για την παραγωγή τριτίου. Το ^{6}Li αποτελεί το 7.4% του φυσικού λιθίου, το οποίο βρίσκεται στο φλοιό της Γης με αφθονία περίπου 12 εκ. τόννων και μπορούν να παραχθούν 15 γραμμάρια τριτίου από 30 γραμμάρια λιθίου. Αντίστοιχα, για την παραγωγή 10 γραμμαρίων δευτερίου, απαιτούνται 500 λίτρα νερό [5]. Επομένως οι δύο απαραίτητες συνιστώσες για την παραγωγή ενέργειας μέσω σύντηξης – το D και το ^{6}Li – βρίσκονται διαθέσιμα στη φύση και η παραγωγή τριτίου μπορεί να επιτευχθεί μέσω των αντιδράσεων (4) και (5). Σημειώνεται ότι κατά την αντίδραση (D-T) εάν υπάρχει παρουσία ^{6}Li είναι δυνατή η ανατροφοδότηση της αντίδρασης με τρίτιο ώστε αυτή να μη διακόπτεται μετά την έναρξή της [3].

Μία άλλη πολύ σημαντική αντίδραση για τον τομέα της τεχνολογίας σύντηξης είναι αυτή μεταξύ δευτερίου-δευτερίου (D-D), η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο ισοπίθανους τρόπους:

$$\mathrm{D} + \mathrm{D} = {}^{3}\mathrm{He}\ (0.82\ \mathrm{MeV}) + \mathrm{n}\ (2.45\ \mathrm{MeV}) \qquad (6)$$

$$\mathrm{D} + \mathrm{D} = \mathrm{T}\ (1.01\ \mathrm{MeV}) + \mathrm{p}\ (3.02\ \mathrm{MeV}) \qquad (7)$$

Παρατηρείται ότι κατά την αντίδραση (D-D) παράγεται τρίτιο οπότε στη συνέχεια μπορούν να προκύψουν αντιδράσεις (D-T). Άλλες αντιδράσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν ως συνέπεια των αντιδράσεων (D-D) είναι η αντίδραση (D+^{3}He), η (T-T) και η (^{3}He+^{3}He).

2.1.3. Προϋποθέσεις πραγματοποίησης αντιδράσεων σύντηξης

Για την πραγματοποίηση κάθε αντίδρασης σύντηξης, πρέπει η ισχυρή πυρηνική δύναμη (ελκτική) να υπερνικήσει το φράγμα Coulomb των πυρήνων (απωστική δύναμη). Το φράγμα Coulomb για την αντίδραση (D-T) είναι V_c = 0.4 MeV και απαιτεί πολύ υψηλές κινητικές ενέργειες των αντιδρώντων για να επιτευχθεί.

Οι υψηλές κινητικές ενέργειες των αντιδρώντων επιτυγχάνονται σε συνθήκες πλάσματος, η οποία είναι μία κατάσταση της ύλης όπου το ηλεκτρονιακό νέφος κυκλοφορεί ως ιονισμένο αέριο ανάμεσα σε όλους τους πυρήνες (θετικά ιόντα). Τέτοιες συνθήκες υπάρχουν στα άστρα όπου μάλιστα αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες (η θερμοκρασία στον Ήλιο φτάνει τους 15x10^{6} ^{o}C) και βαρυτικά πεδία πολύ ισχυρότερα από το γήινο (ο Ήλιος έχει βαρυτικό πεδίο 28 φορές μεγαλύτερο από αυτό της Γης), επομένως υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες περιορισμού του πλάσματος ώστε να αυξηθεί αρκετά η πιθανότητα φαινομένων σήραγγας και να πραγματοποιηθούν αντιδράσεις σύντηξης [6].

Επειδή σε τεχνολογικό επίπεδο δεν μπορεί στη Γη να αξιοποιηθεί η βαρύτητα για τον περιορισμό του πλάσματος, απαιτείται η θέρμανση πλάσματος χαμηλότερης πυκνότητας σε υψηλότερη θερμοκρασία (~10^{8} ^{o}C), δηλαδή κατά 8-10 φορές μεγαλύτερη από του Ήλιου. Παράλληλα απαιτείται η συγκράτηση του

πλάσματος σε συνθήκες που να μην έρχεται σε επαφή με άλλα στοιχεία τα οποία θα οδηγούσαν στην ψύξη του και άρα στην κατάρρευσή του, το οποίο συμβαίνει μέσω κατάλληλου συστήματος περιορισμού.

2.2. Αντιδραστήρες ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης

2.2.1. Πλεονεκτήματα παραγωγής ενέργειας μέσω σύντηξης

Η ανάπτυξη πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης μελετάται ως μία σοβαρή και βιώσιμη εναλλακτική στον τομέα της ενέργειας και αυτό οφείλεται κυρίως στα εξής πλεονεκτήματα που προσφέρει έναντι άλλων τεχνολογιών [7]:

i. Αφθονία ενέργειας: η ελεγχόμενη θερμοπυρηνική σύντηξη εκλύει σχεδόν 4 εκ. φορές περισσότερη ενέργεια από χημικές αντιδράσεις όπως η καύση λιγνίτη, πετρελαίου ή φυσικού αερίου και 4 φορές περισσότερη ενέργεια από αντιδράσεις σχάσης (για καύσιμο ίδιας μάζας). Η σύντηξη δίνει επομένως τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας τόσο για οικιακή χρήση όσο και για βιομηχανική (baseload energy supply).

ii. Βιωσιμότητα: Τα καύσιμα της σύντηξης είναι εύκολα διαθέσιμα και σχεδόν ανεξάντλητα. Το δευτέριο μπορεί να ληφθεί από όλες τις μορφές νερού, ενώ το τρίτιο μπορεί να παραχθεί κατά τη διάρκεια της σύντηξης με την αντίδραση ταχέων νετρονίων με το λίθιο που τοποθετείται μέσα στον αντιδραστήρα για αυτόν ακριβώς το σκοπό. Εκτιμάται ότι τα αποθέματα λιθίου στο φλοιό της Γης θα επέτρεπαν τη λειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης για τα επόμενα 1000 χρόνια, ενώ λαμβάνοντας υπόψη και τα θαλάσσια αποθέματα λιθίου, καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες για εκατομμύρια χρόνια ακόμα.

iii. Αποφυγή έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου: Μέσω της σύντηξης δεν προκύπτουν επιβλαβή παράγωγα όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου. Το βασικό παρα-προϊόν των αντιδραστήρων αυτών είναι το ήλιο το οποίο είναι ένα ευγενές, μη τοξικό αέριο.

iv. Αποφυγή παραγωγής μακρόβιων ραδιενεργών αποβλήτων: Κατά τη λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης δεν παράγονται απόβλητα υψηλής ενεργότητας ή ραδιενεργά ισότοπα με μεγάλους χρόνους ημιζωής. Η ενεργοποίηση των υλικών του αντιδραστήρα είναι αρκετά μικρή ώστε τα υλικά αυτά να μπορούν να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν εντός των επόμενων 100 ετών, το οποίο είναι μικρός χρόνος σε σύγκριση με τα παράγωγα από σχάση, τα οποία παραμένουν ραδιενεργά για χιλιετίες. Επιπλέον, το τρίτιο εκπέμπει μεν ακτινοβολία β (5.86 keV) αλλά έχει σχετικά μικρό χρόνο ημιζωής (~12.3 y), ενώ ο βιολογικός χρόνος ημιζωής του στο ανθρώπινο σώμα είναι περίπου 10 ημέρες, οπότε αποβάλλεται σχετικά γρήγορα.

v. Μειωμένος κίνδυνος εξάπλωσης πυρηνικών όπλων (nuclear proliferation): Στη σύντηξη δε γίνεται χρήση σχάσιμων υλικών όπως το ουράνιο (U) και το πλουτώνιο (Pu), ενώ το ραδιενεργό τρίτιο που χρησιμοποιείται δεν είναι σχάσιμο (non-fissile), ούτε μπορεί να καταστεί σχάσιμο

μέσω ειδικής επεξεργασίας (non-fissionable). Επομένως δεν υπάρχουν εμπλουτισμένα καύσιμα σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης τα οποία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πυρηνικά όπλα.

vi. Απουσία κινδύνου ατυχημάτων λόγω τήξης του πυρήνα (meltdown): Ατυχήματα αντίστοιχα με εκείνα που έχουν υπάρξει σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης στο παρελθόν (Three-Mile Island, Chernobyl, Fukushima) δεν μπορούν να προκύψουν σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης καθώς είναι ήδη δύσκολο να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες ώστε να διατηρηθεί σταθερό το πλάσμα και να υπάρχει θετικό ισοζύγιο ενέργειας, πόσο μάλλον να υπάρχει η δυνατότητα να ξεπεραστεί κατά πολύ αυτό το όριο ώστε να δημιουργηθεί κάποιος κίνδυνος. Ακόμα και με μικρές διαταραχές, το πλάσμα ψύχεται και η αντίδραση σταματά, ενώ η ποσότητα του καυσίμου που βρίσκεται ανά πάσα στιγμή μέσα στο σύστημα επαρκεί μόνο για μερικά δευτερόλεπτα, οπότε δεν υπάρχει η πιθανότητα αλυσιδωτής αντίδρασης που θα οδηγούσε σε πυρηνική έκρηξη.

vii. Κόστος: Η ισχύς του πυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης που μελετάται αυτή τη στιγμή ως αυτός που θα επικρατήσει στο δεύτερο μισό του 21^{ου} αιώνα θα είναι αντίστοιχη με εκείνη από έναν αντιδραστήρα σχάσης (μεταξύ 1 και 1.7 GWatt). Το κόστος ανά kWatt αναμένεται επίσης να είναι συγκρίσιμο με αυτό, ενώ θα μειώνεται όσο αυξάνεται σε κλίμακα η χρήση της σύντηξης, με την κατασκευή περισσότερων αντιδραστήρων με στόχο την παραγωγή ενέργειας.

2.2.2. Προκλήσεις στην κατασκευή και τη λειτουργία αντιδραστήρων σύντηξης

Η αξιοποίηση της πυρηνικής σύντηξης για την παραγωγή ενέργειας έχει πληθώρα θετικών προοπτικών, ωστόσο προβλέπεται ότι η σύνδεση των αντιδραστήρων σύντηξης στο ηλεκτρικό δίκτυο δε θα γίνει νωρίτερα από το 2050 [8]. Αυτό οφείλεται σε τεχνολογικής φύσης προβλήματα, τα οποία μελετώνται στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων όπως το πρόγραμμα EUROfusion. Πρόκειται για τη μεγαλύτερη διεθνή συνεργασία στον τομέα της τεχνολογίας σύντηξης, με συμβολή εργαστηρίων από όλον τον κόσμο και κυρίως από την Ευρώπη. Οι στόχοι του προγράμματος περιγράφονται αναλυτικά στο “Roadmap to the realisation of fusion energy” [9] και κάποιες βασικές προκλήσεις που τονίζονται σε αυτό είναι οι εξής:

i. Σταθερότητα πλάσματος: Το πλάσμα είναι μια μορφή της ύλης η οποία ακόμα δεν έχει μελετηθεί στον ίδιο βαθμό με τις υπόλοιπες και ειδικά σε περιβάλλον σύντηξης όπου υπάρχουν πολύ υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από του Ήλιου και πάρα πολύ έντονη ροή υψηλοενεργειακών νετρονίων, είναι ακόμα δυσκολότερη η πρόβλεψη και ο έλεγχος της συμπεριφοράς του. Οι αστάθειες στο πλάσμα οφείλονται σε διάφορες παραμέτρους όπως ατέλειες μέσα σε αυτό, ανομοιογένεια στην ένταση του μαγνητικού πεδίου, φαινόμενα μεταφοράς και άλλα. Αυτό αποτελεί σημείο προς μελέτη και βελτίωση στους μελλοντικούς αντιδραστήρες.

ii. Παραγωγή τριτίου μέσα στο σύστημα: Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1.2, το τρίτιο είναι ένα ισότοπο με πολύ χαμηλή αφθονία στη φύση, επομένως πρέπει να παραχθεί μέσα στο πλάσμα μέσω των αντιδράσεων (4) και (5) παρουσία ^{6}Li ή ^{7}Li. Για το σκοπό αυτό στους μελλοντικούς αντιδραστήρες που βασίζονται στη σύντηξη, βασικό σημείο της έρευνας θα αποτελούν τα Test Blanket Modules (TBM), τα οποία αφορούν το εσωτερικό τοίχωμα του δοχείου κενού του αντιδραστήρα που έρχεται σε άμεση επαφή με το πλάσμα. Με την προσθήκη υλικών που περιέχουν ^{6}Li στο τοίχωμα (το ^{7}Li αποτελεί πολύ χαμηλότερο ποσοστό του φυσικού λιθίου και

άρα είναι πιο δυσεύρετο), υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής τριτίου κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Ωστόσο, η αντίδραση (4) με την οποία συμβαίνει αυτό καταναλώνει ένα νετρόνιο, γεγονός που μειώνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Επομένως σε αυτό το σενάριο των TBM συμπεριλαμβάνεται στο υλικό του τοιχώματος και κάποια ποσότητα βηρυλλίου (Be) ή μολύβδου (Pb), τα οποία αποτελούν «γεννήτριες νετρονίων» μέσω των εξής αντιδράσεων [10]:

$$^{9}\mathrm{Be} + \mathrm{n} = 2\alpha + 2\mathrm{n}' + \mathrm{Q}\ (-2.5\ \mathrm{MeV}) \quad (\mathrm{E_{th}} = 2.7\ \mathrm{MeV}) \qquad (8)$$

$$^{208}\mathrm{Pb} + \mathrm{n} = {}^{207}\mathrm{Pb} + 2\mathrm{n}' + \mathrm{Q}\ (-7.4\ \mathrm{MeV}) \quad (9)$$

Το ζήτημα της παραγωγής τριτίου με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται ‘‘tritium breeding’’ και είναι ένα από τα βασικά ζητήματα που πρέπει να μελετηθούν εκτενέστερα για τους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης.

iii. <u>Μελέτη και ανάπτυξη υλικών που έρχονται σε επαφή με το πλάσμα</u>: Η υψηλή ροή νετρονίων με ενέργειες που φτάνουν έως 14 MeV επηρεάζει τα υλικά με τα οποία αλληλεπιδρά με δύο τρόπους: είτε προσκρούοντας και μετακινώντας άτομα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα των υλικών με αποτέλεσμα τη δημιουργία δομικών ατελειών σε αυτά, είτε με την απορρόφησή τους από τους πυρήνες των υλικών, γεγονός που οδηγεί στη μεταστοιχείωση αρκετών ατόμων του υλικού και άρα επηρεάζει την ισοτοπική τους σύσταση, μεταβάλλοντας σε σημαντικό βαθμό τις μηχανικές τους ιδιότητες [3]. Στόχος είναι η εκτενής έρευνα πάνω στα υλικά που έχουν έως τώρα επιλεγεί για τις δομικές συνιστώσες του συστήματος σε συνθήκες παρόμοιες με εκείνες που θα υπάρχουν σε έναν μελλοντικό αντιδραστήρα σύντηξης, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του πλάσματος σε αυτά και στη συνέχεια τη βελτίωσή τους με προηγμένες μεθόδους.

2.2.3. Ο αντιδραστήρας σύντηξης Joint European Torus (JET)

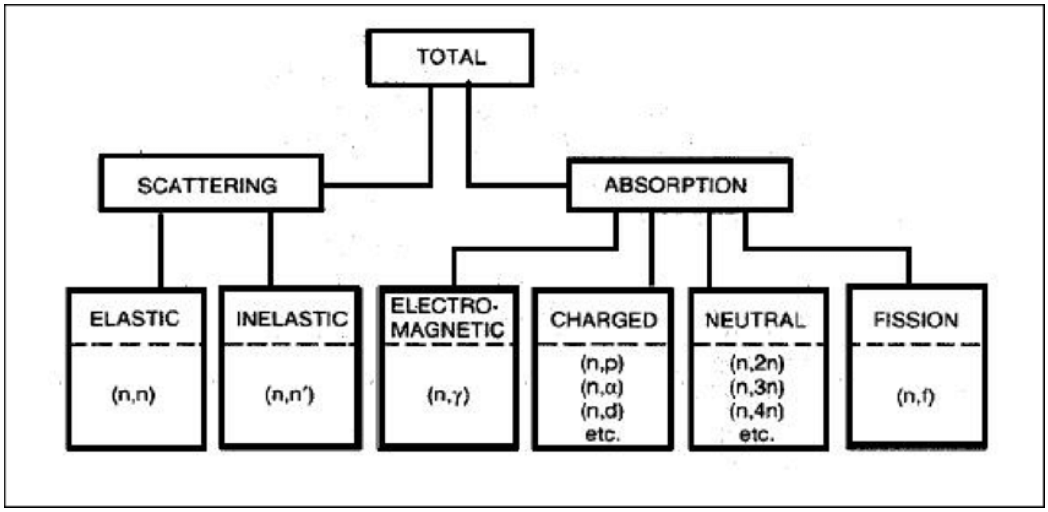
Το Joint European Torus (JET) βρίσκεται στο Culham του Ηνωμένου Βασιλείου και αποτελεί το μεγαλύτερο ερευνητικό αντιδραστήρα σύντηξης στον κόσμο από το 1983 που λειτούργησε για πρώτη φορά έως σήμερα. Ανήκει στο Culham Centre for Fusion Energy (CCFE) και ο στόχος του ερευνητικού προγράμματος ήταν να καταφέρει να φτάσει σε συντελεστή απόδοσης Q = 1. Πρόκειται για το μοναδικό tokamak στο οποίο μπορούν να πραγματοποιηθούν πειράματα με τρία είδη πλάσματος: δευτερίου-δευτερίου (D-D), δευτερίου-τριτίου (D-T) και τριτίου-τριτίου (T-T) [11], γεγονός που το καθιστά ως την καταλληλότερη διάταξη για τη διεξαγωγή έρευνας στον τομέα της σύντηξης και συγκεκριμένα για τη μελέτη των παραμέτρων που απαιτούνται στους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης. Τέτοια παραδείγματα είναι το ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) που κατασκευάζεται αυτή τη στιγμή στο Cadarache της Γαλλίας και ο μελλοντικός αντιδραστήρας DEMO που προβλέπεται να είναι ο πρώτος ο οποίος θα καταφέρει να αποδώσει στο δίκτυο ενέργεια από σύντηξη.

Στην έως τώρα πορεία του, το JET έχει καταφέρει να φτάσει σε κατάλληλες συνθήκες περιορισμού του πλάσματος ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν και οι 3 αντιδράσεις σύντηξης (D-D, T-T, D-T). Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, και συγκεκριμένα στις 09/02/2022, ανακοινώθηκε πως την D-T καμπάνια του 2021, επετεύχθη παραγωγή θερμικής ενέργειας 59 MJ σε ένα διάστημα 5 s και μέση ισχύς περίπου 11 MWatt (megajoules per second) [12], γεγονός που αποτελεί εξαιρετικό τεχνολογικό επίτευγμα για την ανάδειξη των δυνατοτήτων αυτού του τύπου αντιδραστήρων και σημαντικό πειραματικό

αποτέλεσμα όσον αφορά στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διάταξης (όπως τα υλικά των τοιχωμάτων), σε σχέση με παλαιότερα πειράματα που απέδιδαν τη μισή ισχύ. Πλέον το JET διανύει τα τελευταία χρόνια λειτουργίας του αλλά τα αποτελέσματα που προκύπτουν ακόμα και από τις τελευταίες καμπάνιες (D-D, D-T και T-T) είναι καθοριστικά για την πορεία της έρευνας στο ITER και στους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης.

2.3. Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη

Δεδομένου ότι η ενέργεια προς εκμετάλλευση που παράγεται κατά την πυρηνική σύντηξη μεταφέρεται από τα νετρόνια, ενδιαφέρον έχει να παρουσιασθούν ορισμένα στοιχεία για τα νετρόνια και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη. Το νετρόνιο, ως υποατομικό σωματίδιο με ουδέτερο φορτίο και μάζα λίγο μεγαλύτερη από εκείνη του πρωτονίου, μπορεί να αλληλεπιδράσει με άλλα σωματίδια της ύλης με διάφορους τρόπους, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σκέδαση (scattering) και απορρόφηση (absorption). Οι υπόλοιπες αντιδράσεις αποτελούν υποπεριπτώσεις των δύο αυτών κατηγοριών και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Κατηγορίες πιθανών αλληλεπιδράσεων νετρονίου-ύλης [13]

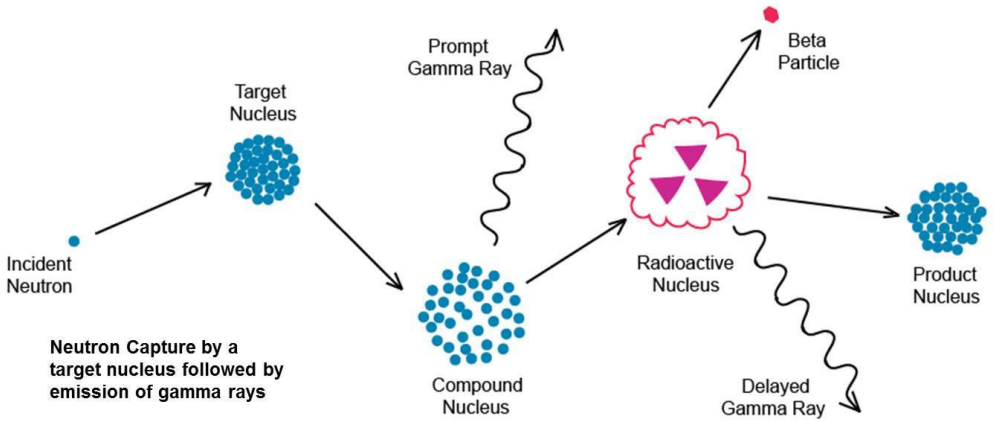
Η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις εξαρτάται από την ενέργεια του νετρονίου και από το είδος και την ενέργεια του πυρήνα στον οποίο αυτό προσπίπτει και ονομάζεται μικροσκοπική ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης, καθώς θεωρείται ότι το κάθε νετρόνιο αλληλεπιδρά με την «ενεργό επιφάνεια» του πυρήνα. Για το λόγο αυτό η μονάδα μέτρησης είναι της μορφής αντίστροφης επιφάνειας (m^{-2}). Συγκεκριμένα η μικροσκοπική ενεργός διατομή συμβολίζεται με «σ» και ορίζεται μέσω του barn (1 barn = 10^{-24} cm^{-2}).

2.3.1. Μέθοδος νετρονικής ενεργοποίησης

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση (Neutron Activation Analysis - NAA) είναι μια πυρηνική αναλυτική τεχνική, η οποία επιτρέπει τον ταυτόχρονο προσδιορισμό πολλών στοιχείων σε πλήθος δειγμάτων με μεγάλη ακρίβεια [14]. Εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι η τεχνική επινοήθηκε το 1936 από τους G. Hevesy και H. Levi [15], μόλις 4 έτη μετά την ανακάλυψη του νετρονίου από τον J. Chadwick, και έως σήμερα αποτελεί «μέθοδο αναφοράς» στη σύγκριση αποτελεσμάτων με άλλες μεθόδους που βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης ή σε περιπτώσεις πειραμάτων όπου παρατηρείται ασυμφωνία στα αποτελέσματα [16]. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ευαισθησία της τεχνικής που επιτρέπει την ταυτόχρονη μελέτη ~60 ισοτόπων σε δείγματα μικρού όγκου και έχει κατώτατο όριο ανίχνευσης της τάξης των ppb (parts per billion) [17].

Η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης βασίζεται στην ακτινοβόληση του δείγματος σε πεδίο νετρονίων, γεγονός που οδηγεί στην απορρόφηση νετρονίων από τους πυρήνες του δείγματος. Με την αλληλεπίδραση αυτή οι περισσότεροι πυρήνες καθίστανται ραδιενεργοί, εκπέμποντας κατά την αποδιέγερσή τους ακτινοβολία-γ. Η ανίχνευση μέσω κατάλληλης διάταξης των φωτονίων που παράγονται, δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των ισοτόπων που υπάρχουν στο δείγμα καθώς και της ενεργότητάς τους. Γνωρίζοντας την ενεργότητα, μπορεί στη συνέχεια να γίνει εκτίμηση της ροής των νετρονίων στα οποία έχει εκτεθεί το δείγμα.

Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, το νετρόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα-στόχο με μία μη-ελαστική σκέδαση και ακολουθεί η σύλληψή του από αυτόν. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου, «σύνθετου», διεγερμένου πυρήνα, ο οποίος μεταπίπτει σε μία σταθερότερη κατάσταση, με την ταυτόχρονη εκπομπή μίας ή περισσότερων «άμεσων» ακτίνων-γ (prompt gamma rays), χαρακτηριστικές για κάθε πυρήνα. Σε πολλές περιπτώσεις, η κατάσταση προς την οποία αποδιεγείρεται ο «σύνθετος» πυρήνας, έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ραδιενεργού πυρήνα ο οποίος μπορεί να αποδιεγερθεί εκπέμποντας μία ή περισσότερες χαρακτηριστικές για αυτόν ακτίνες-γ (delayed gamma rays). Η εκπομπή αυτών των ακτίνων-γ γίνεται με ρυθμό που είναι χαρακτηριστικός του ραδιενεργού πυρήνα. Ανάλογα με το ισότοπο, οι χρόνοι ημιζωής, ποικίλλουν από κλάσματα του δευτερολέπτου έως αρκετά χρόνια [18].



Εικόνα 3. Αλληλεπιδράσεις μετά τη σύλληψη νετρονίου από πυρήνα-στόχο [19]

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση επομένως μπορεί να γίνει με τους εξής δύο τρόπους, ανάλογα με το χρόνο της μέτρησης σε σχέση με την ακτινοβόληση:

Prompt-Gamma Neutron Activation Analysis (PG-NAA): Γίνεται ανίχνευση των φωτονίων που εκπέμπονται από το διεγερμένο πυρήνα αμέσως μετά τη σύλληψη του νετρονίου, δηλαδή κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης (in situ). Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στοιχείων με εξαιρετικά υψηλή ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίου (B, Cd, Sm, Gd), σε στοιχεία των οποίων τα παραγόμενα ισότοπα αποδιεγείρονται με πολύ γρήγορο ρυθμό ώστε να μελετηθούν με άλλο τρόπο, σε στοιχεία που παράγουν μόνο σταθερά ισότοπα στη συνέχεια και άρα δεν μπορούν να ανιχνευτούν διαφορετικά και σε στοιχεία με πολύ μικρά ποσοστά εκπομπής ακτίνων-γ από τα παραγόμενα ισότοπά τους [16].

Delayed-Gamma Neutron Activation Analysis (DG-NAA): Συνήθως αναφέρεται απλά ως NAA καθώς είναι η πιο συνήθης περίπτωση ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση. Τα δείγματα μελετώνται μετά το τέλος της ακτινοβόλησής τους και γίνεται ανίχνευση των φωτονίων που εκπέμπονται από τα ραδιενεργά ισότοπα που προκύπτουν από τους διεγερμένους πυρήνες. Χρησιμοποιείται για το μεγαλύτερο ποσοστό στοιχείων που έχουν ραδιενεργά ισότοπα και παρέχει ευελιξία ως προς το χρόνο και τη διάρκεια της μέτρησης καθώς επιτρέπει την επιλογή των διαστημάτων αυτών με τρόπο ώστε να περιοριστεί η επίδραση της ενεργότητας των δειγμάτων λόγω των πιο βραχύβιων ισοτόπων σε σχέση με εκείνα που έχουν μεγαλύτερους χρόνους ημιζωής [16]. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκε η μέθοδος της DG-NAA.

2.4. Εφαρμογή της νετρονικής ενεργοποίησης στο πλαίσιο της σύντηξης μέσω των ανιχνευτών VERDI

2.4.1. Γενικές πληροφορίες για τους ανιχνευτές VERDI

Οι ανιχνευτές VERDI (noVel nEutRon Detector for fusIon) έχουν αναπτυχθεί από την Ομάδα Τεχνολογίας Σύντηξης στο ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος EUROfusion, με σκοπό τη μέτρηση της συνολικής ροής των νετρονίων και τον προσδιορισμό του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων στη θέση μέτρησης μέσα σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης. Συγκεκριμένα, προορίζονται ως ανιχνευτές σε θέσεις εντός του αντιδραστήρα που βρίσκονται πολύ κοντά στο πλάσμα, όπου η νετρονική ροή πρέπει να μετριέται με ακρίβεια κάτω από μεταβαλλόμενες και έντονες ροές νετρονίων, υψηλό υπόβαθρο ακτινοβολίας-γ, υψηλές θερμοκρασίες και μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μεγάλης έντασης. [20] Οι ανιχνευτές VERDI έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές πηγές πλάσματος όπως δευτερίου-δευτερίου (D-D), τριτίου-τριτίου (T-T) και δευτερίου-τριτίου (D-T) και να προσδιορίζουν το ενεργειακό φάσμα και τη συνολική ροή νετρονίων, μεγέθη σημαντικά για την εκτίμηση του ρυθμού παραγωγής τριτίου (tritium breeding), της θέρμανσης λόγω πυρηνικών αντιδράσεων και της νετρονικής ενεργοποίησης υλικών σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σύντηξης όπως το ITER και το DEMO [21][22][23].

Ο κάθε ανιχνευτής VERDI αποτελείται από μία κάψουλα από κεραμικό υλικό χαμηλής ενεργοποίησης, η οποία περιέχει μεταλλικά στοιχεία συγκεκριμένης συγκέντρωσης σε μορφή ελασμάτων (foils). Η νετρονική ροή και το ενεργειακό φάσμα υπολογίζονται από την ανάλυση μέσω φασματοσκοπίας-γ των

φωτοκορυφών που προκύπτουν από την ενεργοποίηση των μεταλλικών στοιχείων μέσα στην κάψουλα. Αυτό το περίβλημα είναι κατασκευασμένο ώστε να αντέχει την ακτινοβόληση και παράλληλα να αλληλεπιδρά ελάχιστα με την υψηλή ροή νετρονίων που δημιουργείται μέσα στον αντιδραστήρα.

2.4.2. Υλικά μεταλλικών ελασμάτων-στόχων

Η επιλογή των μεταλλικών στοιχείων των ελασμάτων έχει γίνει με συγκεκριμένα κριτήρια, όπως το σημείο τήξης (μεγαλύτερο των 800 ºC), ο χρόνος ημιζωής του παραγόμενου ραδιενεργού ισοτόπου (μεγαλύτερος των 20 min), η ενεργός διατομή ραδιενεργού σύλληψης, το ποσοστό εκπομπής των παραγόμενων ακτίνων-γ (μεγαλύτερο του 10%), και άλλοι παράγοντες όπως το κόστος [20].

Εφόσον οι ανιχνευτές VERDI είναι σχεδιασμένοι για έκθεση σε διαφορετικές πηγές πλάσματος, περιέχουν ισότοπα με ενεργές διατομές αντιδράσεων σύλληψης νετρονίων σε μεγάλο ενεργειακό εύρος από θερμικά νετρόνια έως νετρόνια που προκύπτουν από αντιδράσεις με ενεργειακό κατώφλι έως ~12 MeV. Δεδομένου ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια των νετρονίων σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης είναι 14 MeV -αντίδραση δευτερίου-τριτίου (D-T)-, το ερευνητικό ενδιαφέρον στον τομέα της τεχνολογίας σύντηξης εστιάζει σε νετρόνια με κινητικές ενέργειες σε αυτό το εύρος. Με βάση τα παραπάνω, έχουν επιλεγεί για τους ανιχνευτές VERDI τα υλικά που φαίνονται στον Πίνακα 1. Αναγράφεται το υλικό του κάθε ελάσματος με το αντίστοιχο σημείο τήξης, οι πιθανές αντιδράσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν κατά την ακτινοβόληση των VERDI ανιχνευτών, ο χρόνος ημιζωής των παραγόμενων ραδιοϊσοτόπων καθώς και το ενεργειακό κατώφλι της κάθε αντίδρασης.

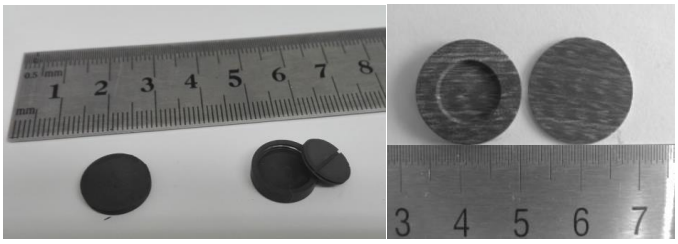
Πίνακας 1. Ιδιότητες μεταλλικών στοιχείων ανιχνευτών VERDI

Στοιχείο	Σημείο τήξης (ºC)	Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής	Κατώφλι (MeV)
Ag	962	^{109}Ag (n, γ) ^{110m}Ag	249.8 d	--
		^{107}Ag (n, 2n) ^{106m}Ag	8.28 d	9.60
Au	1064	^{197}Au (n, γ) ^{198}Au	2.69 d	--
		^{197}Au (n, 2n) ^{196}Au	6.18 d	8.13
Mn	1246	^{55}Mn (n, γ) ^{56}Mn	2.57 h	--
		^{55}Mn (n, 2n) ^{54}Mn	310 d	10.50
Nb	2469	^{93}Nb (n, 2n) ^{92m}Nb	10.15 d	9.00
Ni	1455	^{58}Ni (n, np) ^{57}Co (67.8%)	272 d	9.24
		^{58}Ni (n, d) ^{57}Co (32.2%)	272 d	6.08
		^{58}Ni (n, p) ^{58}Co	72 d	0.40
		^{60}Ni (n, p) ^{60}Co	5.27 y	2.20
Rh	1963	^{103}Rh (n, 2n) ^{102}Rh	2.9 y	9.50
		^{103}Rh (n, p) ^{103}Ru	39.3 d	0.20
Ti	1668	^{46}Ti (n, p) ^{46}Sc	85 d	1.62
		^{47}Ti (n, p) ^{47}Sc	3.43 d	0.66
		^{48}Ti (n, p) ^{48}Sc	44 h	3.29
Y	1526	^{89}Y (n, α) ^{86}Rb	18.63 d	3.03
		^{89}Y (n, 2n) ^{88}Y	106.6 d	12.00

2.4.3. Υλικά περιβλήματος και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών

Όσον αφορά τα υλικά του περιβλήματος (ή κάψουλας), αυτά επιλέγονται με γνώμονα τρία βασικά σημεία: την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, τη δυνατότητα εγκλεισμού των ελασμάτων σε ένα ανθεκτικό περίβλημα και την πολύ χαμηλή συγκέντρωση προσμείξεων, οι οποίες θα επηρέαζαν τις μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας λόγω των προϊόντων ενεργοποίησής τους.

Με βάση αυτά τα κριτήρια, επιλέχθηκαν ο γραφίτης και το CMC (Ceramic Matrix Composite), το οποίο είναι σύνθετο κεραμικό υλικό από καρβίδιο του πυριτίου ενισχυμένο με ίνες άνθρακα. Οι κάψουλες αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.

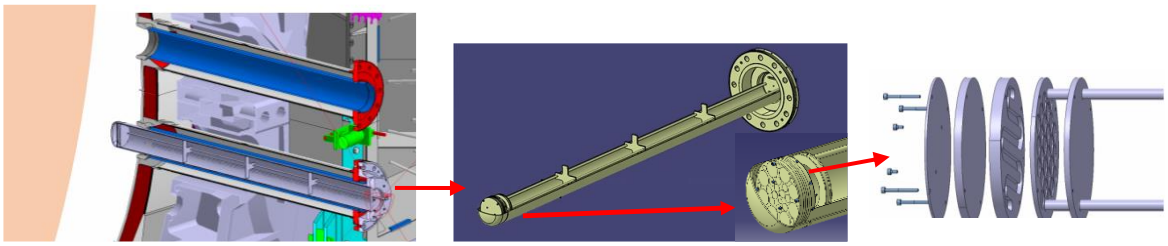


Εικόνα 4. Κάψουλες ανιχνευτών VERDI από υλικό γραφίτη (αριστερά) και CMC (δεξιά) [24]

2.4.4. Οι ανιχνευτές VERDI που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της Δ.Ε.

Οι δυνατότητες των ανιχνευτών VERDI έχουν μελετηθεί μέσω πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί σε πεδία νετρονίων στο Frascati Neutron Generator (FNG) του ENEA στο Frascati της Ιταλίας και σε πραγματικές συνθήκες σύντηξης στο Joint European Torus (JET) στο Culham του Ηνωμένου Βασιλείου.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν ανιχνευτές που είχαν ακτινοβοληθεί σε πηγή πλάσματος δευτερίου-δευτερίου (D-D) στο Long Term Irradiation Station (LTIS) του JET από τις 30 Ιουλίου 2019 8:51:27 έως τις 20 Δεκεμβρίου 2019 21:30:17 (ζώνη ώρας: UTC+0). Μετά την ακτινοβόλησή τους, οι ανιχνευτές έφτασαν στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» στις 16 Μαρτίου 2020.



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση των δειγματοφορέων όπου τοποθετήθηκαν οι ανιχνευτές VERDI (από αριστερά: σωλήνας δειγματοφορέων στο tokamak, δειγματοφορείς εντός του σωλήνα, διάταξη δειγματοφορέων) [24]

Κατά την ακτινοβόληση οι ανιχνευτές VERDI τοποθετήθηκαν σε δύο δειγματοφορείς (ACT sub-holder και RADA sub-holder), οι οποίοι βρίσκονται στερεωμένοι πάνω σε άξονα που έρχεται σε επαφή με το πλάσμα και φαίνεται στην Εικόνα 5. Σημειώνεται ότι ο ACT sub-holder βρισκόταν εγγύτερα στο πλάσμα. Κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης, εκπέμφθηκαν από την πηγή πλάσματος 3.15×10^{19} νετρόνια ± 10%. Λαμβάνοντας υπόψη το υπολογιστικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για το tokamak, εκτιμάται ότι η ολοκληρωμένη ροή των νετρονίων στη θέση ακτινοβόλησης των δειγμάτων κυμαίνεται από 1.83×10^{14} έως 1.92×10^{14} n/cm^2, ανάλογα με τη θέση του ανιχνευτή [25].

Οι ανιχνευτές VERDI που μελετώνται στην παρούσα εργασία είναι συνολικά οκτώ: δύο με κάψουλα γραφίτη, οι οποίοι ακτινοβολήθηκαν στο ACT sub-holder και 6 οι οποίοι ακτινοβολήθηκαν στο RADA sub-holder, οι μισοί εκ των οποίων είχαν κάψουλα γραφίτη και οι άλλοι μισοί κάψουλα από CMC. Επίσης, δύο από τους ανιχνευτές στο RADA sub-holder επιλέχθηκαν να μείνουν κενοί -ένας με κάψουλα γραφίτη και ένας με κάψουλα από CMC- ώστε να μελετηθεί η ενεργοποίηση ιχνοστοιχείων του υλικού της κάψουλας που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται ο κάθε δειγματοφορέας με τους αντίστοιχους ανιχνευτές καθώς και τα άλλα δείγματα.

Εικόνα 6. Οι δειγματοφορείς ACT (αριστερά) και RADA (δεξιά) με τους ανιχνευτές VERDI [24]

Αναλυτικά τα στοιχεία των ανιχνευτών VERDI που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία δίνονται στον Πίνακα 2 για τους ανιχνευτές στο ACT sub-holder και στον Πίνακα 3 για τους ανιχνευτές στο RADA sub-holder. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται η κωδική ονομασία της κάψουλας, η κωδική ονομασία του ανιχνευτή, τα υλικά από τα οποία αποτελείται ο κάθε ανιχνευτής, το πάχος του κάθε ελάσματος καθώς και η μάζα του. Σημειώνονται επίσης τα αντίστοιχα μεγέθη για το υλικό του περιβλήματος και αναγράφονται οι σχετικές θέσεις των ελασμάτων μέσα στην κάψουλα [24].

Πίνακας 2. Σύσταση ανιχνευτών VERDI ακτινοβολημένων στο "ACT sub-holder"

Κωδικός κάψουλας	Κωδικό όνομα ανιχνευτή	Στοιχεία υλικών-στόχων			
		Στοιχείο	Τύπος	Πάχος (mm)	Μάζα (g)
GR17.5-fC10-adh-1	VERDI_ACT_15	graphite	καπάκι	0.6000	0.3237
		Y	έλασμα	0.1250	0.0459
		Mn88/Ni12	έλασμα	0.0125	0.0075
		Ag	έλασμα	0.0040	0.0032
		Rh	έλασμα	0.0250	0.0241
		Au	έλασμα	0.0040	0.0065
		Ni	έλασμα	0.0070	0.0044
		Nb	έλασμα	0.0010	0.0008
		Ti	έλασμα	0.2500	0.0880
		graphite	βάση	0.2500	0.2450
GR17.5-fC10-adh-2	VERDI_ACT_16	graphite	καπάκι	0.6000	0.3134
		Y	έλασμα	0.1250	0.0450
		Mn88/Ni12	έλασμα	0.0125	0.0068
		Ag	έλασμα	0.0040	0.0033
		Rh	έλασμα	0.0250	0.0246
		Au	έλασμα	0.0040	0.0066
		Ni	έλασμα	0.0070	0.0046
		Nb	έλασμα	0.0010	0.0009
		Ti	έλασμα	0.2500	0.0903
		graphite	βάση	0.2500	0.2460

Πίνακας 3. Σύσταση ανιχνευτών VERDI ακτινοβολημένων στο "RADA sub-holder"

Κωδικός κάψουλας	Κωδικό όνομα ανιχνευτή	Στοιχεία υλικών-στόχων			
		Στοιχείο	Τύπος	Thickness (mm)	Mass (g)
290318-17.5C-8f10-GrAd-1	VERDI_RADA_10	graphite	καπάκι	0.4370	0.1795
		Mn88/Ni12	έλασμα	0.0125	0.0066
		Ti	έλασμα	0.2500	0.0913
		Y	έλασμα	0.1250	0.0434
		Rh	έλασμα	0.0250	0.0238
		Ni	έλασμα	0.0070	0.0051
		Au	έλασμα	0.0040	0.0070
		Ag	έλασμα	0.0040	0.0035
		Nb	έλασμα	0.0010	0.0008
		graphite	βάση	0.6340	0.5217
290318-17.5C-8f10-GrAd-2	VERDI_RADA_11	graphite	καπάκι	0.5370	0.2301
		Mn88/Ni12	έλασμα	0.0125	0.0075
		Ti	έλασμα	0.2500	0.0910
		Y	έλασμα	0.1250	0.0450

		Rh	έλασμα	0.0250	0.0239
		Ni	έλασμα	0.0070	0.0048
		Au	έλασμα	0.0040	0.0068
		Ag	έλασμα	0.0040	0.0034
		Nb	έλασμα	0.0010	0.0009
		graphite	βάση	0.5320	0.4986
290318-17.5C-blank-GrAd-3	VERDI_RADA_12	graphite	καπάκι	0.4110	0.1697
		graphite	βάση	0.5720	0.5000
290318-17.5C-C SiC-8f10-GrAd-4	VERDI_RADA_13	CMC	καπάκι	0.5080	0.3080
		Mn88/Ni12	έλασμα	0.0125	0.0078
		Ti	έλασμα	0.2500	0.0915
		Y	έλασμα	0.1250	0.0453
		Rh	έλασμα	0.0250	0.0246
		Ni	έλασμα	0.0070	0.0047
		Au	έλασμα	0.0040	0.0068
		Ag	έλασμα	0.0040	0.0032
		Nb	έλασμα	0.0010	0.0008
		CMC	βάση	0.5700	0.6940
290318-17.5C-C SiC -8f10-GfAd-5	VERDI_RADA_14	CMC	καπάκι	0.5400	0.3288
		Mn88/Ni12	έλασμα	0.0125	0.0082
		Ti	έλασμα	0.2500	0.0877
		Y	έλασμα	0.1250	0.0444
		Rh	έλασμα	0.0250	0.0240
		Ni	έλασμα	0.0070	0.0050
		Au	έλασμα	0.0040	0.0068
		Ag	έλασμα	0.0040	0.0035
		Nb	έλασμα	0.0010	0.0007
		CMC	βάση	0.4710	0.6817
290318-17.5C-C SiC -blank -6	VERDI_RADA_15	CMC	καπάκι	0.4230	0.2526
		CMC	βάση	0.5140	0.6624

Η ανάλυση των ανιχνευτών VERDI μετά το τέλος της ενεργοποίησης δίνει τα απαραίτητα δεδομένα για την ανακατασκευή του προσπίπτοντος φάσματος νετρονίων. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να υπολογιστεί η ενεργότητα των παραγόμενων ισοτόπων η οποία συνδέεται με το συνολικό πλήθος των νετρονίων με το οποίο ακτινοβολήθηκαν οι ανιχνευτές. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιείται προσδιορισμός των προϊόντων ενεργοποίησης με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3: Η μέθοδος της γ-φασματοσκοπίας με σύστημα Compton Suppression

Η παρούσα εργασία εφαρμόζει τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας για τη μελέτη των ενεργοποιημένων υλικών των ανιχνευτών VERDI, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω αναλύονται τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη που επηρεάζουν τη μέτρηση των ακτίνων-γ καθώς και οι πιο διαδεδομένες ανιχνευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μετρήσεις.

