



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Διπλωματική εργασία στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Ιατρικής Φυσικής –
Ακτινοφυσικής του τμήματος Ιατρικής Πανεπιστημίου Αθηνών

**ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ
ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ
ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Σαλπαδήμος Νικόλαος

A.M. 20181070

Επιβλέποντες:

Σειμένης Ιωάννης

Ποτηριάδης Κωνσταντίνος

Καρφόπουλος Κωνσταντίνος

Αθήνα 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σεϊμένη για την συγκατάθεσή του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Η βοήθεια και οι συμβουλές του ήταν καταλυτικές.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ποτηριάδη, για την εμπιστοσύνη και το ενδιαφέρον που μου επέδειξε, καθώς και τις καίριες υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Καρφόπουλο, χωρίς τη συμβολή του οποίου δε θα ήταν δυνατή η περαίωση της εργασίας. Μέσω της άψογης συνεργασίας μαζί του, των επεξηγήσεών του και της συνεχούς καθοδήγησής του αυξήθηκε σημαντικά το γνωστικό μου επίπεδο και καλλιεργήθηκε ο τρόπος σκέψης μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα υπόλοιπα μέλη του τμήματος ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος για τις υποδείξεις τους και κυρίως για το φιλικό περιβάλλον που μου προσέφεραν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΤΕΧΝΙΚΗ Γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ.....	4
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	5
2.2.1 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ	7
2.2.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.....	8
2.2.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ.....	10
2.2.4 ΨΥΞΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ.....	12
2.2.5 ΣΧΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ	13
2.2.6 Η ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΕΑΕ.....	13
2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ.....	14
2.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ	17
2.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	19
2.5.1 ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	19
2.5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΚΟΡΥΦΗΣ	21
2.5.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ	24
2.5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	29
2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	37
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	38
3.1 ΚΩΔΙΚΑΣ RENELOPE	38
3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
3.1.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ.....	39
3.1.3 ΚΥΡΙΩΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	40
3.1.4 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ RENMAIN	41
3.1.5 ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ RENMAIN	44
3.1.6 ΧΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ.....	45
3.1.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ.....	47
3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΩΔΙΚΑ RENELOPE	49
3.2.1 ΘΕΤΟΝΤΑΣ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	49
3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	50
3.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	52
3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	56

3.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΑΘΙΟΥ ΠΑΛΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	56
3.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	58
3.5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ	58
3.5.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΗΣΤΗ	61
3.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΕΚΡΩΝ ΖΩΝΩΝ	61
3.7 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΠΑΧΩΝ ΝΕΚΡΩΝ ΖΩΝΩΝ	63
3.8 ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	77
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ	79
4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΛΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	79
4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	79
4.1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	80
4.1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ 0.05 g/cc ΠΑΛΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΟΓΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ 260mL	98
4.1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ 3 g/cc ΠΑΛΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΟΓΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ 100mL	104
4.1.4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	107
4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΝΕΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΥΑΘΙΟΥ	111
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	111
4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	112
4.2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΥΑΘΙΟΥ.....	115
4.2.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	116
4.2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	118
4.2.6 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΥΑΘΙΟΥ.....	150
4.2.7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	154
5. ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΑΓΝΩΣΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	156
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	156
5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΗΡΓΕ	157
5.3 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	159
5.4 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	161
5.4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	162
5.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	164
5.4.3 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ.....	166
5.5 ΕΞΑΚΡΙΒΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ	167
6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ	170
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	173

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 Πιστοποιητικά πηγών βαθμονόμησης.....	173
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 Πιστοποιητικό ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου σχετικής απόδοσης 70%	232
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 Καμπύλες πειραματικής βαθμονόμησης παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου	233
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 Αναλύσεις μετρήσεων δείγματος Procorad 2017-C και ελάσματος χαλκού	241
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	248

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης με ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου σχετικής απόδοσης 70%, που είναι εγκατεστημένη στο τμήμα ραδιενέργειας περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ) της ΕΕΑΕ. Η συγκεκριμένη ανιχνευτική διάταξη χρησιμοποιείται για τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων κυρίως περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος, στο πλαίσιο του εθνικού προγράμματος εποπτείας της ραδιενέργειας περιβάλλοντος.