3.1. Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

Για την ανίχνευση οποιασδήποτε ακτινοβολίας απαιτείται η παραγωγή φορτισμένων σωματιδίων και στη συνέχεια η συλλογή του αντίστοιχου ηλεκτρικού σήματος. Σε αντίθεση όμως με τα σωματίδια α και β, η ακτινοβολία-γ δε φέρει ηλεκτρικό φορτίο, οπότε η ανίχνευσή της βασίζεται σε αλληλεπιδράσεις των φωτονίων μέσα στο υλικό του ανιχνευτή. Μέσω των αλληλεπιδράσεων αυτών μεταφέρεται ενέργεια από τα φωτόνια σε ηλεκτρόνια του υλικού, τα οποία στη συνέχεια είναι ανιχνεύσιμα λόγω φαινομένων ιονισμού και διέγερσης των ατόμων στον ανιχνευτή.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι βασικές αλληλεπιδράσεις φωτονίων με την ύλη, δηλαδή το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton και η δίδυμη γένεση. Επιλέγεται να μη γίνει ιδιαίτερη αναφορά στη σκέδαση Rayleigh (κυρίως ελαστική σκέδαση Η/Μ ακτινοβολίας με σωματίδια μεγέθους μικρότερο από το μήκος κύματος του φωτονίου), τη σκέδαση Thomson (ελαστική σκέδαση φωτονίων με ελεύθερα φορτισμένα σωματίδια) και τις αντιδράσεις απορρόφησης φωτονίου από πυρήνα καθώς αυτές δεν αξιοποιούνται στη γ-φασματοσκοπία, ούτε την επηρεάζουν. Λεπτομερής περιγραφή όλων των αλληλεπιδράσεων των φωτονίων με την ύλη μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία [26].

3.1.1. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Πρόκειται για την πλήρη απορρόφηση ενός φωτονίου από το άτομο και την ταυτόχρονη εκπομπή ενός δέσμιου ηλεκτρονίου από κάποια στιβάδα του ατόμου. Ισχύει $E_e = E_\gamma - E_b$, όπου E_e : κινητική ενέργεια εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου, E_γ: ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου και E_b: ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο.

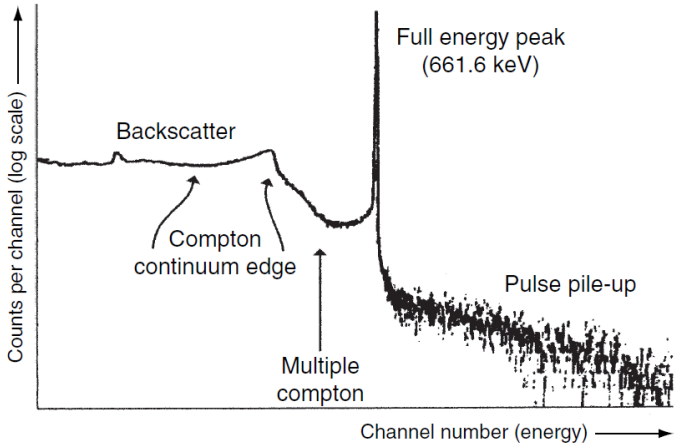
Το άτομο, ακόμα και μετά την εκπομπή του ηλεκτρονίου, βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση με περίσσεια ενέργειας E_b και μπορεί να αποδιεγερθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η ανακατανομή της πλεονάζουσας ενέργειας στα υπόλοιπα ηλεκτρόνια του ατόμου, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπή ηλεκτρονίων Auger με συνέπεια τη μεταφορά ενός ακόμα ποσοστού της αρχικής ενέργειας του φωτονίου στον ανιχνευτή. Ο δεύτερος τρόπος είναι η κατάληψη της κενής θέσης του φωτοηλεκτρονίου από ηλεκτρόνιο υψηλότερης στιβάδας, η οποία συνοδεύεται από την εκμποπή μιας χαρακτηριστικής ακτίνας-Χ. Υπάρχει πιθανότητα η ακτίνα αυτή να απορροφηθεί ξανά και να εκπεμφθεί άλλη ακτίνα-Χ οπότε το φαινόμενο συνεχίζεται μέχρι να αποδοθεί όλη η ενέργεια του αρχικού φωτονίου στον ανιχνευτή. Ως αποτέλεσμα του φαινομένου εμφανίζεται στο φάσμα του ανιχνευτή μία καλά σχηματισμένη κορυφή, η

οποία αντιστοιχεί στην ενέργεια του αρχικού φωτονίου και αναφέρεται ως φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης.

3.1.2. Φαινόμενο Compton

Η σκέδαση Compton είναι ανελαστική σκέδαση του φωτονίου με ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου, στο οποίο μεταφέρει μέρος της ενέργειάς του. Τα δύο σωματίδια σκεδάζονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις με διαφορετικές ενέργειες από τις αρχικές τους και όλες οι γωνίες σκέδασης είναι πιθανές.

Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη μεταφορά ενέργειας από το φωτόνιο στο ηλεκτρόνιο γίνεται όταν υπάρξει οπισθοσκέδαση (backscatter) και εμφανίζεται στο φάσμα η αιχμή Compton αριστερά της φωτοκορυφής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Η σχετικά επίπεδη περιοχή του φάσματος ανάμεσα στην περίπτωση μηδενικής μεταφοράς ενέργειας (για 0°) και μέγιστης μεταφοράς (για 180°) ονομάζεται συνεχές υπόστρωμα Compton (Compton continuum) και οφείλεται σε συνεχόμενες σκεδάσεις σε διάφορες γωνίες, χωρίς ωστόσο να αποδίδεται η πλήρης ενέργεια του αρχικού φωτονίου στο υλικό του ανιχνευτή.



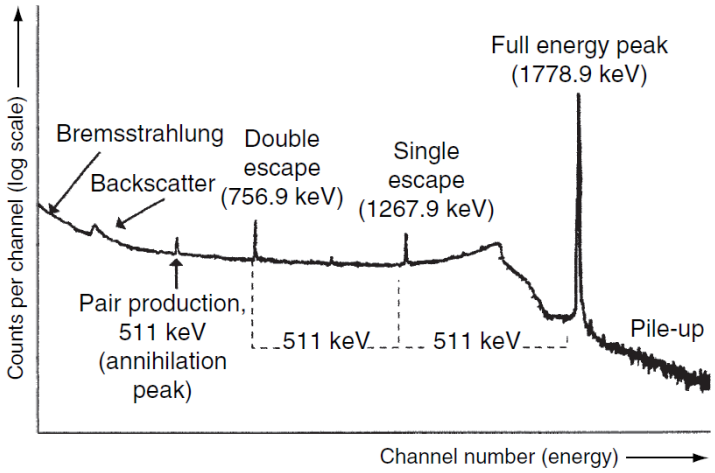
Εικόνα 7. Φάσμα γ-φασματοσκοπίας όπου φαίνεται το συνεχές υπόστρωμα Compton και η φωτοκορυφή [26]

3.1.3. Δίδυμη γένεση

Σε αντίθεση με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και τη σκέδαση Compton, η δίδυμη γένεση προκαλείται από την αλληλεπίδραση ολόκληρου του ατόμου με το φωτόνιο. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει μέσα στο πεδίο Coulomb του πυρήνα και οδηγεί στη μετατροπή της ακτίνας-γ σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Προφανώς, για να συμβεί αυτή η αλληλεπίδραση απαιτείται ενέργεια κατωφλίου ίση με τη συνολική μάζα ηρεμίας των δύο σωματιδίων (511 keV το καθένα), δηλαδή 1022 keV.

Ωστόσο, όταν το ποζιτρόνιο «θερμοποιηθεί» (έχει δηλαδή ενέργεια ίση με περίπου 0.025 eV σε θερμοκρασία δωματίου), τότε εξαϋλώνεται με ένα ηλεκτρόνιο παράγοντας δύο αντιδιαμετρικά φωτόνια με

ενέργεια 511 keV το καθένα. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει σε χρονικό διάστημα 1 ns που είναι σαφώς μικρότερο του χρόνου ανίχνευσης (100-700 ns για τους περισσότερους ανιχνευτές), οπότε η εξαΰλωση θεωρείται ταυτόχρονο συμβάν με τη δίδυμη γένεση. Εάν το ένα από τα δύο αυτά φωτόνια διαφύγει από τον ανιχνευτή και το άλλο αποδόσει την ενέργειά του μέσα σε αυτόν, παρατηρείται μία κορυφή κατά 511 keV χαμηλότερης ενέργειας από την αρχική ενέργεια του συγκεκριμένου φωτονίου (single escape peak). Αν διαφύγουν και τα δύο, εμφανίζεται μία κορυφή με ενέργεια κατά 1022 keV χαμηλότερη από την φωτοκορυφή που θα αντιστοιχούσε στο αρχικό φωτόνιο (double escape peak). Οι κορυφές αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Φάσμα γ-φασματοσκοπίας όπου φαίνονται οι κορυφές μονής και διπλής διαφυγής λόγω δίδυμης γένεσης, το συνεχές υπόστρωμα Compton και η φωτοκορυφή [26]

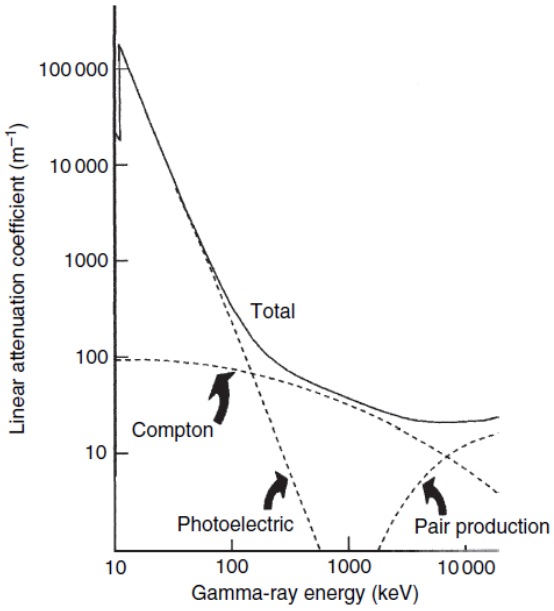
3.2. Εξασθένηση ακτίνων-γ μέσα στην ύλη

Σημαντική παράμετρος στη μελέτη αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας γ με την ύλη είναι η εξασθένηση δέσμης ακτίνων-γ μέσα από συγκεκριμένο πάχος υλικού απορροφητή. Ένας δείκτης αυτής της εξασθένησης που υφίσταται η δέσμη φωτονίων είναι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (m^{-1}). Για παράλληλη μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων με ένταση I_0 (φωτόνια·m^{-2}·s^{-1}) που προσπίπτει κάθετα σε απορροφητή πάχους x, το υλικό του οποίου έχει ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ, η ένταση I της εξερχόμενης από τον απορροφητή δέσμης υπολογίζεται από την εξής σχέση [26]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \qquad (10)$$

Ο συντελεστής μ εκφράζει την ανά μονάδα μήκους πιθανότητα ένα φωτόνιο, που κινείται μέσα στο υλικό του απορροφητή, να υποστεί κάποια από τις αλληλεπιδράσεις που περιγράφονται στην παράγραφο 3.1, οι οποίες οδηγούν στην αλλαγή της κατεύθυνσής του, τη μείωση της ενέργειάς του ή την εξαφάνισή του [27].

Στην Εικόνα 9 φαίνονται με διακεκομμένη γραμμή οι γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης για κάθε ένα από τα φαινόμενα της παραγράφου 3.1 και με συνεχόμενη γραμμή ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων.



Εικόνα 9. Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης φωτονίων συναρτήσει της ενέργειάς τους [26]

Το διάγραμμα δείχνει επίσης ποια αλληλεπίδραση είναι πιο πιθανή σε κάθε ενεργειακή περιοχή, με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο να είναι η κύρια αλληλεπίδραση στις χαμηλές ενέργειες φωτονίων έως ~100 keV, η δίδυμη γένεση να κυριαρχεί στις αρκετά υψηλές ενέργειες (> 10 MeV) και το φαινόμενο Compton να είναι η πιο πιθανή αλληλεπίδραση για τις ενδιάμεσες ενέργειες φωτονίων.

3.2.1. Αυτοαπορρόφηση ακτίνων-γ

Ένα αρκετά σημαντικό φαινόμενο που αξίζει να αναφερθεί είναι η αυτοαπορρόφηση φωτονίων. Πρόκειται για φαινόμενο κατά το οποίο φωτόνια τα οποία εκπέμπονται από ένα δείγμα όγκου απορροφώνται μέσα στο ίδιο το δείγμα και δεν ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή. Η αυτοαπορρόφηση φωτονίων εξαρτάται σημαντικά από την ενέργεια των φωτονίων και από το υλικό του δείγματος με συνέπεια η ένταση του φαινομένου κατά την ανάλυση ενός δείγματος να είναι διαφορετική από αυτήν που εμφανίζεται μέσα στην πρότυπη πηγή κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης της απόδοσης του ανιχνευτή [27]. Η αντιμετώπιση του προβλήματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους ανάλογα με τα δεδομένα που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση.

i. Παραγωγή πρότυπων πηγών βαθμονόμησης της ίδιας γεωμετρίας και σύστασης ίδιας ή όμοιας με τη σύσταση των αναλυόμενων δειγμάτων. Κάθε πρότυπη πηγή οδηγεί στην εκτίμηση της απόδοσης για την υπόψιν γεωμετρία, σύσταση του υλικού και ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων. Στη συνέχεια, για την εκτίμηση της ενεργότητας ενός δείγματος χρησιμοποιείται η απόδοση που έχει εκτιμηθεί από την πρότυπη πηγή της ίδιας ή όμοιας σύστασης [28]. Σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί πρόκληση ο ακριβής προσδιορισμός της ενεργότητας της πρότυπης πηγής, ενώ η υπόλοιπη διαδικασία είναι πιο απλή σε σχέση με τις άλλες μεθόδους.

ii. Βαθμονόμηση απόδοσης με πρότυπη πηγή και εκτίμηση συντελεστή αναγωγής απόδοσης από το υλικό της πηγής βαθμονόμησης στο υλικό του αναλυόμενου δείγματος λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης ανάμεσα στην πηγή βαθμονόμησης και το αναλυόμενο δείγμα [28]. Σε αυτήν την περίπτωση η εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης μέσω αναλυτικών μαθηματικών σχέσεων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία σε αρκετές περιπτώσεις περιλαμβάνει παραδοχές όσον αφορά τη γεωμετρία του προβλήματος.

iii. Απευθείας εκτίμηση της απόδοσης για τη γεωμετρία και τη συγκεκριμένη σύσταση του υλικού που ενδιαφέρει, είτε με προσομοίωση Monte Carlo, είτε με αριθμητικό υπολογισμό [28]. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί όταν οι προηγούμενες δύο μέθοδοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ωστόσο ενέχει και αυτή παραδοχές που αφορούν την ομοιομορφία του κρυστάλλου του ανιχνευτή και απαιτεί λεπτομερή και ακριβή περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή, τα οποία δεν είναι πάντα γνωστά.

3.3. Κύρια είδη ανιχνευτών γ-φασματοσκοπίας

Η ανίχνευση της γ-ακτινοβολίας γίνεται με αξιοποίηση των φαινομένων αλληλεπίδρασής της με την ύλη, τα οποία παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.1. Ένας ιδανικός ανιχνευτής γ-φασματοσκοπίας θα πρέπει να ικανοποιεί τις εξής προδιαγραφές :

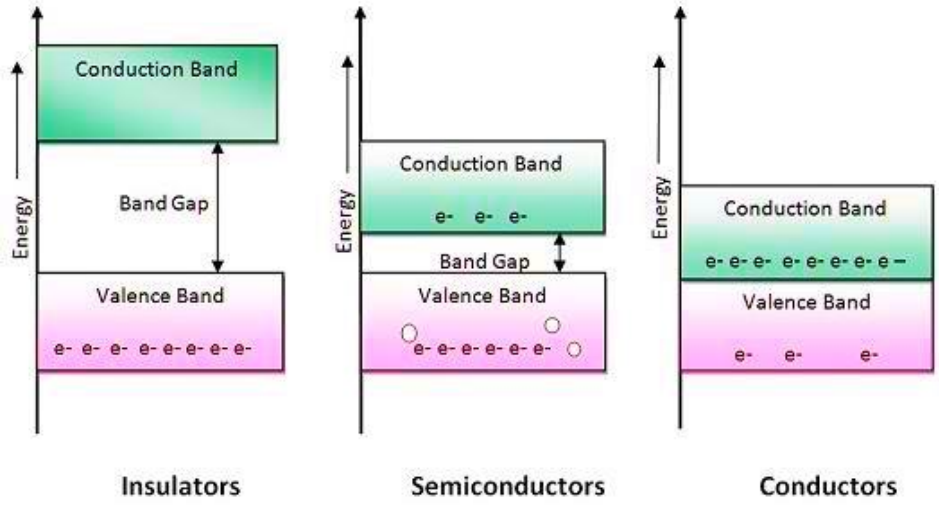
i. Ρεύμα εξόδου ανάλογο της ενέργειας της εισερχόμενης γ-ακτινοβολίας
ii. Καλή απόδοση ανίχνευσης, δηλαδή υψηλό συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας
iii. Κατάλληλο μηχανισμό για εύκολη συλλογή του παραγόμενου σήματος
iv. Ικανοποιητική ενεργειακή διακριτική ικανότητα
v. Σταθερή λειτουργία με τη μεταβολή παραμέτρων όπως η θερμοκρασία κ.ά.
vi. Λογικό κόστος και πρακτικό μέγεθος

Στις παραγράφους 3.3.2 και 3.3.3 παρουσιάζονται τα δύο πιο διαδεδομένα είδη ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στη γ-φασματοσκοπία: οι ανιχνευτές ημιαγωγών και οι ανιχνευτές σπινθηρισμού. Για την κατανόηση της λειτουργίας τους, ωστόσο, χρειάζεται πρώτα αναφορά στις ενεργειακές ζώνες των υλικών, στις οποίες οφείλονται οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

3.3.1. Ενεργειακές ζώνες υλικών

Στα στερεά τα ηλεκτρόνια των ατόμων κατανέμονται σε διακριτά επίπεδα ανάλογα με την ενέργειά τους και κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα (ζώνη) περιέχει συγκεκριμένο αριθμό ηλεκτρονίων. Ανάμεσα σε αυτά τα επίπεδα υπάρχουν ενεργειακά απαγορευμένες περιοχές λόγω κβαντικών φαινομένων. Η υψηλότερη ενεργειακά κατειλημμένη ζώνη ονομάζεται ζώνη σθένους και οι χημικές ιδιότητες των υλικών οφείλονται στα ηλεκτρόνια αυτής της ζώνης. Για να μπορέσει ένα ηλεκτρόνιο να κινηθεί μέσα στο υλικό, θα πρέπει να είναι αρχικά εφικτό να μεταπηδήσει ανάμεσα στις ενεργειακές ζώνες μέσα στο ίδιο το άτομο. Επομένως αν υπάρχει δυνατότητα μετακίνησης ενός ατόμου σε ζώνη με κατάλληλη ενέργεια, τότε η εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου δημιουργεί ρεύμα ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Η ευκολία με την οποία γίνεται αυτό είναι διαφορετική ανάλογα με την κατηγορία του υλικού και με βάση αυτήν την

κατηγοριοποίηση τα υλικά χωρίζονται σε μονωτές, αγωγούς και ημιαγωγούς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10. Σχηματικό ενεργειακό διάγραμμα ενός μονωτή, ενός ημιαγωγού και ενός αγωγού [29]

i. Μονωτές: Η ζώνη σθένους (valence band) είναι πλήρης και οι επόμενες διαθέσιμες ενεργειακές ζώνες βρίσκονται σε ένα υψηλότερο επίπεδο που ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας (conduction band), ενώ τις δύο αυτές ζώνες χωρίζει μια απαγορευμένη περιοχή (band gap). Για να καταφέρει ένα ηλεκτρόνιο να κινηθεί μέσα στο υλικό, θα πρέπει να αποκτήσει αρκετή ενέργεια ώστε να καλύψει το ενεργειακό χάσμα E_g της απαγορευμένης περιοχής. Αυτή η ενέργεια για τους μονωτές είναι ~10 eV, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που είναι διαθέσιμη λόγω θερμικής διέγερσης. Επομένως δεν παρατηρείται μετακίνηση ηλεκτρονίων σε αυτά τα υλικά ανεξαρτήτως του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

ii. Αγωγοί: Η ζώνη σθένους δεν είναι πλήρης και στην πραγματικότητα παρατηρείται υπερκάλυψη μεταξύ της ζώνης αυτής και της ζώνης αγωγιμότητας, αφού δεν υπάρχει απαγορευμένη περιοχή. Λόγω θερμικής διέγερσης, η ζώνη αγωγιμότητας έχει συνεχώς μερική κατάληψη από ηλεκτρόνια και η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου ακόμα και μικρής έντασης, δημιουργεί ρεύμα μέσα στο υλικό. Δε χρησιμοποιούνται αυτά τα υλικά στη γ-φασματοσκοπία καθώς η δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος από την αλληλεπίδραση με τη γ-ακτινοβολία είναι πολύ μικρή σε σχέση με το ρεύμα που δημιουργείται αυτόματα στο υπόβαθρο.

iii. Ημιαγωγοί: Το ενεργειακό διάγραμμα των ημιαγωγών είναι παρόμοιο με των μονωτών. Η ζώνη σθένους είναι και σε αυτήν την περίπτωση πλήρης, ωστόσο το ενεργειακό κενό E_g είναι ~1 eV στους ημιαγωγούς, άρα είναι πιθανή η μεταπήδηση ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας λόγω θερμικής διέγερσης. Υπό κανονικές συνθήκες, θα υπάρχει συνεχώς ένας μικρός αριθμός ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και το υλικό θα παρουσιάζει, χαμηλή μεν, ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να βρεθεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας έχει έντονη εξάρτηση από τη θερμοκρασία, επομένως οι ανιχνευτές ημιαγωγών, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια, ψύχονται σε κατάλληλες θερμοκρασίες ώστε να διατηρείται

μικρός ο πληθυσμός των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και το ρεύμα που δημιουργείται να οφείλεται κυρίως στη διέγερση του υλικού από την αλληλεπίδραση με τη γ-ακτινοβολία.

3.3.2. Ανιχνευτές ημιαγωγών

Οι ανιχνευτές αυτοί βασίζουν τη λειτουργία τους στις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγώγιμων υλικών για την παραγωγή ρεύματος ανάλογου της προσπίπτουσας σε αυτούς γ-ακτινοβολίας, το οποίο στη συνέχεια συλλέγεται με την εφαρμογή κατάλληλου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτές οι ιδιότητες προκύπτουν από τις ενεργειακές ζώνες στις οποίες κατανέμονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στο κρυσταλλικό πλέγμα των υλικών.

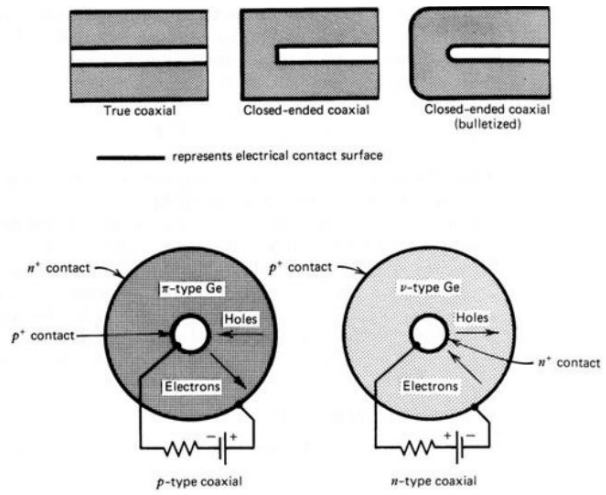
Συγκεκριμένα, το προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ή διεγείρει ένα αρχικό ηλεκτρόνιο σε ενέργειες αρκετά μεγαλύτερες από την ενέργεια που απαιτείται για θερμική διέγερση, επομένως ηλεκτρόνια σε πολύ χαμηλότερες ζώνες από τη ζώνη σθένους προάγονται σε ζώνες υψηλότερες από τη ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς) και οι οπές που αυτά αφήνουν (θετικοί φορείς) ανακαταμένονται στις διαθέσιμες ενεργειακές ζώνες έως ότου οι οπές βρίσκονται στην κορυφή της ζώνης σθένους και τα ηλεκτρόνια στη βάση της ζώνης αγωγιμότητας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας επάγονται και άλλες διεγέρσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας αλληλουχίας (cascade) ηλεκτρονίων-οπών για κάθε αρχικό ηλεκτρόνιο. Έτσι, ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που παράγονται (n) είναι ανάλογος της απορροφώμενης ενέργειας από το φωτόνιο (E_{abs}) και αντιστρόφως ανάλογος με τη μέση ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής ($\in$) ως εξής [26]:

$$n = \frac{E_{abs}}{\in} \qquad (11)$$

Υπό κανονικές συνθήκες (απουσία εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου), τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας θα αποδιεγείρονταν και θα επέστρεφαν στη ζώνη σθένους. Με την εφαρμογή, ωστόσο, εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αυτά μετακινούνται πάνω στις δυναμικές γραμμές του πεδίου και άρα μπορούν να συλλεχθούν και να αναλυθούν με σκοπό τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

Το πιο διαδεδομένο υλικό στους ανιχνευτές ημιαγωγών είναι ο κρύσταλλος γερμανίου (Ge) ο οποίος πλέον κατασκευάζεται με ειδικές διεργασίες ώστε να περιέχει εξαιρετικά μικρό ποσοστό ατελειών και ονομάζεται κρύσταλλος υπερκαθαρού γερμανίου (hyper-pure or high-purity Germianium - HPGe).

Υπάρχουν διάφορες γεωμετρίες κατασκευής του ανιχνευτή, με πιο διαδεδομένη αυτή του κλειστού τύπου-p ομοαξονικού ανιχνευτή HPGe με προστατευτικό περίβλημα αλουμινίου (Al), ο οποίος έχει κάτω όριο ανίχνευσης στα 40 keV. Συνήθως αυτού του τύπου ανιχνευτές έχουν εξωτερική επαφή-n πάχους ~700 μm, η οποία αποτελεί «νεκρό στρώμα» (dead layer), δηλαδή δεν μπορεί να γίνει ανίχνευση γ-ακτινοβολίας εκεί. Ο κρύσταλλος έχει κυλινδρικό σχήμα με μικρή οπή στο κέντρο του για την εισαγωγή του ενός ηλεκτροδίου συλλογής ρεύματος (το άλλο βρίσκεται στην εξωτερική του επιφάνεια), όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Επίσης, είναι συχνή πρακτική η αφαίρεση υλικού περιφερειακά από το πάνω μέρος του με σκοπό τη μείωση του νεκρού στρώματος, διαδικασία η οποία αναφέρεται ως ‘‘bulletization’’ καθώς η γεωμετρία θυμίζει το σχήμα μιας σφαίρας [26]. Τέλος, σημειώνεται πως οι ανιχνευτές γερμανίου πρέπει κατά τη λειτουργία τους να ψύχονται, επομένως βρίσκονται συνδεδεμένοι σε δοχείο dewar που περιέχει υγρό άζωτο (LN_2), το οποίο έχει σημείο βρασμού στους 77 K.



Εικόνα 11. Τύποι ομοαξονικού ανιχνευτή (πάνω) και ηλεκτρόδια ανιχνευτή σε διατομή (κάτω) [30]

3.3.3. Ανιχνευτές σπινθηρισμού

Οι ανιχνευτές σπινθηρισμού χρησιμοποιούνται από την εποχή που ανακαλύφθηκε η ραδιενέργεια έως σήμερα και μπορούν να ανιχνεύσουν διάφορα είδη ακτινοβολίας, όπως α, β, γ. Όπως και στους ανιχνευτές ημιαγωγών, η εισερχόμενη ακτίνα-γ αλληλεπιδρά με το υλικό του ανιχνευτή με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρεύματος ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των σπινθηριστών, ωστόσο, η συλλογή του σήματος δε γίνεται με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου αλλά με τη μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια σε άτομα τα οποία αποδιεγείρονται παράγοντας φως. Αυτό στη συνέχεια συλλέγεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Ένα οικονομικό και διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες υλικό, το οποίο προσφέρει παράλληλα μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ακτίνων-γ είναι ο κρύσταλλος από ιωδιούχο νάτριο (NaI) με ενεργοποιητή από θάλλιο (Tl). Μάλιστα, σε αντίθεση με τους ανιχνευτές ημιαγωγών, ένας ανιχνευτής NaI μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασία δωματίου, όπου παρουσιάζει τη μέγιστη παραγωγή οπτικού σήματος.

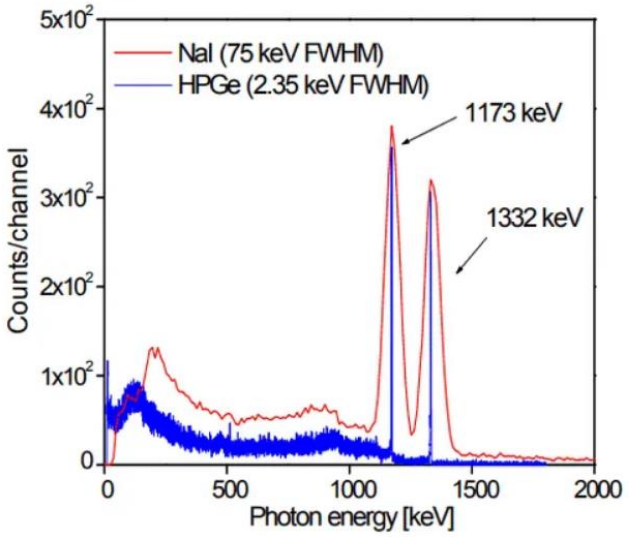
Παράλληλα, ωστόσο, παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες. Είναι ευαίσθητος σε δονήσεις και καταπόνηση, με αποτέλεσμα να χρειάζεται προσοχή στο χειρισμό του, επηρεάζεται από απότομες αλλαγές στη θερμοκρασία και είναι υδροσκοπικός, δηλαδή απορροφά υγρασία από το περιβάλλον, γεγονός που αλλοιώνει τις οπτικές του ικανότητες και μειώνει την αποδοσή του. Για το λόγο αυτό, οι κρύσταλλοι NaI είναι ερμητικά κλειστοί σε κατάλληλο περίβλημα.

3.3.4. Σύγκριση ανιχνευτών HPGe και NaI

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη αναφορά σε δύο βασικές ιδιότητες κάθε ανιχνευτή και η σύγκριση αυτών ανάμεσα στους ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) και ιωδιούχου νατρίου (NaI).

Σημαντική παράμετρος ενός ανιχνευτή είναι η ενεργειακή διακριτική του ικανότητα (energy resolution), δηλαδή το κατά πόσο μπορεί να διακρίνει δύο διαφορετικές ακτίνες-γ σε κοντινές ενέργειες. Αυτή δίνεται από το μέγιστο πλάτος στο ήμισυ του ύψους (full width at half maximum - FWHM) της γκαουσιανής καμπύλης που αντιστοιχεί σε κάθε φωτοκορυφή του φάσματος. Κατά σύμβαση συνηθίζεται να αναφέρονται οι τιμές της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας στα 122.1 keV του ^{57}Co και στα 1332.5 keV του ^{60}Co.

Στο NaI απαιτείται η απορρόφηση ακτινοβολίας-γ με ενέργεια ~25 eV για την παραγωγή ενός φωτονίου, γεγονός που σημαίνει ότι χρειάζεται αρχική ακτινοβολία-γ ενέργειας ~100 eV για την παραγωγή ηλεκτρικού σήματος στη φωτοκάθοδο. Σε σύγκριση με τα 2.35 eV που απαιτούνται σε έναν ανιχνευτή HPGe, αυτό το ποσό ενέργειας είναι αρκετά μεγάλο, επομένως η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του γερμανίου είναι πολύ καλύτερη από του ιωδιούχου νατρίου και σε περιπτώσεις που είναι σημαντική αυτή η παράμετρος σε μία μέτρηση, θα πρέπει να επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος ανιχνευτή. Στην Εικόνα 12 φαίνεται η διαφορά στην ενεργειακή διακριτική ικανότητα του NaI σε σχέση με το HPGe.



Εικόνα 12. Φάσμα ^{60}Co από ανιχνευτή NaI (κόκκινο) και HPGe (μπλε) [31]

Η δεύτερη πολύ σημαντική παράμετρος είναι η ικανότητα του ανιχνευτή να ανιχνεύει τα εισερχόμενα σε αυτόν φωτόνια, η οποία ποσοτικοποιείται από την απόδοσή του. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί της απόδοσης, οι οποίοι αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.7.2.1. Είδη απόδοσης ανιχνευτή, αλλά σε αυτό το σημείο γίνεται αναφορά στη σχετική απόδοση ενός ανιχνευτή, δηλαδή στο συγκριτικό μέγεθος που συσχετίζει τις αποδόσεις δύο διαφορετικών ανιχνευτών μεταξύ τους. Έχει καθιερωθεί η σχετική απόδοση των ανιχνευτών να έχει ως σημείο αναφοράς την απόδοση ενός ανιχνευτή NaI (3 in)x(3 in).

Θεωρείται δηλαδή ότι η απόδοση αυτού του ανιχνευτή είναι 100% (ανιχνεύει όλα τα εισερχόμενα σε αυτόν φωτόνια) και η απόδοση κάθε άλλου ανιχνευτή συγκρίνεται με αυτήν την απόδοση.

Η απόδοση ενός ανιχνευτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθός του και εξαρτάται από το υλικό και τον τύπο του ανιχνευτή. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η απόδοση των σπινθηριστών είναι μεγαλύτερη από εκείνη των ημιαγωγών για ανιχνευτές ίδιων διαστάσεων.

3.4. Συλλογή και ανάλυση σήματος ανιχνευτών

Το αποτέλεσμα της διέλευσης της ακτινοβολίας-γ από το υλικό ενός ανιχνευτή είναι η παραγωγή μιας ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου ανάλογης της ενέργειας των εισερχόμενων ακτίνων-γ. Αυτό στη συνέχεια εξέρχεται από τον ανιχνευτή και οδηγείται σε κατάλληλο ηλεκτρονικό σύστημα για τη συλλογή του φορτίου, τη μέτρησή του και την αποθήκευση της πληροφορίας που περιέχει. Στη συνέχεια η πληροφορία αυτή οδηγείται σε υπολογιστικά προγράμματα με σκοπό την επεξεργασία και ανάλυση του σήματος με κατάλληλο τρόπο ώστε να διαμορφωθεί το σήμα από τους ανιχνευτές σε φάσμα ακτινοβολίας-γ.

3.4.1. Ηλεκτρονικά συστήματα γ-φασματοσκοπίας

Με στόχο την ανάλυση του σήματος που καταγράφεται σε κάθε ανιχνευτή -είτε ημιαγωγών, είτε σπινθηριμού- αυτός συνδέεται με τα εξής στοιχεία:

i. Τροφοδοτικό υψηλής τάσης: Απαραίτητη συνιστώσα για τη λειτουργία των ανιχνευτών, καθώς με τη διαφορά δυναμικού συλλέγεται το ηλεκτρικό φορτίο που έχει δημιουργηθεί στα υλικά των ανιχνευτών μετά την αλληλεπίδρασή τους με την ακτινοβολία-γ.

ii. Προενισχυτής: Βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στον ανιχνευτή, ώστε να γίνει η συλλογή του σήματος -χωρίς αυτό να αλλοιωθεί λόγω της αντίστασης των καλωδίων- και ουσιαστικά ολοκληρώνει το σήμα που προέρχεται από τον ανιχνευτή. Το ύψος του παλμού που προκύπτει από τον προενισχυτή είναι ανάλογο της ενέργειας της εισερχόμενης ακτινοβολίας-γ, ωστόσο χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία ώστε να αναλυθεί κατάλληλα, η οποία γίνεται από τις επόμενες συνιστώσες του ηλεκτρονικού συστήματος.

iii. Ενισχυτής: Στον ενισχυτή, πέρα από την ενίσχυση του σήματος, πραγματοποιούνται και άλλες διεργασίες για τη βελτιστοποίηση της μορφής του σήματος και την αναίρεση περίπλοκων φαινομένων που οφείλονται στα ηλεκτρονικά του συστήματος, τα οποία δεν θα αναφερθούν αναλυτικά καθώς ξεφεύγουν από το σκοπό της παρούσας εργασίας.

iv. Πολυκαναλικός αναλυτής (Multi Channel Analyzer-MCA): Σε αυτό το στάδιο γίνεται η συλλογή και η ταξινόμηση των παλμών που προέρχονται από τον ενισχυτή σε κανάλια (channels/bins) όπου ο αριθμός καναλιού έχει γραμμική εξάρτηση από την ενέργεια της ακτίνας-γ. Σε κάθε κανάλι αθροίζεται ο αριθμός των λογικών σημάτων που αντιστοιχούν σε αυτό και προκύπτει έτσι ένα ιστόγραμμα γεγονότων (ακτίνων-γ) συναρτήσει του καναλιού του MCA, το οποίο είναι το φάσμα της γ-φασματοσκοπικής μέτρησης.

Τα ηλεκτρονικά αυτά συστήματα είναι διαθέσιμα είτε ως ξεχωριστά εξαρτήματα τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες υποδοχές ενός Nuclear Instrumentation Module (NIM), είτε σε ολοκληρωμένα συστήματα που περιλαμβάνουν όλα τα παραπάνω εξαρτήματα και ονομάζονται επεξεργαστές/αναλυτές ψηφιακού σήματος (digital signal processors/digital signal analyzers - DSP/DSA). Οι δύο αυτές περιπτώσεις ηλεκτρονικών διατάξεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.

Εικόνα 13. Το NIM (αριστερά) [32] και το DSA (δεξιά) [33]
(τα δύο συστήματα δεν είναι σε ίδια κλίμακα)

3.4.2. Λογισμικά ανάλυσης γ-φασματοσκοπίας

Για την προβολή και την επεξεργασία των φασμάτων ακτινοβολίας-γ, καθώς και τη λήψη και αποθήκευση των μετρήσεων, αξιοποιούνται κατάλληλα λογισμικά γ-φασματοσκοπίας. Σημαντική λειτουργία των λογισμικών αυτών είναι η αναγνώριση κορυφών, δηλαδή ο έλεγχος για το αν κάποια γκαουσιανή καμπύλη είναι αρκετά μικρή ώστε να οφείλεται σε διαταραχές του υποβάθρου ή αν αντιστοιχεί πράγματι σε μια φωτοκορυφή. Επιπλέον, μέσω αυτών των λογισμικών είναι εφικτή η αυτόματη ολοκλήρωση των φωτοκορυφών που έχουν αναγνωριστεί και η μέτρηση της καθαρής επιφάνειας που περιλαμβάνεται κάτω από αυτές, η οποία αντιστοιχεί στον αριθμό των γεγονότων (ακτίνων-γ) που ανιχνεύτηκαν από τη διάταξη σε συγκεκριμένο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης των ισοτόπων που περιέχει το δείγμα και ο υπολογισμός διαφόρων μεγεθών, όπως η ενεργότητα του δείγματος, μέσω των δεδομένων από τα λογισμικά γ-φασματοσκοπίας.

Δύο από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά γ-φασματοσκοπίας είναι το GammaVision [34] της εταιρείας ORTEC και το GENIE 2000 [35] της εταιρείας Mirion Technologies.

3.5. Συστήματα Compton Suppression

3.5.1. Γενικά στοιχεία των συστημάτων Compton Suppression

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.2. όταν ένα φωτόνιο εισέλθει στον ανιχνευτή και αλληλεπιδράσει με σκέδαση Compton με ένα ηλεκτρόνιο του υλικού, το φωτόνιο μεταφέρει μέρος της ενέργειάς του στο ηλεκτρόνιο και αλλάζει κατεύθυνση με αποτέλεσμα είτε να αλληλεπιδράσει ξανά μέσα στον ανιχνευτή μέχρι να απωλέσει όλη την ενέργειά του, είτε να διαφύγει από αυτόν. Έτσι, τα γεγονότα Compton

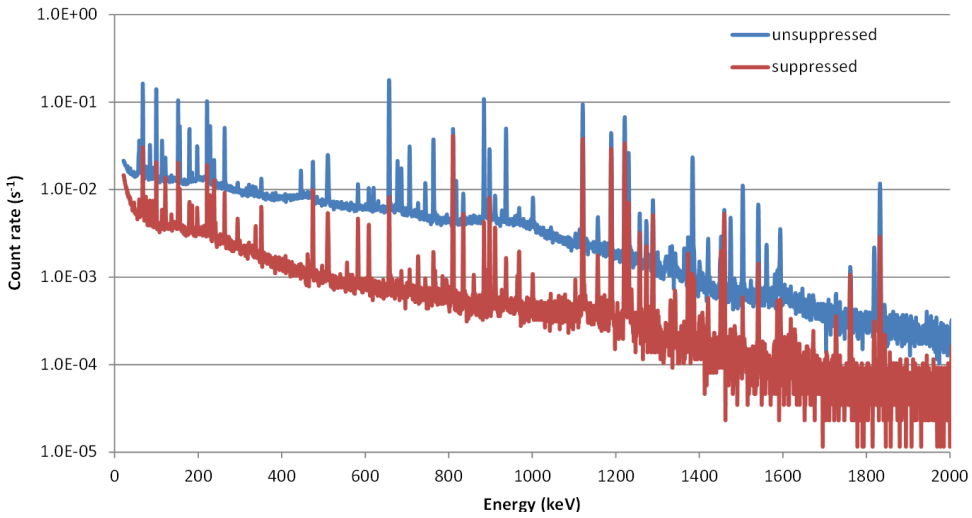
καταγράφονται στο φάσμα σε τυχαίες θέσεις αριστερά της αντίστοιχης φωτοκορυφής που θα σχημάτιζε κάθε φωτόνιο αν αλληλεπιδρούσε μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης) και δεν μπορεί από αυτά να εξαχθεί πληροφορία σχετικά με την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτίνας-γ. Δημιουργείται λοιπόν μια σχετικά επίπεδη περιοχή στο φάσμα η οποία οφείλεται στις σκεδάσεις Compton και δυσκολεύει την ανίχνευση ασθενών φωτοκορυφών οι οποίες σχηματίζονται σε περιοχές του φάσματος με υψηλό συνεχές υπόστρωμα, κάτι που συχνά συμβαίνει για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, με αποτέλεσμα η ανάλυσή τους να καθίσταται δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη.

Με στόχο την παρακολούθηση των ακτίνων-γ που σκεδάζονται κατά Compton στο τέλος της δεκαετίας του ’50 -όταν κι η χρήση ανιχνευτών σπινθηρισμού έδωσε ώθηση στη μελέτη του φάσματος των ακτινοβολιών που προέρχονταν από ραδιενεργές διεργασίες- δημιουργήθηκε η ιδέα της χρήσης ενός επιπλέον ανιχνευτή, ο οποίος θα ανιχνεύει τα φωτόνια που διαφεύγουν από τον όγκο του κυρίως ανιχνευτή [36][37].

Επινοήθηκαν, έτσι, τα συστήματα Compton Suppression (Compton Suppression Systems - CSS) για τη μείωση του υποστρώματος Compton στη γ-φασματοσκοπία. Ο «πρωτεύων» ή «κυρίως» ανιχνευτής (primary detector), περιβάλλεται από ένα δεύτερο, ο οποίος είναι γνωστός ως «ενεργητική θωράκιση» (active shielding), «δευτερεύων» ανιχνευτής (secondary detector) ή ανιχνευτής «φύλακας» (guard detector). Η μέθοδος μείωσης του υποστρώματος στηρίζεται στη συσχέτιση των σημάτων των δύο ανιχνευτών. Σήματα που καταγράφονται και στους δύο ανιχνευτές «συγχρόνως» οφείλονται σε φωτόνια που έχουν αποδώσει στον πρωτεύοντα ανιχνευτή μόνο ένα κλάσμα της ενέργειάς του και συνεπώς δεν είναι αξιοποιήσιμα [36].

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression είναι η εξής: όταν ο δευτερεύων ανιχνευτής ανιχνεύσει ένα γεγονός αλληλεπίδρασης φωτονίου συγχρόνως με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή, δίνει κατάλληλο ηλεκτρονικό σήμα ώστε να μην καταγραφεί η αντίστοιχη αλληλεπίδραση στον πρωτεύοντα ανιχνευτή, καθώς πρόκειται για φωτόνιο που προέρχεται από σκέδαση Compton, το οποίο συνεισφέρει στη δημιουργία του συνεχούς υποστρώματος της διάταξης. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε μείωση του συνεχούς υποστρώματος και βελτιώνει τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης του πρωτεύοντα ανιχνευτή [36].

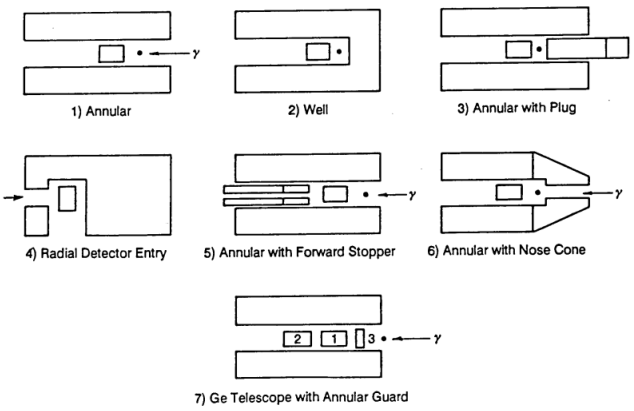
Ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη διάταξη, η αρχή λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression είναι σχεδόν πάντα η ίδια: τα σήματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ανιχνευτή χρησιμοποιούνται με σκοπό την εύρεση της χρονικής συσχέτισής τους. Εάν τα δύο σήματα παραχθούν εντός συγκεκριμένου «στενού» χρονικού παραθύρου, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ταυτόχρονα και κατά συνέπεια προέρχονται από την αλληλεπίδραση του ίδιου φωτονίου με τους δύο ανιχνευτές. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται ένα σήμα σύμπτωσης (coincidence event). Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται το σύστημα, η παραγωγή αυτού του σήματος σύμπτωσης μπορεί να οδηγήσει στην απόρριψη (λειτουργία αντισύμπτωσης - anti-coincidence) ή στην καταγραφή (λειτουργία σύμπτωσης - coincidence) του σήματος του πρωτεύοντος ανιχνευτή [36], οι οποίες αναλύονται στην παράγραφο 3.5.2. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται ενδεικτικά φάσματα για την ανιχνευτική διάταξη με το CSS όπου λαμβάνεται το unsuprressed φάσμα (μπλε) και το suppressed φάσμα (κόκκινο) που προκύπτει από τη λειτουργία του συστήματος σε αντισύμπτωση.



Εικόνα 14. Φάσμα του ίδιου δείγματος χωρίς χρήση CSS (μπλε) και με χρήση CSS (κόκκινο)

Η μείωση των γεγονότων σκέδασης Compton εξαρτάται από την ικανότητα του δευτερεύοντα ανιχνευτή να ανιχνεύσει τα σκεδαζόμενα φωτόνια. Για το λόγο αυτό, ως πρωτεύων ανιχνευτής επιλέγεται συνήθως ανιχνευτής HPGe, εξαιτίας της καλής διακριτικής ικανότητας που διαθέτει, ενώ ο δευτερεύων ανιχνευτής συχνά είναι ανιχνευτής σπινθηρισμού όπως NaI ή BGO, λόγω της υψηλής απόδοσης ανίχνευσης και του χαμηλότερου κόστους.

Πιθανές γεωμετρίες της διάταξης παρουσιάζονται στην Εικόνα 15 και οι παραδοσιακοί τρόποι διάταξης των δύο ανιχνευτών περιλαμβάνουν ενεργητική θωράκιση δακτυλιοειδούς σχήματος με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή τοποθετημένο στο κέντρο, χωρίς ή με χρήση «plug detector» (διάταξη 1 και διάταξη 3 στην Εικόνα 15, αντίστοιχα) [36]. Φυσικά, είναι δυνατό αυτές οι διατάξεις να στηθούν και κάθετα, ανάλογα τις ανάγκες και το χώρο του κάθε εργαστηρίου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η ανάγκη ψύξης του ανιχνευτή HPGe αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό της διάταξης ενός CSS, καθώς θα πρέπει να εξασφαλίζεται η σύνδεσή του με το δοχείο dewar του υγρού αζώτου.



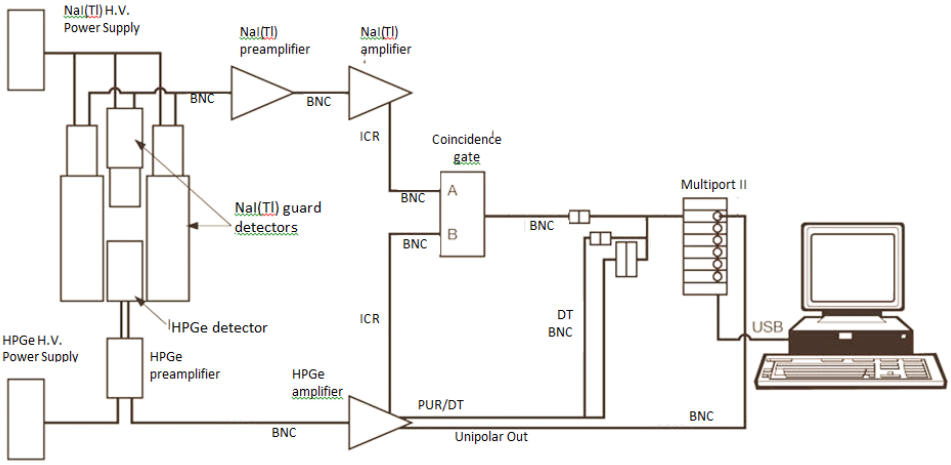
Εικόνα 15. Διάφοροι συνδυασμοί πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ανιχνευτή. Με το σύμβολο • ορίζεται η θέση του προς ανάλυση δείγματος [38]

3.5.2. Λειτουργίες συστήματος

3.5.2.1. Λειτουργία αντισύμπτωσης

Σκοπός της λειτουργίας ενός συστήματος Compton Suppression σε αντισύμπτωση (anti-coincidence) είναι η καταγραφή γεγονότων αλληλεπίδρασης των φωτονίων μόνο με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή, καθώς περιέχουν την πληροφορία για την ενέργεια των εισερχόμενων στον ανιχνευτή ακτίνων-γ. Επομένως, στόχος είναι η απόρριψη των γεγονότων που καταγράφονται ταυτόχρονα και στους δύο ανιχνευτές καθώς αυτά οφείλονται κυρίως σε σκεδάσεις Compton και άρα δεν έχουν αποθέσει πλήρως την ενέργειά τους στον κυρίως ανιχνευτή. Για να είναι δυνατό αυτό, όταν παράγονται σήματα και από τους δύο ανιχνευτές εντός του χρονικού παραθύρου που έχει ορίσει ο χρήστης, δημιουργείται ένα λογικό σήμα το οποίο αποτρέπει την καταγραφή του σήματος του πρωτεύοντος ανιχνευτή, με αποτέλεσμα τη συλλογή φάσματος με μειωμένο συνεχές υπόστρωμα (suppressed φάσμα) [36]. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας του συστήματος αποτελεί τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στη βιβλιογραφία.

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται με περισσότερη λεπτομέρεια η διαδρομή που ακολουθούν τα σήματα των δύο ανιχνευτών σε ένα τυπικό σύστημα με χρήση ξεχωριστών μονάδων και μονάδας NIM. Οι έξοδοι και από τους δύο ανιχνευτές, μετά από την επεξεργασία τους από τους αντίστοιχους προενισχυτές και ενισχυτές, τροφοδοτούνται στη μονάδα σύμπτωσης (coincidence gate) η οποία αναλαμβάνει να κάνει τον έλεγχο της σύμπτωσης των καταγραφόμενων στους δύο ανιχνευτές συμβάντων. Στην περίπτωση που ένα φωτόνιο απορροφηθεί πλήρως στον πρωτεύοντα ανιχνευτή, δεν υπάρχει σήμα από το δευτερεύοντα ανιχνευτή, οπότε επιτρέπεται η καταγραφή του σήματος του πρωτεύοντος ανιχνευτή στον πολυκαναλικό αναλυτή (MCA). Ωστόσο, εάν το φωτόνιο λόγω σκέδασης Compton αλληλεπιδράσει και με τον πρωτεύοντα και με τον δευτερεύοντα ανιχνευτή, παράγονται συγχρόνως δύο σήματα τα οποία τροφοδοτούνται στη μονάδα σύμπτωσης. Σε αυτήν την περίπτωση δεν επιτρέπεται η καταγραφή του σήματος του πρωτεύοντα ανιχνευτή στον πολυκαναλικό αναλυτή και προκύπτει έτσι το suppressed φάσμα [36]. Το χρονικό περιθώριο ανάμεσα στην καταγραφή των δύο σημάτων ποικίλλει, ενώ συνήθως επιλέγεται να είναι 1000 ns [39].



Εικόνα 16. Τυπικό κύκλωμα ηλεκτρονικών συστήματος Compton Suppression [38]

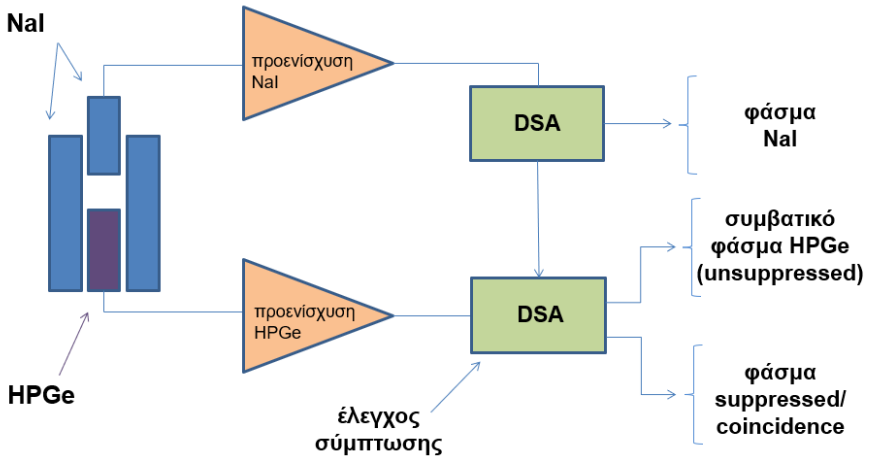
3.5.2.2. Λειτουργία σύμπτωσης

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος σε σύμπτωση (coincidence mode), τα σήματα που παράγονται από την αλληλεπίδραση φωτονίων με τον πρωτεύοντα ανιχνευτή, καταγράφονται μόνο εάν παραχθεί σήμα αλληλεπίδρασης και από την ενεργητική θωράκιση εντός του χρονικού παραθύρου που έχει ορίσει ο χρήστης. Ως αποτέλεσμα, στο φάσμα σύμπτωσης (ή coincidence φάσμα) καταγράφονται μόνο τα γεγονότα που πέφτουν «ταυτόχρονα» στον κύριο και στο δευτερεύοντα ανιχνευτή και απορρίπτονται όλα τα άλλα. Σημειώνεται ότι η λειτουργία αυτή του συστήματος είναι χρήσιμη στην περίπτωση μελέτης ισοτόπων που εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά (cascade emitters) [36][40].

3.5.2.3. Παράλληλη λειτουργία

Με βάση την παράγραφο 3.5.1. διαπιστώνεται το πλεονέκτημα του συστήματος Compton Suppression στην ανάλυση μονοενεργειακών ισοτόπων και όπως θα αναφερθεί στην παράγραφο 3.6.3. αναδεικνύεται η αδυναμία του στην ανάλυση ισοτόπων που εκπέμπουν περισσότερα από ένα φωτόνια σε σειρά. Επομένως, κρίνεται πολύ σημαντικό η ανιχνευτική διάταξη να επιτρέπει τη συλλογή φάσματος τόσο με χρήση, όσο και χωρίς τη χρήση του συστήματος Compton Suppression.

Μία ιδιαίτερα διαδεδομένη πρακτική είναι η χρήση δύο κυκλωμάτων ηλεκτρονικών, ώστε να λαμβάνονται ταυτόχρονα δύο φάσματα. Στο ένα κύκλωμα η συλλογή και επεξεργασία του σήματος από τον πρωτεύοντα ανιχνευτή πραγματοποιείται με τις συμβατικές μεθόδους χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία. Το φάσμα που προκύπτει ονομάζεται συμβατικό ή unsuppressed φάσμα και δεν παρουσιάζει μειωμένο το συνεχές υπόστρωμα Compton. Στο άλλο κύκλωμα συλλέγονται σήματα και από τους δύο ανιχνευτές – πρωτεύων και ενεργητική θωράκιση – και πραγματοποιείται έλεγχος σύμπτωσης των σημάτων. Σε λειτουργία αντισύμπτωσης, δημιουργείται το suppressed φάσμα στο οποίο το υπόστρωμα Compton εμφανίζεται μειωμένο, ενώ σε λειτουργία σύμπτωσης παράγεται το coincidence φάσμα στο οποίο καταγράφονται μόνο οι φωτοκορυφές των ισοτόπων που παρουσιάζουν φαινόμενα σύμπτωσης, με σκοπό τις αντίστοιχες μελέτες [36]. Στην Εικόνα 17 φαίνεται σχεδιαγραμματικά η παράλληλη λειτουργία του συστήματος με τη χρήση ψηφιακών επεξεργαστών σήματος (digital signal analyzers - DSA) αντί για ξεχωριστές διατάξεις ηλεκτρονικών όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 16.



Εικόνα 17. Τυπικό κύκλωμα ηλεκτρονικών CSS σε παράλληλη λειτουργία

3.5.3. Συντελεστές χαρακτηρισμού απόκρισης του συστήματος Compton Suppression

Η απόκριση μιας ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει ενεργητική θωράκιση, όπως το σύστημα Compton Suppression, ποσοτικοποιείται με χρήση συντελεστών «μείωσης» (suppression factors). Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για να αναδείξουν τη βελτίωση που μπορεί να επιφέρει η χρήση ενός συστήματος Compton Suppression σε μία διάταξη γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, δηλαδή αποτελούν μία εκτίμηση του πλεονεκτήματος που εισάγεται από το νέο σύστημα. Για τους συντελεστές αυτούς δεν υπάρχει μία τυποποίηση και απαντώνται αρκετοί στη βιβλιογραφία, ωστόσο γίνεται εκτενής αναφορά και μελέτη τους στο πλαίσιο Δ.Δ. (Μ. Σάββα) [36]. Από τη Δ.Δ. αυτή προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι πιο σημαντικοί συντελεστές για τη μελέτη της απόκρισης του CSS είναι ο Reduction Factor (RF), που αφορά το συνεχές υπόστρωμα, ο Peak Reduction Factor (R_p), που αφορά την ίδια τη φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης και ο Total Area Suppression Factor (TASF), που αφορά τα καταγραφόμενα γεγονότα της φωτοκορυφής σε σχέση με τα συνολικά καταγραφόμενα γεγονότα. Οι συντελεστές παρουσιάζονται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους.

3.5.2.1. Reduction Factor (RF)

Ο συντελεστής αυτός δείχνει τη μείωση στο υπόστρωμα σε μία συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος. Υπολογίζεται ως ο λόγος της μέσης τιμής του ύψους των κρούσεων σε μία ενεργειακή περιοχή του υποστρώματος στο unsuppressed φάσμα προς τη μέση τιμή του ύψους των κρούσεων στην ίδια περιοχή στο suppressed φάσμα [36][41][42]. Δεδομένου ότι στα δύο φάσματα λαμβάνεται η ίδια ενεργειακή περιοχή, ο συντελεστής RF υπολογίζεται από τη σχέση (12).

$$\mathrm{RF} = \frac{\left(\sum_{k=i}^{j} C_k\right)_{unsup}}{\left(\sum_{k=i}^{j} C_k\right)_{sup}} \qquad (12)$$

όπου:
C_k: ο αριθμός των κρούσεων στο διάστημα μεταξύ των καναλιών [i, j]
[i, j]: το διάστημα των καναλιών της φωτοκορυφής

3.5.2.2. Peak Reduction Factor (R_P)

Πρόκειται για συντελεστή που συνήθως χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση ισοτόπου που εκπέμπει περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά, καθώς και για τη μελέτη της επίδρασης των τυχαίων γεγονότων σύμπτωσης (chance coincidence), στην περίπτωση φωτονίων που δεν εκπέμπονται σε σειρά.

Ο R_p λαμβάνει υπόψη του τη μείωση που υφίσταται η φωτοκορυφή πλήρους απορρόφησης ενός φωτονίου, λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης στην ενεργητική θωράκιση ενός από τα υπόλοιπα σε σειρά εκπεμπόμενα φωτόνια. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται πειραματικά, ως ο λόγος ανάμεσα στην «καθαρή» επιφάνεια της φωτοκορυφής (peak area) στα δύο φάσματα (suppressed/unsuppressed).

Επισημαίνεται ότι η «καθαρή» επιφάνεια είναι η επιφάνεια της φωτοκορυφής έχοντας αφαιρέσει την επιφάνεια του υποστρώματος κάτω από αυτήν [36][43].

$$R_p = \frac{(\text{peak area})_{\text{sup}}}{(\text{peak area})_{\text{unsup}}} \quad (13)$$

3.5.2.3. Total Area Suppression Factor (TASF)

Ο συντελεστής TASF λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό καταγραφής γεγονότων σε όλο το ενεργειακό φάσμα, επομένως παρέχει πληροφορίες για τη μείωση του υποστρώματος σε ολόκληρο το φάσμα στο οποίο ανιχνεύεται η φωτοκορυφή ενδιαφέροντος. Ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής επιφάνειας της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής προς τη συνολική επιφάνεια στο φάσμα, συμπεριλαμβανομένων της αιχμής Compton και της ίδιας της φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης, στα δύο φάσματα (suppressed/unsuppressed) [36][37].

$$\text{TASF} = \frac{(\text{A}\,[\text{P/T}])_{\text{sup}}}{(\text{A}\,[\text{P/T}])_{\text{unsup}}} \quad (14)$$

$$\text{A}[\text{P/T}] = \frac{\left(\sum_{k=i}^{j} C_k\right) - B}{\sum_{k=1}^{M} C_k} \quad (15)$$

όπου:
C_k: ο αριθμός των κρούσεων στο διάστημα μεταξύ των καναλιών που ορίζονται στο διάστημα του αθροίσματος
[i, j]: το διάστημα των καναλιών της φωτοκορυφής
M: το τελευταίο κανάλι του φάσματος
B: η επιφάνεια του υποστρώματος (αριθμός κρούσεων) κάτω από τη φωτοκορυφή

3.6. Φαινόμενα σύμπτωσης που επηρεάζουν τη λειτουργία της γ-φασματοσκοπικής διάταξης

3.6.1. Πραγματική σύμπτωση

Ως πραγματική σύμπτωση (true coincidence) ορίζεται το φαινόμενο της διαδοχικής εκπομπής δύο ή και περισσοτέρων φωτονίων του ίδιου κλάδου διάσπασης του πυρήνα ενός ισοτόπου και η ταυτόχρονη ανίχνευση αυτών -λόγω αντικειμενικής αδυναμίας της ανιχνευτικής διάταξης- ως ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με το άθροισμα των ενεργειών των επιμέρους φωτονίων [44].

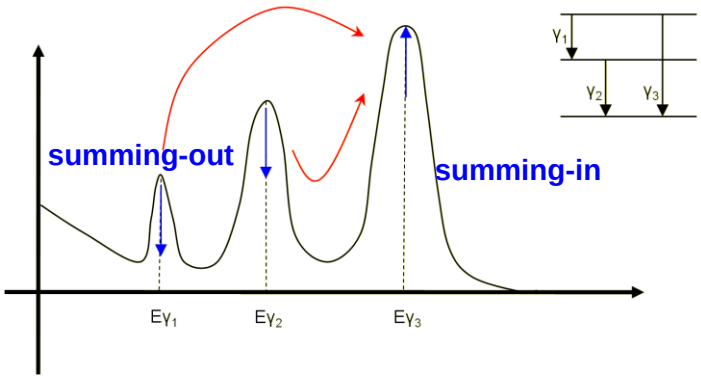
Το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος της διαδοχικής εκπομπής των φωτονίων αυτών είναι μικρότερος από το χρόνο απόκρισης του ανιχνευτή (resolution time), δηλαδή του χρονικού διαστήματος

που απαιτείται ώστε ο ανιχνευτής να συλλέξει και να καταγράψει ένα φωτόνιο πριν είναι σε θέση να δεχθεί το επόμενο. Ο χρόνος απόκρισης οφείλεται τόσο στο χρόνο στον οποίο γίνονται οι αλληλεπιδράσεις γ-ακτινοβολίας με την ύλη εντός του κρυστάλλου όσο και στο χρόνο απόκρισης των ηλεκτρονικών συστημάτων της ανάλυσης σήματος [26].

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης εξαρτάται από το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου (όσο περισσότερες ακτίνες-γ εκπέμπονται σε σειρά, τόσο εντονότερο είναι), από το μέγεθος του ανιχνευτή (μεγαλύτεροι ανιχνευτές παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα ανίχνευσης φωτονίων, επομένως το φαινόμενο είναι εντονότερο), καθώς και από τη γεωμετρία μέτρησης, δηλαδή από το μέγεθος του δείγματος και την απόσταση δείγματος-ανιχνευτή (μεγαλύτερα δείγματα και μεγαλύτερες αποστάσεις οδηγούν σε μείωση της έντασης του φαινομένου).

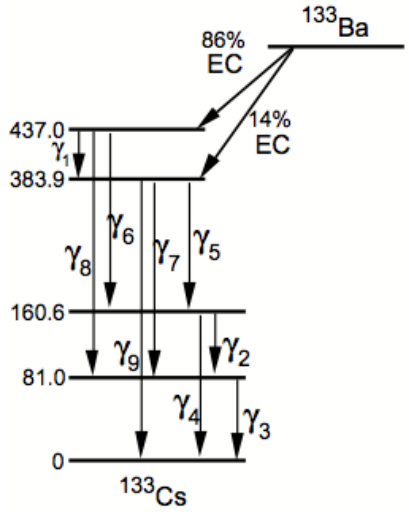
Ως αποτέλεσμα, γεγονότα που φτάνουν στον ανιχνευτή σε χρονικά διαστήματα μικρότερα του χρόνου απόκρισης ανιχνεύονται ως ένα γεγονός με ενέργεια ίση με το άθροισμα των ενεργειών των επί μέρους ακτίνων-γ. Αυτή η αθροιστική ενέργεια είτε εμφανίζεται στο φάσμα ως μία νέα κορυφή σε σημείο όπου μπορεί προηγουμένως να μην υπήρχε κάποια άλλη φωτοκορυφή, είτε αθροίζεται πάνω σε μια προϋπάρχουσα φωτοκορυφή. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, υπάρχει μια υπερεκτίμηση του αριθμού γεγονότων στο σημείο της αθροιστικής ενέργειας, γεγονός που περιγράφεται από τον όρο ‘‘summing-in’’. Αντίθετα, οι φωτοκορυφές των μεμονωμένων φωτονίων ενός ισοτόπου που παρουσιάζει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης χάνουν κρούσεις αφού ο ανιχνευτής δεν μπορεί να διακρίνει τα γεγονότα αυτά μεταξύ τους και τα ανιχνεύει ως ένα φωτόνιο. Επομένως στις μεμονωμένες φωτοκορυφές αντιστοιχεί η περίπτωση του ‘‘summing-out’’. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης για ισότοπο στο οποίο αντιστοιχεί το διάγραμμα διάσπασης που φαίνεται στο άνω δεξιά μέρος της εικόνας. Υπάρχει επίσης περίπτωση μια φωτοκορυφή να αποτελεί κορυφή στην οποία αθροίζονται γεγονότα από την πραγματική σύμπτωση άλλων φωτονίων, ενώ ταυτόχρονα να χάνονται από αυτήν κρούσεις, οι οποίες καταγράφονται σε άλλες αθροιστικές κορυφές υψηλότερης ενέργειας (summing-in και summing-out στην ίδια φωτοκορυφή).

Το τι συμβαίνει σε κάθε περίπτωση για κάθε φωτοκορυφή, υποδηλώνεται από το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου. Ισότοπα τα οποία εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως cascade-emitters ενώ όσα δεν εκδηλώνουν αυτό το φαινόμενο ονομάζονται non-cascade emitters. Η ορολογία αυτή υιοθετείται στις επόμενες παραγράφους της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 18. Φαινόμενα summing-out και summing-in λόγω πραγματικής σύμπτωσης

Στην Εικόνα 19 δίνεται ως παράδειγμα ο κλάδος διάσπασης του ^{133}Ba όπου φαίνονται οι διαφορετικές ακτινες-γ που μπορούν να αθροιστούν (για παράδειγμα: γ2 + γ3 = γ4, γ2 + γ6 = γ8, γ1 + γ2 + γ5 = γ8 κτλ). Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως η ακτίνα γ_1 κάνει μόνο summing-out, η ακτίνα γ_8 κάνει μόνο summing-in και η ακτίνα γ_7 κάνει και summing-in και summing-out. Από το διάγραμμα αυτό αναδεικνύεται η περιπλοκότητα του φαινομένου και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας.



Εικόνα 19. Διάγραμμα διάσπασης ^{133}Ba όπου φαίνεται η πραγματική σύμπτωση ακτίνων-γ [45]

3.6.2. Τυχαία άθροιση

Όπως και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, η τυχαία άθροιση (random summing) οφείλεται στο χρόνο απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης. Η διαφορά σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο, είναι πως τα φωτόνια που πέφτουν στον ανιχνευτή δεν προέρχονται από τη διάσπαση του ίδιου πυρήνα, αλλά είναι δύο ανεξάρτητα γεγονότα που ανιχνεύονται «ταυτόχρονα» λόγω τυχαιότητας. Το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως σε δείγματα υψηλής ενεργότητας και είναι πιο έντονο όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργότητα του δείγματος (μεγάλη πιθανότητα διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου). Όπως και στην περίπτωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, η τυχαία άθροιση είναι πιο έντονη όσο εγγύτερα είναι η πηγή στον ανιχνευτή και όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του ανιχνευτή (μεγαλύτερη στερεά γωνία ανίχνευσης).

3.6.3. Φαινόμενα σύμπτωσης που επιδρούν στη λειτουργία του συστήματος Compton Suppression

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση ανιχνευτικής διάταξης με σύστημα Compton Suppression, δεν είναι εφικτή η διάκριση των σημάτων που προέρχονται από σκεδάσεις Compton από τα σήματα που οφείλονται σε άλλη ακτινοβολία (π.χ. φωτόνια από άλλο ισότοπο). Είναι δηλαδή δυνατόν να καταγραφούν στους δύο ανιχνευτές με τυχαίο τρόπο γεγονότα, τα οποία να μην έχουν προκύψει από μερική απόθεση ενέργειας του ίδιου φωτονίου στους δύο ανιχνευτές, αλλά να προέρχονται από δύο διαφορετικά φωτόνια τα οποία για τυχαίους λόγους καταγράφηκαν εντός του χρονικού περιθωρίου σύμπτωσης.

Λόγω του τρόπου λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση ανάλυσης ισοτόπων τα οποία εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια σε σειρά (cascade emitters). Κατά τη μελέτη ενός τέτοιου ισοτόπου με διάταξη CSS, υπάρχει πιθανότητα ανίχνευσης της μίας ακτίνας-γ στον πρωτεύοντα ανιχνευτή και της άλλης στην ενεργητική θωράκιση. Εάν ο χρόνος διαδοχικής εκπομπής των φωτονίων αυτών είναι μικρότερος από το χρονικό παράθυρο που επιλέγεται για τον έλεγχο σύμπτωσης (1000 ns), το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να διακρίνει εάν αυτά τα συμβάντα σύμπτωσης προέρχονται από ένα φωτόνιο το οποίο αλληλεπιδρά και με τους δύο ανιχνευτές ή από δύο διαφορετικά φωτόνια [36].

Με αντίστοιχο τρόπο, η υψηλή ενεργότητα των υπό ανάλυση δειγμάτων μπορεί να επηρεάσει την απόκριση ενός συστήματος Compton Suppression, καθώς η υψηλή ροή ακτίνων-γ αυξάνει την πιθανότητα φωτόνια από αποδιεγέρσεις διαφορετικών πυρήνων να ανιχνευθούν ταυτόχρονα στους δύο ανιχνευτές και επομένως να δώσουν σήματα σύμπτωσης, τα οποία όμως προκύπτουν για τυχαίους λόγους. Τα CSS επομένως ενδείκνυνται για την ανάλυση δειγμάτων που παρουσιάζουν χαμηλό ρυθμό εκπομπής φωτονίων, οπότε και ο νεκρός χρόνος (dead time) της ανιχνευτικής διάταξης είναι χαμηλός [36].

3.7. Βαθμονόμηση γ-φασματοσκοπικής διάταξης

3.7.1. Ενεργειακή βαθμονόμηση

Σκοπός της ενεργειακής βαθμονόμησης είναι η αντιστοίχιση του ύψους των ηλεκτρικών παλμών, που εκφράζεται από τον αριθμό του καναλιού, με τις αντίστοιχες ενέργειες των ακτίνων-γ που τους προκάλεσαν. Η πειραματική ενεργειακή βαθμονόμηση συνιστά τον προσδιορισμό της γραμμικής συνάρτησης (y = a + bx):

$$E = a + b \cdot CH \qquad (16)$$

όπου:
a: το σημείο τομής της γραμμικής συνάρτησης ενεργειακής βαθμονόμησης με τον κάθετο άξονα
b: η ενεργειακή κλίμακα (keV/κανάλι) του πολυκαναλικού αναλυτή
CH: ο αριθμός του καναλιού στο οποίο βρίσκεται η φωτοκορυφή στο φάσμα

3.7.2. Βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής

3.7.2.1. Είδη απόδοσης ανιχνευτή

Η απόδοση ενός ανιχνευτή αποτελεί το μέτρο της ικανότητάς του να ανιχνεύει την ακτινοβολία μιας πηγής, ανά μονάδα χρόνου, σε μία συγκεκριμένη απόσταση της πηγής από αυτόν. Για φωτόνια, η ανιχνευτική ικανότητα εξαρτάται από την ενέργεια των ακτίνων-γ, τον τύπο του κρυστάλλου του ανιχνευτή, τη γεωμετρία του συστήματος (μέγεθος του κρυστάλλου), τις διαστάσεις της πηγής και τη σχετική θέση πηγής-κρυστάλλου [46]. Ορίζονται διαφορετικού τύπου αποδόσεις, οι κυριότερες των οποίων είναι οι εξής:

i. Απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency - FEPE): Είναι το μέγεθος που συσχετίζει την καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής του φάσματος με τον ολικό αριθμό φωτονίων που εκπέμφθηκαν από την πηγή στο χρονικό διάστημα της μέτρησης και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μέτρησης.

Υπολογίζεται ως ο λόγος του αριθμού των ανιχνευόμενων φωτονίων προς τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή στον ίδιο χρόνο, γεγονός που σημαίνει ότι η FEPE είναι αδιάστατο μέγεθος και αναγράφεται συνήθως ως δεκαδικός αριθμός.

ii. Απόλυτη ολική απόδοση (total efficiency): Είναι ο λόγος του συνολικού αριθμού των ακτίνων-γ που έχουν συλλεχθεί από τον ανιχνευτή προς τον συνολικό αριθμό των εκπεμπόμενων από την πηγή ακτίνων-γ στον ίδιο χρόνο.

iii. Εσωτερική απόδοση (intrinsic efficiency): Είναι ο λόγος του αριθμού των ακτίνων-γ που ανιχνεύονται προς τον αριθμό των ακτίνων-γ που έπεσαν πάνω στον ανιχνευτή, ανεξαρτήτως αν καταγράφηκαν από αυτόν ή όχι. Το μέγεθος αυτό είναι ανεξάρτητο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης και χαρακτηρίζει τον ανιχνευτή αλλά ο υπολογισμός του είναι δύσκολος καθώς απαιτεί τον προσδιορισμό της στερεάς γωνίας ανάμεσα στην πηγή και τον ανιχνευτή (Ω). Η εσωτερική απόδοση (ε_{in}) σχετίζεται με την απόλυτη απόδοση (ε_{abs}) ως εξής:

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon_{abs} \cdot \frac{4\pi}{\Omega} \qquad (17)$$

iv. Σχετική απόδοση (relative efficiency): Πρόκειται για μέγεθος της ανιχνευτικής ικανότητας διαφορετικών ανιχνευτών και υπολογίζεται συγκρίνοντας την απόλυτη απόδοση της φωτοκορυφής των 1332 keV του ^{60}Co συγκεκριμένου ανιχνευτή με την ίδια απόδοση για πρότυπο ανιχνευτή NaI (3 in)x(3 in). Η σχετική απόδοση αναγράφεται ως ποσοστό στο πιστοποιητικό που συνοδεύει τον ανιχνευτή από την εταιρεία κατασκευής του.

Από τα παραπάνω μεγέθη, τα δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι η απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής (η οποία στη συνέχεια της εργασίας θα αναφέρεται ως «απόδοση φωτοκορυφής» ή απλά «απόδοση») και η σχετική απόδοση.

3.7.2.2. Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης γ-φασματοσκοπικής διάταξης

Εάν η απόδοση είναι γνωστή, μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα της μέτρησης η ενεργότητα του δείγματος στην αρχή της μέτρησης. Η απόδοση ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των ανιχνευόμενων φωτονίων ($N_{detected}$) προς τον αριθμό των εκπεμπόμενων από το δείγμα φωτονίων στο ίδιο χρονικό διάστημα ($N_{emitted}$). Ο αριθμός των ανιχνευόμενων φωτονίων αντιστοιχεί στην καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος (peak area) στο φάσμα της μέτρησης, ενώ ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων μπορεί να προσδιοριστεί από την ενεργότητα του δείγματος στην αρχή της μέτρησης. Επομένως, η απόδοση υπολογίζεται από τη σχέση (18):

$$\varepsilon = \frac{N_{detected}}{N_{emitted}} = \frac{area}{A \cdot t_c \cdot P_\gamma} \qquad (18)$$

όπου:
ε: η απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής
area: η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος
A: η ενεργότητα του δείγματος στην αρχή της μέτρησης
t_c: η διάρκεια της μέτρησης
P_γ: το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου ενδιαφέροντος

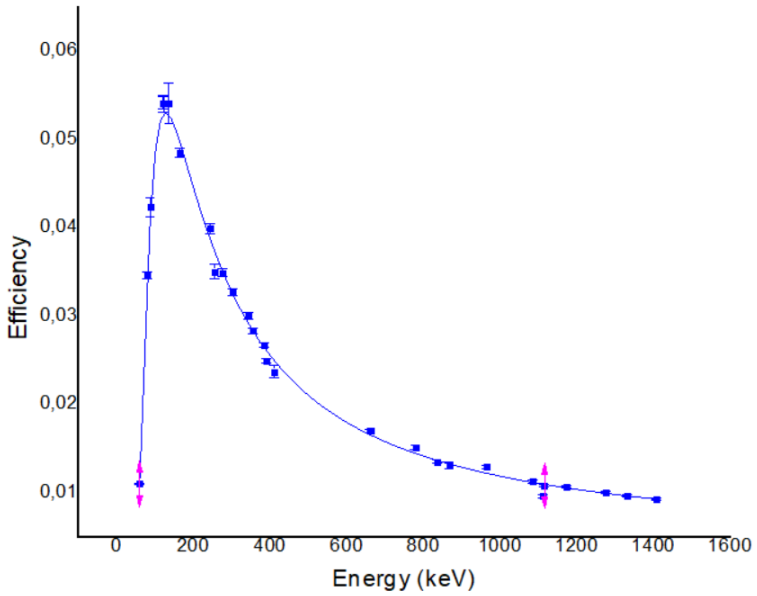
Η βαθμονόμηση με χρήση πρότυπων πηγών βασίζεται στο ότι για τα συγκεκριμένα δείγματα είναι προσδιορισμένη με μεγάλη ακρίβεια η ενεργότητα σε συγκεκριμένη ημερομηνία, επομένως από το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων μπορεί να γίνει η αναγωγή της αρχικής ενεργότητας στην ενεργότητα στην αρχή της μέτρησης, ως εξής:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t_d} \quad (19)$$

όπου:
A: η ενεργότητα δείγματος στην αρχή της μέτρησης
A_0: η ενεργότητα σε μία χρονική στιγμή αναφοράς για την οποία είναι γνωστό το συγκεκριμένο μέγεθος
t_d: το χρονικό διάστημα ανάμεσα στη χρονική στιγμή αναφοράς (γνωστή ενεργότητα) και στην αρχή της μέτρησης

Είναι καλή πρακτική η χρήση πρότυπων πηγών, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα, των οποίων οι ενέργειες καλύπτουν το ενεργειακό φάσμα που έχει ενδιαφέρον για τις μετρήσεις που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στον ανιχνευτή. Έτσι εξασφαλίζεται η ύπαρξη αρκετών πειραματικών σημείων ώστε να κατασκευαστεί η καμπύλη της απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η βαθμονόμηση που προκύπτει από τη σχέση (18) αναφέρεται σε ίδια γεωμετρία μέτρησης δείγματος σε σχέση με τη γεωμετρία μέτρησης πηγών βαθμονόμησης, δηλαδή για ίδιο περίπου μέγεθος και σχήμα πηγής και ίδια απόσταση πηγής-ανιχνευτή.

Με βάση τα παραπάνω, προσδιορίζεται για δείγμα άγνωστης ενεργότητας η απόδοση του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια με στόχο στη συνέχεια τον υπολογισμό άλλων μεγεθών, όπως η ενεργότητά του. Στην Εικόνα 20 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ανιχνευτή HPGe της απόδοσης φωτοκορυφής ως συνάρτηση της ενέργειας.



Εικόνα 20. Καμπύλη απόδοσης φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης συναρτήσει της ενέργειας

Πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλη βαθμονόμησης που προκύπτει από τους υπολογισμούς της σχέσης (18) δεν είναι διορθωμένη για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Για να γίνει αυτό, πρέπει να συμπεριληφθεί στην παραπάνω σχέση μια διόρθωση της επιφάνειας της φωτοκορυφής μέσω ενός συντελεστή TCC (true coincidence correction factor). Για τον υπολογισμό των συντελεστών TCC για κάθε ενέργεια ενός ισοτόπου, αξιοποιείται στην παρούσα εργασία το ανοιχτό λογισμικό TrueCoinc που έχει αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής του πανεπιστημίου Kossuth της Ουγγαρίας [47]. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως είσοδο το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου από βιβλιοθήκες όπως η ENDF καθώς και τη μη διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης και έχει ως έξοδο πίνακες με τους διαφορετικούς συντελεστές TCC για την κάθε ενέργεια ενός ισοτόπου. Έαν ο συντελεστής είναι μικρότερος της μονάδας, δηλώνει ότι η συγκεκριμένη φωτοκορυφή υποεκτιμάται κατά τη μέτρηση λόγω summing-out φαινομένων, ενώ εάν είναι μεγαλύτερος της μονάδας, υποδηλώνει φαινόμενα summing-in. Με τη διαίρεση της καθαρής επιφάνειας της φωτοκορυφής με τον αντίστοιχο TCC προκύπτει η διορθωμένη τιμή της επιφάνειας.

Επιπλέον, θα πρέπει να γίνει μια διόρθωση για την αποδιέγερση του ισοτόπου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Υπολογίζονται έτσι νέες τιμές της απόδοσης από τη σχέση (20), λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και την αποδιέγερση στη διάρκεια της μέτρησης και κατασκευάζεται η αντίστοιχη καμπύλη βαθμονόμησης. Λόγω νεκρού χρόνου, το διάστημα στο οποίο ο ανιχνευτής λαμβάνει μετρήσεις (live time - tc) είναι μικρότερο από την πραγματική διάρκεια της μέτρησης (real time - Δt), και αυτός είναι ο λόγος που εμφανίζονται διαφορετικά μεγέθη για το χρόνο στη σχέση (20).

$$\varepsilon = \frac{\text{area}}{\text{TCC} \cdot A_0 \cdot e^{(-\lambda t_d)} \cdot \left[\frac{1 - e^{(-\lambda \Delta t)}}{\lambda \Delta t}\right] \cdot t_c \cdot P_\gamma} \qquad (20)$$

όπου:
ε: η απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής
area: η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος
TCC: ο συντελεστής διόρθωσης της επιφάνειας φωτοκορυφής για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης
A_0: η γνωστή ενεργότητα του δείγματος
λ: η σταθερά διάσπασης του ισοτόπου
t_d: το χρονικό διάστημα ανάμεσα στη χρονική στιγμή αναφοράς (γνωστή ενεργότητα) και στην αρχή της μέτρησης
Δt: η πραγματική διάρκεια της μέτρησης (real time)
t_c: το χρονικό διάστημα στο οποίο είναι ενεργός ο ανιχνευτής κατά τη μέτρηση (live time)
P_γ: το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου ενδιαφέροντος

3.7.2.3. Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης συστήματος Compton Suppression

Η βαθμονόμηση απόδοσης συστημάτων Compton Suppression σε λειτουργία αντισύμπτωσης γίνεται με την ίδια ακριβώς μέθοδο που περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο, με μόνη ιδιαιτερότητα την επιλογή των πηγών βαθμονόμησης. Πιο συγκεκριμένα, καθώς η απόκριση του συστήματος Compton Suppression εξαρτάται από το διάγραμμα διάσπασης των υπό μελέτη ισοτόπων, θα πρέπει σε αυτήν την περίπτωση να γίνεται κατάλληλη επιλογή των πηγών βαθμονόμησης ώστε να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα σύμπτωσης τα οποία οδηγούν σε απόρριψη γεγονότων όταν το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία αντισύμπτωσης [36].

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.6.3, για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ταυτόχρονης καταγραφής του ενός φωτονίου στον πρωτεύοντα και του άλλου (ή περισσότερων φωτονίων) στο δευτερεύοντα ανιχνευτή, με αποτέλεσμα αυτά τα γεγονότα να απορρίπτονται από τη μονάδα ελέγχου σύμπτωσης και να υπάρχει υποεκτίμηση της επιφάνειας των αντίστοιχων φωτοκορυφών στα suppressed φάσματα. Καθώς το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από το διάγραμμα διάσπασης κάθε ισοτόπου και δεν υπάρχει σταθερή επίδραση του CSS πάνω στα συγκεκριμένα ισότοπα, επιλέγεται να μη γίνεται χρήση τέτοια ισοτόπων (cascade emitters) στη βαθμονόμηση απόδοσης των συστημάτων Compton Suppression. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό υπογραμμίζεται και στην παράγραφο 4.6.3.2, όπου παρουσιάζεται η πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης με σημειακές πηγές για το CSS σε λειτουργία αντισύμπτωσης.

Κεφάλαιο 4: Μελέτη απόκρισης του συστήματος Compton Suppression στην ανάλυση των VERDI ανιχνευτών

4.1. Η διάταξη CSS του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

4.1.1. Ο πρωτεύων ανιχνευτής (HPGe)

Ο πρωτεύων ανιχνευτής της διάταξης CSS του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ομοαξονικός ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) τύπου-p, της εταιρείας Eurisys Mesures, σχετικής απόδοσης 40%. Διαθέτει διακριτική ικανότητα, όπως εκφράζεται από το FWHM, ίση με 0.93 keV στην κορυφή των 122 keV του ^{57}Co και ίση με 1.90 keV στην κορυφή των 1332 keV του ^{60}Co (Παράρτημα Α). Ο λόγος peak-to-Compton είναι 1/62, μέγεθος το οποίο συσχετίζει το ύψος της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής πλήρους απορρόφησης, προς τη μέση τιμή του πλήθους των κρούσεων που καταγράφονται σε μία σχετικά επίπεδη περιοχή κοντά στην αιχμή Compton που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων.

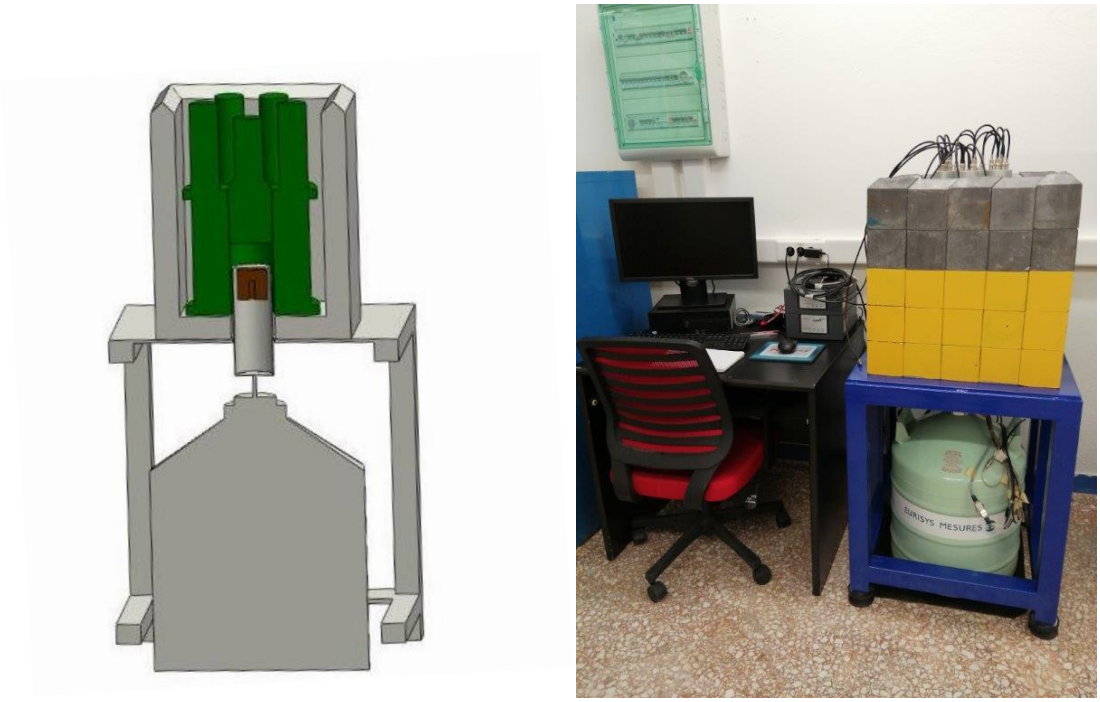
Ο ανιχνευτής συνδέεται μόνιμα με δοχείο υγρού αζώτου (dewar). Για τη συλλογή και επεξεργασία του σήματος του ανιχνευτή χρησιμοποιείται μονάδα DSA τύπου Lynx της εταιρείας Mirion Technologies, η οποία τροφοδοτεί τον ανιχνευτή με υψηλή τάση (+3000 V), και συνδέεται με το λογισμικό Genie 2000 της ίδιας εταιρείας για την επεξεργασία του φάσματος.