Οι μετρήσεις στην διάταξη αυτή πραγματοποιούνταν, μέχρι πρότινος, σε συγκεκριμένη γεωμετρία πηγών, η οποία στο εξής θα αναφέρεται ως παλαιά γεωμετρία κυαθίου. Δεδομένου ότι σχεδιάζεται η αντικατάστασή της με νέα – καινούρια γεωμετρία κυαθίου – η κατ' επέκταση μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των προς μελέτη δειγμάτων απαιτεί την εκ νέου βαθμονόμηση του ανιχνευτικού συστήματος. Η εύρεση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για τη νέα γεωμετρία κυαθίου πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αξιοποιώντας τον κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE, καθώς και τη μέθοδο μεταφοράς απόδοσης.

Κατά τη διεξαγωγή των γ -φασματοσκοπικών αναλύσεων δειγμάτων η πλήρωση του κυαθίου νέας γεωμετρίας πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικούς όγκους : 205 mL και 100 mL. Έτσι, η ανιχνευτική διάταξη βαθμονομήθηκε για εννέα διαφορετικές πυκνότητες κυαθίου όγκου πλήρωσης 205 mL και έξι διαφορετικές πυκνότητες κυαθίου όγκου πλήρωσης και 100 mL. Το ενεργειακό φάσμα ενδιαφέροντος κάλυπτε τις πλέον συνηθισμένες ενέργειες στη γ -φασματοσκοπία, μεταξύ 46 keV και 1900 keV.

Η διπλωματική εργασία απαρτίζεται από έξι κεφάλαια, τα οποία αναλύονται συνοπτικά παρακάτω :

Στο **2^ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται εισαγωγή στη μέθοδο γ -φασματοσκοπίας. Περιγράφονται εκτενώς όλα τα απαραίτητα στοιχεία που απαρτίζουν μια διάταξη γ -φασματοσκοπίας και αναλύονται τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία τους. Ειδική μνεία γίνεται στη διάταξη που χρησιμοποιείται στο ΤΕΡΠ και η οποία αξιοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας. Εν συνεχεία, διετελέστηκαν όλες οι απαραίτητες προεργασίες πριν την προσομοίωση της νέας γεωμετρίας κυαθίου :

- ενεργειακή βαθμονόμηση. Προσδιορίστηκε σχέση η οποία εκφράζει την ενέργεια των ανιχνευόμενων φωτονίων συναρτήσει του καναλιού του φάσματος.
- βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας, μέσω της οποίας εκφράζεται το εύρος της κάθε φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων στα οποία αντιστοιχεί
- πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες πολυενεργειακές (46-1900 keV) πρότυπες πηγές του ΤΕΡΠ. Πρόκειται για πρότυπες πηγές στα κυάθια της «παλιάς γεωμετρίας» όγκου πλήρωσης 260 mL και 100 mL σε διαφορετικές πυκνότητες. Η πειραματική βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας μετρήσεις που δεν πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο **3^ο κεφάλαιο**, αρχικά περιγράφεται ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE, με τη χρήση του οποίου πραγματοποιούνται οι υπολογιστικές βαθμονομήσεις στη συγκεκριμένη εργασία. Στα πλαίσια εξοικείωσης με τον κώδικα μελετήθηκε και περιγράφεται ένα απλό παράδειγμα προσομοίωσης που αφορούσε την εύρεση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης του χαλκού για φωτόνια ενέργειας 662 keV.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της εξεταζόμενης ανιχνευτικής διάταξης η οποία απαιτεί τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εύρεση του πάχους των νεκρών ζωνών του ανιχνευτή. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στηρίζεται στη σύγκριση πειραματικών και αντίστοιχων υπολογιστικών τιμών της απόδοσης.