4.1.2. Ο δευτερεύων ανιχνευτής (NaI)

Ο κυρίως ανιχνευτής περιβάλλεται από το δευτερεύοντα ανιχνευτή, ο οποίος αποτελείται από δύο τμήματα: έναν ενιαίο δακτυλιοειδή κρύσταλλο NaI γύρω από τον ανιχνευτή HPGe και έναν αφαιρούμενο ανιχνευτή-plug NaI ο οποίος επιτρέπει την τοποθέτηση του δείγματος στο χώρο ανάμεσα στο γερμάνιο και στο ιωδιούχο νάτριο. Ο ανιχνευτής-plug διαθέτει ένα φωτοπολλαπλασιαστή (PhotoMultiplier Tube - PMT), ενώ το σήμα από τον δακτυλιοειδή NaI ενισχύεται μέσω 6 PMT σε εξαγωνική γεωμετρία (Παράρτημα Α). Τα σήματα από τα δύο τμήματα του δευτερεύοντα ανιχνευτή ενώνονται και τελικά δημιουργείται ένα σήμα εξόδου το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες από όλους τους κρυστάλλους NaI. Οι ανιχνευτές NaI είναι κατασκευασμένοι από την εταιρεία Scionix και περιβάλλονται από παθητική θωράκιση κατασκευασμένη από τούβλα μολύβδου. Το σήμα από την ενεργητική θωράκιση οδηγείται σε ένα δεύτερο DSA της εταιρείας Mirion Technologies, όπου γίνεται η ανάλυση και η συλλογή του σήματος από το NaI αλλά παράλληλα οδηγείται στο σήμα αυτό και στο DSA του πρωτεύοντα ανιχνευτή όπου γίνεται ο έλεγχος σύμπτωσης.

Η διάταξη περιλαμβάνει επίσης δειγματοφορέα από plexiglass, με εσοχή κυκλικής διατομής, ώστε να διευκολύνεται η τοποθέτηση του προς μελέτη δείγματος στο χώρο ανάμεσα στον πρωτεύοντα και στο δευτερεύοντα ανιχνευτή. Ο χώρος αυτός έχει ύψος περίπου 8.5 cm και διάμετρο 9 cm, ενώ υπάρχουν δειγματοφορείς για 4 αποστάσεις από τον κυρίως ανιχνευτή: 0 cm (pos1), 1 cm (pos2), 3 cm (pos3), 6 cm (pos4).

Στην Εικόνα 21 δίνεται αριστερά η σχηματική απεικόνιση της ανιχνευτικής διάταξης σε τομή, όπου φαίνεται το δοχείο dewar (κάτω), το περίβλημα του HPGe (γκρι κύλινδρος) και ο κρύσταλλος HPGe (καφέ χρώμα), ο δευτερεύων ανιχνευτής NaI (πράσινο χρώμα) και η παθητική θωράκιση μολύβδου (γκρι περίβλημα). Δεξιά παρουσιάζεται η πραγματική διάταξη αποτελούμενη από τα αντίστοιχα στοιχεία. Στη φωτογραφία φαίνονται αριστερά της θωράκισης μολύβδου τα δύο DSA όπου γίνεται η ανάλυση σήματος και ο έλεγχος σύμπτωσης. Στην Εικόνα 22 φαίνεται το άνω τμήμα της διάταξης όπου διακρίνονται οι 7 φωτοπολλαπλασιαστές του δευτερεύοντα ανιχνευτή καθώς και η παθητική θωράκιση μολύβδου περιμετρικά της διάταξης.



Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση της ανιχνευτικής διάταξης CSS του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» (αριστερά), φωτογραφία πραγματικής διάταξης (δεξιά)

Εικόνα 22. Φωτογραφία άνω όψης ανιχνευτικής διάταξης CSS του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

4.1.3. Η ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος

Στο CSS του ΙΠΡΕΤΕΑ υιοθετείται η λογική της παράλληλης λειτουργίας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.5.2.3. ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη λήψη ενός συμβατικού σήματος και ενός σήματος επεξεργασμένου μετά τον έλεγχο σύμπτωσης με χρονικό παράθυρο 1000 ns (1 μs). Ως αποτέλεσμα μπορούν να καταγραφούν συγχρόνως δύο φάσματα: συμβατικό (unsuppressed) και φάσμα με μειωμένο υπόστρωμα (suppressed), όταν η διάταξη είναι ρυθμισμένη σε λειτουργία αντισύμπτωσης. Εναλλακτικά, η διάταξη μπορεί να ρυθμιστεί σε λειτουργία σύμπτωσης, οπότε λαμβάνονται πάλι δύο φάσματα: συμβατικό (unsuppressed) και φάσμα σύμπτωσης (coincidence) [36].

4.2. γ-φασματοσκοπική ανάλυση ανιχνευτών VERDI

Οι 8 ανιχνευτές VERDI που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν στο εργαστήριο του ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» στο διάστημα 01/12/2021 - 10/12/2021. Σε όλες τις μετρήσεις, οι ανιχνευτές βρίσκονταν σε επαφή με το καπάκι του κυρίως ανιχνευτή (HPGe) στο κέντρο της διάταξης και ο χρόνος της μέτρησης ήταν σε όλες τις περιπτώσεις 24 ώρες (86400 s). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λήφθηκαν τόσο τα συμβατικά φάσματα (unsuppressed) όσο και τα φάσματα σε λειτουργία αντισύμπτωσης (suppressed). Έγινε επίσης λήψη 24ωρου φάσματος υποστρώματος ώστε να αφαιρεθεί αυτό κατά την ανάλυση των φασμάτων. Στον Πίνακα 4 αναγράφονται οι ημερομηνίες και ώρες έναρξης των μετρήσεων (ζώνη ώρας: UTC+3) για τους VERDI ανιχνευτές καθώς και το live time και real time της μέτρησης. Από τα δεδομένα αυτά γίνεται αντιληπτό ότι ο νεκρός χρόνος των μετρήσεων (real time - live time), δεν ξεπερνά το 0.02% του real time σε κάθε μέτρηση και άρα είναι αμελητέος.

Πίνακας 4. Πληροφορίες για τις μετρήσεις των VERDI ανιχνευτών

Δείγμα	Ημερομηνία & ώρα έναρξης μέτρησης	Live time (s)	Real time (s)
ACT15	01/12/21 11:30	86400	86414.40
ACT16	02/12/21 12:14	86400	86414.26
RADA10	03/12/21 13:35	86400	86414.70
RADA11	06/12/21 11:11	86400	86414.64
RADA12	07/12/21 12:06	86400	86412.35
RADA13	08/12/21 14:05	86400	86414.59
RADA14	09/12/21 14:29	86400	86414.43
RADA15	10/12/21 16:30	86400	86411.96

Πρώτο στάδιο της ανάλυσης ήταν η αναγνώριση των φωτοκορυφών στα φάσματα και ο υπολογισμός της επιφάνειάς τους μέσω του λογισμικού GENIE 2000 για όλους τους ανιχνευτές VERDI. Σημειώνεται ότι στους ανιχνευτές RADA12 και RADA15 που δεν περιέχουν μεταλλικά ελάσματα, δεν ανιχνεύθηκαν φωτοκορυφές από προϊόντα ενεργοποίησης στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπως άλλωστε είχε προκύψει και από προηγούμενα πειράματα [20][24]. Στη συνέχεια ακολούθησε η καταγραφή της καθαρής επιφάνειας κάθε φωτοκορυφής ενδιαφέροντος με την αντίστοιχη αβεβαιότητα, μετά την αφαίρεση των κρούσεων από το φάσμα υποστρώματος.

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 ενδεικτικά για τον VERDI ανιχνευτή RADA11, συνοδευόμενα από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τύπου A σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Παρατηρείται ότι στο suppressed φάσμα δεν ανιχνεύονται ορισμένες φωτοκορυφές των ισοτόπων ^{102m}Rh, ^{88}Y, ^{110m}Ag και ^{182}Ta, που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, ενώ κι εκείνες που ανιχνεύονται είναι αισθητά μειωμένες και συνοδεύονται από υψηλότερες αβεβαιότητες συγκριτικά με το unsuppressed φάσμα. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο για το μονοενεργειακό ^{54}Mn, για το οποίο η ανάλυση στο suppressed φάσμα δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση στην επιφάνεια της φωτοκορυφής και η αντίστοιχη αβεβαιότητα είναι χαμηλότερη. Την ίδια εικόνα παρουσιάζει και το ^{57}Co, το οποίο εκπέμπει μεν φωτόνια σε σειρά, ενέργειας 14 keV και 122 keV, ωστόσο εξαιτίας του παραθύρου από αλουμίνιο (Al) που διαθέτουν οι ανιχνευτές HPGe και NaI, τα φωτόνια ενέργειας 14 keV δεν μπορούν να διαπεράσουν το παράθυρο και να ανιχνευθούν. Επομένως, το ^{57}Co αντιμετωπίζεται από το CSS ως ισότοπο που δεν εκπέμπει φωτόνια σε σειρά και για το λόγο αυτό η φωτοκορυφή του δεν παρουσιάζει μειώσεις στο suppressed φάσμα. Σύμφωνα με τη συμπεριφορά του CSS για κάθε ισότοπο, επιλέγεται το βέλτιστο φάσμα ανάλυσης, το οποίο και αναγράφεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Επιφάνειες ανιχνευόμενων φωτοκορυφών για τον ανιχνευτή RADA11 του RADA sub-holder

Ισότοπο	**Ενέργεια (keV)**	**Επιφάνεια φωτοκορυφής στο unsuppressed φάσμα (counts)**	**Επιφάνεια φωτοκορυφής στο suppressed φάσμα (counts)**	**Επιλεγόμενο στις αναλύσεις φάσμα**
^{57}Co	122.06	490.6 ± 10.4%	446.1 ± 8.69%	sup
^{102m}Rh	475.06	794.7 ± 5.75%	285.6 ± 9.14%	unsup
	628.05	-	-	
	631.29	159.2 ± 18.0%	-	
	697.49	161.5 ± 20.0%	-	
^{54}Mn	834.85	459.3 ± 6.84%	468.9 ± 5.62%	sup
^{88}Y	898.04	153.1 ± 17.9%	-	unsup
	1836.06	88.86 ± 16.5%	-	
^{110m}Ag	447.81	335.5 ± 11.8%	-	unsup
	620.28	184.7 ± 16.2%	-	
	657.69	8745 ± 1.13%	286.9 ± 8.29%	
	678.47	677.6 ± 5.58%	-	
	686.78	542.7 ± 6.73%	-	
	707.56	1326 ± 3.48%	39.67 ± 30.6%	
	744.96	366.5 ± 9.18%	-	
	817.69	489.4 ± 6.64%	-	
	884.19	5355 ± 1.45%	207.9 ± 9.49%	
	938.22	2383 ± 2.28%	60.10 ± 23.1%	
	1384.29	1419 ± 2.94%	-	
	1476.42	228.6 ± 8.50%	-	
	1505.51	580.6 ± 5.15%	-	
	1561.62	90.98 ± 16.9%	-	

^{182}Ta	67.61	950.9 ± 5.83%	-	unsup
	99.60	840.1 ± 6.36%	-	
	151.94	442.2 ± 12.6%	-	
	156.31	180.4 ± 23.3%	-	
	179.57	269.4 ± 19.5%	-	
	222.11	439.0 ± 11.9%	-	
	263.90	265.7 ± 18.3%	-	
	1188.65	284.9 ± 9.03%	210.0 ± 8.72%	
	1222.09	454.4 ± 6.46%	265.1 ± 7.73%	
	1231.81	158.6 ± 13.0%	74.45 ± 17.4%	

Οι επιφάνειες των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος που προσδιορίστηκαν παραπάνω, εκτός από τον προσδιορισμό της επαγόμενης από την ενεργοποίηση ενεργότητας των δειγμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το χαρακτηρισμό της διάταξης CSS με χρήση των συντελεστών που παρουσιάστηκαν στο 3ο Κεφάλαιο. Αυτή η ανάλυση περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

4.3. Μελέτη συνεχούς υποστρώματος Compton

Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση του συστήματος Compton Suppression στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος, το οποίο οφείλεται κυρίως σε σκεδάσεις Compton και αντιστοιχεί στις περιοχές του φάσματος οι οποίες δεν παρουσιάζουν φωτοκορυφές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής Reduction Factor (RF). Το συγκεκριμένο μέγεθος υπολογίζεται από τη σχέση (12) ως ο λόγος του μέσου όρου του αριθμού γεγονότων στο suppressed φάσμα προς το αντίστοιχο μέγεθος στο unsuppressed φάσμα για περιοχές του φάσματος που αντιστοιχούν στο συνεχές υπόστρωμα (παράγραφος 3.5.2.1.). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για όλους τους ανιχνευτές VERDI και για διάφορες ενεργειακές περιοχές χωρίς διακριτές φωτοκορυφές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Επιπλέον, στον ίδιο πίνακα αναγράφονται και οι αντίστοιχες τιμές από παλαιότερες αναλύσεις τον Απρίλιο ’20 για τις ίδιες συνθήκες μέτρησης. Σημειώνεται ότι στις μετρήσεις του Απριλίου ’20 στις περιοχές 1245 – 1330 keV και 1600 – 1725 keV ανιχνεύονται φωτοκορυφές και άρα δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του RF.

Πίνακας 6. Συντελεστής RF για τις μετρήσεις Απριλίου ’20 και Δεκεμβρίου ’21

Ανιχνευτής VERDI	**Reduction Factor (RF)**							
	355 – 400 (keV)		**1010 – 1115 (keV)**		**1245 – 1330 (keV)**		**1600 – 1725 (keV)**	
	Απρ. ’20	**Δεκ. ’21**	**Απρ. ’20**	**Δεκ. ’21**	**Απρ. ’20**	**Δεκ. ’21**	**Απρ. ’20**	**Δεκ. ’21**
ACT15	5.84	3.19	6.71	3.57	-	3.07	-	2.44
ACT16	5.87	3.25	6.74	3.55	-	3.15	-	2.49
RADA10	5.91	3.23	6.43	3.50	-	3.00	-	2.52
RADA11	5.90	3.26	6.41	3.54	-	3.04	-	2.35
RADA12	2.13	2.13	2.11	2.09	2.01	1.94	1.74	1.74
RADA13	5.81	3.20	6.15	3.50	-	3.11	-	2.37
RADA14	5.80	3.20	6.33	3.51	-	3.07	-	2.47
RADA15	2.15	2.13	2.10	2.19	1.98	1.91	1.75	1.77

Από τα δεδομένα του Πίνακα 6 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ομοιομορφία στην απόκριση του συστήματος Compton Suppression κατά την ανάλυση των διαφορετικών ανιχνευτών VERDI που περιείχαν μεταλλικά ελάσματα, καθώς για κάθε ενεργειακή περιοχή δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις τιμές του RF μεταξύ των διαφορετικών ανιχνευτών.

- Σχετικά με τη συμπεριφορά του συντελεστή RF στις διαφορετικές περιοχές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, παρατηρείται μέγιστη μείωση του συνεχούς υποστρώματος στην περιοχή 1010 – 1115 keV, όπου το συνεχές υπόστρωμα στα suppressed φάσματα είναι ~6 φορές μικρότερο από το συνεχές υπόστρωμα στα unsuppressed φάσματα. Αντίστοιχα, η χαμηλότερη μείωση (~2.5 φορές) παρουσιάζεται στην περιοχή 1600 – 1725 keV, δεξιά της οποίας έτσι κι αλλιώς δεν υπάρχουν φωτοκορυφές, άρα ήδη το συνεχές υπόστρωμα είναι χαμηλό και χωρίς την επίδραση του CSS. Η περιοχή των 1010 – 1115 keV όπου ο RF έχει τις μέγιστες τιμές σε όλους τους ανιχνευτές VERDI και στις δύο σειρές μετρήσεων, είναι μια περιοχή κοντά στην οποία υπάρχουν πολλές έντονες φωτοκορυφές που προέρχονται από τα δείγματα και άρα η επίδραση του CSS στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος είναι εντονότερη σε αυτήν την περίπτωση.

- Για τους ανιχνευτές RADA12 και RADA15, οι οποίοι δεν περιέχουν μεταλλικά ελάσματα, οι τιμές του συντελεστή RF είναι χαμηλότερες σε σχέση με τους ανιχνευτές που είχαν ελάσματα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην έλλειψη φωτοκορυφών από προϊόντα ενεργοποίησης οι οποίες θα οδηγούσαν σε σκεδάσεις Compton. Επιπλέον, στους δύο αυτούς ανιχνευτές οι τιμές του RF για την ίδια ενεργειακή περιοχή στις δύο σειρές μετρήσεων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ανιχνεύονται μόνο φωτοκορυφές υποστρώματος, οι οποίες δε μεταβάλλονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου.

- Αναφορικά με τη σύγκριση με τις αναλύσεις του Απριλίου ’20, παρατηρείται ότι στις δύο πρώτες ενεργειακές περιοχές οι τιμές του συντελεστή RF στις μετρήσεις του Δεκεμβρίου ’21 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές στις μετρήσεις του Απριλίου ’20 κατά περίπου 50%. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η επίδραση του CSS στη μείωση του συνεχούς υποστρώματος είναι λιγότερο έντονη όσο χαμηλότερη είναι η συνολική ενεργότητα ενός δείγματος. Στις μετρήσεις του Απριλίου ’20 υπάρχουν εντονότερες φωτοκορυφές άρα υψηλότερο συνεχές υπόστρωμα Compton, επομένως η χρήση του CSS σε αυτήν την περίπτωση οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση του συνεχούς υποστρώματος σε σχέση με τις μετρήσεις του Δεκεμβρίου ’21. Ωστόσο, η συμπεριφορά του συντελεστή RF σε ολόκληρο το ενεργειακό φάσμα είναι αντίστοιχη στις δύο σειρές μετρήσεων.

4.4. Μελέτη ανιχνευόμενων φωτοκορυφών

Για τη μελέτη της επίδρασης του συστήματος Compton Suppression στις ανιχνευόμενες στα δείγματα φωτοκορυφές χρησιμοποιούνται οι συντελεστές Peak Reduction Factor (R_p) και Total Area Suppression Factor (TASF), οι οποίοι έχουν περιγραφεί στις παραγράφους 3.5.2.2. και 3.5.2.3. αντίστοιχα.

4.4.1. Υπολογισμός συντελεστή R_p

Ο συντελεστής R_p υπολογίζεται από τη σχέση (13) ως ο λόγος της καθαρής επιφάνειας μιας φωτοκορυφής ενδιαφέροντος στο suppressed φάσμα προς την αντίστοιχη ποσότητα στο unsuppressed φάσμα. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας τον Δεκέμβριο ’21 παρουσιάζονται στους Πίνακες 7, 8 και 9 συνοδευόμενα από τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τύπου Α σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Σημειώνεται ότι στους συγκεκριμένους πίνακες δεν παρουσιάζονται ορισμένες φωτοκορυφές των ισοτόπων ^{102m}Rh, ^{88}Y, ^{110m}Ag και ^{182}Ta, καθώς αυτές έχουν ανιχνευτεί μόνο στα unsuppressed φάσματα, επομένως δεν μπορεί να υπολογιστεί για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις ο συντελεστής R_p.

Στους ίδιους πίνακες αναγράφονται και οι τιμές του συντελεστή R_p που αφορούν στις μετρήσεις του Απριλίου του ’20. Επιπλέον, πραγματοποιείται διερεύνηση πιθανών στατιστικά σημαντικών αποκλίσεων με χρήση του στατιστικού ελέγχου U-test (Παράρτημα Γ). Σημειώνεται ότι τιμές του U-test μικρότερες από 1.96 δείχνουν ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις τιμές της απόδοσης για κάθε ενέργεια, ενώ τιμές του U-test μεγαλύτερες του 2.58 υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Πίνακας 7. Συντελεστής R_p για τους VERDI ανιχνευτές ACT15 και ACT16

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	ACT15 R_p			ACT16 R_p		
		Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test
^{57}Co	122.06	1.080 ± 6.6%	1.020 ± 15%	0.35	0.964 ± 6.5%	1.207 ± 21%	0.94
^{102m}Rh	475.06	0.723 ± 3.5%	0.356 ± 11%	8.09	0.680 ± 3.5%	0.415 ± 11%	5.28
^{54}Mn	834.85	1.049 ± 5.5%	1.079 ± 11%	0.22	1.201 ± 6.6%	0.970 ± 12%	1.64
^{110m}Ag	657.69	0.042 ± 2.4%	0.039 ± 7.3%	1.08	0.043 ± 2.4%	0.038 ± 7.8%	1.85
	884.19	0.030 ± 3.9%	0.036 ± 10%	1.51	0.033 ± 3.7%	0.038 ± 9.6%	1.31
	938.22	-	-	-	0.032 ± 6.2%	0.034 ± 17%	0.35
^{182}Ta	1188.65	0.680 ± 1.3%	0.706 ± 11%	0.34	0.683 ± 1.3%	0.729 ± 12%	0.52
	1222.09	0.504 ± 1.2%	0.510 ± 9.3%	0.13	0.501 ± 1.2%	0.554 ± 9.0%	1.05

Πίνακας 8. Συντελεστής R_p για τους VERDI ανιχνευτές RADA10 και RADA11

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	RADA10 R_p			RADA11 R_p		
		Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test
^{57}Co	122.06	1.047 ± 4.9%	1.199 ± 17%	0.73	0.975 ± 5.4%	0.909 ± 14%	0.49
^{102m}Rh	475.06	0.706 ± 3.1%	0.377 ± 9.1%	8.07	0.722 ± 3.2%	0.359 ± 11%	8.02
^{54}Mn	834.85	1.049 ± 5.2%	0.916 ± 11%	1.16	1.056 ± 5.0%	1.021 ± 8.9%	0.33
^{110m}Ag	657.69	0.040 ± 2.4%	0.044 ± 6.8%	1.12	0.042 ± 2.3%	0.033 ± 8.4%	3.18
	707.56	-	-	-	0.021 ± 15%	0.030 ± 31%	0.96
	884.19	0.032 ± 3.5%	0.036 ± 9.3%	1.27	0.031 ± 3.7%	0.039 ± 9.6%	1.96
	938.22	0.028 ± 6.4%	0.029 ± 18%	0.06	0.028 ± 6.8%	0.025 ± 23%	0.44
^{182}Ta	1188.65	0.721 ± 1.2%	0.792 ± 12%	0.77	0.719 ± 1.2%	0.737 ± 13%	0.20
	1222.09	0.561 ± 1.1%	0.508 ± 9.6%	1.07	0.566 ± 1.1%	0.583 ± 10%	0.29
	1231.81	-	-	-	0.301 ± 2.3%	0.469 ± 22%	1.65

Πίνακας 9. Συντελεστής R_p για τους VERDI ανιχνευτές RADA13 και RADA14

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	RADA13 R_p			RADA14 R_p		
		Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test
^{57}Co	122.06	1.070 ± 6.0%	1.010 ± 13%	0.41	1.005 ± 5.5%	0.894 ± 15%	0.78
^{102m}Rh	475.06	0.697 ± 3.0%	0.464 ± 11%	4.20	0.690 ± 3.4%	0.347 ± 11%	7.86
^{54}Mn	834.85	0.966 ± 4.3%	1.002 ± 9.5%	0.35	0.958 ± 4.8%	1.034 ± 11%	0.62
^{88}Y	898.04	0.310 ± 2.1%	0.353 ± 29%	0.41	-	-	-
^{110m}Ag	657.69	0.040 ± 2.3%	0.038 ± 7.6%	0.81	0.044 ± 2.4%	0.036 ± 7.9%	2.74
	884.19	0.032 ± 3.3%	0.029 ± 12%	0.94	0.034 ± 3.6%	0.034 ± 11%	0.14
	938.22	-	-	-	0.028 ± 7.4%	0.032 ± 18%	0.68
^{182}Ta	1188.65	0.722 ± 1.1%	0.760 ± 11%	0.46	0.715 ± 1.4%	0.769 ± 11%	0.64
	1222.09	0.575 ± 1.0%	0.619 ± 9.1%	0.77	0.564 ± 1.2%	0.627 ± 9.2%	1.09
	1231.81	-	-	-	0.304 ± 2.5%	0.296 ± 24%	0.11

Οι παρατηρήσεις και τα σχόλια που προκύπτουν από τη μελέτη του R_p συνοψίζονται στα εξής:

- Για τα μονοενεργειακά ισότοπα, όπως το ^{57}Co[1] και το ^{54}Mn, δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση της επιφάνειας των φωτοκορυφών ανάμεσα στα unsuppressed και suppressed φάσματα ($R_p \approx 1$). Σημειώνεται ότι δεν έχουν φυσική σημασία τιμές του συντελεστή R_p μεγαλύτερες της μονάδας, εξαιτίας του τρόπου ορισμού του. Όπου παρατηρείται κάτι τέτοιο, όπως για την περίπτωση του ^{57}Co στον ανιχνευτή ACT16, η απόκλιση από τη μονάδα δικαιολογείται δεδομένης της αβεβαιότητας τάξεως 20% (1σ).

- Αντίθετη είναι η εικόνα για τα πολυενεργειακά ισότοπα, όπως το ^{88}Y, ο ^{110m}Ag και το ^{182}Ta, όπου η τιμή του R_p είναι αρκετά μικρότερη της μονάδας, καθώς εκπέμπουν πολλά φωτόνια σε σειρά. Αυτό σημαίνει αυξημένη πιθανότητα ανίχνευσης ενός φωτονίου στον κυρίως ανιχνευτή και κάποιου άλλου από τα εκπεμπόμενα σε σειρά φωτονίου στην ενεργητική θωράκιση, άρα απορρίπτονται γεγονότα από τα suppressed φάσματα για τις αντίστοιχες φωτοκορυφές λόγω αυτού του φαινομένου.

- Αναφορικά με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον Απρίλιο ’20, δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές, με εξαίρεση την περίπτωση του ^{102m}Rh, η οποία αναλύεται διεξοδικά στην παράγραφο 6.1.1., καθώς για την επεξήγηση του φαινομένου απαιτείται ο προσδιορισμός της ενεργότητας των δειγμάτων. Γενικά η επίδραση του CSS στις διακριτές φωτοκορυφές δεν αναμένεται να αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, καθώς εξαρτάται μόνο από το διάγραμμα διάσπασης του εκάστοτε ισοτόπου.

[1] Το ^{57}Co όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 4.2, παρόλο που εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, για το CSS θεωρείται ότι είναι non cascade emitter.

4.4.2. Υπολογισμός συντελεστή TASF

Ο συντελεστής TASF υπολογίζεται από τη σχέση (14) με βάση τα δεδομένα των ανιχνευόμενων φωτοκορυφών και συσχετίζει τη μείωση που ενδεχομένως υφίσταται μία φωτοκορυφή από το CSS με τη μείωση του υποστρώματος σε ολόκληρο το φάσμα. Τα αποτελέσματα για τις μετρήσεις του Δεκεμβρίου ’21 παρουσιάζονται στους Πίνακες 10, 11 και 12, όπου αναγράφονται και οι τιμές του συντελεστή TASF για μετρήσεις τον Απρίλιο του ’20 για τις ίδιες συνθήκες μέτρησης καθώς και οι τιμές της απόκλισης. Σημειώνεται ότι οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των παρακάτω πινάκων αντιστοιχούν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ και περιλαμβάνουν την αβεβαιότητα της φωτοκορυφής και την αβεβαιότητα του συνολικού πλήθους των κρούσεων στο εκάστοτε φάσμα.

Πίνακας 10. Συντελεστής TASF για τους VERDI ανιχνευτές ACT15 και ACT16

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	ACT15 TASF			ACT16 TASF		
		Απρ. ’20	Δεκ. ’21	Απόκλιση	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	Απόκλιση
^{57}Co	122.06	4.884 ± 6.6%	2.682 ± 15%	-58%	4.368 ± 6.5%	3.189 ± 21%	-31%
^{102m}Rh	475.06	3.270 ± 3.5%	0.936 ± 11%	-111%	3.079 ± 3.5%	1.096 ± 11%	-95%
^{54}Mn	834.85	4.748 ± 5.5%	2.837 ± 11%	-50%	5.441 ± 6.6%	2.563 ± 12%	-72%
^{110m}Ag	657.69	0.191 ± 2.4%	0.102 ± 7.3%	-60%	0.197 ± 2.4%	0.100 ± 7.7%	-65%
	884.19	0.136 ± 3.9%	0.094 ± 10%	-37%	0.148 ± 3.7%	0.100 ± 10%	-39%
	938.22	-	-	-	0.146 ± 6.2%	0.091 ± 17%	-47%
^{182}Ta	1188.65	3.077 ± 1.3%	1.858 ± 11%	-49%	3.094 ± 1.4%	1.925 ± 12%	-47%
	1222.09	2.281 ± 1.2%	1.342 ± 9.3%	-52%	2.271 ± 1.2%	1.463 ± 9.0%	-43%

Πίνακας 11. Συντελεστής TASF για τους VERDI ανιχνευτές RADA10 και RADA11

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	RADA10 TASF			RADA11 TASF		
		Απρ. ’20	Δεκ. ’21	Απόκλιση	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	Απόκλιση
^{57}Co	122.06	4.676 ± 4.9%	3.167 ± 17%	-38%	4.360 ± 5.4%	2.402 ± 14%	-58%
^{102m}Rh	475.06	3.154 ± 3.1%	0.997 ± 9.1%	-104%	3.226 ± 3.2%	0.949 ± 11%	-109%
^{54}Mn	834.85	4.685 ± 5.2%	2.418 ± 11%	-64%	4.720 ± 5.0%	2.697 ± 8.9%	-55%
^{110m}Ag	657.69	0.179 ± 2.4%	0.115 ± 6.9%	-43%	0.188 ± 2.3%	0.087 ± 8.4%	-74%
	707.56	-	-	-	0.092 ± 15%	0.079 ± 31%	-15%
	884.19	0.143 ± 3.5%	0.096 ± 9.3%	-39%	0.139 ± 3.7%	0.103 ± 10%	-30%
	938.22	0.126 ± 6.4%	0.075 ± 18%	-50%	0.125 ± 6.8%	0.067 ± 23%	-61%
^{182}Ta	1188.65	3.219 ± 1.2%	2.092 ± 12%	-42%	3.214 ± 1.2%	1.947 ±13%	-49%
	1222.09	2.505 ± 1.1%	1.343 ± 10%	-60%	2.532 ± 1.1%	1.541 ± 10%	-49%
	1231.81	-	-	-	1.345 ± 2.3%	1.240 ± 22%	-8.1%

Πίνακας 12. Συντελεστής TASF για τους VERDI ανιχνευτές RADA13 και RADA14

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	RADA13 TASF			RADA14 TASF		
		Απρ. ’20	Δεκ. ’21	Απόκλιση	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	Απόκλιση
^{57}Co	122.06	4.731 ± 6.0%	2.651 ± 13%	-56%	4.421 ± 5.5%	2.367 ± 14%	-61%
^{102m}Rh	475.06	3.080 ± 3.0%	1.219 ± 11%	-87%	3.038 ± 3.4%	0.919 ± 11%	-107%
^{54}Mn	834.85	4.271 ± 4.3%	2.632 ± 9.5%	-48%	4.217 ± 4.8%	2.737 ± 11%	-43%
^{88}Y	898.04	1.372 ± 2.1%	0.926 ± 29%	-39%	-	-	-
^{110m}Ag	657.69	0.178 ± 2.3%	0.099 ± 7.6%	-57%	0.193 ± 2.4%	0.094 ± 7.9%	-69%
	884.19	0.143 ± 3.3%	0.076 ± 12%	-61%	0.151 ± 3.6%	0.089 ± 11%	-51%
	938.22	-	-	-	0.122 ± 7.4%	0.084 ± 18%	-37%
^{182}Ta	1188.65	3.192 ± 1.1%	1.995 ± 11%	-46%	3.145 ± 1.4%	2.035 ± 11%	-43%
	1222.09	2.544 ± 1.0%	1.625 ± 9.1%	-44%	2.483 ± 1.2%	1.661 ± 9.2%	-40%
	1231.81	-	-	-	1.339 ± 2.5%	0.784 ± 24%	-52%

Για το συντελεστή TASF σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- Για τις περισσότερες φωτοκορυφές ο συντελεστής TASF έχει τιμές μεγαλύτερες από τη μονάδα τόσο για μονοενεργειακά ισότοπα όσο και για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά. Εξαίρεση αποτελούν οι φωτοκορυφές του ^{110m}Ag για τις οποίες ο συντελεστής TASF είναι μικρότερος της μονάδας.

- Αναφορικά με τις τιμές του συντελεστή TASF στους διαφορετικούς VERDI ανιχνευτές, παρατηρείται συνέπεια ανά ενέργεια ακτίνας-γ και χρονική περίοδο ανάλυσης.

- Συγκριτικά με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν τον Απρίλιο ’20, παρατηρείται έντονη μείωση των τιμών του συντελεστή TASF στις μετρήσεις της παρούσας εργασίας, η οποία αποδίδεται στην έντονη μείωση των συνολικών καταγραφόμενων κρούσεων στο φάσμα εξαιτίας της χαμηλότερης ενεργότητας των δειγμάτων. Δεδομένου ότι ο λόγος των φωτοκορυφών ανάμεσα στα δύο φάσματα (suppressed - unsuppressed) είναι σταθερός στις δύο σειρές μετρήσεων, όπως υποδηλώνεται και από τον συντελεστή R_p, η μείωση του συντελεστή TASF οφείλεται στη μείωση του λόγου του συνολικού πλήθους καταγραφόμενων γεγονότων στα δύο φάσματα ανάμεσα στις δύο σειρές μετρήσεων.

- Επίσης σημειώνεται ότι οι συντελεστές TASF που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας συνοδεύονται από υψηλότερες αβεβαιότητες συγκριτικά με τους αντίστοιχους υπολογισμούς του Απριλίου ’20, γεγονός που ομοίως οφείλεται στη μείωση της ενεργότητας των δειγμάτων η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε φωτοκορυφές μικρότερης επιφάνειας κι επομένως υψηλότερης αβεβαιότητας.

4.5. Επίδραση του CSS στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση

Από τη μελέτη των φασμάτων με και χωρίς το CSS διαπιστώθηκε ότι τα μονοενεργειακά ισότοπα δεν υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed φάσμα και η αβεβαιότητα που συνοδεύει την επιφάνεια της εκάστοτε σχηματιζόμενης κορυφής είναι χαμηλότερη. Επομένως, προτείνεται η χρήση του suppressed φάσματος για την ανάλυσή τους. Αντίστροφη συμπεριφορά παρατηρείται για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, όπου στο suppressed φάσμα οι φωτοκορυφές εμφανίζομαι μειωμένες και με υψηλότερες αβεβαιότητες. Σε αυτές τις περιπτώσεις ενδείκνυται η χρήση του unsuppressed φάσματος. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ανάγκη παράλληλης λειτουργίας του συστήματος Compton Suppression και τη χρήση του κατάλληλου φάσματος ανάλογα με το ισότοπο που μελετάται σε κάθε περίπτωση.

Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης του CSS στις αναλύσεις γ-φασματοσκοπίας ανιχνευτών VERDI χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές: RF, R_p και TASF, καθένας από τους οποίους παρέχει διαφορετική πληροφορία.

Ο συντελεστής RF είναι ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος για τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος με τη χρήση συστήματος Compton Suppression, αναδεικνύοντας πόσο χαμηλότερο είναι το υπόστρωμα στα suppressed φάσματα σε σχέση με τις αντίστοιχες περιοχές στα unsuppressed, για περιοχές που δεν ανιχνεύονται διακριτές φωτοκορυφές. Σημειώνεται ότι για δείγματα που περιέχουν πολλά πολυενεργειακά ισότοπα είναι πιο δύσκολος ο εντοπισμός τέτοιων περιοχών υποστρώματος στο φάσμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή αυτού.

Με τους συντελεστές R_p και TASF μελετήθηκε η επίδραση του CSS στην επιφάνεια των ανιχνευόμενων φωτοκορυφών. Στο πλαίσιο αυτής της ανάλυσης, ο συντελεστής R_p φάνηκε ότι δείχνει ικανοποιητικά την επίδραση της χρήσης της ενεργητικής θωράκισης στην ίδια την φωτοκορυφή ενδιαφέροντος. Ωστόσο, η σύγκριση που πραγματοποιεί ο συντελεστής TASF δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτική. Δεδομένου ότι ο συντελεστής λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό καταγραφόμενων γεγονότων σε όλο το ενεργειακό φάσμα, για πολυενεργειακές πηγές, εμπεριέχει το συνεχές υπόστρωμα εξαιτίας όλων των φωτονίων της πηγής, αλλά και τις όποιες μειώσεις μπορεί να υποστούν οι ίδιες οι φωτοκορυφές.

Έχοντας καθορίσει το βέλτιστο τρόπο λειτουργίας για κάθε περίπτωση ισοτόπου, μπορεί να γίνει προσδιορισμός της ενεργότητας των δειγμάτων, για την οποία ωστόσο πρέπει να προηγηθεί βαθμονόμηση απόδοσης, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

4.6. Βαθμονόμηση του συστήματος Compton Suppression με σημειακές πηγές

4.6.1. Σημειακές πηγές βαθμονόμησης

Οι πηγές του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση απόδοσης του CSS είναι σημειακές πηγές διαμέτρου 24.5 mm και πάχους 3.18 mm με ενεργό διάμετρο 3 mm, σύμφωνα με τα πιστοποιητικά των πηγών (Παράρτημα Β) και φαίνονται στην Εικόνα 23.

Εικόνα 23. Μέγεθος και σχήμα σημειακών πηγών βαθμονόμησης

Στον Πίνακα 13 δίνεται η λίστα των πηγών μαζί με την ενεργότητα που αναγράφεται στο πιστοποιητικό που τις συνοδεύει για συγκεκριμένη ημερομηνία και ώρα (ζώνη ώρας: UTC+3), καθώς και η αντίστοιχη αβεβαιότητα σε διάστημα εμπιστοσύνης 1σ. Οι πηγές μετρήθηκαν σε 4 διαφορετικές αποστάσεις από τον κυρίως ανιχνευτή (0 cm, 1 cm, 3 cm, 6cm) και στον Πίνακα 14 δίνονται οι ημερομηνίες των μετρήσεων και η διάρκειά τους.

Πίνακας 13. Ενεργότητα πηγών βαθμονόμησης κατά την κατασκευή τους

Ισότοπο	Ενεργότητα πιστοποιητικού (Bq)	Ημ. & Ώρα Πιστοποιητικού	Αβεβαιότητα (1σ)
^{241}Am	312800	01/07/1983 12:00	0.3%
^{133}Ba	36430	01/01/2015 22:00	1.0%
^{109}Cd	37110	01/01/2015 22:00	1.0%
^{139}Ce	39600	01/06/2021 14:00	1.0%
^{57}Co	39220	01/01/2015 22:00	1.0%
^{60}Co	33470	01/01/2015 22:00	1.0%
^{137}Cs	38150	01/01/2015 22:00	1.0%
^{152}Eu	3992	01/01/2015 22:00	1.2%
^{54}Mn	37890	01/01/2015 22:00	1.0%
^{22}Na	37590	01/01/2015 22:00	1.0%
^{113}Sn	35900	01/06/2021 14:00	1.0%
^{65}Zn	35100	01/06/2021 14:00	1.0%

Πίνακας 14. Ημερομηνία και διάρκεια μετρήσεων βαθμονόμησης

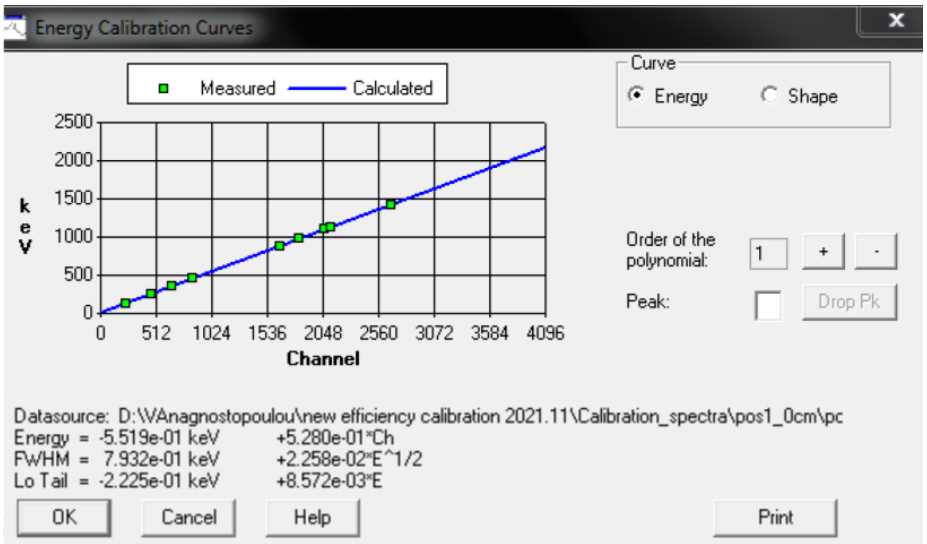
Ισότοπο	sdd=0 cm (pos1)		sdd=1 cm (pos2)		sdd=3 cm (pos3)		sdd=6 cm (pos4)	
	Ημ. & Ώρα	t_c (s)	Ημ. & Ώρα	t_c (s)	Ημ. & Ώρα	t_c (s)	Ημ. & Ώρα	t_c (s)
^{241}Am	22/11/21 13:37	200	22/11/21 17:27	300	24/11/21 11:50	400	26/11/21 12:07	300
^{133}Ba	22/11/21 14:42	600	22/11/21 17:41	900	24/11/21 12:01	600	26/11/21 12:16	600
^{109}Cd	22/11/21 15:31	600	23/11/21 11:09	900	24/11/21 12:20	1800	26/11/21 12:31	1800
^{139}Ce	22/11/21 16:29	200	22/11/21 18:03	200	24/11/21 12:57	400	26/11/21 13:11	500
^{57}Co	21/12/21 11:53	600	21/12/21 12:10	900	24/11/21 13:10	1800	26/11/21 13:27	1800
^{60}Co	23/11/21 10:48	200	23/11/21 11:53	600	24/11/21 14:46	900	26/11/21 14:01	600
^{137}Cs	22/11/21 16:10	100	23/11/21 12:11	300	24/11/21 15:06	400	26/11/21 14:18	300
^{152}Eu	22/11/21 16:15	600	23/11/21 12:22	900	24/11/21 16:44	1800	26/11/21 14:26	1800
^{54}Mn	22/11/21 16:37	600	23/11/21 12:47	1800	24/11/21 15:18	4200	26/11/21 15:00	5400
^{22}Na	23/11/21 10:59	100	23/11/21 13:21	300	26/11/21 11:25	800	26/11/21 16:35	900
^{113}Sn	22/11/21 16:50	200	22/11/21 18:10	200	26/11/21 11:44	400	26/11/21 16:56	500
^{65}Zn	22/11/21 16:59	200	22/11/21 18:17	200	26/11/21 11:55	400	26/11/21 17:07	500

4.6.2. Ενεργειακή βαθμονόμηση συστήματος Compton Suppression

Η ενεργειακή βαθμονόμηση για μία ανιχνευτική διάταξη που διαθέτει σύστημα Compton Suppression για το CSS πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και για μία συμβατική διάταξη γ-φασματοσκοπίας σύμφωνα με όσα περιγράφονται στην παράγραφο 3.7.1.

Στην περίπτωση του CSS σε λειτουργία αντισύμπτωσης, το πρόγραμμα GENIE 2000 καταγράφει ταυτόχρονα δύο φάσματα (unsuppressed και suppressed), τα οποία βαθμονομούνται με τον ίδιο τρόπο και έχουν κοινή καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμησης. Από την ενεργειακή βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, προέκυψε η παρακάτω καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμησης, η γραφική παράσταση της οποίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 24 μέσω του προγράμματος GENIE 2000:

$$\mathrm{E(keV)} = -0.5519 + 0.5280 \cdot \mathrm{CH} \quad (21)$$



Εικόνα 24. Η ενεργειακή βαθμονόμηση όπως φαίνεται στο πρόγραμμα GENIE 2000

4.6.3. Βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής συστήματος Compton Suppression

4.6.3.1. Βαθμονόμηση απόδοσης για συμβατικό τρόπο λειτουργίας

Η βαθμονόμηση απόδοσης για το συμβατικό τρόπο λειτουργίας αφορά τα unsuppressed φάσματα. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από όλες τις σημειακές πηγές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.6.1. Για τον προσδιορισμό της απόδοσης χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση, η οποία έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.7.2.2.:

$$\varepsilon = \frac{\text{area}}{\text{TCC} \cdot A_0 \cdot e^{-(\lambda t_d)} \cdot \left[\frac{1 - e^{(-\lambda \Delta t)}}{\lambda \Delta t}\right] \cdot t_c \cdot P_\gamma} \qquad (22)$$

Σημειώνεται ότι για τη διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης έγινε χρήση του λογισμικού TrueCoinc [47] και οι συντελεστές διόρθωσης για το φαινόμενο παρουσιάζονται στον Πίνακα 15 για τις 4 διαφορετικές αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή. Οι τιμές της απόδοσης που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία δίνονται στον Πίνακα 16, μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Στις αβεβαιότητες αυτές λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα στην επιφάνεια της φωτοκορυφής, η οποία δίνεται απευθείας από το λογισμικό γ-φασματοσκοπίας και η αβεβαιότητα στην αρχική ενεργότητα της πηγής όπως αυτή δηλώνεται στο πιστοποιητικό της (Παράρτημα Β). Τα χρονικά διαστήματα και το ποσοστό εκπομπής της κάθε ακτίνας-γ έχουν αμελητέες αβεβαιότητες, οι οποίες παραλείπονται. Με βάση τις τιμές του Πίνακα 16, κατασκευάζονται οι πειραματικές καμπύλες βαθμονόμησης για τη συμβατική λειτουργία του CSS, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 25.

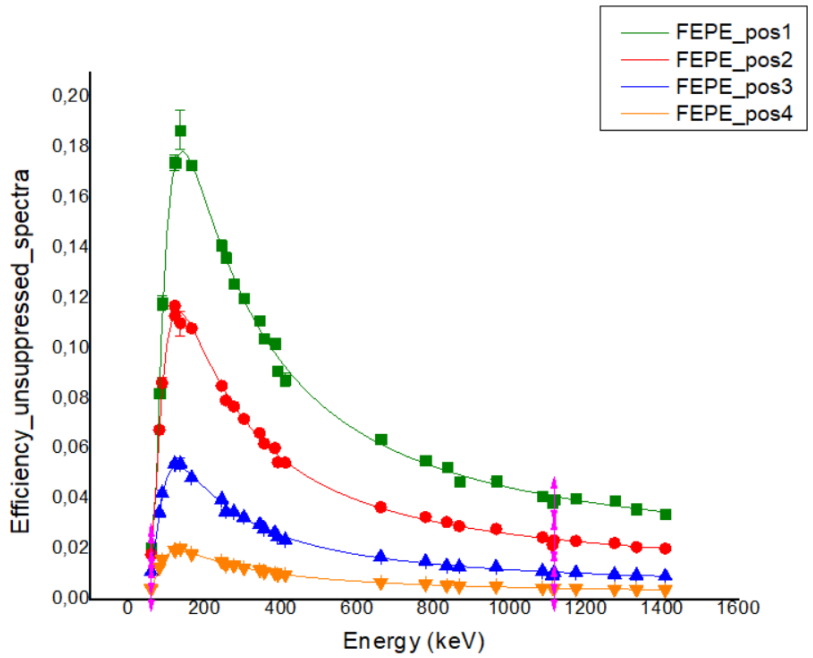
Πίνακας 15. Τιμές συντελεστών TCC στις 4 αποστάσεις πηγής-αντιχνευτή

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	TCC sdd=0 cm	TCC sdd=1 cm	TCC sdd=3 cm	TCC sdd=6 cm
^{241}Am	59.54	0.999	1.000	1.000	1.000
^{133}Ba	81.00	0.763	0.861	0.936	0.974
	276.40	0.914	0.940	0.967	0.987
	302.85	0.954	0.968	0.983	0.993
	356.01	0.969	0.976	0.986	0.994
	383.85	1.063	1.049	1.028	1.011
^{109}Cd	88.03	1.000	1.000	1.000	1.000
^{139}Ce	165.86	1.000	1.000	1.000	1.000
^{57}Co	122.06	1.000	1.000	1.000	1.000
	136.47	1.000	1.000	1.000	1.000
^{60}Co	1173.23	0.806	0.897	0.949	0.978
	1332.49	0.800	0.892	0.948	0.977
^{137}Cs	661.66	1.000	1.000	1.000	1.000
^{152}Eu	121.78	0.771	0.872	0.938	0.973
	244.70	0.714	0.830	0.916	0.966
	344.28	0.837	0.907	0.956	0.981
	778.90	0.768	0.865	0.938	0.975
	867.38	0.679	0.802	0.904	0.986
	964.06	0.866	0.918	0.960	0.984
	1085.84	1.089	1.058	1.029	1.010
	1112.08	0.927	0.955	0.978	0.992
	1408.01	0.909	0.944	0.972	0.989
^{54}Mn	834.85	1.000	1.000	1.000	1.000
^{22}Na	1274.54	0.579	0.758	0.888	0.954
^{113}Sn	255.13	1.000	1.000	1.000	1.000
	391.70	1.000	1.000	1.000	1.000
^{65}Zn	1115.54	1.000	1.000	1.000	1.000

Πίνακας 16. Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής στις 4 αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή για το unsuppressed φάσμα

Ενέργεια (keV)	Απόδοση sdd=0 cm	Απόδοση sdd=1 cm	Απόδοση sdd=3 cm	Απόδοση sdd=6 cm
59.54	0.02086 ± 0.3%	0.01805 ± 0.3%	0.01101 ± 0.3%	0.00424 ± 0.4%
81.00	0.08233 ± 1.0%	0.06765 ± 1.0%	0.03463 ± 1.0%	0.01281 ± 1.1%
88.03	0.11777 ± 2.4%	0.08633 ± 2.3%	0.04234 ± 2.5%	0.01591 ± 3.6%
121.78	0.17423 ± 1.3%	0.11671 ± 1.3%	0.05407 ± 1.3%	0.01974 ± 1.4%
122.06	0.17428 ± 1.7%	0.11267 ± 1.7%	0.05401 ± 1.7%	0.01949 ± 2.6%
136.47	0.18684 ± 4.2%	0.10999 ± 4.5%	0.05407 ± 4.2%	0.02028 ± 7.1%

165.86	0.17318 ± 1.0%	0.10793 ± 1.0%	0.04852 ± 1.0%	0.01815 ± 1.0%
244.70	0.14148 ± 1.5%	0.08507 ± 1.5%	0.03991 ± 1.5%	0.01505 ± 1.9%
255.13	0.13567 ± 1.7%	0.07928 ± 2.0%	0.03503 ± 2.3%	0.01390 ± 2.9%
276.40	0.12576 ± 1.0%	0.07689 ± 1.0%	0.03485 ± 1.2%	0.01362 ± 1.3%
302.85	0.11957 ± 1.0%	0.07189 ± 1.0%	0.03270 ± 1.1%	0.01259 ± 1.2%
344.28	0.11085 ± 1.3%	0.06628 ± 1.3%	0.03004 ± 1.3%	0.01177 ± 1.5%
356.01	0.10377 ± 1.0%	0.06211 ± 1.0%	0.02828 ± 1.0%	0.01112 ± 1.1%
383.85	0.10212 ± 1.0%	0.06030 ± 1.0%	0.02668 ± 1.1%	0.01058 ± 1.3%
391.70	0.09134 ± 1.0%	0.05461 ± 1.1%	0.02486 ± 1.1%	0.00994 ± 1.1%
661.66	0.06390 ± 1.0%	0.03679 ± 1.0%	0.01701 ± 1.0%	0.00678 ± 1.1%
778.90	0.05560 ± 1.6%	0.03294 ± 1.6%	0.01510 ± 1.7%	0.00619 ± 2.0%
834.85	0.05261 ± 1.8%	0.03084 ± 1.5%	0.01354 ± 1.5%	0.00570 ± 1.8%
867.38	0.04706 ± 2.8%	0.02916 ± 2.6%	0.01313 ± 2.9%	0.00531 ± 3.7%
964.06	0.04717 ± 1.6%	0.02805 ± 1.6%	0.01286 ± 1.6%	0.00532 ± 2.0%
1085.84	0.03843 ± 1.8%	0.02171 ± 2.0%	0.00962 ± 2.1%	0.00465 ± 2.4%
1112.08	0.04134 ± 1.6%	0.02477 ± 1.7%	0.01132 ± 1.7%	0.00464 ± 2.2%
1115.54	0.03984 ± 1.1%	0.02356 ± 1.1%	0.01084 ± 1.1%	0.00454 ± 1.2%
1173.23	0.04025 ± 1.1%	0.02330 ± 1.0%	0.01069 ± 1.0%	0.00445 ± 1.1%
1274.54	0.03928 ± 1.3%	0.02255 ± 1.2%	0.01001 ± 1.1%	0.00415 ± 1.2%
1332.49	0.03614 ± 1.1%	0.02088 ± 1.0%	0.00965 ± 1.0%	0.00397 ± 1.1%
1408.01	0.03422 ± 1.5%	0.02034 ± 1.6%	0.00926 ± 1.6%	0.00382 ± 2.0%



Εικόνα 25. Πειραματικές καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης για το unsuppressed φάσμα στις 4 αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή

Στον Πίνακα 17 φαίνεται η εξίσωση για την κάθε καμπύλη βαθμονόμησης με τις αντίστοιχες τιμές R^2 και Root Mean Square (RMS) τα οποία είναι στατιστικά μεγέθη που δείχνουν το πόσο καλά εφαρμόζει η επιλεγόμενη καμπύλη στα πειραματικά δεδομένα. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι το R^2, τόσο καλύτερη είναι η εφαρμογή, ενώ το RMS αποτελεί την απόκλιση των πειραματικών δεδομένων από αυτήν την καμπύλη και χρησιμοποιείται ως η αβεβαιότητα της καμπύλης βαθμονόμησης για τους υπολογισμούς που γίνονται στη συνέχεια της εργασίας.

Πίνακας 17. Εξισώσεις καμπυλών βαθμονόμησης για το unsuppressed φάσμα στις 4 αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή

sdd (cm)	Fitted FEPE curve	R^2	RMS
0	$\varepsilon = 0.01217 + 30.47137 \cdot E^{-1} + 2577.29787 \cdot E^{-2} - 680213.71547 \cdot E^{-3} + 2.50416 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99788	3.54%
1	$\varepsilon = 0.00711 + 17.65269 \cdot E^{-1} + 1713.99382 \cdot E^{-2} - 388453.49763 \cdot E^{-3} + 1.34632 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99757	3.35%
3	$\varepsilon = 0.00324 + 8.09484 \cdot E^{-1} + 698.54477 \cdot E^{-2} - 160164.37012 \cdot E^{-3} + 5.44879 \cdot 10^{6} \cdot E^{-4}$	0.99625	3.90%
6	$\varepsilon = 0.00133 + 3.55331 \cdot E^{-1} + 88.2915 \cdot E^{-2} - 44011.2047 \cdot E^{-3} + 1.59396 \cdot 10^{6} \cdot E^{-4}$	0.99851	2.43%

4.6.3.2. Βαθμονόμηση απόδοσης για λειτουργία αντισύμπτωσης

Για τη βαθμονόμηση απόδοσης σε λειτουργία αντισύμπτωσης (δηλαδή για τα suppressed φάσματα) από τις σημειακές πηγές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.6.1. χρησιμοποιούνται μόνο όσες δεν εκπέμπουν φωτόνια στη σειρά, για τους λόγους που εξηγήθηκαν στο 3ο Κεφάλαιο. Επομένως, αξιοποιούνται όσα ισότοπα από τον Πίνακα 15 έχουν για όλες τις ενέργειες συντελεστή TCC ίσο με τη μονάδα, γεγονός ισοδύναμο με το ότι δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται για τη βαθμονόμηση απόδοσης οι εξής πηγές: ^{241}Am, ^{109}Cd, ^{139}Ce, ^{57}Co, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{113}Sn, ^{65}Zn. Και σε αυτήν την περίπτωση, ο υπολογισμός της απόδοσης γίνεται μέσω της σχέσης (18) και οι τιμές της απόδοσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Οι καμπύλες βαθμονόμησης που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία παρουσιάζονται για όλες τις αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή στην Εικόνα 26, ενώ οι αντίστοιχες εξισώσεις δίνονται στον Πίνακα 19.

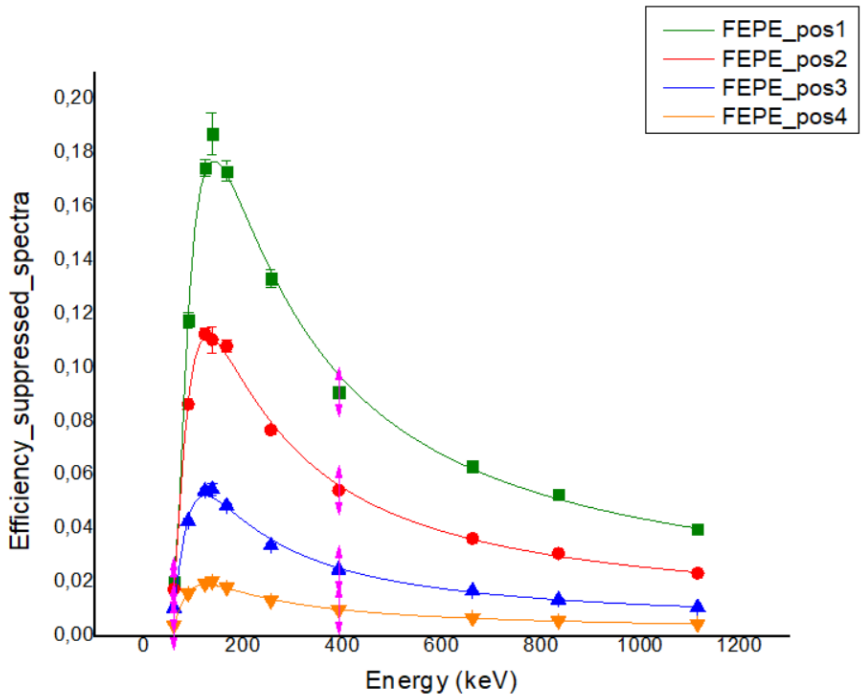
Πίνακας 18. Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής στις 4 αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή για το suppressed φάσμα

Ενέργεια (keV)	Απόδοση sdd=0 cm	Απόδοση sdd=1 cm	Απόδοση sdd=3 cm	Απόδοση sdd=6 cm
59.54	0.02029 ± 0.3%	0.01752 ± 0.3%	0.01048 ± 0.3%	0.00409 ± 0.4%
88.03	0.11761 ± 2.4%	0.08641 ± 2.3%	0.04284 ± 2.3%	0.01588 ± 3.6%
122.06	0.17441 ± 1.7%	0.11256 ± 1.7%	0.05415 ± 1.7%	0.01949 ± 2.6%
136.47	0.18713 ± 4.2%	0.11039 ± 4.4%	0.05465 ± 4.2%	0.02050 ± 6.7%
165.86	0.17318 ± 1.0%	0.10793 ± 1.0%	0.04852 ± 1.0%	0.01815 ± 1.0%
255.13	0.11318 ± 1.6%	0.07683 ± 2.0%	0.03382 ± 2.1%	0.01334 ± 2.8%

391.70	0.09091 ± 1.0%	0.05432 ± 1.1%	0.02470 ± 1.1%	0.00988 ± 1.1%
661.66	0.06325 ± 1.0%	0.03637 ± 1.0%	0.01681 ± 1.0%	0.00669 ± 1.1%
834.85	0.05263 ± 1.8%	0.03083 ± 1.5%	0.01356 ± 1.5%	0.00568 ± 1.8%
1115.54	0.03968 ± 1.1%	0.02346 ± 1.1%	0.01081 ± 1.1%	0.00452 ± 1.2%

Πίνακας 19. Εξισώσεις καμπυλών βαθμονόμησης για το suppressed φάσμα στις 4 αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή

sdd (cm)	Fitted FEPE curve	R^2	RMS
0	$\varepsilon = 0.00745 + 36.16136 \cdot E^{-1} + 745.28948 \cdot E^{-2} - 479254.88465 \cdot E^{-3} + 1.84215 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99774	3.49%
1	$\varepsilon = 0.00632 + 18.87173 \cdot E^{-1} + 932.76551 \cdot E^{-2} - 283970.91932 \cdot E^{-3} + 9.75838 \cdot 10^{6} \cdot E^{-4}$	0.99738	2.58%
3	$\varepsilon = 0.00324 + 8.28676 \cdot E^{-1} + 429.91008 \cdot E^{-2} - 117976.44546 \cdot E^{-3} + 3.84223 \cdot 10^{6} \cdot E^{-4}$	0.99408	3.66%
6	$\varepsilon = 0.00148 + 3.4271 \cdot E^{-1} + 37.39884 \cdot E^{-2} - 32337.69812 \cdot E^{-3} + 1.10228 \cdot 10^{6} \cdot E^{-4}$	0.99786	3.21%



Εικόνα 26. Πειραματικές καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης για το suppressed φάσμα στις 4 αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως ιδιαιτερότητα παρουσίασαν 4 πηγές βαθμονόμησης για τη λειτουργία αντισύμπτωσης: το ^{57}Co, το ^{22}Na, το ^{139}Ce και το ^{113}Sn.

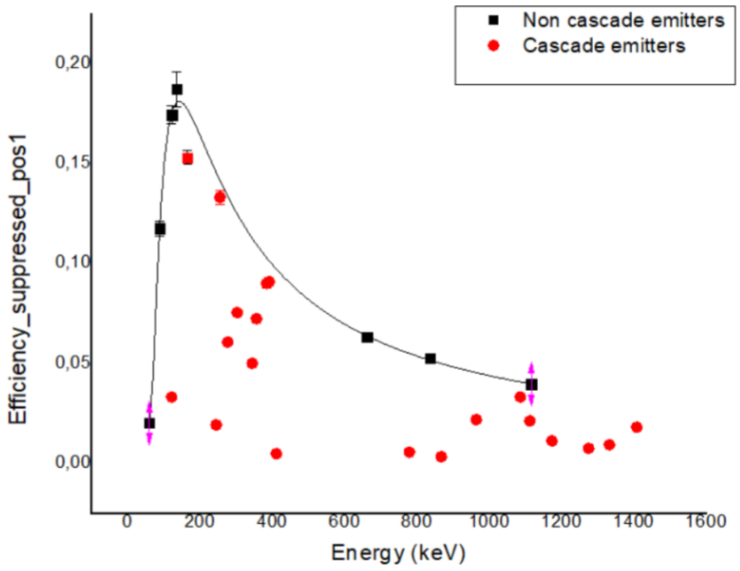
^{57}Co: Το ισότοπο αυτό, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γενικά εκπέμπει φωτόνια σε σειρά, αφού αθροίζονται οι φωτοκορυφές των 14 keV και των 122 keV στην κορυφή των 136 keV. Ωστόσο, όπως παρουσιάστηκε στο παράγραφο 4.2, τόσο ο κυρίως ανιχνευτής όσο και η ενεργητική θωράκιση, διαθέτουν παράθυρο αλουμινίου (Al) το οποίο δεν μπορούν να διαπεράσουν οι ακτίνες-γ ενέργειας 14 keV. Για το λόγο αυτό αξιοποιείται το ^{57}Co στη βαθμονόμηση απόδοσης στη λειτουργία αντισύμπτωσης και μάλιστα είναι αρκετά χρήσιμο γιατί στις ενέργειες ~135 keV παρουσιάζει μέγιστο η καμπύλη βαθμονόμησης και είναι σημαντικό να υπάρχουν πειραματικά σημεία εκεί.

^{22}Na: Το ισότοπο αυτό, αν και μονοενεργειακό, δε χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση απόδοσης για τη λειτουργία αντισύμπτωσης καθώς εκπέμπει σωματίδια-β^+ (ποζιτρόνια). Αυτά, αλληλεπιδρώντας με ηλεκτρόνια μέσα στη διάταξη, εξαϋλώνονται με αποτέλεσμα τη δημιουργία στο φάσμα έντονης κορυφής εξαΰλωσης στα 511 keV από τα 2 φωτόνια που παράγονται από αυτήν την αλληλεπίδραση. Υπάρχει επομένως μεγάλη πιθανότητα ένα φωτόνιο εξαΰλωσης και ένα φωτόνιο ενέργειας 1274 keV από την αποδιέγερση του ^{22}Na να ανιχνευτούν στον κυρίως ανιχνευτή εντός του χρονικού παραθύρου που έχει επιλεγεί για τον έλεγχο σύμπτωσης. Ως αποτέλεσμα, απορρίπτονται τα αντίστοιχα γεγονότα και η φωτοκορυφή του ^{22}Na υποεκτιμάται στα suppressed φάσματα.

^{139}Ce: Πρόκειται για μονοενεργειακό ισότοπο, ωστόσο στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκαν μη αναμενόμενες μειώσεις στο suppressed φάσμα συγκριτικά με το unsuppressed για όλες τις αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή. Οι μειώσεις αυτές αποδίδονται στην υψηλή ενεργότητα της πηγής το χρονικό διάστημα των μετρήσεων, η οποία οδηγεί σε συμβάντα τυχαίας σύμπτωσης. Για το λόγο αυτό, τα δεδομένα απόδοσης για το ισότοπο αυτό στο suppressed φάσμα δε χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση.

^{113}Sn: Το ισότοπο αυτό εκπέμπει μεν δύο φωτόνια σε σειρά, ενέργειας 295 keV και 391 keV, ωστόσο ο χρόνος της ενδιάμεσης στάθμης είναι της τάξης των 99 m, δηλαδή πολύ μεγαλύτερος από το χρονικό παράθυρο σύμπτωσης. Επομένως, για το CSS το ισότοπο αυτό θεωρείται ότι δεν εκπέμπει φωτόνια σε σειρά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση απόδοσης.

Για να αναδειχθεί η ακαταλληλότητα χρήσης των suppressed φασμάτων για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, δίνεται η Εικόνα 27. Σε αυτήν παρουσιάζεται η καμπύλη βαθμονόμησης στο suppressed φάσμα, ενδεικτικά για απόσταση πηγής-ανιχνευτή 0 cm (pos1), και οι πειραματικές τιμές της απόδοσης των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά και φαίνονται οι σημαντικές αποκλίσεις που προκύπτουν σε αυτήν την περίπτωση.



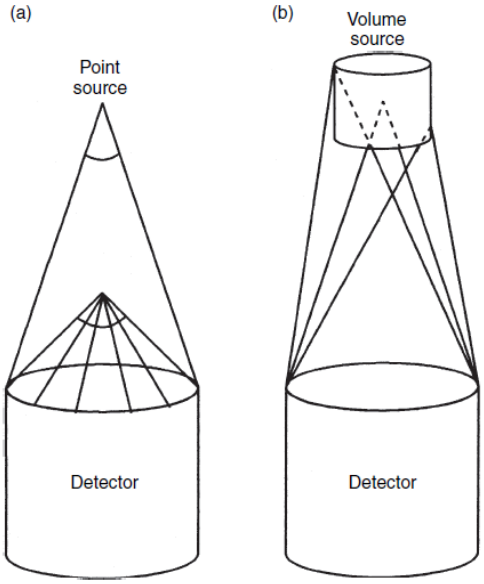
Εικόνα 27. Καμπύλη βαθμονόμησης στο suppressed φάσμα και πειραματικές τιμές απόδοσης για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά

Με την ολοκλήρωση της πειραματικής απόδοσης της διάταξης του CSS με σημειακές πηγές, μπορεί να προσδιοριστεί η ενεργότητα των δειγμάτων που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ωστόσο θα πρέπει να προηγηθεί ο υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου, ο οποίος παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5: Προσομοιώσεις Monte Carlo για μεταφορά απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου

5.1. Ανάγκη μεταφοράς απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου

Τα δείγματα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, δηλαδή οι ανιχνευτές VERDI, έχουν διαστάσεις οι οποίες διαφοροποιούνται από τις σημειακές πηγές με τις οποίες έγινε η βαθμονόμηση απόδοσης. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τόσο την αυτοαπορρόφηση ακτίνων-γ μέσα στον όγκο των δειγμάτων όσο και την στερεά γωνία ανάμεσα στην επιφάνεια των δειγμάτων και εκείνη του παραθύρου του κυρίως ανιχνευτή. Το δεύτερο αυτό φαινόμενο φαίνεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28. Αλλαγή στερεάς γωνίας δείγματος-ανιχνευτή για σημειακή πηγή (αριστερά) και πηγή όγκου (δεξιά) [26]

Για τη διόρθωση των φαινομένων αυτών στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές Monte Carlo προσομοιώνοντας τόσο τις σημειακές πηγές με τις οποίες πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση απόδοσης, όσο και τους ίδιους τους ανιχνευτές VERDI με πλήρη λεπτομέρεια. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται ορισμένα στοιχεία για τη μέθοδο Monte Carlo, παρουσιάζεται συνοπτικά ο κώδικας PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και υπολογίζονται κατάλληλοι συντελεστές για την απόδοση και την αυτοαπορρόφηση στη γεωμετρία των ανιχνευτών VERDI.

5.2. Η μαθηματική μέθοδος Monte Carlo και η χρήση της για μεταφορά απόδοσης

Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια αριθμητική μέθοδος που αξιοποιείται για τον υπολογισμό πιθανοτήτων καθώς και διαφόρων ποσοτήτων σχετικών με πιθανότητες, χρησιμοποιώντας σειρές τυχαίων αριθμών. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η χρήση αναλυτικών μεθόδων ή άλλων αριθμητικών προσεγγίσεων είναι ανεπαρκής και συνίσταται στο ότι, αντί να γίνει αναλυτική ή αριθμητική επίλυση του προβλήματος, δημιουργείται αρχικά μία ακολουθία τυχαίων αριθμών η κατανομή των οποίων αντιστοιχεί στη συνάρτηση πιθανότητας f(x) που είναι προς υπολογισμό. Οι τιμές του x μπορούν να θεωρηθούν προσομοιούμενες μετρήσεις και από αυτές να υπολογιστούν οι πιθανότητες να ληφθούν συγκεκριμένες τιμές της f(x) σε μια συγκεκριμένη περιοχή [48]. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί πρακτικά το ολοκλήρωμα της f(x), έστω I, και να γίνει ο προσδιορισμός της άγνωστης ποσότητας. Παρακάτω δίνεται το παράδειγμα υπολογισμού ολοκληρώματος σε 2 διαστάσεις, ωστόσο ο ίδιος φορμαλισμός ισχύει και στις 3 διαστάσεις.

Είναι: $I = \int_a^b f(x)dx \quad (23)$ και: $< f > = \int_a^b f(x)p(x)dx \quad (24)$

Στη σχέση (24) η ποσότητα <f> είναι η αναμενόμενη μέση τιμή της συνάρτησης f στο διάστημα [a, b] και η p(x) είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τέτοια ώστε p(x)>0 στο [a, b] και p(x)=0 εκτός αυτού του διαστήματος. Η p(x) αναφέρεται από εδώ και στο εξής ως pdf (probability density function) για λόγους συντομίας και θεωρείται ότι στο διάστημα [a, b] αυτή είναι σταθερή, άρα p(x) = c (= constant). Η σχέση (24) τότε γίνεται:

$$< f > = \int_a^b c \cdot f(x)dx \Rightarrow < f > = \frac{1}{(b-a)} \int_a^b f(x)dx \Rightarrow < f > = \frac{1}{(b-a)} \cdot I$$

$$\Rightarrow I = (b-a) \cdot < f > \quad (25)$$

Η σχέση (25) συσχετίζει το προς υπολογισμό μέγεθος (ολοκλήρωμα I) με μία ποσότητα η οποία μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της μεθόδου Monte Carlo με τη δημιουργία τυχαίων αριθμών (N) οι οποίοι αξιοποιούνται για τον υπολογισμό της δειγματικής μέσης τιμής της f. Εάν ο N τείνει στο άπειρο, από τον Ισχυρό Νόμο των Μεγάλων Αριθμών [49] ισχύει ότι η δειγματική μέση τιμή θα ισούται με τη θεωρητική μέση τιμή της συνάρτησης f, δηλαδή:

Για $N \to \infty : \bar{f} \to < f > \xrightarrow{(25)} \frac{1}{(b-a)} \cdot I \Rightarrow I = (b-a) \cdot \bar{f} \Rightarrow I = (b-a) \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} f(x_i) \quad (26)$

Όσον αφορά την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων από τη μέθοδο Monte Carlo, σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα [49] προκύπτει ότι όταν το N τείνει στο άπειρο η πυκνότητα πιθανότητας της δειγματικής μέσης τιμής είναι μια κανονική κατανομή με μέση τιμή <f> και τυπική απόκλιση σ_f.

$$p(\bar{f}) = \frac{1}{\sigma_f\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{\left(\bar{f} - < f >\right)^2}{2\sigma_f^2}\right] \qquad (27)$$

Επομένως για αρκετά μεγάλες τιμές του N, το διάστημα $\bar{f} \pm n \cdot \sigma_f$ (28) περιέχει τη μέση τιμή της f με πιθανότητα 68.3% για n = 1 (αβεβαιότητα σε 1σ), με 95.4% για n = 2 (αβεβαιότητα σε 2σ) και 99.7% για n=3 (αβεβαιότητα σε 3σ).

Η μέθοδος Monte Carlo αξιοποιείται ευρύτατα στη γ-φασματοσκοπία και σε άλλους εφαρμοσμένους κλάδους της πυρηνικής φυσικής για τη προσομοίωση μεγεθών όπως η απόδοση ενός ανιχνευτή, οι ενεργές διατομές αντιδράσεων, οι ροές σωματιδίων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται για τη μεταφορά απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου, ελλείψει άλλης αξιόπιστης μεθόδου για τον υπολογισμό αυτόν.

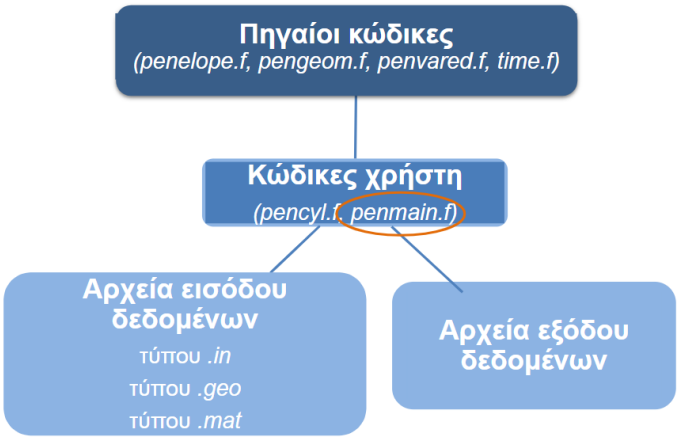
5.3. Ο κώδικας PENELOPE

Ο κώδικας PENELOPE δημιουργήθηκε για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων β-σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη. Αναπτύχθηκε από τους F.Salvat, J.M.Fernandez-Varea και J.Sempau, το 1996, στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης. Την πρώτη αυτή έκδοση του κώδικα έχουν ακολουθήσει πολλές νέες, εμπλουτισμένες -κυρίως σε επίπεδο βιβλιοθηκών- εκδόσεις. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του 2018 [50], η οποία έχει αρκετές βελτιώσεις και σημαντικές διαφορές από τις προγενέστερες εκδόσεις.

Η ονομασία του κώδικα προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons. Πρόκειται για ένα κώδικα που είχε αρχικά σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη διάδοση ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από ποικίλα υλικά. Η δυνατότητα προσομοίωσης και φωτονίων προστέθηκε λίγο αργότερα και αυτός είναι ο λόγος που δεν περιέχεται στην ονομασία του κώδικα [44].

5.3.1. Γενικά στοιχεία

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης του κώδικα PENELOPE στηρίζεται σε ένα μοντέλο διασποράς (scattering model) που συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων και αναλυτικά μοντέλα της ενεργού διατομής για τους διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης. Βρίσκει εφαρμογή στην περίπτωση σωματιδίων ή φωτονίων με ενέργειες στην περιοχή από 50 eV έως 1 GeV. Ο κώδικας αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτίνων, ενταγμένων σε κώδικες προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα λειτουργίας του κώδικα στην
Εικόνα **29**.



Εικόνα 29. Διάγραμμα λειτουργίας κώδικα προσομοίωσης PENELOPE [36]

Οι πηγαίοι κώδικες (penelope.f, pengeom.f, penvared.f, time.f) περιέχουν τις υπορουτίνες προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις των ακτινοβολιών με την ύλη. Η περιγραφή του προς προσομοίωση προβλήματος γίνεται μέσω των αρχείων εισόδου του κώδικα. Αναφέρονται τρεις τύποι αρχείων εισόδου: αρχεία .in, αρχεία .geo, αρχεία .mat, μέσω των οποίων εισάγονται οι παράμετροι της προσομοίωσης (για παράδειγμα το είδος της ακτινοβολίας, η ενέργεια σωματιδίων κ.ά.), η γεωμετρία του προβλήματος και τα υλικά του προβλήματος, αντίστοιχα. Απαραίτητη συνιστώσα του κώδικα PENELOPE είναι ένας κώδικας χρήστη, ο οποίος συνδέει τα αρχεία εισόδου δεδομένων με τους πηγαίους κώδικες, ελέγχει την πορεία της προσομοίωσης και καταγράφει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με ένα τρόπο που να είναι χρήσιμος στο χρήστη. Στην έκδοση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. περιέχονταν δύο κώδικες χρήστη: pencyl.f (για απλές και σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές), και penmain.f (για σύνθετα προβλήματα πιο πολύπλοκης γεωμετρίας) [36]. Στις εφαρμογές της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ο κώδικας χρήστη penmain.f και για αυτό επισημαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

Σημειώνεται ότι σημαντικό πλεονέκτημα του κώδικα PENELOPE είναι και το γεγονός ότι όλα τα περιεχόμενα σε αυτόν προγράμματα και υπορουτίνες παρέχονται υπό τη μορφή ανοικτού κώδικα (open source), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο χρήστη να τα τροποποιήσει ανάλογα με τις ανάγκες των εφαρμογών του.

5.3.2. Αρχεία εισόδου

Τα αρχεία εισόδου του κώδικα penmain, τα οποία παρέχονται από το χρήστη και περιέχουν όλα τα απαραίτητα για την προσομοίωση δεδομένα, είναι τα εξής [44]:

i. Αρχείο τύπου .in: Είναι το βασικό αρχείο εισόδου δεδομένων του προβλήματος. Μέσω αυτού περιγράφονται:
   a. η πηγή ακτινοβολίας: το είδος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (φωτόνια, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια), η αρχική ενέργεια των σωματιδίων (δυνατότητα εισόδου είτε μοναδικής ενέργειας είτε ισοτόπου είτε ενεργειακού φάσματος), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πηγής καθώς και η απόσταση πηγής-ανιχνευτή. Στην περίπτωση του ισοτόπου, θα πρέπει

να δοθεί ένα επιπλέον αρχείο εισόδου από τη βιβλιοθήκη Nucleide, η οποία είναι διαθέσιμη ελεύθερα στο Διαδίκτυο. Για τον υπολογισμό της απόδοσης σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να διαιρεθεί η απόδοση με το ποσοστό εκπομπής για κάθε ανιχνευόμενη ακτίνα-γ.

b. οι ονομασίες του αρχείου περιγραφής της γεωμετρίας (τύπου .geo) και τα αρχεία περιγραφής των υλικών (τύπου .mat). Τα ξεχωριστά αυτά αρχεία θα αναζητήσει και θα διαβάσει ο κώδικας προκειμένου να προμηθευτεί όλα τα δεδομένα που αφορούν το πρόβλημα.

c. οι παράμετροι της προσομοίωσης: ορίζεται το είδος και ο αριθμός των ανιχνευτών, η ενεργειακή διαμέριση, το κατώφλι ενέργειας.

d. λοιπά στοιχεία της προσομοίωσης: ορίζεται από το χρήστη η επιθυμητή διάρκεια της προσομοίωσης ή/και ο επιθυμητός αριθμός γεγονότων που θα προσομοιωθούν καθώς και κάποιες ακόμα παράμετροι που αφορούν τα αρχεία εξόδου της προσομοίωσης (όπως η ονομασία των αρχείων και το κάθε πότε θα καταγράφονται τα αποτελέσματα στα αρχεία εξόδου).

ii. Αρχείο τύπου .mat: Πρόκειται για το αρχείο ορισμού κάθε υλικού που χρησιμοποιείται στην περιγραφή του προβλήματος. Περιέχει όλες τις απαραίτητες φυσικές σταθερές που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη στη διαδικασία προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με τα συγκεκριμένα υλικά. Σημειώνεται ότι δημιουργείται ένα ξεχωριστό αρχείο .mat για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Αυτό μπορεί είτε να γίνει από έτοιμη βιβλιοθήκη που περιέχει όλα τα στοιχεία καθώς και σύνθετα υλικά (όπως βιολογικοί ιστοί για προσομοιώσεις δόσεων, ή κράμματα μετάλλων και υλικά όπως το plexiglass που χρησιμοποιούνται συχνά σαν βοηθητικά στοιχεία στις μετρήσεις), είτε με κατασκευή ενός υλικού από το χρήστη. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να δοθούν συγκεκριμένες παράμετροι όπως τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το υλικό, το ποσοστό του κάθε στοιχείου, η πυκνότητά του κτλ.

iii. Αρχείο τύπου .geo: Είναι το αρχείο στο οποίο περιγράφεται αναλυτικά η γεωμετρία του προβλήματος. Ορίζονται με λεπτομέρειες όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τόσο η δομή (επιφάνειες, όγκοι, ακριβείς διαστάσεις) όσο και τα υλικά από τα οποία αποτελείται κάθε τμήμα της κατασκευής.

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί, διαμορφώνονται κάθε φορά από το χρήστη τα αντίστοιχα αρχεία εισόδου. Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητο, για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης, να είναι αποθηκευμένα όλα τα παραπάνω αρχεία δεδομένων στο ίδιο φάκελο (directory).

5.3.3. Εικονικοί ανιχνευτές

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χρειάζεται να καταγράφονται διάφορες πληροφορίες, οι οποίες θα επιτρέψουν τελικά και την επίλυση του σχετικού φυσικού προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εικονικών ανιχνευτών. Οι εικονικοί ανιχνευτές είναι ουσιαστικά σειρές εντολών μέσα στον κώδικα χρήστη (π.χ. τον penmain) με τις οποίες καταγράφονται ορισμένες παράμετροι όταν κάποιο σωματίδιο εισέλθει στο «σώμα» που έχει καθοριστεί από το χρήστη ως ανιχνευτής ή τμήμα ενός ανιχνευτή. Τα «σώματα» που αντιστοιχούν σε ανιχνευτές ή τμήματα ανιχνευτών ορίζονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου (τύπου

.in). Ο κώδικας PENELOPE περιλαμβάνει τρία είδη εικονικών ανιχνευτών: τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης, τους ανιχνευτές δόσης και τους ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας [44].

i. Ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (impact detector): καταγράφει την ενέργεια που έχουν τα σωματίδια τη στιγμή που εισέρχονται σε αυτόν. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα αρχείο το οποίο περιέχει το φάσμα της ενέργειας των σωματιδίων που εισήλθαν στο «σώμα» που έχει οριστεί ως ανιχνευτής αλληλεπίδρασης. Ο ανιχνευτής αυτός παρέχει επίσης τη δυνατότητα καταγραφής σε ξεχωριστό αρχείο των τιμών των χαρακτηριστικών (είδος, ενέργεια, θέση, κατεύθυνση, παράγοντα βαρύτητας και προέλευση) όλων των εισερχόμενων σωματιδίων. Τα «σώματα» ή ομάδα «σωμάτων» που αντιστοιχούν σε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης και τα οποία ορίζονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου αποτελούν τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνονται στο αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo [44].

ii. Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector): καταγράφει -όπως υποδηλώνει και το όνομά του- την ενέργεια που αποθέτουν τα εισερχόμενα σε αυτόν σωματίδια. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα επιπλέον αρχείο εξόδου, το οποίο περιέχει το φάσμα της ενέργειας που αποτέθηκε από τα σωματίδια στον ανιχνευτή. Όμοια με την περίπτωση του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, το «σώμα» ή η ομάδα «σωμάτων» που ορίζεται στο αρχείο εισόδου ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας αποτελεί τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνεται και στο αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας τύπου .geo. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει στο αρχείο εισόδου έως και 5 διαφορετικούς ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας, για κάθε έναν από τους οποίους δημιουργείται αντίστοιχο αρχείο εξόδου (τύπου pm_spc_enddet_nn.dat) [44], ενώ υπάρχει και η δυνατότητα αλλαγής του μέγιστου αριθμού ανιχνευτών με κατάλληλη τροποποίηση εντός του κώδικα χρήστη. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας και τα αρχεία εξόδου αυτού του τύπου περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 5.3.4.

iii. Ανιχνευτής δόσης (dose enclosure): καταγράφει την κατανομή της δόσης σε κάποιο τμήμα της κατασκευής. Είναι ουσιαστικά ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα, το οποίο έχει καθοριστεί στο αρχείο εισόδου ως ανιχνευτής δόσης. Σε αντίθεση όμως με τους άλλους δύο ανιχνευτές (αλληλεπίδρασης και αποτιθέμενης ενέργειας), ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δεν αποτελεί τμήμα της κατασκευής και για το λόγο αυτό δεν περιέχεται στο αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo. Με την έλευση ενός σωματιδίου στον ορισμένο ως ανιχνευτή δόσης χώρο, καταγράφεται η δόση στη θέση που βρίσκεται το σωματίδιο. Μετά το πέρας της προσομοίωσης η κατανομή της δόσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή που έχει υπολογιστεί δίνεται μέσα από αντίστοιχο αρχείο εξόδου [44].

5.3.4. Αρχεία εξόδου

Ο κώδικας χρήστη penmain, όπως διανέμεται με τον κώδικα PENELOPE, παράγει αρχεία εξόδου τα οποία περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Περιλαμβάνουν τις τιμές των μεγεθών που έχουν ζητηθεί από το χρήστη, ενώ ενημερώνονται σε τακτά χρονικά διάστημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως ορίζεται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου .in. Στη συνέχεια περιγράφονται δύο από τα αρχεία εξόδου δεδομένων του κώδικα χρήστη penmain, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Αρχείο εξόδου penmain.dat: Συνοψίζονται όλα τα δεδομένα της προσομοίωσης, όπως το αρχείο γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκε, πληροφορίες για τα δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης με τον τρόπο που αυτά ορίζονται από το χρήστη στα αρχεία εισόδου, και τέλος δίνεται ο αριθμός των ιστοριών και ο χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Αρχείο εξόδου penmain-res.dat: Πρόκειται για αρχείο το οποίο συνεχώς ανανεώνεται με την εξέλιξη της προσομοίωσης και σε αυτό παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν [36].

Αρχείο εξόδου pm_spc_enddet_nn.dat: Πρόκειται για το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector). Οι πληροφορίες του αρχείου εξόδου είναι κατανεμημένες σε τρεις στήλες. Στην πρώτη στήλη του αρχείου δίνεται το ενεργειακό παράθυρο (η μέση ενέργεια του εκάστοτε παραθύρου). Στη δεύτερη στήλη του αρχείου δίνεται η πιθανότητα απόθεσης ενέργειας εντός των ορίων του ενεργειακού παραθύρου, ανηγμένη στο πλήθος των ιστοριών και το εύρος του ενεργειακού παραθύρου dE. Στην τρίτη στήλη δίνεται η απόλυτη αβεβαιότητα της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας στο κάθε ενεργειακό παράθυρο σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ [36]. Σημειώνεται ότι μπορεί να δοθεί οποιαδήποτε άλλη ονομασία στο αρχείο αυτό μέσω του αρχείου εισόδου τύπου .in.

5.4. Μέθοδος υπολογισμού απόδοσης και αντίστοιχης αβεβαιότητας με τον κώδικα PENELOPE

Στην περίπτωση που το προς επίλυση πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) ενός ανιχνευτή χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που καταγράφονται στο αρχείο εξόδου pm_spc_enddet_nn.dat.

Τμήμα αυτού του αρχείου φαίνεται στην Εικόνα 30, όπου στην πρώτη στήλη δίνεται η αποτιθέμενη ενέργεια σε eV, στη δεύτερη στήλη η πυκνότητα πιθανότητας (pdf) σε μονάδες 1/(eV·σωματίδιο) για την αντίστοιχη ενέργεια και στην τρίτη στήλη η απόλυτη αβεβαιότητα της pdf σε διάστημα εμπιστοσύνης 3σ.

spc-enddet-01.dat

```
#  Results from PENMAIN. Output from energy-deposition detector #  1
#  Deposited energy spectrum.
#  1st column: deposited energy (eV).
#  2nd column: probability density (1/(eV*particle)).
#  3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).
 5.883000E+04  2.472612E-07  2.35E-07
 5.889000E+04  4.945224E-07  3.32E-07
 5.895000E+04  2.719873E-07  2.46E-07
 5.901000E+04  3.956179E-07  2.97E-07
 5.907000E+04  6.676053E-07  3.85E-07
 5.913000E+04  3.708918E-07  2.87E-07
 5.919000E+04  4.203441E-07  3.06E-07
 5.925000E+04  3.708918E-07  2.87E-07
 5.931000E+04  5.439747E-07  3.48E-07
 5.937000E+04  4.697963E-07  3.23E-07
 5.943000E+04  3.214396E-07  2.67E-07
 5.949000E+04  2.472612E-07  2.35E-07
 5.955000E+04  3.447316E-04  8.67E-06
 5.961000E+04  1.000000E-35  0.00E+00
 5.967000E+04  1.000000E-35  0.00E+00
 5.973000E+04  1.000000E-35  0.00E+00
 5.979000E+04  1.000000E-35  0.00E+00
```

Εικόνα 30. Παράδειγμα αρχείου εξόδου pm_spc_enddet_nn.dat PENELOPE

Σε ένα γ-φάσμα, θεωρητικά, κάτω από μία φωτοκορυφή καταγράφονται μόνο τα φωτόνια τα οποία αποθέτουν όλη την αρχική τους ενέργεια στον ανιχνευτή. Στην πραγματικότητα όμως, καταγράφεται και ένα μικρό ποσοστό φωτονίων τα οποία έχουν υποστεί μικρή απώλεια ενέργειας, λόγω προηγούμενης αλληλεπίδρασης (π.χ. μέσα την πηγή), όπως για παράδειγμα φωτόνια χαμηλών ενεργειών (E < 100 keV) τα οποία έχουν υποστεί σκέδαση υπό πολύ μικρή γωνία. Για τον ορθό υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα φωτόνια αυτά, καθώς είναι δυνατόν να καταγράφονται στη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης ενέργειας [51]. Για το λόγο αυτό, η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης μέσω προσομοίωσης πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση (29).

$$\varepsilon = \left(\sum_{n} (\mathrm{pdf})_i\right) \cdot \Delta E \qquad (29)$$

όπου:
ε: η απόδοση φωτοκορυφής
$(\mathrm{pdf})_i$: η πιθανότητα απόθεσης ενέργειας εντός των ορίων του ενεργειακού παραθύρου i
ΔE: το εύρος των χρησιμοποιούμενων ενεργειακών παραθύρων
n: το πλήθος των ενεργειακών παραθύρων που πρέπει να αθροιστούν, ώστε να προκύψει η ενεργειακή περιοχή μέσα στην οποία καταγράφονται όλα τα φωτόνια τα οποία θα καταγράφονταν κάτω από την αντίστοιχη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης στο πραγματικό φάσμα

Δεδομένου ότι μία φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης πρακτικά οριοθετείται στην περιοχή [κεντροειδές ± 1.5·FWHM], η τιμή του n εξαρτάται από το FWHM της ανιχνευτικής διάταξης για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και δίνεται από τη σχέση (30).

$$n = \frac{1.5 \cdot \mathrm{FWHM}}{\Delta E} \qquad (30)$$

Η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο 1σ υπολογίζεται με εφαρμογή του νόμου διάδοσης σφαλμάτων και τις τιμές της απόλυτης αβεβαιότητας της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας (pdf) για κάθε ενεργειακό παράθυρο, από τη σχέση (31).

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{\sqrt{\sum_n \sigma^2 (\mathrm{pdf})_i} \cdot \Delta E}{3} \qquad (31)$$

όπου:
σ(ε): η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο 1σ
$\sigma(\mathrm{pdf})_i$: η απόλυτη αβεβαιότητα της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας (pdf) στο i-ενεργειακό παράθυρο
n: πλήθος ενεργειακών καναλιών, όπως υπολογίζεται από τη σχέση (30).

Σημειώνεται πως το ΔE λαμβάνεται από την 1η στήλη του αρχείου εξόδου pm_spc_enddet_nn.dat ως η διαφορά ανάμεσα σε δύο διαδοχικές τιμές της ενέργειας, η pdf από τη 2η στήλη και η σ(pdf) από την 3η στήλη.

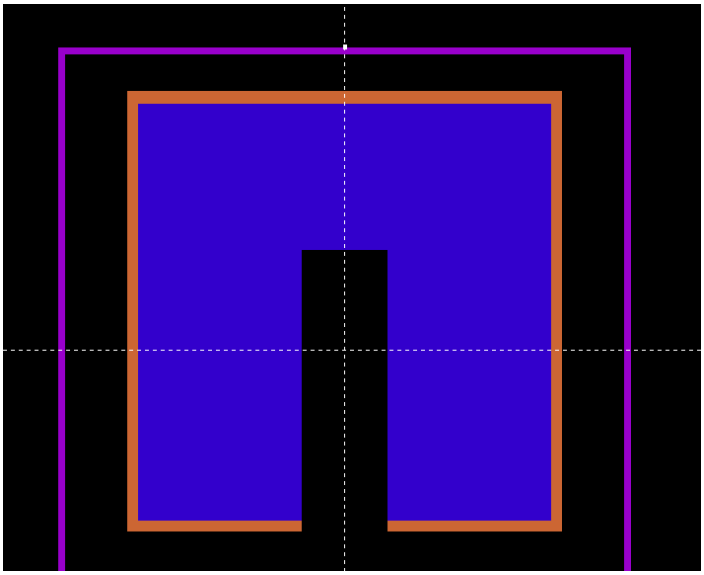
Επίσης σημαντικό είναι να αναφερθεί πως στην περίπτωση υπολογισμού της ολικής απόδοσης για ένα ισότοπο, ισχύει η σχέση (29) με άθροιση πάνω σε όλες τις ενέργειες.

5.5. Επιβεβαίωση γεωμετρικού μοντέλου της διάταξης μέσω του κώδικα PENELOPE

Για τους σκοπούς της προσομοίωσης της διάταξης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των διαστάσεων του κυρίως ανιχνευτή. Ακόμα και στην περίπτωση που είναι γνωστές όλες οι διαστάσεις του ανιχνευτή είναι σκόπιμο να ελέγχονται και να επαληθεύονται, αφού δεν είναι λίγες οι δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες στις οποίες διαπιστώνονται αποκλίσεις των τιμών που υπολογίζονται από τις «ονομαστικές» τιμές που αναφέρονται στα πιστοποιητικά των ανιχνευτών. Τέτοιες ασυμφωνίες μπορεί να οφείλονται, για παράδειγμα, σε κατ' εκτίμηση τιμές που δίνονται από τους κατασκευαστές, σε διαφοροποιήσεις με την πάροδο του χρόνου κάποιων χαρακτηριστικών (π.χ. των νεκρών ζωνών) λόγω της χρήσης του ανιχνευτή ή σε ατελείς συγκεντρώσεις φορτίου [44]. Επιπλέον, στα πιστοποιητικά των ανιχνευτών δεν περιγράφονται πάντα όλες οι διαστάσεις που έχουν σημασία για την πλήρη περιγραφή της διάταξης, όπως η διάμετρος της οπής του ανιχνευτή ή τις περιφερειακές νεκρές ζώνες.

5.5.1. Προσδιορισμός των διαστάσεων ανιχνευτή HPGe μέσω προσομοίωσης

Από τις παραμέτρους που συνήθως είναι άγνωστες -ή ανεπαρκώς γνωστές- για έναν ανιχνευτή η σημαντικότερη, ίσως, είναι η νεκρή ζώνη του ανιχνευτή. Υποθέτοντας, με καλή προσέγγιση, ότι η ζώνη αυτή είναι ομοιόμορφη σε όλη την εξωτερική επιφάνεια του κρυστάλλου, αρκεί να προσδιοριστεί το πάχος της. Επισημαίνεται ότι, τόσο η ομοιογένεια του κρυστάλλου, όσο και το σταθερό πάχος της νεκρής ζώνης είναι απλώς παραδοχές, που φυσικά δεν είναι δεδομένο ότι εξασφαλίζονται. Οι παραδοχές αυτές είναι δύσκολο και εξαιρετικά χρονοβόρο να ελεγχθούν πειραματικά. Εκτός από τον όγκο του ανενεργού κρυστάλλου, για την πλήρη περιγραφή του ανιχνευτή, πρέπει ακόμα να υπολογιστούν το πάχος του παραθύρου Al και το μέγεθος της οπής (finger) στο κέντρο του κρυστάλλου, όπου αυτές δεν δίνονται από άλλες πηγές (όπως πιστοποιητικό ανιχνευτή ή ραδιογραφία) [44].



Εικόνα 31. Απεικόνιση κάθετης τομής ανιχνευτή HPGE

Ζητούμενο συνεπώς αυτού του ελέγχου είναι η εκτίμηση των 4 παραμέτρων: πάχος νεκρής ζώνης (πορτοκαλί), πάχος παραθύρου Al (μωβ), ύψος οπής και διάμετρος οπής (κέντρο Εικόνα 31). Η εκτίμηση των διαστάσεων αυτών πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από την προσομοίωση. Συνήθως επιλέγεται ως μέγεθος σύγκρισης η απόδοση φωτοκορυφής για συγκεκριμένες ενέργειες φωτονίων που να καλύπτουν το ενεργειακό φάσμα ενδιαφέροντος της εκάστοτε εφαρμογής. Συμφωνία μεταξύ των τιμών πειράματος-προσομοίωσης υποδεικνύει ότι το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και οι διαστάσεις του ανιχνευτή ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του πειράματος και της προσομοίωσης αποδίδεται στο γεγονός ότι ορισμένες από τις διαστάσεις του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και θα πρέπει να τροποποιηθούν αναλόγως. Πρέπει στο σημείο αυτό να διευκρινισθεί ότι οι διαστάσεις που τελικά θα προκύψουν συνοδεύονται από μία αβεβαιότητα η οποία εξαρτάται τόσο από την αβεβαιότητα λόγω της προσομοίωσης, όσο και από την αβεβαιότητα λόγω της πειραματικής διαδικασίας (π.χ. η αβεβαιότητα των πηγών που χρησιμοποιούνται στα πειράματα) [44] και ταυτίζεται με τη μέγιστη απόκλιση των πειραματικών δεδομένων από τα προσομοιούμενα.

Είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι οι διαστάσεις οι οποίες τελικά θα προκύψουν δεν είναι απαραίτητο ότι θα είναι ταυτόσημες με τις αντίστοιχες πραγματικές διαστάσεις του ανιχνευτή. Οι διαστάσεις που εκτιμώνται είναι οι διαστάσεις εκείνες, οι οποίες για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, δίνουν αποτελέσματα που δεν θα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από τα πειραματικά, ωστόσο είναι πιθανό να υπάρχουν περισσότεροι από ένας συνδυασμοί διαστάσεων του ανιχνευτή που να ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη.

5.5.2. Έλεγχος υπάρχοντος γεωμετρικού μοντέλου της διάταξης

Για τον κύριο ανιχνευτή του συστήματος Compton Suppression στο εργαστήριο του ΙΠΡΕΤΕΑ είχε κατασκευαστεί και προϋπήρχε γεωμετρικό μοντέλο με εξαιρετική σύγκλιση με τις πειραματικές τιμές. Ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να γίνει επαλήθευση του μοντέλου στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μιας και η νεκρή ζώνη του ανιχνευτή μεταβάλλεται με το χρόνο σε μικρό αλλά μη αμελητέο βαθμό. Παρακάτω παρουσιάζεται το υπάρχον γεωμετρικό μοντέλο για το οποίο έγινε έλεγχος.

i. Για το πάχος του παράθυρου Al, στο πιστοποιητικό του ανιχνευτή HPGe (Παράρτημα) δηλώνεται πως αυτό είναι μικρότερο ή ίσο με 1 mm, οπότε υιοθετήθηκε η μέγιστη τιμή στο 1 mm.
ii. Για την άνω νεκρή ζώνη, έχει εκτιμηθεί με καλή προσέγγιση ότι αυτή έχει πάχος 1.775 mm, για το περιφερειακό πάχος 2.0 mm και για την κάτω νεκρή ζώνη πάχος 1.5 mm, (μέσω σύγκρισης προσομοίωσης και πειραμάτων με χρήση σημειακών πηγών ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{54}Mn σε επαφή με τον κυρίως ανιχνευτή).
iii. Σχετικά με την οπή, αυτή δεν αναφέρεται στο πιστοποιητικό του ανιχνευτή, ωστόσο αναγράφεται πως ο ενεργός όγκος του ανιχνευτή είναι 173 cm^3, ενώ έχει ύψος 61.3 mm και διάμετρο 60.7 mm. Επομένως, ο συνολικός του όγκος είναι $\pi R^2 h$ = 177.4 cm^3. Αυτό σημαίνει πως ο όγκος της οπής είναι περίπου 4.4 cm^3. Έχει υποτεθεί με πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα ύψος οπής ίσο με 3.9 cm και διάμετρος οπής ίση με 1.2 cm, δηλαδή με όγκο 4.41 cm^3, μέγεθος αποδεκτό δεδομένου ότι ο κατασκευαστής δεν έχει προσδιορίσει τις αβεβαιότητες των μεγεθών που αναγράφονται στο πιστοποιητικό.

Για τον έλεγχο του μοντέλου αυτού κατασκευάζεται, με βάση τα στοιχεία που αναφέρθηκαν, η γεωμετρία του συστήματος Compton Suppression σε αρχείο τύπου .geo και γίνεται προσομοίωση για συγκεκριμένες σημειακές πηγές βαθμονόμησης (^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{54}Mn, ^{22}Na). Από τη σύγκριση των πειραματικών τιμών της απόδοσης με την απόδοση που προκύπτει από την προσομοίωση με τον κώδικα PENELOPE, γίνεται έλεγχος τόσο μέσω του U-test (Παράρτημα Γ) όσο και με την απόκλιση (σχέση 32) για το πόσο καλά προσεγγίζεται η πραγματικότητα από το γεωμετρικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί. Μέσω αυτής της διαδικασίας, προέκυψε η προσαρμογή του μοντέλου με τα στοιχεία που αναγράφονται στον Πίνακα 20.

Πίνακας 20. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου ανιχνευτή HPGe

Παράμετρος	Προηγούμενο μοντέλο	Νέο μοντέλο
Πάχος παραθύρου Al	1.0 mm	1.0 mm
Πάχος άνω νεκρής ζώνης	1.775 mm	1.800 mm
Πάχος περιφερειακής νεκρής ζώνης	2.0 mm	1.5 mm
Πάχος κάτω νεκρής ζώνης	1.5 mm	1.5 mm
Διάμετρος οπής	1.2 cm	1.2 cm
Ύψος οπής	3.9 cm	3.9 cm

Στον Πίνακα 21 παρουσιάζεται η σύγκριση πειράματος-προσομοίωσης μέσω του στατιστικού ελέγχου U-test (Παράρτημα Γ) και μέσω της απόκλισης η οποία ορίζεται στη σχέση (32) και όσο εγγύτερα είναι στο μηδέν, τόσο καλύτερη προσαρμογή δηλώνει. Στόχος είναι για όλες τις ενέργειες, η απόκλιση να είναι μικρότερη του 2%.

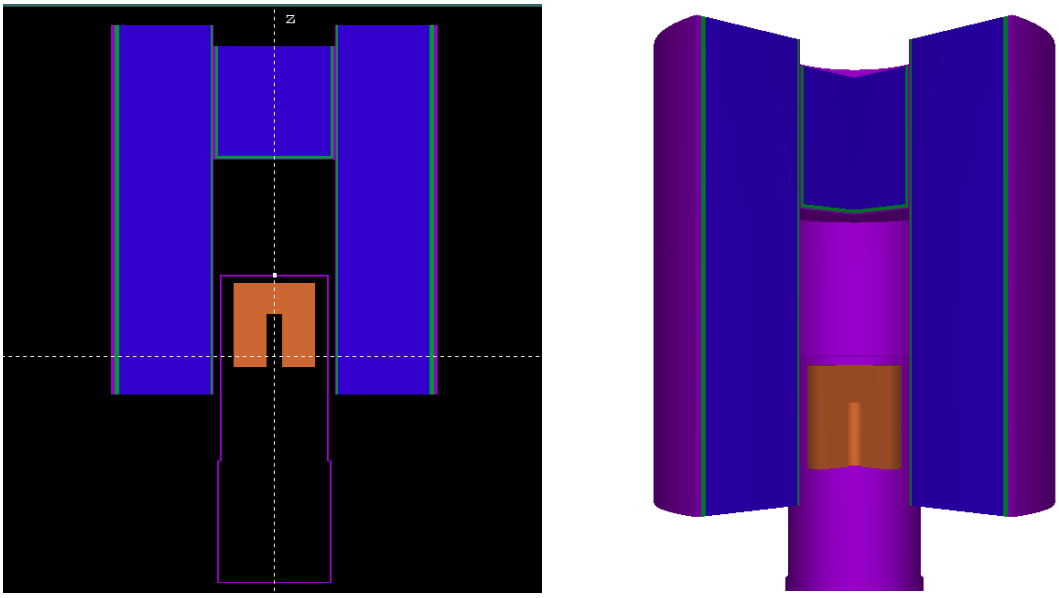
$$\text{απόκλιση} = \frac{(\exp - \text{sim})}{\exp}\ [\%] \qquad (32)$$

Πίνακας 21. Σύγκριση πειραματικών-προσομοιούμενων δεδομένων για έλεγχο γεωμετρικού μοντέλου ανιχνευτή HPGe

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματική απόδοση	Προσομοιούμενη απόδοση	U-test	Απόκλιση
^{241}Am	59.54	0.0209 ± 0.3%	0.0207 ± 0.8%	0.941	0.84%
^{137}Cs	661.66	0.0639 ± 1.0%	0.0634 ± 0.8%	0.575	0.75%
^{54}Mn	834.85	0.0526 ± 1.0%	0.0526 ± 0.6%	0.023	-0.04%
^{60}Co	1173.23	0.0403 ± 1.8%	0.0401 ± 0.6%	0.298	0.36%
	1132.49	0.0361 ± 1.1%	0.0367 ± 0.9%	1.113	-1.55%
^{22}Na	1274.54	0.0375 ± 1.1%	0.0376 ± 0.5%	0.165	-0.23%

Σημειώνεται πως η προσομοίωση στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, επομένως τα πειραματικά δεδομένα της απόδοσης περιλαμβάνουν το συντελεστή TCC σύμφωνα με τη σχέση (18) ώστε να γίνει διόρθωση για το φαινόμενο αυτό και να μπορούν να συγκριθούν οι πειραματικές τιμές με τις προσομοιούμενες.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας, παρατηρείται εξαιρετική συμφωνία για όλες τις ενέργειες με αποκλίσεις μικρότερες από 2% από τις πειραματικές τιμές για το νέο μοντέλο, οπότε υιοθετείται από εδώ και στο εξής. Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται η απεικόνιση του μοντέλου αυτού σε 2 και 3 διαστάσεις αντίστοιχα.



Εικόνα 32. Απεικόνιση ανιχνευτή HPGE σε δύο διαστάσεις (αριστερά) και σε τρεις διατάσεις (δεξιά)

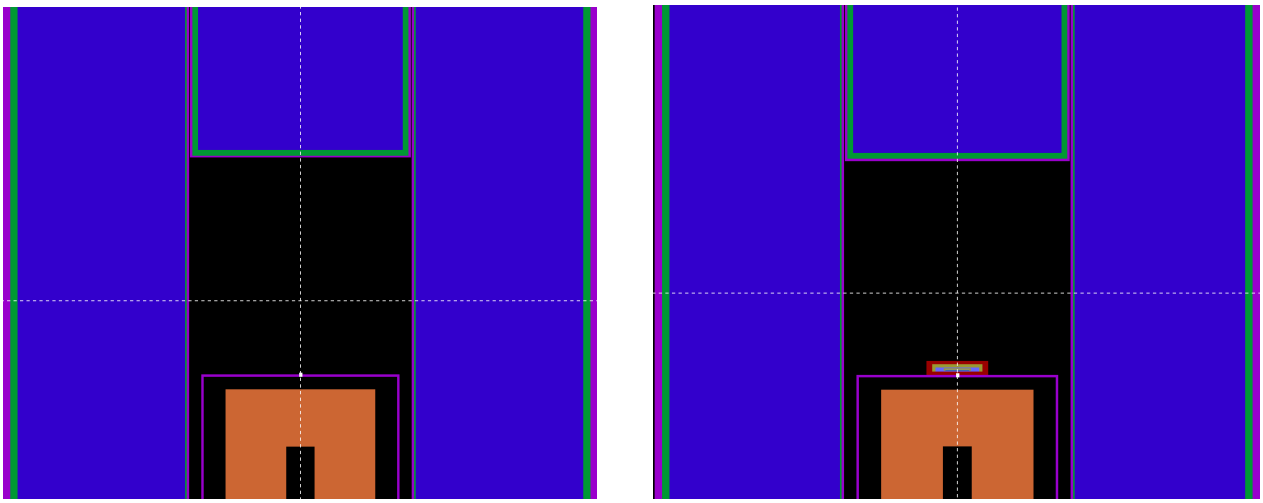
5.6. Υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς απόδοσης μέσω του κώδικα PENELOPE

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μεταφορά απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου λαμβάνοντας ως συντελεστή μεταφοράς απόδοσης το λόγο των αποδόσεων για τα μελετούμενα δείγματα, δηλαδή τους ανιχνευτές VERDI, προς την αντίστοιχη απόδοση για τις σημειακές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση.

Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα αρχείο γεωμετρίας .geo για σημειακές πηγές σε επαφή με το καπάκι του ανιχνευτή (pos1, sdd = 0 cm) και τρία αρχεία .geo για τους ανιχνευτές VERDI, καθώς ανά δύο είχαν ακριβώς ίδια γεωμετρία (γεωμετρία ACT: ACT15 & ACT16, γεωμετρία RADA_C: RADA10 & RADA11, γεωμετρία RADA_CMC: RADA13 & RADA14).

Στην Εικόνα 33 φαίνεται η γεωμετρία της διάταξης για σημειακή πηγή (αριστερά) και η γεωμετρία VERDI-ACT (δεξιά). Λόγω του εξαιρετικά μικρού πάχους των ελασμάτων μέσα στους ανιχνευτές VERDI

δεν είναι εμφανείς οι διαφορές ανάμεσα στις 3 γεωμετρίες και επιλέχθηκε ενδεικτικά να παρουσιαστεί μία από αυτές. Μιας και κάθε ακτίνα-γ που ανιχνεύεται προέρχεται από την ενεργοποίηση διαφορετικού ελάσματος μέσα στον ανιχνευτή VERDI, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για κάθε έλασμα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής αναγράφονται στον Πίνακα 22 για τις σημειακές πηγές και για τις γεωμετρίες των ανιχνευτών VERDI.



Εικόνα 33. Απεικόνιση κάθετης τομής διάταξης (σε εστίαση) για σημειακή πηγή (αριστερά) και ανιχνευτή VERDI (δεξιά)

Πίνακας 22. Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για σημειακές πηγές και ανιχνευτές VERDI που προκύπτουν από την προσομοίωση με τον κώδικα PENELOPE

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση (point)	Απόδοση (ACT)	Απόδοση (RADA_C)	Απόδοση (RADA_CMC)
^{57}Co	122.06	0.1783 ± 0.10%	0.1548 ± 0.10%	0.1367 ± 0.11%	0.1356 ± 0.11%
^{102m}Rh	475.06	0.0846 ± 0.15%	0.0718 ± 0.16%	0.0691 ± 0.16%	0.0688 ± 0.16%
	628.05	0.0669 ± 0.17%	0.0569 ± 0.18%	0.05489 ± 0.19%	0.0546 ± 0.19%
	631.29	0.0664 ± 0.17%	0.0566 ± 0.18%	0.0548 ± 0.19%	0.0544 ± 0.19%
	697.49	0.0611 ± 0.18%	-	0.0506 ± 0.19%	0.0502 ± 0.19%
^{54}Mn	834.85	0.0528 ± 0.19%	0.0448 ± 0.21%	0.0459 ± 0.20%	0.0457 ± 0.20%
^{88}Y	898.04	0.0499 ± 0.20%	0.0418 ± 0.21%	0.0417 ± 0.21%	0.0416 ± 0.21%
	1836.06	0.0276 ± 0.27%	-	0.0234 ± 0.29%	0.0233 ± 0.29%
^{110m}Ag	447.81	0.0880 ± 0.04%	0.0740 ± 0.04%	0.0702 ± 0.04%	0.0701 ± 0.04%
	620.28	0.0666 ± 0.03%	0.0558 ± 0.04%	0.0521 ± 0.04%	0.0528 ± 0.04%
	657.69	0.0639 ± 0.17%	0.0540 ± 0.18%	0.0518 ± 0.19%	0.0515 ± 0.19%
	678.47	0.0618 ± 0.06%	0.0523 ± 0.07%	0.0508 ± 0.07%	0.0502 ± 0.07%

	686.78	0.0614 ± 0.05%	0.0540 ± 0.05%	0.0501 ± 0.06%	0.0491 ± 0.06%
	707.56	0.0603 ± 0.08%	0.0516 ± 0.08%	0.0495 ± 0.08%	0.0487 ± 0.08%
	744.96	0.0563 ± 0.04%	0.0485 ± 0.05%	0.0467 ± 0.05%	0.0463 ± 0.05%
	763.67	0.0563 ± 0.09%	0.0480 ± 0.10%	0.0458 ± 0.10%	0.0458 ± 0.10%
	817.69	0.0526 ± 0.05%	0.0447 ± 0.06%	0.0426 ± 0.06%	0.0433 ± 0.06%
	884.19	0.0495 ± 0.17%	0.0423 ± 0.19%	0.0404 ± 0.19%	0.0401 ± 0.19%
	938.22	0.0479 ± 0.12%	0.0408 ± 0.13%	0.0391 ± 0.13%	0.0387 ± 0.13%
	1384.29	0.0350 ± 0.12%	0.0300 ± 0.13%	0.0287 ± 0.13%	0.0286 ± 0.13%
	1476.42	0.0330 ± 0.05%	0.0280 ± 0.05%	0.0267 ± 0.05%	0.0264 ± 0.06%
	1505.51	0.0330 ± 0.09%	0.0277 ± 0.10%	0.0270 ± 0.10%	0.0265 ± 0.10%
	1561.62	0.0308 ± 0.03%	0.0274 ± 0.03%	0.0258 ± 0.03%	0.0263 ± 0.03%
^{182}Ta	67.61	0.0387 ± 0.17%	0.0236 ± 0.22%	0.0287 ± 0.20%	0.0283 ± 0.20%
	85.06	0.0113 ± 0.22%	0.0073 ± 0.28%	0.0087 ± 0.26%	0.0088 ± 0.26%
	99.60	0.0291 ± 0.22%	0.0210 ± 0.26%	0.0235 ± 0.25%	0.0231 ± 0.25%
	151.94	0.1664 ± 0.03%	0.1312 ± 0.04%	0.1356 ± 0.03%	0.1339 ± 0.03%
	156.31	0.1683 ± 0.02%	0.1304 ± 0.02%	0.1353 ± 0.02%	0.1363 ± 0.02%
	179.57	0.1111 ± 0.03%	0.0877 ± 0.04%	0.0909 ± 0.03%	0.0887 ± 0.03%
	222.11	0.1533 ± 0.03%	0.1238 ± 0.04%	0.1253 ± 0.04%	0.1248 ± 0.04%
	229.01	0.1319 ± 0.03%	0.1076 ± 0.03%	0.1080 ± 0.03%	0.1075 ± 0.03%
	263.90	0.1248 ± 0.03%	0.1005 ± 0.03%	0.1026 ± 0.03%	0.1008 ± 0.03%
	1188.65	0.0394 ± 0.09%	0.0330 ± 0.10%	0.0330 ± 0.10%	0.0331 ± 0.10%
	1222.09	0.0390 ± 0.12%	0.0326 ± 0.13%	0.0324 ± 0.13%	0.0324 ± 0.13%
	1231.81	0.0386 ± 0.08%	0.0324 ± 0.08%	0.0326 ± 0.08%	0.0322 ± 0.09%

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακας 23 και σύμφωνα με τη σχέση (33) υπολογίζονται οι συντελεστές μεταφοράς απόδοσης (efftran) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 23, ενώ οι αβεβαιότητές τους υπολογίζονται σύμφωνα με τη διάδοση σφαλμάτων (Παράρτημα Γ).

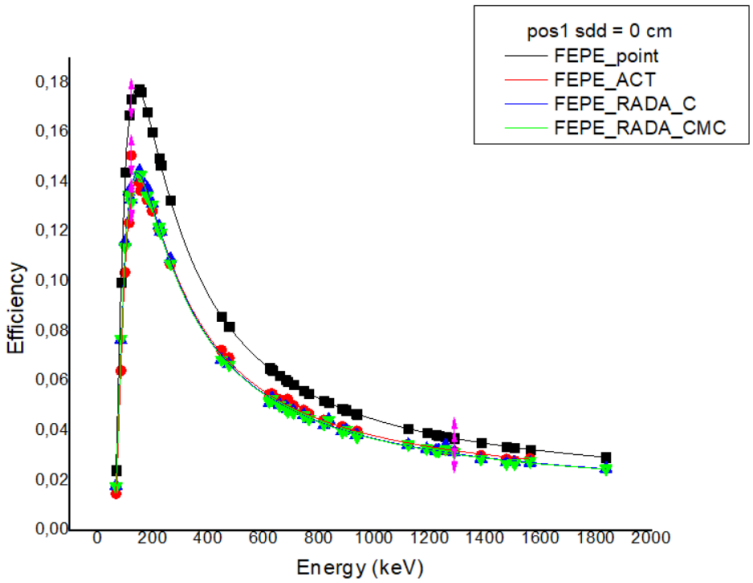
$$\text{efftran} = \frac{\varepsilon_{\text{foil}}}{\varepsilon_{\text{point}}} \quad (33)$$

Πίνακας 23. Συντελεστές μεταφοράς απόδοσης (efftran) για τις 3 γεωμετρίες των ανιχνευτών VERDI

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	efftran (ACT)	efftran (RADA_C)	efftran (RADA_CMC)
^{57}Co	122.06	0.868 ± 0.14%	0.767 ± 0.15%	0.760 ± 0.15%
^{102m}Rh	475.06	0.849 ± 0.22%	0.817 ± 0.22%	0.814 ± 0.22%
	628.05	0.850 ± 0.25%	0.821 ± 0.25%	0.816 ± 0.25%
	631.29	0.853 ± 0.25%	0.826 ± 0.25%	0.820 ± 0.25%
	697.49	-	0.828 ± 0.26%	0.820 ± 0.26%
^{54}Mn	834.85	0.848 ± 0.28%	0.869 ± 0.28%	0.867 ± 0.28%
^{88}Y	898.04	0.837 ± 0.29%	0.836 ± 0.29%	0.834 ± 0.29%
	1836.06	-	0.846 ± 0.39%	0.844 ± 0.39%
^{110m}Ag	447.81	0.842 ± 0.05%	0.798 ± 0.05%	0.797 ± 0.05%
	620.28	0.838 ± 0.05%	0.782 ± 0.05%	0.793 ± 0.05%
	657.69	0.846 ± 0.25%	0.811 ± 0.25%	0.807 ± 0.25%
	678.47	0.847 ± 0.09%	0.823 ± 0.09%	0.812 ± 0.09%
	686.78	0.880 ± 0.07%	0.816 ± 0.07%	0.799 ± 0.08%
	707.56	0.857 ± 0.11%	0.821 ± 0.11%	0.808 ± 0.11%
	744.96	0.860 ± 0.06%	0.828 ± 0.07%	0.822 ± 0.07%
	763.67	0.852 ± 0.13%	0.813 ± 0.13%	0.813 ± 0.13%
	817.69	0.851 ± 0.08%	0.811 ± 0.08%	0.823 ± 0.08%
	884.19	0.854 ± 0.25%	0.816 ± 0.25%	0.809 ± 0.26%
	938.22	0.853 ± 0.18%	0.817 ± 0.18%	0.807 ± 0.18%
	1384.29	0.855 ± 0.17%	0.818 ± 0.18%	0.815 ± 0.18%
	1476.42	0.849 ± 0.07%	0.808 ± 0.07%	0.798 ± 0.07%
	1505.51	0.840 ± 0.13%	0.819 ± 0.13%	0.805 ± 0.13%
	1561.62	0.887 ± 0.04%	0.837 ± 0.04%	0.851 ± 0.04%
^{182}Ta	67.61	0.610 ± 0.27%	0.741 ± 0.26%	0.731 ± 0.26%
	85.06	0.644 ± 0.36%	0.768 ± 0.34%	0.773 ± 0.34%
	99.60	0.721 ± 0.34%	0.807 ± 0.33%	0.792 ± 0.33%
	151.94	0.788 ± 0.05%	0.815 ± 0.05%	0.804 ± 0.05%
	156.31	0.775 ± 0.03%	0.804 ± 0.03%	0.810 ± 0.03%
	179.57	0.789 ± 0.05%	0.818 ± 0.05%	0.798 ± 0.05%
	222.11	0.807 ± 0.05%	0.817 ± 0.05%	0.814 ± 0.05%
	229.01	0.816 ± 0.04%	0.819 ± 0.04%	0.815 ± 0.04%
	263.90	0.806 ± 0.04%	0.822 ± 0.04%	0.808 ± 0.04%
	1188.65	0.837 ± 0.14%	0.836 ± 0.14%	0.839 ± 0.14%
	1222.09	0.837 ± 0.17%	0.832 ± 0.18%	0.831 ± 0.18%
	1231.81	0.840 ± 0.11%	0.845 ± 0.11%	0.834 ± 0.12%

Με την ανάλυση αυτή και τις καμπύλες βαθμονόμησης για σημειακή πηγή που έχουν παρουσιαστεί στο 4ο Κεφάλαιο, έγινε η βαθμονόμηση της διάταξης για τους ανιχνευτές VERDI. Συγκεκριμένα, για κάθε ανιχνευόμενη ενέργεια του Πίνακας 23, έγινε υπολογισμός της απόδοσης μέσω της πειραματικής καμπύλης βαθμονόμησης και στη συνέχεια, η τιμή της απόδοσης πολλαπλασιάστηκε με τον κατάλληλο συντελεστή μεταφοράς απόδοσης που έχει προκύψει για κάθε γεωμετρία ανιχνευτή VERDI. Έτσι, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες βαθμονόμησης για κάθε περίπτωση οι οποίες και παρουσιάζονται στην Εικόνα 34.

Μιας και οι ανιχνευτές VERDI αποτελούνται από τα ίδια ελάσματα και έχουν σχεδόν ίδια γεωμετρία, είναι αναμενόμενο οι καμπύλες αυτές να μην παρουσιάζουν έντονες αποκλίσεις. Οι διαφορές οφείλονται στο διαφορετικό υλικό της κάψουλας, στη διαφορετική σειρά των ελασμάτων μέσα στους ανιχνευτές και μικρές διαφορές στα στρώματα αέρα μέσα σε αυτούς, στην ακριβή τους θέση κατά τη μέτρηση. Στο ίδιο διάγραμμα δίνεται και η καμπύλη βαθμονόμησης για τις σημειακές πηγές, η οποία παρουσιάζει σαφώς μεγαλύτερες τιμές σε όλες τις ενέργειες από τις αντίστοιχες τιμές για τις γεωμετρίες των ανιχνευτών VERDI, γεγονός επίσης αναμενόμενο. Επίσης, στον Πίνακα 24 δίνονται οι αντίστοιχες συναρτήσεις για τις καμπύλες της απόδοσης για τους ανιχνευτές VERDI σε επαφή με το παράθυρο του κυρίως ανιχνευτή.



Εικόνα 34. Καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης για το CSS με σημειακές πηγές και με ανιχνευτές VERDI για sdd=0cm

Πίνακας 24. Εξισώσεις καμπυλών απόδοσης φωτοκορυφής για sdd = 0 cm στη γεωμετρία σημειακής πηγής και στις 3 γεωμετρίες των ανιχνευτών VERDI

sample	Fitted FEPE curve	R^2
point	$\varepsilon = 0.01217 + 30.47137 \cdot E^{-1} + 2577.29787 \cdot E^{-2} - 680213.71547 \cdot E^{-3} + 2.50416 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99788
ACT	$\varepsilon = 0.01287 + 23.12090 \cdot E^{-1} + 2702.68793 \cdot E^{-2} - 658194.33655 \cdot E^{-3} + 2.50255 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99326
RADA_C	$\varepsilon = 0.01114 + 23.98209 \cdot E^{-1} + 2354.37732 \cdot E^{-2} - 591055.94815 \cdot E^{-3} + 2.19305 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99861
RADA_CMC	$\varepsilon = 0.01083 + 24.23106 \cdot E^{-1} + 2189.33168 \cdot E^{-2} - 570752.33800 \cdot E^{-3} + 2.12389 \cdot 10^{7} \cdot E^{-4}$	0.99870

Κεφάλαιο 6: Υπολογισμός ενεργότητας ανιχνευτών VERDI

Με βάση τη μεταφορά απόδοσης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται ο υπολογισμός της ενεργότητας των ανιχνευτών VERDI κατά τη μέτρησή τους το Δεκέμβριο του ’21 και ανάγεται στο τέλος της ακτινοβόλησης. Επίσης συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας με τις μετρήσεις των ίδιων ανιχνευτών τον Απρίλιο του ’20. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται και ο τρόπος υπολογισμού της αναλογίας μεταξύ ^{102m}Rh και ^{102}Rh, η συνύπαρξη των οποίων στα δείγματα αποτέλεσε την αιτία αποκλίσεων στους συντελεστές R_p και TASF κατά τη σύγκριση με τις μετρήσεις του Απριλίου ’20.

6.1. Υπολογισμός ενεργότητας δειγμάτων κατά τη μέτρηση

Η ενεργότητα για τους ανιχνευτές VERDI στην αρχή της μέτρησης το Δεκέμβριο ’21 υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$A = \frac{\text{area}}{\text{TCC} \cdot [\text{efftran} \cdot \varepsilon] \cdot \left[\frac{1 - e^{(-\lambda \Delta t)}}{\lambda \Delta t}\right] \cdot t_c \cdot P_\gamma} \quad (34)$$

όπου:
A: η ενεργότητα του δείγματος στην αρχή της μέτρησης
area: η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος
TCC: ο συντελεστής διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης
efftran: ο συντελεστής μεταφοράς απόδοσης από σημειακή πηγή σε πηγή όγκου
ε: η απόδοση φωτοκορυφής από πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης για σημειακή πηγή
λ: η σταθερά διάσπασης του ισοτόπου
Δt: η χρονική διάρκεια της μέτρησης (real time)
t_c: η διάρκεια που ήταν ενεργός ο ανιχνευτής κατά τη μέτρηση (live time)
P_γ: το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου ενδιαφέροντος

Η ενεργότητα υπολογίζεται από τη σχέση (34) με τα δεδομένα των μετρήσεων για την επιφάνεια των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος. Οι συντελεστές TCC υπολογίστηκαν για τους ανιχνευτές VERDI και δίνονται στον Πίνακα 25, ενώ οι συντελεστές μεταφοράς απόδοσης efftran παρουσιάζονται στον Πίνακα 23 (παράγραφος 5.6).

Πίνακας 25. Τιμές συντελεστών TCC για τις 3 γεωμετρίες των ανιχνευτών VERDI

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	TCC (ACT)	TCC (RADA_C)	TCC (RADA_CMC)
^{57}Co	122.06	1.000	1.000	1.000
^{102m}Rh	475.06	1.000	1.000	1.000
	628.05	0.660	0.660	0.659
	631.29	0.522	0.522	0.521
	697.49	0.656	0.656	0.656
^{54}Mn	834.85	-	0.633	0.633
^{88}Y	898.04	0.820	0.832	0.832
	1836.06	-	0.832	0.832
^{110m}Ag	447.81	0.540	0.552	0.551
	620.28	0.537	0.547	0.547
	657.69	0.636	0.647	0.647
	678.47	0.535	0.545	0.545
	686.78	0.582	0.593	0.593
	707.56	0.557	0.567	0.567
	744.96	0.581	0.591	0.591
	763.67	0.624	0.635	0.635
	817.69	0.532	0.542	0.541
	884.19	0.632	0.642	0.642
	938.22	0.645	0.654	0.653
	1384.29	0.711	0.720	0.719
	1476.42	0.752	0.761	0.760
	1505.51	0.683	0.691	0.690
	1561.62	1.280	1.295	1.293
^{182}Ta	67.61	0.786	0.788	0.792
	85.06	0.777	0.777	0.780
	99.60	0.755	0.758	0.760
	151.94	0.785	0.788	0.791
	156.31	0.772	0.774	0.777
	179.57	0.756	0.752	0.759
	222.11	0.776	0.779	0.781
	229.01	0.728	0.728	0.731
	263.90	0.800	0.802	0.804
	1188.65	0.980	0.980	0.986
	1222.09	0.969	0.964	0.967
	1231.81	0.820	0.812	0.816

Για όλους τους ανιχνευτές VERDI η διάρκεια της μέτρησης t_c ήταν 24 ώρες (86400 s). Η απόδοση φωτοκορυφής, ε, λαμβάνεται από τη σχέση που αναφέρεται στην πρώτη σειρά του Πίνακα 17 (παράγραφος 4.6.3.1.). Τα ποσοστά εκπομπής για τα φωτόνια που έχουν ανιχνευτεί και τα αποτελέσματα των υπολογισμών της ενεργότητας παρουσιάζονται στους Πίνακες 26, 27 και 28 με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα της επιφάνειας φωτοκορυφής, την αβεβαιότητα του συντελεστή μεταφοράς απόδοσης και την αβεβαιότητα της καμπύλης βαθμονόμησης (RMS).

Πίνακας 26. Τιμές ενεργότητας ανιχνευτών VERDI ACT15 & ACT16 κατά τη μέτρησή τους τον Δεκέμβριο ’21

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής P_γ	Ενεργότητα A στον ACT15 (Bq)	Ενεργότητα A στον ACT16 (Bq)
^{57}Co	122.06	85.60%	0.037 ± 10.0%	0.030 ± 11.5%
^{102m}Rh	475.06	99.98%	0.104 ± 7.49%	0.086 ± 8.37%
	628.05	95.00%	0.215 ± 7.00%	0.187 ± 7.52%
	631.29	8.30%	-	0.721 ± 19.5%
	697.49	56.00%	0.086 ± 20.2%	0.128 ± 14.5%
^{54}Mn	834.85	44.00%	-	-
^{88}Y	898.04	93.70%	-	-
	1836.06	99.20%	-	-
^{110m}Ag	447.81	3.70%	3.459 ± 10.8%	2.781 ± 11.8%
	620.28	2.73%	2.881 ± 18.2%	3.501 ± 15.4%
	657.69	95.61%	3.062 ± 4.19%	3.063 ± 4.19%
	678.47	10.70%	3.060 ± 6.55%	3.035 ± 6.53%
	686.78	6.53%	3.388 ± 7.76%	2.881 ± 8.31%
	707.56	16.69%	3.131 ± 5.42%	3.196 ± 5.39%
	744.96	4.77%	3.280 ± 9.19%	2.846 ± 10.5%
	763.67	22.60%	3.260 ± 4.88%	2.896 ± 5.04%
	817.69	7.43%	2.839 ± 8.30%	2.484 ± 9.12%
	884.19	75.00%	2.985 ± 4.30%	3.040 ± 4.29%
	938.22	35.00%	3.085 ± 4.61%	3.107 ± 4.62%
	1384.29	25.10%	3.010 ± 4.99%	2.999 ± 5.00%
	1476.42	4.08%	3.434 ± 9.12%	3.153 ± 9.56%
	1505.51	13.33%	2.793 ± 6.32%	2.966 ± 6.12%
	1561.62	1.22%	2.846 ± 13.6%	2.849 ± 15.3%
^{182}Ta	67.61	42.90%	1.660 ± 8.20%	1.548 ± 8.34%
	85.06	2.65%	3.584 ± 12.9%	2.454 ± 18.3%
	99.60	14.20%	0.757 ± 8.37%	0.675 ± 8.77%
	151.94	7.02%	0.677 ± 12.2%	0.751 ± 10.8%
	156.31	2.67%	0.791 ± 23.0%	0.993 ± 18.6%

	179.57	3.12%	1.344 ± 14.6%	1.105 ± 18.1%
	222.11	7.57%	0.829 ± 11.3%	0.778 ± 11.6%
	229.01	3.64%	1.271 ± 16.6%	1.006 ± 18.6%
	263.90	3.61%	0.638 ± 25.7%	0.981 ± 19.0%
	1188.65	16.49%	0.776 ± 8.93%	0.691 ± 9.50%
	1222.09	27.23%	0.725 ± 7.08%	0.728 ± 7.03%
	1231.81	11.62%	0.720 ± 12.9%	0.650 ± 13.5%

Πίνακας 27. Τιμές ενεργότητας ανιχνευτών VERDI RADA10 & RADA11 κατά τη μέτρησή τους τον Δεκέμβριο ’21

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής P_γ	Ενεργότητα A στον RADA10 (Bq)	Ενεργότητα A στον RADA11 (Bq)
^{57}Co	122.06	85.60%	0.046 ± 9.66%	0.045 ± 9.58%
^{102m}Rh	475.06	99.98%	0.091 ± 8.12%	0.122 ± 6.92%
	628.05	95.00%	0.267 ± 6.42%	0.219 ± 7.02%
	631.29	8.30%	-	-
	697.49	56.00%	0.079 ± 21.9%	0.094 ± 18.04%
^{54}Mn	834.85	44.00%	-	0.137 ± 20.4%
^{88}Y	898.04	93.70%	0.064 ± 16.6%	-
	1836.06	99.20%	0.054 ± 15.5%	0.050 ± 17.0%
^{110m}Ag	447.81	3.70%	3.341 ± 11.5%	2.761 ± 12.5%
	620.28	2.73%	4.031 ± 15.1%	2.804 ± 16.7%
	657.69	95.61%	3.311 ± 4.18%	3.243 ± 4.19%
	678.47	10.70%	3.235 ± 6.57%	2.693 ± 6.88%
	686.78	6.53%	3.349 ± 7.78%	3.315 ± 7.84%
	707.56	16.69%	3.105 ± 5.46%	3.369 ± 5.32%
	744.96	4.77%	4.008 ± 8.57%	3.233 ± 10.0%
	763.67	22.60%	3.037 ± 5.04%	3.176 ± 4.95%
	817.69	7.43%	3.230 ± 8.16%	3.330 ± 7.77%
	884.19	75.00%	3.282 ± 4.28%	3.221 ± 4.28%
	938.22	35.00%	3.356 ± 4.59%	3.150 ± 4.63%
	1384.29	25.10%	3.237 ± 4.94%	3.151 ± 4.98%
	1476.42	4.08%	3.116 ± 9.74%	3.120 ± 9.40%
	1505.51	13.33%	2.850 ± 6.36%	2.670 ± 6.54%
	1561.62	1.22%	3.763 ± 12.7%	2.445 ± 17.3%
^{182}Ta	67.61	42.90%	1.564 ± 7.27%	1.782 ± 7.09%
	85.06	2.65%	-	-
	99.60	14.20%	0.722 ± 7.83%	0.772 ± 7.53%
	151.94	7.02%	0.763 ± 10.8%	0.640 ± 13.2%

	156.31	2.67%	-	0.712 ± 23.7%
	179.57	3.12%	-	0.965 ± 19.9%
	222.11	7.57%	0.758 ± 11.8%	0.704 ± 12.6%
	229.01	3.64%	0.992 ± 19.7%	-
	263.90	3.61%	0.841 ± 22.4%	0.973 ± 18.8%
	1188.65	16.49%	0.661 ± 9.55%	0.622 ± 9.89%
	1222.09	27.23%	0.707 ± 7.21%	0.626 ± 7.61%
	1231.81	11.62%	0.531 ± 15.9%	0.602 ± 13.6%

Πίνακας 28. Τιμές ενεργότητας ανιχνευτών VERDI RADA13 & RADA14 κατά τη μέτρησή τους τον Δεκέμβριο ’21

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής P_γ	Ενεργότητα A στον RADA13 (Bq)	Ενεργότητα A στον RADA14 (Bq)
^{57}Co	122.06	85.60%	0.050 ± 8.83%	0.042 ± 10.3%
^{102m}Rh	475.06	99.98%	0.120 ± 7.08%	0.098 ± 7.74%
	628.05	95.00%	0.177 ± 7.84%	0.227 ± 6.95%
	631.29	8.30%	-	-
	697.49	56.00%	0.103 ± 19.5%	0.146 ± 14.7%
^{54}Mn	834.85	44.00%	-	0.120 ± 21.8%
^{88}Y	898.04	93.70%	0.053 ± 16.9%	0.055 ± 17.6%
	1836.06	99.20%	-	0.061 ± 15.3%
^{110m}Ag	447.81	3.70%	2.730 ± 12.5%	2.408 ± 13.7%
	620.28	2.73%	3.167 ± 15.7%	3.755 ± 13.7%
	657.69	95.61%	3.227 ± 4.19%	3.235 ± 4.19%
	678.47	10.70%	2.836 ± 6.84%	3.363 ± 6.39%
	686.78	6.53%	3.273 ± 8.07%	3.028 ± 8.36%
	707.56	16.69%	3.250 ± 5.40%	3.279 ± 5.36%
	744.96	4.77%	3.434 ± 9.56%	2.932 ± 10.6%
	763.67	22.60%	3.176 ± 4.93%	3.112 ± 4.99%
	817.69	7.43%	2.726 ± 8.78%	3.121 ± 8.22%
	884.19	75.00%	3.169 ± 4.29%	3.209 ± 4.28%
	938.22	35.00%	3.119 ± 4.65%	3.331 ± 4.60%
	1384.29	25.10%	3.136 ± 4.98%	3.207 ± 4.96%
	1476.42	4.08%	2.797 ± 10.2%	3.622 ± 9.09%
	1505.51	13.33%	3.192 ± 5.98%	2.920 ± 6.28%
	1561.62	1.22%	2.624 ± 16.9%	3.338 ± 14.3%
^{182}Ta	67.61	42.90%	1.447 ± 8.01%	1.703 ± 7.34%
	85.06	2.65%	2.948 ± 12.8%	-
	99.60	14.20%	0.626 ± 9.24%	0.704 ± 7.99%

	151.94	7.02%	0.822 ± 10.2%	0.572 ± 14.2%
	156.31	2.67%	0.757 ± 22.6%	-
	179.57	3.12%	-	-
	222.11	7.57%	0.850 ± 11.2%	0.869 ± 11.1%
	229.01	3.64%	0.709 ± 23.7%	1.163 ± 18.4%
	263.90	3.61%	1.341 ± 16.3%	-
	1188.65	16.49%	0.759 ± 8.85%	0.749 ± 8.39%
	1222.09	27.23%	0.715 ± 7.33%	0.679 ± 7.43%
	1231.81	11.62%	0.694 ± 13.1%	0.735 ± 12.6%

Από τη μελέτη των παραπάνω πινάκων παρατηρείται ότι όσον αφορά την ενεργότητα για την ίδια ενέργεια των ισοτόπων ενδιαφέροντος, αυτή δε διαφέρει ιδιαίτερα μεταξύ των VERDI ανιχνευτών. Δεν αναμένονται έντονες αποκλίσεις, εξάλλου, καθώς οι ανιχνευτές περιέχουν τα ίδια μεταλλικά ελάσματα και ήταν τοποθετημένοι σε κοντινές θέσεις μεταξύ τους κατά την ακτινοβόληση, οπότε οι διαφορές στη ροή νετρονίων ανάμεσα στους VERDI ανιχνευτές ήταν μικρή.

Παρατηρείται επίσης πως τα διαφορετικά ισότοπα μεταξύ τους παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικές τιμές της ενεργότητας, με τον ^{110m}Ag να εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές σε όλες τις ανιχνευόμενες ενέργειες και το ^{57}Co και ^{88}Y τις χαμηλότερες. Αυτή η συμπεριφορά θα διερευνηθεί περισσότερο στην παράγραφο 6.2 όπου υπολογίζεται η ειδική ενεργότητα ανά ισότοπο στα δείγματα, οπότε λαμβάνεται υπόψη και η μάζα κάθε ισοτόπου.

Στο ^{182}Ta παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις τιμές της ενεργότητας ανάμεσα στις διάφορες ενέργειες σε κάθε ανιχνευτή VERDI και για το λόγο αυτό λαμβάνονται υπόψη οι φωτοκορυφές με τις μικρότερες αβεβαιότητες κατά τον υπολογισμό της σταθμισμένης μέσης τιμής της ενεργότητας (Παράρτημα Γ).

Όσον αφορά το ^{102m}Rh, όπως φάνηκε από την ασυμφωνία των συντελεστών R_p και TASF με τις μετρήσεις των ίδιων δειγμάτων τον Απρίλιο ’20, διαπιστώθηκε ότι στα δείγματα υπάρχουν δύο ισότοπα του ροδίου (^{102m}Rh και ^{102}Rh) που εκπέμπουν φωτόνια ίδιας ενέργειας (475 keV) και έχουν διαφορετικούς χρόνους ημιζωής, γεγονός που εξηγεί αυτήν την απόκλιση, καθώς στις προηγούμενες μετρήσεις ήταν ανιχνεύσιμο μόνο το ^{102}Rh. Στην επόμενη παράγραφο αξιοποιούνται οι τιμές της ενεργότητας από τους παραπάνω πίνακες για δύο ενέργειες που εκπέμπονται από το ^{102m}Rh ώστε να γίνει διάκριση μεταξύ των δύο αυτών ισοτόπων και να υπολογιστεί η ενεργότητά τους.

6.1.1. Προσδιορισμός αναλογίας ^{102m}Rh/^{102}Rh στους VERDI ανιχνευτές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για το ρόδιο (Rh), στις μετρήσεις του Απριλίου ’20 ανιχνεύτηκε μόνο η φωτοκορυφή των 475 keV, ενώ στις μετρήσεις του Δεκεμβρίου ’21 ήταν εφικτή η ανίχνευση -σε κάποιους VERDI ανιχνευτές- και των φωτοκορυφών 628 keV, 631 keV και 697 keV.

Σύμφωνα με τη βιβλιοθήκη ENDF του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency - IAEA), οι φωτοκορυφές των 475 keV, των 628 keV και των 631 keV προκύπτουν και

από άλλο ισότοπο του ροδίου πέρα από το ^{102m}Rh (3.742 y), και συγκεκριμένα από το ^{102}Rh (207.3 d). Στον Πίνακα 29 φαίνονται οι φωτοκορυφές με τα ποσοστά εκπομπής τους για κάθε ένα από τα ισότοπα του Rh.

Πίνακας 29. Ενέργειες και αντίστοιχα ποσοστά εκπομπής για το ^{102m}Rh και το ^{102}Rh

Ενέργεια (keV)	^{102m}Rh - Ποσοστό εκπομπής	^{102}Rh - Ποσοστό εκπομπής
475.06	95%	46%
628.05	8.3%	4.5%
631.29	56%	0.10%
697.49	44%	-

Από τα δεδομένα του Πίνακα 29 γίνεται εμφανές ότι για τις ενέργειες των 475 keV και 628 keV όπου τα ποσοστά εκπομπής διαφέρουν μεν αλλά είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, υπάρχει η πιθανότητα στις αντίστοιχες φωτοκορυφές να καταγράφονται γεγονότα τόσο από την αποδιέγερση του ενός ισοτόπου όσου και του άλλου. Αυτό σημαίνει ότι οι ανιχνευόμενες φωτοκορυφές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς του Πίνακα 26, 27 και 28 δεν πρέπει να αποδοθούν μόνο στο ^{102m}Rh, αλλά και στο ^{102}Rh.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, είναι εφικτή η εκτίμηση του ποσοστού του κάθε ισοτόπου στο δείγμα, καθώς η ανίχνευση περισσότερων φωτοκορυφών που δεν εκπέμπονται και από τα δύο ισότοπα συμβάλλει στο διαχωρισμό των δύο ισοτόπων.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η φωτοκορυφή των 697 keV, που εκπέμπεται μόνο από το ^{102m}Rh, και αυτή των 631 keV -η οποία προκύπτει και από το ^{102}Rh αλλά με αμελητέο ποσοστό εκπομπής- και λαμβάνεται η σταθμισμένη μέση τιμή της ενεργότητάς τους για όλους τους ανιχνευτές VERDI. Η τιμή της ενεργότητας που εκτιμάται με αυτόν τον τρόπο αποτελεί την ενεργότητα του ^{102m}Rh το Δεκέμβριο του ’21 και αναγράφεται στη σχέση (35).

$$\mathrm{A}(^{102\mathrm{m}}\mathrm{Rh}) = 0.106 \ \pm 21.3\ \%\ [\mathrm{Bq}] \qquad (35)$$

Λύνοντας στη συνέχεια τη σχέση (34) για την επιφάνεια φωτοκορυφής, με δεδομένη την ενεργότητα της σχέσης (35) λαμβάνεται ο αριθμός των γεγονότων της ανιχνευόμενης φωτοκορυφής των 475 keV που οφείλεται στην αποδιέγερση του ^{102m}Rh.

Στη συνέχεια γίνεται στάθμιση για τη μέση τιμή των συνολικών επιφανειών φωτοκορυφής σε όλους τους ανιχνευτές VERDI για την ενέργεια των 475 keV και μέσω της σχέσης (36) προκύπτει ο αριθμός γεγονότων που αντιστοιχεί στην αποδιέγερση του ισοτόπου ^{102}Rh.

$$(\text{total area}) = (\text{area } ^{102\mathrm{m}}\mathrm{Rh}) + (\text{area } ^{102}\mathrm{Rh}) \qquad (36)$$

Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 30. Επιπλέον, υπολογίζεται η αναλογία ^{102m}Rh/^{102}Rh διαιρώντας τις αντίστοιχες επιφάνειες που αναγράφονται στην 2^{η} και 4^{η} στήλη του πίνακα με τη συνολική επιφάνεια της φωτοκορυφής στην 6^{η} στήλη.

Πίνακας 30. Επιφάνεια φωτοκορυφής ^{102m}Rh, ^{102}Rh και συνολική επιφάνεια της φωτοκορυφής των 475.06 keV για τις μετρήσεις του Δεκεμβρίου ’21

Ανιχνευτής	Επιφάνεια ^{102m}Rh (counts)	Ποσοστό ^{102m}Rh	Επιφάνεια ^{102}Rh (counts)	Ποσοστό ^{102}Rh	Συνολική επιφάνεια (counts)
ACT15 ACT16	400.74 ± 21.6%	51.31%	380.23 ± 31.5%	48.69%	780.97 ± 13.0%
RADA10 RADA11	385.77 ± 21.6%	49.40%	395.20 ± 33.3%	50.60%	
RADA13 RADA14	383.67 ± 21.6%	49.13%	397.31 ± 33.0%	50.87%	

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, προκύπτει ότι το ^{102m}Rh και το ^{102}Rh υπάρχουν σε αναλογία 1:1 στα δείγματα κατά τη μέτρησή τους το Δεκέμβριο του ’21 και η σταθμισμένη μέση τιμή (Παράρτημα Γ) της ενεργότητας του ^{102}Rh το Δεκέμβριο του ’21 εκτιμάται ότι είναι:

$$A\,(^{102}\mathrm{Rh}) = 0.159\ \pm 19.6\%\ \ [\mathrm{Bq}] \qquad (37)$$

6.1.1.1 Αναγωγή αναλογίας ^{102m}Rh/^{102}Rh στις μετρήσεις του Απριλίου ’20 και σύγκριση με πειραματικές τιμές

Η σχέση (34) όταν εφαρμοστεί σε μετρήσεις που έγιναν για το ίδιο δείγμα σε διαφορετικές ημερομηνίες αλλά στις ίδιες συνθήκες μέτρησης οδηγεί στη σχέση (38), καθώς οι ποσότητες TCC, efftran, ε, P_γ και t_c είναι ίδιες μεταξύ τους στις δύο σειρές μετρήσεων και απαλείφονται. Επομένως για A_1, A_2 όπου η μέτρηση A_1 έχει γίνει σε πρότερο χρόνο σε σχέση με την A_2, είναι:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{(\mathrm{area})_1}{(\mathrm{area})_2} \Rightarrow \frac{A_1}{A_1 \cdot e^{(-\lambda t_d)}} = \frac{(\mathrm{area})_1}{(\mathrm{area})_2} \Rightarrow (\mathrm{area})_1 = (\mathrm{area})_2 \cdot e^{(\lambda t_d)} \qquad (38)$$

όπου:
A_1, A_2: οι ενεργότητες του δείγματος για χρονικές στιγμές $t_1 < t_2$ αντίστοιχα
$(\mathrm{area})_1$, $(\mathrm{area})_2$: οι καθαρές επιφάνειες της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος αντίστοιχα
λ: η σταθερά διάσπασης του υπό μελέτη ισοτόπου
t_d: το χρονικό διάστημα που έχει μεσολαβήσει μεταξύ των t_1, t_2

Στον Πίνακα 31 παρατίθενται τα αποτελέσματα από τους παραπάνω υπολογισμούς καθώς και οι πειραματικές τιμές της συνολικής επιφάνειας της φωτοκορυφής των 475 keV για τις μετρήσεις των ίδιων ανιχνευτών VERDI τον Απρίλιο ’20. Στην τελευταία στήλη δίνονται και τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου U-test (Παράρτημα Γ) για τη διερεύνηση της συμφωνίας των νέων αποτελεσμάτων με τις παλαιότερες μετρήσεις.

Πίνακας 31. Επιφάνεια φωτοκορυφής ^{102m}Rh, ^{102}Rh και συνολική επιφάνεια της φωτοκορυφής των 475.06 keV για τις μετρήσεις του Απριλίου ’20

Ανιχνευτής	Επιφάνεια ^{102m}Rh (counts)	Ποσοστό ^{102m}Rh	Επιφάνεια ^{102}Rh (counts)	Ποσοστό ^{102}Rh	Συνολική εκτιμώμενη επιφάνεια (counts)	Συνολική πειραματική επιφάνεια (counts)	U-test
ACT15	544.30 ± 21.6%	16.01%	2856 ± 35.1%	83.99%	3400 ± 29.7%	3088 ± 3.4%	0.271
ACT16	544.30 ± 21.6%	16.01%	2856 ± 35.1%	83.99%	3400 ± 29.7%	3125 ± 2.9%	0.308
RADA10	530.13 ± 21.6%	14.19%	3206 ± 33.3%	85.81%	3736 ± 28.7%	3688 ± 3.5%	0.045
RADA11	530.64 ± 21.6%	14.13%	3226 ± 33.3%	85.87%	3757 ± 28.7%	3611 ± 2.4%	0.134
RADA13	528.04 ± 21.6%	13.96%	3255 ± 33.0%	86.04%	3783 ± 28.6%	3501 ± 2.0%	0.261
RADA14	522.66 ± 21.6%	14.66%	3043 ± 33.0%	85.34%	3565 ± 28.3%	3332 ± 4.3%	0.229

Από την τελευταία στήλη του Πίνακα 31 διαπιστώνεται ότι οι δύο σειρές μετρήσεων δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές όσον αφορά το στοιχείο ρόδιο (Rh) και για την εκτίμηση της αναλογίας ^{102m}Rh/^{102}Rh λαμβάνεται η μέση τιμή των ποσοστών της 3^{ης} και της 5^{ης} στήλης του παραπάνω πίνακα αντίστοιχα, επομένως είναι: ^{102m}Rh - 14.83% και ^{102}Rh - 85.17%, άρα η αναλογία των δύο ισοτόπων τον Απρίλιο ’20 είναι περίπου 1:6.

6.1.1.2 Αναγωγή αναλογίας ^{102m}Rh/^{102}Rh στο τέλος της ακτινοβόλησης το Δεκέμβριο ’19

Με τρόπο αντίστοιχο με τους υπολογισμούς της παραγράφου 6.1.1.1. γίνεται η αναγωγή της αναλογίας του ^{102m}Rh/^{102}Rh στο τέλος της ακτινοβόλησης στις 20/12/2019 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 32.

Πίνακας 32. Επιφάνεια φωτοκορυφής ^{102m}Rh, ^{102}Rh και συνολική επιφάνεια της φωτοκορυφής των 475.06 keV στο τέλος της ακτινοβόλησης το Δεκέμβριο ’19

Ανιχνευτής	Επιφάνεια ^{102m}Rh (counts)	Ποσοστό ^{102m}Rh	Επιφάνεια ^{102}Rh (counts)	Ποσοστό ^{102}Rh	Συνολική εκτιμώμενη επιφάνεια (counts)
ACT15	575.12 ± 21.6%	12.29%	4104 ± 35.1%	87.71%	4680 ± 30.9%
ACT16	575.42 ± 21.6%	12.26%	4119 ± 35.1%	87.74%	4694 ± 30.9%
RADA10	554.22 ± 21.6%	11.43%	4296 ± 33.3%	88.57%	4850 ± 29.6%
RADA11	555.04 ± 21.6%	11.34%	4338 ± 33.3%	88.66%	4893 ± 29.6%
RADA13	552.61 ± 21.6%	11.18%	4392 ± 33.0%	88.82%	4944 ± 29.4%
RADA14	552.90 ± 21.6%	11.15%	4407 ± 33.0%	88.85%	4960 ± 29.4%

Από τα δεδομένα του Πίνακα 32 προκύπτει πως η μέση τιμή για το ποσοστό του ^{102m}Rh είναι 11.61% και η αντίστοιχη τιμή για το ^{102}Rh είναι 88.39%, δηλαδή η αναλογία των δύο ισοτόπων στο τέλος της ακτινοβόλησης τον Δεκέμβριο ’19 είναι περίπου 1:9.

6.1.2. Σταθμισμένες μέσες τιμές ενεργότητας για κάθε ισότοπο

Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως η ενεργότητα για ισότοπα για τα οποία έχουν ανιχνευτεί περισσότερες από μία ακτίνες-γ προκύπτει από τη σταθμισμένη μέση τιμή (Παράρτημα Γ) μεταξύ των τιμών της ενεργότητας για κάθε ενέργεια και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 33. Για τις τιμές της

ενεργότητας του ^{102m}Rh και του ^{102}Rh λαμβάνονται για όλους τους VERDI ανιχνευτές αυτές που αναγράφονται στις σχέσεις (35) και (37) αντίστοιχα.

Πίνακας 33. Σταθμισμένη μέση τιμή ενεργότητας το Δεκέμβριο ’21 για τα ισότοπα ενδιαφέροντος που μετρήθηκαν με τους VERDI ανιχνευτές

Ισότοπο	Σταθμισμένη μέση τιμή ενεργότητας A (Bq)					
	ACT15	ACT16	RADA10	RADA11	RADA13	RADA14
^{57}Co	0.230 ± 10.0%	0.188 ± 11.5%	0.284 ± 9.66%	0.282 ± 9.58%	0.313 ± 8.83%	0.266 ± 10.3%
^{54}Mn	0.506 ± 7.49%	0.419 ± 8.37%	0.443 ± 8.12%	0.599 ± 6.92%	0.590 ± 7.08%	0.483 ± 7.74%
^{102m}Rh	0.106 ± 21.3%	0.106 ± 21.3%	0.106 ± 21.3%	0.106 ± 21.3%	0.106 ± 21.3%	0.106 ± 21.3%
^{102}Rh	0.159 ± 19.6%	0.159 ± 19.6%	0.159 ± 19.6%	0.159 ± 19.6%	0.159 ± 19.6%	0.159 ± 19.6%
^{88}Y	2.191 ± 22.9%	-	5.990 ± 11.4%	5.295 ± 17.0%	5.663 ± 16.9%	6.274 ± 11.5%
^{110m}Ag	22.15 ± 5.10%	21.69 ± 51.4%	23.38 ± 6.22%	22.68 ± 7.36%	22.95 ± 5.19%	23.48 ± 6.04%
^{182}Ta	56.27 ± 15.1%	54.49 ± 12.5%	52.54 ± 10.9%	51.28 ± 12.5%	56.51 ± 14.0%	55.13 ± 12.7%

6.2. Εκτίμηση ειδικής ενεργότητας δειγμάτων στο τέλος της ακτινοβόλησης και σύγκριση με προηγούμενη μέτρηση των ίδιων δειγμάτων

Για την εκτίμηση της ειδικής ενεργότητας, δηλαδή της ενεργότητας ανά μονάδα μάζας, αξιοποιούνται τα δεδομένα από τους Πίνακες 26, 27 και 28 καθώς και η μάζα κάθε ελάσματος από τον Πίνακας 2 και τον Πίνακας 3, ενώ οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τη σχέση (18).

Στην περίπτωση του ^{57}Co, το οποίο προέρχεται από αντίδραση του Ni, υπολογίζεται η συνολική μάζα του Ni στους ανιχνευτές VERDI, δηλαδή 100% της μάζας του ελάσματος Ni και 12% της μάζας του ελάσματος Mn/Ni. Αντίστοιχα για το Mn, λαμβάνεται το 88% της μάζας του ελάσματος Mn/Ni. Για το Ta, το οποίο αποτελεί πρόσμειξη άγνωστης συγκέντρωσης στο έλασμα του Y, αναφέρεται από τον κατασκευαστή του ελάσματος ότι η ατέλεια αυτή είναι έως 2% και έτσι θεωρείται ως μάζα του Ta το 2% της μάζας του ελάσματος Y και για τη μάζα του Y λαμβάνεται το 98% της μάζας του αντίστοιχου ελάσματος. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 34.

Πίνακας 34. Μάζες ισοτόπων ενδιαφέροντος που περιέχονται στους ανιχνευτές VERDI

Ισότοπο	Μάζα ισοτόπου (g)					
	ACT15	ACT16	RADA10	RADA11	RADA13	RADA14
Co	0.0053	0.0054	0.0059	0.0057	0.0056	0.0060
Mn	0.0066	0.0060	0.0058	0.0066	0.0069	0.0072
Rh	0.0241	0.0246	0.0238	0.0239	0.0246	0.0240
Y	0.0450	0.0441	0.0425	0.0441	0.0444	0.0435
Ag	0.0032	0.0033	0.0035	0.0034	0.0032	0.0035
Ta	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009

Οι τιμές της ειδικής ενεργότητας που υπολογίζονται με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω αναγράφονται στον Πίνακα 35 για τους ανιχνευτές ACT15 και ACT16, στον Πίνακα 36 για τους ανιχνευτές RADA10 και RADA11 και στον Πίνακα 37 για τους ανιχνευτές RADA13 και RADA14 αντίστοιχα. Παρουσιάζονται επίσης οι αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από την ανάλυση των μετρήσεων του Απριλίου ’20 με ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 80% που διαθέτει το εργαστήριο του

ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και οι τιμές του στατιστικού ελέγχου U-test για τη σύγκριση ανάμεσα στις δύο σειρές μετρήσεων.

Πίνακας 35. Ειδική ενεργότητα ανιχνευτών VERDI ACT15 & ACT16 στο τέλος της ακτινοβόλησής τους το Δεκέμβριο ’19 από τις μετρήσεις Απριλίου ’20 και Δεκεμβρίου ’21

Ισότοπο	Ειδική ενεργότητα (Bq/g)					
	ACT15			ACT16		
	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test
^{57}Co	32.19 ± 9.77%	43.40 ± 10.0%	2.091	32.49 ± 10.1%	34.81 ± 11.5%	0.449
^{54}Mn	56.74 ± 9.16%	76.67 ± 7.49%	2.573	46.47 ± 9.40%	69.83 ± 8.37%	3.202
^{102m}Rh	-	5.558 ± 12.6%	-	-	5.445 ± 12.6%	-
^{102}Rh	33.81 ± 7.19%	71.77 ± 19.6%	2.657	33.02 ± 7.39%	70.31 ± 19.6%	2.662
^{110m}Ag	7647 ± 7.37%	6922 ± 5.10%	1.091	8052 ± 8.74%	6573 ± 51.4%	0.429
^{182}Ta	44819 ± 53.1%	62522 ± 15.1%	0.691	53503 ± 22.1%	60544 ± 12.5%	0.501

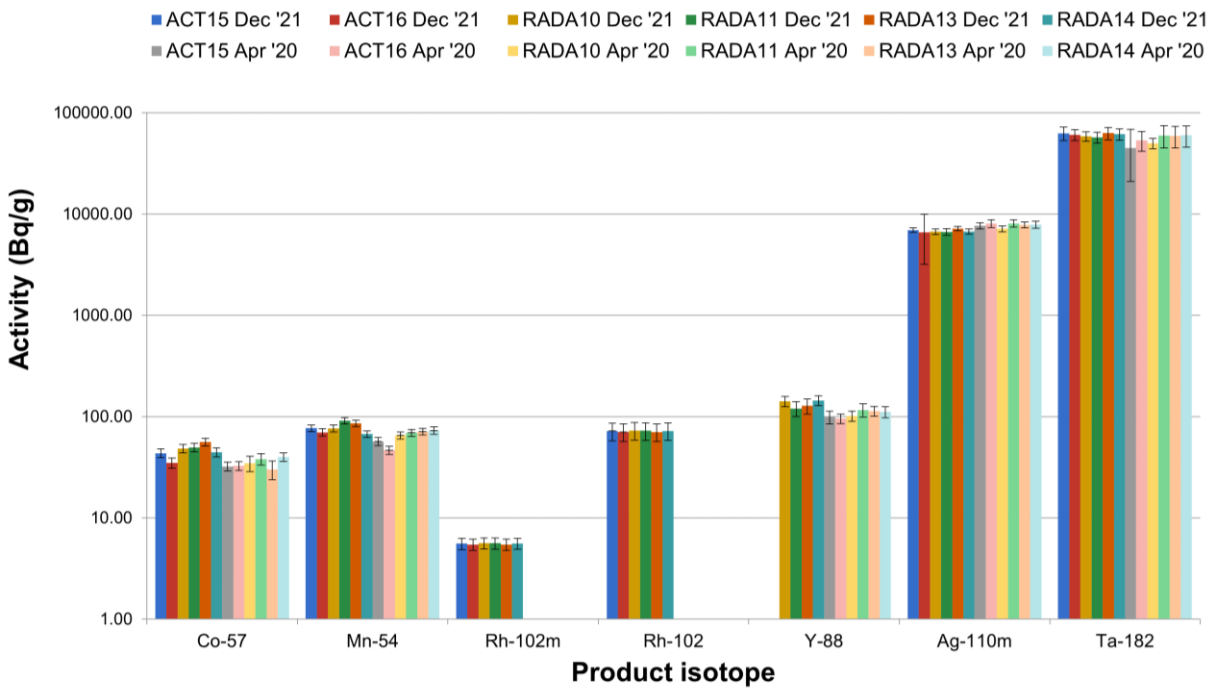
Πίνακας 36. Ειδική ενεργότητα ανιχνευτών VERDI RADA10 & RADA11 στο τέλος της ακτινοβόλησής τους το Δεκέμβριο ’19 από τις μετρήσεις Απριλίου ’20 και Δεκεμβρίου ’21

Ισότοπο	Ειδική ενεργότητα (Bq/g)					
	RADA10			RADA11		
	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test
^{57}Co	34.43 ± 17.2%	48.14 ± 9.66%	1.819	38.02 ± 12.9%	49.47 ± 9.58%	1.682
^{54}Mn	65.09 ± 8.09%	76.38 ± 8.12%	1.388	69.05 ± 7.81%	90.76 ± 6.92%	2.622
^{102m}Rh	-	5.628 ± 12.6%	-	-	5.605 ± 12.6%	-
^{102}Rh	34.06 ± 7.38%	72.68 ± 19.6%	2.667	40.36 ± 7.36%	72.37 ± 19.6%	2.207
^{88}Y	101.4 ± 11.6%	140.9 ± 11.4%	1.987	116.0 ± 15.2%	120.1 ± 17.0%	0.151
^{110m}Ag	7145 ± 6.64%	6680 ± 6.22%	0.737	8063 ± 8.40%	6671 ± 7.36%	1.664
^{182}Ta	50025 ± 11.6%	58378 ± 10.9%	0.970	59620 ± 24.7%	56978 ± 12.5%	0.162

Πίνακας 37. Ειδική ενεργότητα ανιχνευτών VERDI RADA10 & RADA11 στο τέλος της ακτινοβόλησής τους το Δεκέμβριο ’19 από τις μετρήσεις Απριλίου ’20 και Δεκεμβρίου ’21

Ισότοπο	Ειδική ενεργότητα (Bq/g)					
	RADA13			RADA14		
	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test	Απρ. ’20	Δεκ. ’21	U-test
^{57}Co	30.05 ± 21.0%	55.89 ± 8.83%	3.223	39.80 ± 9.32%	44.33 ± 10.3%	0.771
^{54}Mn	70.95 ± 7.53%	85.51 ± 7.08%	1.803	72.64 ± 8.25%	67.08 ± 7.74%	0.701
^{102m}Rh	-	5.445 ± 12.6%	-	-	5.582 ± 12.6%	-
^{102}Rh	36.93 ± 7.37%	70.31 ± 19.6%	2.374	36.53 ± 7.32%	72.07 ± 19.6%	2.470
^{88}Y	113.0 ± 11.2%	127.5 ± 16.9%	0.583	110.7 ± 12.5%	144.2 ± 11.5%	1.553
^{110m}Ag	7808 ± 6.93%	7172 ± 5.19%	0.969	7866 ± 7.82%	6709 ± 6.04%	1.572
^{182}Ta	59062 ± 24.1%	62789 ± 14.0%	0.223	59835 ± 23.6%	61256 ± 12.7%	0.088

Τα δεδομένα αυτά απεικονίζονται μαζί με τις αντίστοιχες τιμές από τις μετρήσεις των ίδιων δειγμάτων σε ανιχνευτή HPGe 80% τον Απρίλιο του ’20 στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35. Ειδική ενεργότητα (Bq/g) ανιχνευτών VERDI στο τέλος της ακτινοβόλησής τους τον Δεκέμβριο ’19 με βάση τις μετρήσεις του Δεκεμβρίου ’21 και του Απριλίου ’20

Από την παραπάνω εικόνα δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις για την ειδική ενεργότητα ανάμεσα στις δύο σειρές μετρήσεων. Εξαίρεση αποτελεί το ^{88}Y το οποίο δεν ανιχνεύεται καθόλου στους ανιχνευτές του ACT sub-holder στις μετρήσεις της παρούσας εργασίας.

Καθώς τον Απρίλιο του ’20 δεν ήταν εφικτή η διάκριση ανάμεσα στα δύο ισότοπα του Rh στο δείγμα, οι τιμές της ενεργότητας σε αυτήν την περίπτωση δεν παρουσιάζονται στο παραπάνω ιστόγραμμα, και θεωρείται πιο έγκυρη η εκτιμώμενη ειδική ενεργότητα που υπολογίστηκε από την ανάλυση των μετρήσεων του Δεκεμβρίου ’21.

Όσον αφορά τον ^{110m}Ag και το ^{182}Ta, είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενεργότητας καθώς προέρχονται από αντιδράσεις (n, γ) οι οποίες δεν έχουν ενεργειακό κατώφλι. Τα υπόλοιπα ισότοπα που ανιχνεύτηκαν και μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δηλαδή το ^{57}Co, ^{54}Mn, ^{102m}Rh, ^{102}Rh, ^{88}Y, προέρχονται από αντιδράσεις (n, 2n) και (n, np), (n,d). Οι αντιδράσεις αυτές έχουν ενεργειακό κατώφλι στην περιοχή των 6.08 keV - 12 keV και επάγονται από νετρόνια που δημιουργούνται κατά τη σύντηξη δευτερίου - τριτίου (D-T), όπως περιγράφεται στο 2^{ο} Κεφάλαιο. Η πιθανότητα πραγματοποίησης αυτών των αντιδράσεων σε πηγή πλάσματος δευτερίου - δευτερίου (D-D) είναι μικρή σε σχέση με άλλες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο πλάσμα, επομένως είναι λογικό τα ισότοπα που παράγονται μέσω αυτής της διαδικασίας να παρουσιάζουν χαμηλότερη ειδική ενεργότητα σε σχέση με τα ισότοπα που δημιουργούνται από αντιδράσεις χωρίς ενεργειακό κατώφλι.

Κεφάλαιο 7: Σύνοψη

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτήν. Αναφέρονται περιληπτικά τα στάδια της μελέτης και δίνονται τα συμπεράσματα κάθε τμήματος της εργασίας. Τέλος σχολιάζονται μελλοντικές προεκτάσεις πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της απόκρισης του συστήματος Compton Suppression που διαθέτει το εργαστήριο του ΙΠΡΕΤΕΑ στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» κατά την ανάλυση πολυϊσοτοπικών δειγμάτων και συγκεκριμένα VERDI ανιχνευτών. Η μελέτη αυτή εμπεριείχε τον υπολογισμό συντελεστών χαρακτηρισμού του CSS με σκοπό τη διερεύνηση της βελτίωσης της ανιχνευτικής ικανότητας της διάταξης με χρήση ενός τέτοιου συστήματος μείωσης συνεχούς υποστρώματος Compton. Παράλληλα, έγινε σύγκριση των μετρήσεων της παρούσας εργασίας με δεδομένα προηγούμενων αναλύσεων με σκοπό τη μελέτη της διαφοροποίησης της απόκρισης του συστήματος με την πάροδο του χρόνου, η οποία συνεπάγεται τη μείωση της συνολικής ενεργότητας του δείγματος.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, αρχικά έγιναν γ-φασματοσκοπικές μετρήσεις των VERDI ανιχνευτών στο σύστημα Compton Suppression, το οποίο βρισκόταν σε παράλληλη λειτουργία και επέτρεπε την καταγραφή τόσο των unsuppressed όσο και των suppressed φασμάτων. Από την ανάλυση των ισοτόπων που ανιχνεύτηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε υπολογισμός τριών συντελεστών χαρακτηρισμού της απόκρισης του συστήματος, των συντελεστών Reduction Factor (RF), Peak Reduction Factor (R_p) και Total Area Suppression Factor (TASF), καθένας από τους οποίους παρέχει διαφορετική πληροφορία. Ο συντελεστής RF μελετά τη μείωση του συνεχούς υποστρώματος με τη χρήση του συστήματος Compton Suppression υπολογίζοντας πόσο χαμηλότερο είναι το υπόστρωμα στα suppressed φάσματα σε σχέση με τις αντίστοιχες περιοχές στα unsuppressed, για περιοχές που δεν ανιχνεύονται διακριτές φωτοκορυφές. Με τους συντελεστές R_p και TASF μελετάται η επίδραση του CSS στην επιφάνεια των ανιχνευόμενων φωτοκορυφών. Ο συντελεστής R_p δείχνει την επίδραση που έχει η χρήση του CSS στην επιφάνεια της φωτοκορυφής και συγκεκριμένα εάν και πόσο μειώνεται στο suppressed φάσμα, συγκριτικά με το unsuppressed. Μονοενεργειακά ισότοπα δεν υπόκεινται σε μειώσεις στο suppressed φάσμα, ενώ για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά παρατηρείται σημαντική υποεκτίμηση των επιφανειών στο suppressed φάσμα, καθώς η πιθανότητα ένα φωτόνιο να ανιχνευτεί στον πρωτεύοντα ανιχνευτή κι ένα άλλο εκπεμπόμενο σε σειρά στην ενεργητική θωράκιση είναι πολύ υψηλή. Η μείωση που παρατηρείται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται κυρίως από το διάγραμμα διάσπασης του αναλυόμενου ισοτόπου και τους χρόνους των στάθμεών του. Αναφορικά με τον TASF, ο συντελεστής αυτός συσχετίζει την ενδεχόμενη μείωση της επιφάνειας της φωτοκορυφής με τη μείωση της επιφάνειας ολόκληρου του φάσματος, ανάμεσα στα δύο φάσματα – suppressed / unsuppressed. Ωστόσο, φάνηκε ότι ο συντελεστής αυτός δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτικός, καθώς εμπεριέχει το συνεχές υπόστρωμα εξαιτίας όλων των φωτονίων της πηγής, με αποτέλεσμα – ειδικά στις πολυενεργειακές πηγές – να υποεκτιμά την επίδραση του CSS στις χαμηλές ενέργειες και αντίστοιχα να την υπερεκτιμά στις υψηλές ενέργειες.

Στις γ-φασματοσκοπικές μετρήσεις των VERDI ανιχνευτών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αρχικά αναζητήθηκαν τόσο στα unsuppressed όσο και στα suppressed φάσματα φωτοκορυφές που δεν είχαν ανιχνευτεί προηγουμένως, λόγω του μεγάλου πλήθους των ανιχνευόμενων ισοτόπων κι επομένως του υψηλού συνεχούς υποστρώματος των δειγμάτων. Επίσης, διερευνήθηκε η

ενδεχόμενη μείωση της αβεβαιότητας ανίχνευσης φωτοκορυφών χάρη στη χρήση της διάταξης. Συνοπτικά μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα για τα ισότοπα που μελετήθηκαν:

i. Το σύστημα Compton Suppression βελτιώνει την ικανότητα ανίχνευσης για ισότοπα που δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, καθώς σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μειωμένη αβεβαιότητα για τις αντίστοιχες φωτοκορυφές στα suppressed φάσματα σε σχέση με τα unsuppressed. Τέτοια περίπτωση ήταν το ^{57}Co και το ^{54}Mn. Σημειώνεται ότι το ^{57}Co, αν και εκπέμπει φωτόνια 14 keV και 122 keV σε σειρά, εκείνα με ενέργεια 14 keV δεν μπορούν να διαπεράσουν το παράθυρο αλουμινίου των ανιχνευτών και άρα το ισότοπο αυτό αντιμετωπίζεται από το CSS ως ισότοπο που δεν εκπέμπει φωτόνια σε σειρά.

ii. Για ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά (^{102m}Rh, ^{88}Y, ^{182}Ta, ^{110m}Ag) η χρήση του CSS οδηγεί σε μη επιθυμητή απόρριψη γεγονότων στα suppressed φάσματα, δηλαδή υποεκτιμώνται οι αντίστοιχες φωτοκορυφές. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανίχνευσης ενός φωτονίου στον κυρίως ανιχνευτή και κάποιου άλλου φωτονίου - από τα εκπεμπόμενα σε σειρά - στο δευτερεύοντα ανιχνευτή. Το ποσοστό μείωσης της φωτοκορυφής εξαρτάται από το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου, γι' αυτό και παρατηρήθηκαν διαφορετικά ποσοστά μείωσης σε κάθε ισότοπο (^{102m}Rh: 53.6% έως 65.3%, ^{88}Y: 64.7%, ^{182}Ta: 20.8% έως 70.4%, ^{110m}Ag: 95.6% έως 97.5%).

iii. Ανιχνεύτηκαν σε unsuppressed φάσματα δύο επιπλέον φωτοκορυφές του ^{102m}Rh, γεγονός που επέτρεψε το διαχωρισμό των δύο ισοτόπων ^{102m}Rh ($T_{1/2}$ = 3.74 y) και ^{102}Rh ($T_{1/2}$ = 207.8 d) στα δείγματα.

Στη συνέχεια, η απόκριση της διάταξης συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα αναλύσεων των ίδιων δειγμάτων στην ίδια διάταξη και για ίδιες συνθήκες μέτρησης σε προγενέστερη ημερομηνία. Από τη σύγκριση αυτή παρατηρήθηκε χρονική σταθερότητα όσον αφορά στην επίδραση του CSS στις ανιχνευόμενες φωτοκορυφές, ενώ η μείωση του συνεχούς υποστρώματος που επιφέρει η χρήση του μειώνεται όσο μικρότερη είναι η συνολική ενεργότητα των δειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν οι συντελεστές χαρακτηρισμού απόκρισης RF, Rp και TASF και παρατηρήθηκαν τα εξής:

iv. Οι τιμές του συντελεστή RF είναι μειωμένοι στην παρούσα εργασία, καθώς η συνολική ενεργότητα των δειγμάτων έχει ελαττωθεί κι επομένως και το συνεχές υπόστρωμα.

v. Η επίδραση του CSS στις επιφάνειες των φωτοκορυφών δεν φαίνεται να επηρεάζεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι τιμές του συντελεστή Rp παραμένουν στατιστικά σταθερές.

vi. Οι τιμές του συντελεστή TASF μειώθηκαν σημαντικά στις μετρήσεις της παρούσας εργασίας, γεγονός που αποδίδεται στην έντονη μείωση των συνολικών καταγραφόμενων κρούσεων στο φάσμα εξαιτίας της χαμηλότερης ενεργότητας των δειγμάτων.

Αναφορικά με τη βαθμονόμηση απόδοσης διάταξης που διαθέτει σύστημα Compton Suppression, επιβεβαιώθηκε ότι παρουσιάζει δυσκολία κατά τη λειτουργία σε αντισύμπτωση εξαιτίας της διαφορετικής απόκρισης του συστήματος, ανάλογα με το σχήμα αποδιέγερσης του υπό ανάλυση ισοτόπου. Για το λόγο αυτό, κατά τη λειτουργία σε αντισύμπτωση, μία καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης έχει νόημα μόνο για

την ανίχνευση φωτονίων τα οποία είναι μοναδικά ή δεν εκπέμπονται σε σειρά με άλλα. Από τη διαδικασία της βαθμονόμησης απόδοσης διαπιστώθηκε πόσο σημαντική είναι η επίδραση του φαινομένου της τυχαίας σύμπτωσης όταν χρησιμοποιούνται πηγές σχετικά υψηλής ενεργότητας. Τέτοιο παράδειγμα είναι η σημειακή πηγή ^{139}Ce που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η οποία λόγω υψηλής ενεργότητας έχει μειωμένο αριθμό κρούσεων στα suppressed φάσματα σε σχέση με τα unsuppressed.

Για τον υπολογισμό της ειδικής ενεργότητας των ανιχνευτών VERDI, αξιοποιήθηκε η πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης του unsuppressed φάσματος που έγινε με χρήση σημειακών πηγών. Στη συνέχεια με μεθόδους Monte Carlo και συγκεκριμένα μέσω του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE, υπολογίστηκαν κατάλληλοι συντελεστές μεταφοράς απόδοσης για τη διόρθωση τόσο λόγω της αλλαγής στερεάς γωνίας από σημειακές πηγές σε πηγές όγκου, όσο και για το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης των ακτίνων-γ μέσα στα υλικά των υπό ανάλυση δειγμάτων. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε η ενεργότητα των VERDI ανιχνευτών κατά την ημερομηνία μέτρησής τους και έγινε αναγωγή στο τέλος της ακτινοβόλησης. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν από την παρούσα εργασία για την ειδική ενεργότητα στο τέλος της ακτινοβόλησης με αντίστοιχα δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις των ίδιων δειγμάτων. Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψαν τα εξής:

vii. Παρατηρείται συμφωνία για όλα τα ισότοπα που έχουν ανιχνευτεί τόσο στις μετρήσεις της παρούσας εργασίας όσο και στις προγενέστερες, όσον αφορά τις τιμές της ειδικής ενεργότητας των δειγμάτων στο τέλος της ακτινοβόλησης, με εξαίρεση το Rh.

viii. Προσδιορίστηκε πως η αναλογία ^{102m}Rh/^{102}Rh ήταν ~1:9 στο τέλος της ακτινοβόλησης των δειγμάτων. Η διαπίστωση της ύπαρξης των δύο αυτών ισοτόπων στους ανιχνευτές VERDI και ο καθορισμός της αναλογίας τους στην ακτινοβόληση είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εύρημα όσον αφορά στην ανάλυση των συγκεκριμένων ανιχνευτών, καθώς ο υπολογισμός της ενεργότητας του ^{102}Rh χωρίς να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά του ^{102m}Rh οδηγεί σε υποεκτίμηση της ενεργότητας του ^{102}Rh.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, στο πλαίσιο της εργασίας διαπιστώθηκε πως η χρήση του συστήματος Compton Suppression δεν εισάγει σημαντική βελτίωση στην ανάλυση των ανιχνευτών VERDI μετά από ακτινοβόληση σε πηγή πλάσματος D-D, καθώς αυτοί διαθέτουν αρκετά πολυενεργειακά ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά. Παράλληλα, από την ανάλυση των δειγμάτων διαπιστώθηκε η παρουσία τόσο ^{102m}Rh και ^{102}Rh σε αυτά, γεγονός που επηρεάζει τον υπολογισμό της ενεργότητας. Έγινε επομένως προσδιορισμός της αναλογίας των δύο ισοτόπων στο δείγμα και εκτιμήθηκε η ενεργότητα για το κάθε ένα από αυτά.

Μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να είναι οι εξής:

i. Χρήση των δεδομένων της ειδικής ενεργότητας του ^{102}Rh και του ^{102m}Rh στο τέλος της ακτινοβόλησης των ανιχνευτών VERDI για τη διόρθωση των προηγούμενων αναλύσεων.
ii. Μελέτη της επίδρασης της ενεργότητας της πηγής σε φαινόμενα τυχαίας σύμπτωσης στο σύστημα Compton Suppression με μετρήσεις της ίδιας πηγής (πχ. ^{139}Ce) σε χρονικά διαστήματα ανάλογα του χρόνου ημιζωής της.
iii. Χρήση των αποτελεσμάτων της ειδικής ενεργότητας των δειγμάτων στο τέλος της ακτινοβόλησής τους για την ανασύνθεση του φάσματος των νετρονίων (ενεργειακό φάσμα και ροή) στις θέσεις όπου ήταν τοποθετημένοι οι ανιχνευτές μέσα στον αντιδραστήρα JET.
iv. Ανάλυση ακτινοβολημένων ανιχνευτών VERDI με πηγή πλάσματος D-T με σκοπό τη μελέτη της ενδεχόμενης βελτίωσης που μπορεί να εισάγει η χρήση CSS σε τέτοια δείγματα. Διαφορετική πηγή πλάσματος οδηγεί σε παραγωγή νετρονίων άλλης ενέργειας, επομένως προκύπτουν διαφορετικά προϊόντα ενεργοποίησης τα οποία παρουσιάζουν ενδεχομένως διαφορετική συμπεριφορά από αυτά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Βιβλιογραφία

[1] K. S. Krane and W. G. Lynch, "Introductory Nuclear Physics," *Phys. Today*, vol. 42, no. 1, pp. 78–78, Jan. 1989, doi: 10.1063/1.2810884.

[2] "Nuclear Binding Energy." http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/nucbin.html (accessed May 20, 2022).

[3] Dr. Dirk Naujoks, *Plasma-Material Interaction in Controlled Fusion*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[4] G. T. Cook, C. J. Passo, and B. Carter, "Environmental Liquid Scintillation Analysis," in *Handbook of Radioactivity Analysis*, Elsevier, 2003, pp. 537–607. doi: 10.1016/B978-012436603-9/50011-9.

[5] "IAEA | Fusion Portal." https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/Fusion Portal.aspx (accessed May 30, 2022).

[6] "EUROfusion: Fusion on the Sun." https://www.euro-fusion.org/fusion/fusion-on-the-sun/#:~:text=The gravity of the Sun,the fourth state of matter. (accessed May 19, 2022).

[7] "Advantages of Fusion." https://www.iter.org/sci/Fusion (accessed May 19, 2022).

[8] M. B. Irena Chatzis, "Demonstration Fusion Plants," *IAEA Bulletin*, 2021. https://www.iaea.org/bulletin/demonstration-fusion-plants (accessed May 21, 2022).

[9] *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*. EUROfusion Programme Management Unit, 2018. [Online]. Available: https://www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

[10] M. Rubel, "Fusion Neutrons: Tritium Breeding and Impact on Wall Materials and Components of Diagnostic Systems," *J. Fusion Energy*, vol. 38, no. 3–4, pp. 315–329, Aug. 2019, doi: 10.1007/s10894-018-0182-1.

[11] L. D. Horton, "JET, the largest tokamak on the eve of DT operation," *Europhys. News*, vol. 47, no. 5–6, pp. 25–27, Sep. 2016, doi: 10.1051/epn/2016503.

[12] "Fusion energy record demonstrates powerplant future, Culham Centre for Fusion Energy," *United Kingdom Atomic Energy Authority*, Feb. 09, 2022. https://ccfe.ukaea.uk/fusion-energy-record-demonstrates-powerplant-future/

[13] P. Rinard, "Ch.12 Neutron Interactions with Matter," *Los Alamos Tech. Reports*, pp. 357–377, 1990.

[14] Θ. Βασιλοπούλου, "Ανάπτυξη πυρηνικών τεχνικών στοιχειακής ανάλυσης δειγμάτων μεγάλου όγκου," Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012. doi: http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.594.

[15] G. Hevesy and H. Levi, "Action of Slow Neutrons on Rare Earth Elements," *Nature*, vol. 137, no. 3457, pp. 185–185, Feb. 1936, doi: 10.1038/137185a0.

[16] M. A. Ali, "A Brief Overview of Neutron Activation Analyses Methodology and Applications," *Nucl. Res. Cent. At. Energy Auth.*, pp. 71–84, 1999.

[17] "Neutron Activation Analysis," *The McClellan Nuclear Research Center*. https://mnrc.ucdavis.edu/neutron-activation-analysis (accessed May 22, 2022).

[18] Σ. Παντούσα, "Μελέτη Διάταξης Ακτινοβόλησης με Ισοτοπικές Πηγές Νετρονίων," Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019. doi: http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.17116.

[19] "Neutron Activation Analysis," *Analytical Chemistry Group*, 2012. https://acg.missouri.edu/NAA.html (accessed May 23, 2022).

[20] M. I. Savva *et al.*, "VERDI detector benchmark experiment at the ENEA 14 MeV Frascati Neutron Generator," *Fusion Eng. Des.*, vol. 146, pp. 1877–1881, 2019, doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.055.

[21] R. Prokopowicz *et al.*, "Measurements of neutrons at JET by means of the activation methods," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 637, no. 1, pp. 119–127, 2011, doi: 10.1016/j.nima.2011.01.128.

[22] M. Angelone *et al.*, "Neutronics experiments, radiation detectors and nuclear techniques development in the EU in support of the TBM design for ITER," *Fusion Eng. Des.*, vol. 96–97, pp.

2–7, 2015, doi: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.114.
[23] A. Klix, A. Domula, U. Fischer, D. Gehre, P. Pereslavtsev, and I. Rovni, “Neutronics diagnostics for European ITER TBMs: Activation foil spectrometer for short measurement cycles,” *Fusion Eng. Des.*, vol. 87, no. 7–8, pp. 1301–1306, 2012, doi: 10.1016/j.fusengdes.2012.02.129.
[24] L. W. P. M.I. Savva, T. Vasilopoulou, C.R. Nobs, Z. Ghani, I.E. Stamatelatos, “Novel Neutron Detector for Fusion (VERDI): WP6 D10 part 1,” *EUROfusion Rep.*, pp. 1–25, 2020.
[25] P. Batistoni *et al.*, “Calibration of neutron detectors on the Joint European Torus,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 88, no. 10, p. 103505, 2017, doi: 10.1063/1.4991780.
[26] G. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, 2008.
[27] Δ. Κεκκάτος, “Διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας δέσμης, κατά τον πειραματικό προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών,” Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014. doi: http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.6457.
[28] Μ. Ι. Αναγνωστάκης, “γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών,” Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1998.
[29] “Energy Bands - Semiconductor Physics,” *Electronics/Electrical (EE/EC/EX)*, 2018. https://www.eeupdate.com/2018/10/energy-bands-semiconductor-physics.html (accessed May 25, 2022).
[30] R. Barnowski, “Semiconductor (Ionization) Detectors Electron / Hole Pairs : Information Carriers,” *Adv. Concepts Radiat. Detect.*, 2018.
[31] N. Connor, “What is Spectroscopy using Germanium Semiconductor,” *Radiation Dosimetry*, 2019. https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-spectroscopy-using-germanium-semiconductor-hpge-definition/ (accessed May 27, 2022).
[32] “Data Support Lab,” *Inter-University Accelerator Centre - (IUAC)*. https://www.iuac.res.in/data-support-lab (accessed May 25, 2022).
[33] “LYNX Digital Signal Analyzer.” https://www.mirion.com/products/lynx-digital-signal-analyzer (accessed May 25, 2022).
[34] ORTEC ®, “GammaVision® Maestro-PRO® Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulators for Microsoft® Windows® 7, 8.1, and 10 Professional.” Advanced Measurement Technology, Inc, 2020.
[35] “GenieTM 2000 Tutorials.” Canberra Industries, Inc., 2006.
[36] Μ. Σάββα, “Ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών προσδιορισμού πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων ραδιενεργών ιχνοστοιχείων σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας,” Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.2849.
[37] S. Landsberger and S. Peshev, “Compton suppression neutron activation analysis: Past, present and future,” *J. Radioanal. Nucl. Chem. Artic.*, vol. 202, no. 1–2, pp. 201–224, 1996, doi: 10.1007/BF02037943.
[38] J. Pearsall, “Compton Suppression - Made Easier,” 2005.
[39] I. Bikit *et al.*, “Detection limits of the NaI(Tl) shielded HPGe spectrometer,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 421, no. 1–2, pp. 266–271, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0168-9002(98)01258-3.
[40] R. Britton, J. L. Burnett, A. V. Davies, and P. H. Regan, “Improving the effectiveness of a low-energy Compton suppression system,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 729, pp. 64–68, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.nima.2013.06.111.
[41] N. Ö. Çetiner, “Specifications and performance of the Compron Suppression Spectrometer at the Pennsylvania State University,” Διδακτορική Διτριβή, Pennsylvania State University, 2008.
[42] J. Parus, J. Kierzek, W. Raab, and D. Donohue, “A dual purpose Compton suppression spectrometer,” *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 258, no. 1, pp. 123–132, 2003, doi: https://doi.org/10.1023/A:1026270428392.
[43] E. Mauerhofer, “Improvement in the counting statistics and in the limit of detection with Compton

suppression spectrometers—a contribution to instrumental neutron activation analysis," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 47, no. 7, pp. 649–658, Jul. 1996, doi: 10.1016/0969-8043(96)00026-7.

[44] Θ. Βασιλοπούλου, "Προδιορισμός συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ανιχνευτή HPGe λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo," Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008. doi: http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.448.

[45] "Nuclear States and Models Part 2," *Miami University*. http://www.cas.miamioh.edu/~jaegerh/phy293/questions/prelab11b.htm (accessed May 28, 2022).

[46] Α. Καλαμαρά, "Μέτρηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης 241Am (n, 2n) 240Am," Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011. doi: http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.10102.

[47] S. Sudar, *TRUECOINC: A program for calculation of true coincidence correction for gamma rays*. Institute of Experimental Physics, Kossuth University, Debrecen, Hungary, 2000. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/017/33017174.pdf?r=1

[48] "Η μέθοδος Monte Carlo ή μέθοδος των τυχαίων αριθμών," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[49] F. James, "Monte Carlo theory and practice," *Reports Prog. Phys.*, vol. 43, no. 9, pp. 1145–1189, Sep. 1980, doi: 10.1088/0034-4885/43/9/002.

[50] F. Salvat, "PENELOPE-2018: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport," *OECD Work. Proc.*, 2019.

[51] Κ. Καρφόπουλος, "Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και της τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα," Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012. doi: 10.12681/eadd/28330.

[52] G. Gilmore, *Practical gamma-ray spectrometry*, 1st ed. John Wiley & Sons, 1995.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α – Τεχνικά σχέδια διάταξης Compton Suppression System

Παράρτημα Β – Πιστοποιητικά σημειακών πηγών βαθμονόμησης

Παράρτημα Γ – Στατιστικά μεγέθη

Παράρτημα Α

Τεχνικά σχέδια διάταξης Compton Suppression System

EURISYS MESURES

Parc des Tanneries
1, Chemin de la Roseraie
67383 LINGOLSHEIM CEDEX

SERVICE GERMANIUM
Téléphone : 03 88 77 43 50
Télécopie : 03 88 78 68 22

Adresse Postale :
B.P. 311
67834 TANNERIES CEDEX

FICHE DE SPECIFICATIONS DU DETECTEUR GERMANIUM COAXIAL TYPE P :

EGPC 40-190-R

Numéro de série : 53476

Tension de fonctionnement : + 3000 V , polarité POSITIVE

Caractéristiques en détection :

Energie :	122 keV	1332 keV	TEST
Résolutions garanties en keV :	0,93	1,90	
Résolutions mesurées en keV :	0,83	1,85	0,71

Spécifications à 1332 keV :	Efficacité relative	Rapport pic/Compton	Rapport FWTM/FWHM	Rapport FWFM/FWHM
Valeurs garanties :	40,0 %	62	1,90	2,65
Valeurs mesurées :	42,0 %	71,5	1,85	2,45

Conditions de mesure : Amplificateur 7245, constante de mise en forme gaussienne 4µs.
Taux de comptage : 1000 coups par seconde.
Convertisseur analogique digital 7602 à 8192 canaux.

Caractéristiques géométriques du cristal de Germanium :

Diamètre extérieur : 60,7 mm — Longueur : 61,3 mm
Volume utile : 173 cm^3 — Distance au capot : 5 mm
Zone morte : 500 µGe

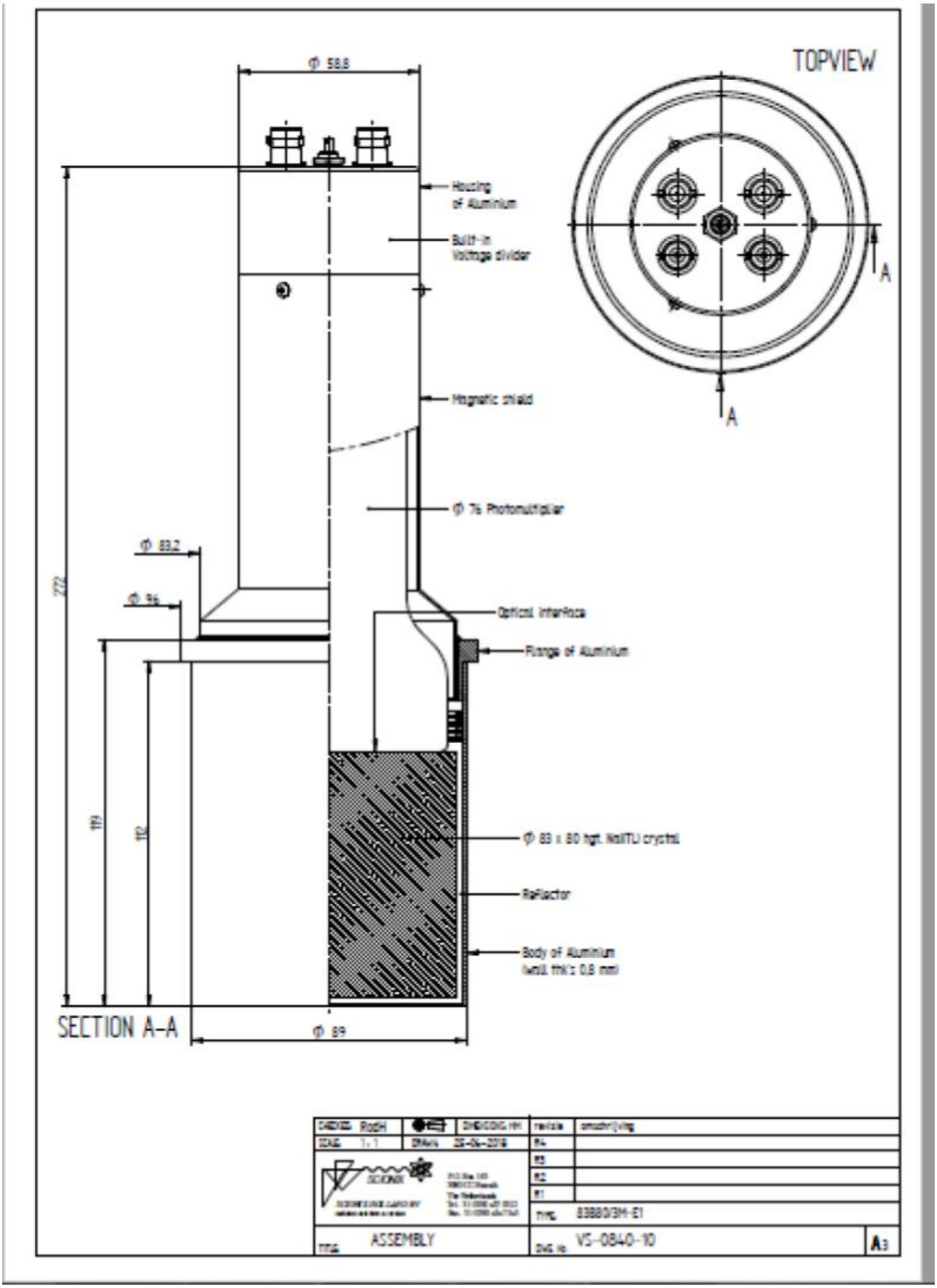
Cryostat : Type : SVF 00 30A — N° 1270
Autonomie : 15 jours en position basse

Capot : Diamètre : 80 mm — Longueur : 135 mm
Fenêtre d'entrée : Al — Epaisseur : ≤1 mm

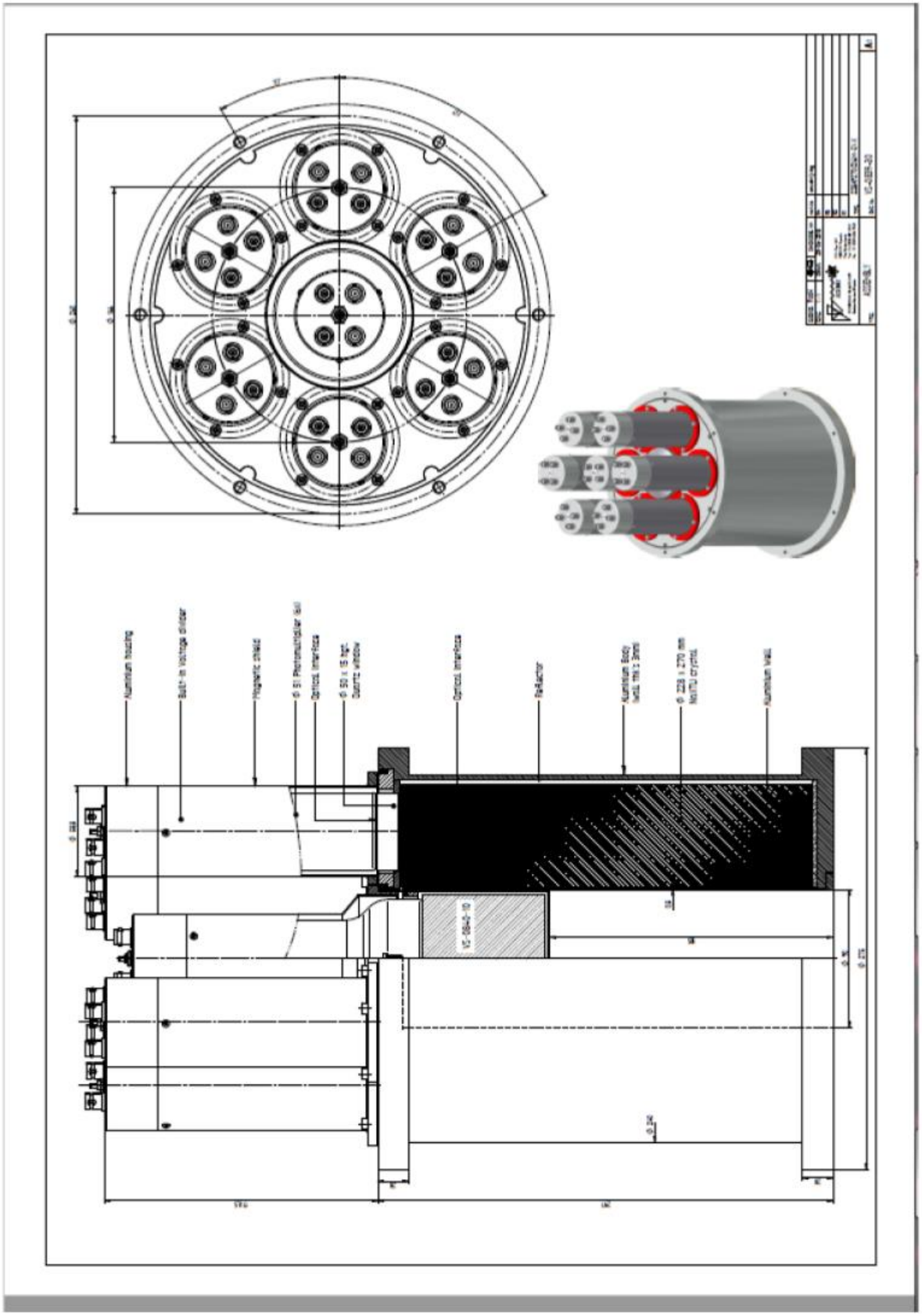
Préamplificateur : Type : PSC 822 — N° 209

Contrôlé par : Pierre SYLLAS
Date : 18 juillet 2000

Εικόνα Α1. Πιστοποιητικό πρωτεύοντα ανιχνευτή HPGe 40%



Εικόνα Α2. Σχέδιο δευτερεύοντα plug ανιχνευτή NaI



Εικόνα Α3. Σχέδιο δευτερεύοντα δακτυλιοειδούς ανιχνευτή NaI

Παράρτημα Β

Πιστοποιητικά σημειακών πηγών βαθμονόμησης

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Division of Research and Laboratories
Laboratory
Electronics and Measurement Section

Vienna, 1983-06-28

SET OF 8 CALIBRATED GAMMA-EMITTING SOURCES
(EMS-A2)

CERTIFICATE

(A) Activities

The 8 sources constituting the

SET No.: 2[illegible]

have the activities stated in the table below within the uncertainty limits there quoted.

The reference time is

1 July 1983, 00.00 Universal time

Nuclide	Activity kBq	Statistical error % +)	Systematic error %	Rounded overall uncertainty of the activity % ++)
^{241}Am	319.8	± 0.3	± 0.7	± 1.0
^{57}Co	633.9	± 0.3	± 0.4	± 1.0
^{22}Na	375.4	± 0.3	± 0.6	± 1.0
^{137}Cs	447.9	± 0.3	± 0.6	± 1.0
^{54}Mn	315.0	± 0.3	± 0.5	± 1.0
^{60}Co	413.2	± 0.3	± 0.4	± 1.0
^{133}Ba	337.8	± 0.3	± 1.2	± 1.5
^{152}Eu	398.1	± 0.3	± 1.6	± 2.0

+) Confidence level: 99%

++) (Rounded) sum of statistical and systematic errors.

Εικόνα Β1. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{241}Am

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Ba-133	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	3862 ± 15 days	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-1	**Contained Radioactivity:**	0.9845 µCi 36.43 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	302.9t, 356.0 keV
Branching ratio used:	0.183t, 0.619 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Daniel James Van Dekam
Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β2. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{133}Ba

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Cd-109	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	462.6 ± 0.7 days	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-2	**Contained Radioactivity:**	1.003 µCi 37.11 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Ag-108m, Co-60, Mn-54, Sc-46 and Zn-65 each < 0.0001% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	88.0 keV
Branching ratio used:	0.0363 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.7 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 2.5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Quality Control — Date: 2-Dec-14 — EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β3. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{109}Cd

Eckert & Ziegler

Kalibrierschein / Calibration Certificate

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-K-15203-01-00

erstellt durch das Kalibrierlaboratorium
as issued by the calibration laboratory

Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH
Gieselweg 1
38110 Braunschweig

Tel +49 5307 932-0
Fax +49 5307 932-293
E-Mail info@isotrak@ezag.com

Seriennr. / Serial No. BB-9465

Kalibrierzeichen *Calibration mark*	
	036359
	D-K-15203-01-00
	2021-05

Gegenstand *Object*	**Ce-139 Gamma Reference Source**
Hersteller *Manufacturer*	**Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH**
Typ *Type*	**CXR84563**
Seriennr. *Serial No.*	**BB-9465**
Auftraggeber *Customer*	**National Centre for Scientific Research "Demokritos" Institute of Nuclear & Radiological Sciences & Technology, Energy & Safety Patr. Gregoriou E & 27 Neapoleos Str Agia Paraskevi Athens 15341 Greece**
Auftragnummer *Order No.*	**CO-0182811**
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines *Number of pages of the certificate*	**2**
Datum der Kalibrierung *Date of calibration*	**1 June 2021**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die metrologische Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
This calibration certificate documents the metrological traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum der Ausstellung *Date of issue*	Freigabe des Kalibrierscheins durch *Approval of the calibration certificate by*
19 May 2021	Tobias Schohl

DKD Mitglied im Deutschen Kalibrierdienst

Εικόνα Β4. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{139}Ce, σελίδα 1/2

036359
D-K-15203-01-00
2021-05

Ce-139 Gamma Reference Source

Serial No.	BB-9465
Drawing	VZ-0477-001
Form	sealed
Dimensions of active surface	ø 1 mm
Overall dimensions	ø 25 x 3 mm
Nuclide	Cerium-139
Activity	39.6 kBq
Relative uncertainty*	3 %
Reference date	1 June 2021 at 12:00 UTC
Radioactive impurities	none
Calibration standard	Ce-139 - BA-8706 (PTB-6.13-12/2020_02)
Measuring method	The activity of the source was determined by comparison with a reference source using a sodium iodine detector with multi-channel analyzer.
Environmental conditions	Temperature: 21 °C ± 5 °C, humidity: 45 % RH ± 20 % RH

End of certificate

Non-accredited additional information

ISO classification*	ISO/12/C34313
Leakage and contamination test*	Wipe test according to ISO 9978
Wipe test passed on	19 May 2021
Your reference	SQ-020411 Email order 07.04.2021

* please see A4_01_01_D1

Εικόνα Β5. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{139}Ce, σελίδα 2/2

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Co-57	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	271.79 ± 0.09 days	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-3	**Contained Radioactivity:**	1.060 µCi 39.22 kBq

Physical Description:

A. Capsule type: M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit: Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume: 3 mm
D. Backing: 9.23 mg/cm² kapton
E. Cover: 0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Co-56 = 0.0395%; Co-58 = 0.00853% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration: 122.1, 136.5 keV
Branching ratio used: 0.8560, 0.1068 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty: ± 0.2 %
B. Type B (systematic) uncertainty: ± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing: ± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level: ± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 18 months.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Daniel Jonas Van Dalsem — Quality Control
2-Dec-14 — Date
EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β6. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{57}Co

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Co-60	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	5.272 ± 0.001 years	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-4	**Contained Radioactivity:**	0.9046 µCi 33.47 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	1173, 1333 keV
Branching ratio used:	0.9986, 0.9998 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.6 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Quality Control — Date: 2-Dec-14

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β7. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{60}Co

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Cs-137	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	30.17 ± 0.16 years	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-5	**Contained Radioactivity:**	1.031 µCi 38.15 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Cs-134 = 0.0589% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	661.7 keV
Branching ratio used:	0.851 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Quality Control 2-Dec-14 Date EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β8. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{137}Cs

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Eu-152	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	4933 ± 11 days	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-152-M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-8	**Contained Radioactivity:**	0.1079 µCi 3.992 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Eu-154 = 0.973%; Gd-153 = 0.468% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was prepared from a weighed aliquot of solution whose activity in µCi/g was determined using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	344.3 keV
Branching ratio used:	0.266 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 2.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.6 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-152-M-3,7KBQ.

Quality Control — Date: 2-Dec-14

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β9. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{152}Eu

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Mn-54	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	312.3 ± 0.4 days	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-6	**Contained Radioactivity:**	1.024 µCi 37.89 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	834.8 keV
Branching ratio used:	0.9998 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 2 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Quality Control — Date: 2-Dec-14

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα B10. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{54}Mn

Eckert & Ziegler
Isotope Products

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661-309-1010
Fax 661-257-8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION
GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Na-22	**Customer:**	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	950.8 ± 0.9 days	**P.O. No.:**	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	**Reference Date:**	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-7	**Contained Radioactivity:**	1.016 µCi 37.59 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	1275 keV
Branching ratio used:	0.9994 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.6 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP 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.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.

Daniel James Van De Veen
Quality Control

2-DEC-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα Β11. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{22}Na

Eckert & Ziegler

Kalibrierschein / Calibration Certificate

erstellt durch das Kalibrierlaboratorium
as issued by the calibration laboratory

Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH
Gieselweg 1
38110 Braunschweig

Tel +49 5307 932-0
Fax +49 5307 932-293
E-Mail infoisotrak@-ezag.com

Seriennr. / Serial No. 88-9466

Kalibrierzeichen *Calibration mark*	036335
	D-K-15203-01-00
	2021-05

Gegenstand *Object*	**Sn-113 Gamma Reference Source**
Hersteller *Manufacturer*	**Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH**
Typ *Type*	**TFR8122**
Seriennr. *Serial No.*	**88-9466**
Auftraggeber *Customer*	**National Centre for Scientific Research "Demokritos" Institute of Nuclear & Radiological Sciences & Technology, Energy & Safety Patr. Gregoriou E & 27 Neapoleos Str Agia Paraskevi Athens 15341 Greece**
Auftragsnummer *Order No.*	**CO-0182811**
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines *Number of pages of the certificate*	**2**
Datum der Kalibrierung *Date of calibration*	**1 June 2021**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die metrologische Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
This calibration certificate documents the metrological traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum der Ausstellung *Date of issue*	Freigabe des Kalibrierscheins durch *Approval of the calibration certificate by*
18 May 2021	

DKD Mitglied im Deutschen Kalibrierdienst

Εικόνα B12. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{113}Sn, σελίδα 1/2

036335
D-K-15209-01-00
2021-05

Sn-113 Gamma Reference Source

Serial No.	88-9466
Drawing	VZ-0477-001
Form	sealed
Dimensions of active surface	ø 1 mm
Overall dimensions	ø 25 x 3 mm
Nuclide	Tin-113
Activity	35.9 kBq
Relative uncertainty*	3 %
Reference date	1 June 2021
Radioactive impurities	AG-110m < 10 Bq
Calibration standard	Sn-113 - 50225 (PTB-6.11-14/2020-6)
Measuring method	The activity of the source was determined by comparison with a reference source of the same construction using a high purity germanium detector with multi-channel analyzer.
Environmental conditions	Temperature: 21 °C ± 5 °C, humidity: 45 % RH ± 20 % RH

End of certificate

Non-accredited additional information

ISO classification*	ISO/12/C34313
Leakage and contamination test*	Wipe test according to ISO 9978
Wipe test passed on	12 May 2021
Your reference	SQ-020411 Email order 07.04.2021

* please see A4_01_01_01

Εικόνα B13. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{113}Sn, σελίδα 2/2

Eckert & Ziegler

Kalibrierschein / Calibration Certificate

BIPM-MRA DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-K-15203-01-00

erstellt durch das Kalibrierlaboratorium
as issued by the calibration laboratory

Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH
Gieselweg 1
38110 Braunschweig

Tel +49 5307 932-0
Fax +49 5307 932-293
E-Mail infoisotrak@ezag.com

Seriennr. / Serial No. BB-9467

Kalibrierzeichen
Calibration mark

036296
D-K-15203-01-00
2021-06

Gegenstand *Object*	**Zn-65 Gamma Reference Source**
Hersteller *Manufacturer*	**Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH**
Typ *Type*	**2AR8122**
Seriennr. *Serial No.*	**BB-9467**
Auftraggeber *Customer*	**National Centre for Scientific Research "Demokritos" Institute of Nuclear & Radiological Sciences & Technology, Energy & Safety Patr. Gregoriou E & 27 Neapoleos Str Agia Paraskevi Athens 15341 Greece**
Auftragsnummer *Order No.*	**CO-0182811**
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines *Number of pages of the certificate*	**2**
Datum der Kalibrierung *Date of calibration*	**1 June 2021**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die metrologische Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
This calibration certificate documents the metrological traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum der Ausstellung *Date of issue*	Freigabe des Kalibrierscheins durch *Approval of the calibration certificate by*
10 May 2021	Tobias Schohl

DKD Mitglied im Deutschen Kalibrierdienst

Εικόνα Β14. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{65}Zn, σελίδα 1/2

036296
D-K-15203-01-00
2021-05

Zn-65 Gamma Reference Source

Serial No.	BB-9467
Drawing	VZ-0477-001
Form	sealed
Dimensions of active surface	ø 1 mm
Overall dimensions	ø 25 x 3 mm
Nuclide	Zinc-65
Activity	35.1 kBq
Relative uncertainty*	3 %
Reference date	1 June 2021 at 12:00 UTC
Radioactive impurities	none
Calibration standard	Zn-65 - AE-1055 (PTB-6.11-12/2014-AE-1055)
Measuring method	The activity of the source was determined by comparison with a reference source using a sodium iodine detector with multi-channel analyzer.
Environmental conditions	Temperature: 21 °C ± 5 °C, humidity: 45 % RH ± 20 % RH

End of certificate

Non-accredited additional information

ISO classification*	ISO/12/C34313
Leakage and contamination test*	Wipe test according to ISO 9978
Wipe test passed on	4 May 2021
Your reference	SQ-020411 Email order 07.04.2021

* please see A4_01_01_D1

Εικόνα B15. Πιστοποιητικό σημειακής πηγής ^{65}Zn, σελίδα 2/2

Παράρτημα Γ
Στατιστικά μεγέθη

Γ1. Ο στατιστικός έλεγχος U-test

Θεωρώντας ότι ($x_1 \pm \delta x_1$) και ($x_2 \pm \delta x_2$) είναι τα αποτελέσματα μιας μέτρησης (και η αντίστοιχη απόλυτη αβεβαιότητα) με τη χρήση του στατιστικού ελέγχου U ελέγχεται το κατά πόσο τα δύο αυτά αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά ίδια ή όχι.

Ορίζεται έτσι η μηδενική και η εναλλακτική υπόθεση H_0 και H_1, αντίστοιχα.

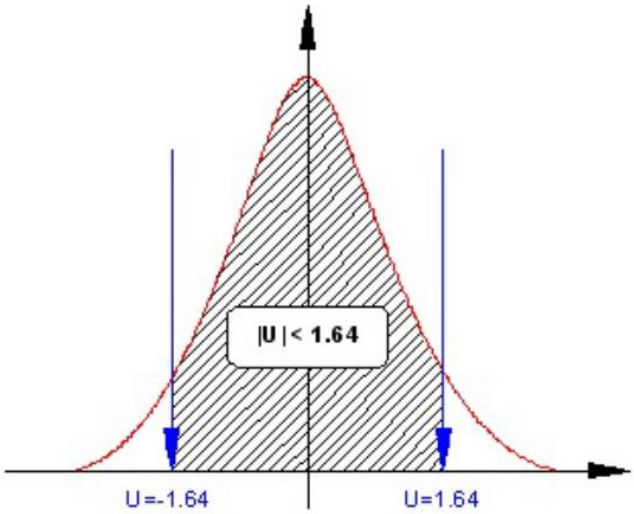
$$H_0: x_1 = x_2$$
$$H_1: x_1 \neq x_2$$

Πρόκειται επομένως για δίπλευρο στατιστικό έλεγχο. Με τη σχέση (Γ1) ορίζεται η μεταβλητή ελέγχου U, από την οποία παίρνει το όνομά του ο έλεγχος:

$$U = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\delta x_1^2 + \delta x_2^2}} \quad (\Gamma 1)$$

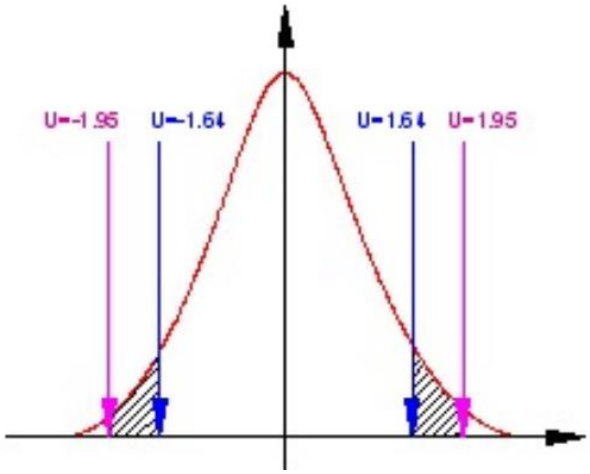
Η μεταβλητή U ακολουθεί την κανονική κατανομή [0,1]. Επομένως:

- αν $|U| \leq 1.64$ οι δύο τιμές δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (Εικόνα Γ1)



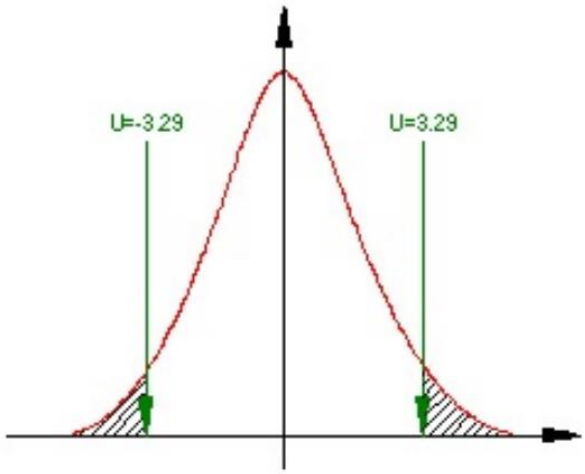
Εικόνα Γ1. Στατιστικός έλεγχος U, |U| ≤1.64

- αν $1.64 < |U| \leq 1.95$ οι δύο μετρήσεις πιθανώς δε διαφέρουν σημαντικά από την τιμή αναφοράς (Εικόνα Γ2)



Εικόνα Γ2. Στατιστικός έλεγχος U, 1.64 < |U| ≤ 1.95

- αν 1.95 ≤ |U| ≤ 2.58 δεν είναι σαφές αν οι δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά
- αν 2.58 ≤ |U| ≤ 3.29 οι δύο μετρήσεις πιθανώς διαφέρουν σημαντικά
- αν |U| > 3.29 οι δύο μετρήσεις διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (Εικόνα Γ3)



Εικόνα Γ3. Στατιστικός έλεγχος U, |U| > 3.29

Για λόγους απλότητας στις περισσότερες εφαρμογές της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε ότι η μηδενική υπόθεση του στατιστικού ελέγχου γίνεται αποδεκτή όταν |U|≤ 1.96 και απορρίπτεται όταν |U| ≥ 2.58. Σε κάθε άλλη περίπτωση, ο έλεγχος τοποθετείται στην περιοχή αβεβαιότητας και δεν μπορεί να προκύψει σαφές συμπέρασμα για τις συγκρινόμενες τιμές.

Γ2. Σταθμισμένη μέση τιμή

Περιγράφεται σε αυτό το σημείο η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών, δηλαδή η σταθμισμένη μέση τιμή αυτών και η αντίστοιχη αβεβαιότητα [52].

Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν:

$$x_1 \pm \delta x_1,\ \ x_2 \pm \delta x_2, \dots, x_\iota \pm \delta x_\iota \qquad (\Gamma 2)$$

όπου:

$x_1, x_2, \dots, x_i$: οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους

$\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_i$: οι αντίστοιχες απόλυτες αβεβαιότητες

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή των x_i . Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά ορθή η χρήση της μέσης τιμής για την περιγραφή του συγκεκριμένου δείγματος, διότι λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξάρτητα από το σφάλμα που τις συνοδεύουν. Για να αποφευχθεί λοιπόν η απλοϊκή αυτή προσέγγιση, η «σταθμισμένη» μέση τιμή δίνεται από τη σχέση (Γ3):

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_i \cdot w_i)}{\sum w_i}, \quad w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2} \qquad (\Gamma 3)$$

όπου:

$\underline{w_i}$: συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της απόκλισης της κάθε τιμής

Η τυπική απόκλιση της σταθμισμένης μέσης τιμής θα δίνεται τότε από τη σχέση (Γ4):

$$\mathrm{var}(x) = \frac{1}{\sum w_i} \qquad (\Gamma 4)$$

Η var(x) καλείται και «εσωτερική διακύμανση», διότι συνυπολογίζει μόνο την αβεβαιότητα κάθε τιμής.

Αν χρειαστεί να ληφθεί υπόψη και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η εξωτερική διακύμανση, δηλαδή:

$$\mathrm{var}(x) = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})^2 \cdot w_i]}{\sum w_i} \qquad (\Gamma 5)$$

Από τις δύο αυτές προσεγγίσεις, επιλέγεται εκείνη με τη μεγαλύτερη τιμή στην αβεβαιότητα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υποεκτίμησης του σφάλματος. Ακολουθώντας λοιπόν την παραπάνω διαδικασία, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος των τιμών με την αντίστοιχη αβεβαιότητα, όπου αυτό χρειάζεται στην παρούσα εργασία. Επομένως, η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος, δίνεται στη σχέση (Γ6):

$$\bar{x} \pm \mathrm{var}(x) \qquad (\Gamma 6)$$

Γ3. Διάδοση σφαλμάτων και υπολογισμός αβεβαιότητας

Από τη θεωρία σφαλμάτων, η σχετική αβεβαιότητα σ(x) συνδέεται με την απόλυτη αβεβαιότητα δx μέσω της σχέσης (Γ7):

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\delta x}{\bar{x}} \qquad (\Gamma 7)$$

Σύμφωνα με τη διάδοση σφαλμάτων και υποθέτοντας κανονικές κατανομές για τα σφάλματα, η καλύτερη εκτίμηση για το σφάλμα ενός μεγέθους f (u, v, ω, ...) δίνεται από τη σχέση (Γ8), δηλαδή ορίζεται μέσω των μερικών παραγώγων του μεγέθους f ως προς τα μεγέθη από τα οποία εξαρτάται και από τις αντίστοιχες απόλυτες αβεβαιότητες των μεγεθών αυτών.

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial u} \cdot \delta u\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \cdot \delta v\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \omega} \cdot \delta \omega\right)^2 + \cdots} \qquad (\Gamma 8)$$

Η σχέση (Γ8) απλοποιείται στην περίπτωση που η f είναι άθροισμα άλλων μεγεθών ή γινόμενο, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

- f (u, v) = u + v: $\delta f = \sqrt{(\delta u)^2 + (\delta v)^2} \qquad (\Gamma 9)$

- f (u, v) = u · v: $\delta f = \bar{u}\,\bar{v}\sqrt{\left(\frac{\delta u}{\bar{u}}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\bar{v}}\right)^2} \;\Rightarrow\; \sigma(f) = \sqrt{\sigma(u)^2 + \sigma(v)^2} \qquad (\Gamma 10)$

Προφανώς οι δύο παραπάνω περιπτώσεις γενικεύονται και για περισσότερες από 2 μεταβλητές και τα μεγέθη που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εμπίπτουν είτε στην μία είτε στην άλλη περίπτωση που περιγράφονται από τις σχέσεις (Γ9) και (Γ10).