Στο **4^ο κεφάλαιο** και με δεδομένο το μοντέλο προσομοίωσης του ανιχνευτή, πραγματοποιείται η υπολογιστική βαθμονόμηση του ανιχνευτή, τόσο για την παλαιά όσο και για την καινούρια γεωμετρία κυαθίου. Σε ό,τι αφορά στη νέα γεωμετρία γίνεται εφαρμογή της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης. Η επικύρωση της βαθμονόμησης πραγματοποιείται με μέτρηση κατάλληλου δείγματος από άσκηση διασύγκρισης στην οποία συμμετείχε το ΤΕΡΠ κατά το παρελθόν.

Στο **5^ο κεφάλαιο** το μοντέλο του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια χαρακτηρισμού ελάσματος χαλκού, το οποίο εντοπίστηκε στον κύκλο ελέγχου

των παλαιών μετάλλων. Το έλασμα αρχικά μετρήθηκε στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου ενώ η απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος για τη γεωμετρία του ελάσματος προσδιορίστηκε με χρήση του κώδικα PENELOPE και τη μέθοδο μεταφοράς απόδοσης. Με αυτό τον τρόπο ταυτοποιήθηκε το ραδιενεργό ισότοπο στο δείγμα και υπολογίστηκε η ενεργότητά του.

Στο **6^ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια ανασκόπηση της εργασίας και παρατίθενται μια σειρά προτάσεων που αφορούν μελλοντικές μελέτες.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με 4 παραρτήματα, τα οποία συγκεντρώνουν μεταξύ άλλων τα πιστοποιητικά των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν, το πιστοποιητικό του ανιχνευτή και διαγράμματα βαθμονόμησης απόδοσης που αξιοποιήθηκαν ή παράχθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας.

2. ΤΕΧΝΙΚΗ Γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γ-φασματοσκοπία αποτελεί μία εκ των πιο διαδεδομένων μεθόδων ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης ραδιενεργών δειγμάτων. Επιτρέπει την ταυτοποίηση καθώς και τον προσδιορισμό της ενεργότητας ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Πρόκειται για μία μη καταστροφική τεχνική, η οποία επιτρέπει, με συνήθως σύντομη προετοιμασία του δείγματος, την ταυτόχρονη ανάλυση όλων των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στο δείγμα. Προφανώς η μέτρηση θα πρέπει να διαρκεί επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι αβεβαιότητες που εμπεριέχονται στην τεχνική. Ακόμη, καθιστά δυνατή την ανάλυση πάσης φύσεως δειγμάτων, ανεξαρτήτως κατάστασης (στερεά, υγρά ή αέρια) και σύστασης. (57, 62, 71)

Οι γ-ραδιενεργοί πυρήνες που μελετώνται στη γ-φασματοσκοπία είναι συνήθως πυρήνες με μεγάλο χρόνο ημιζωής, οι οποίοι εκπέμπουν ενέργειες από μερικά keV μέχρι 10 MeV. Ως επί των πλείστων, παράγουν γραμμικά φάσματα ακτινών-γ, δηλαδή τα φωτόνια εκπέμπονται σε διακριτές ενέργειες. Στα συνεχή φάσματα τα οποία παρατηρούνται στους τομείς της αστροφυσικής και της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων ανιχνεύονται πολύ υψηλότερες ενέργειες, ακόμη και άνω του 1 TeV. Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί ότι το ενεργειακό όριο μεταξύ ακτινών-X και ακτινών-γ είναι συχνά ασαφές. Οι ακτίνες-X συνήθως αναφέρονται σε υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία προέρχεται από αποδιεγέρσεις ατόμων και η ενέργειά της ενδέχεται να ξεπερνάει και τα 100 keV, ενώ φωτόνια χαμηλότερων ενεργειών που εκπέμπονται από πυρήνες συγκαταλέγονται στις ακτίνες γ. (57, 62, 71)

Η γ-φασματοσκοπία παρουσιάζει πληθώρα εφαρμογών σε τομείς όπως αυτούς του ελέγχου πυρηνικών εγκαταστάσεων, της ακτινοφυσικής, της πυρηνικής ιατρικής, της εποπτείας της ραδιενέργειας περιβάλλοντος, της επιστήμης υλικών, καθώς και στους τομείς των βιοεπιστημών και βιομηχανικών εφαρμογών ραδιοϊσοτόπων. (57, 62, 71)

2.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

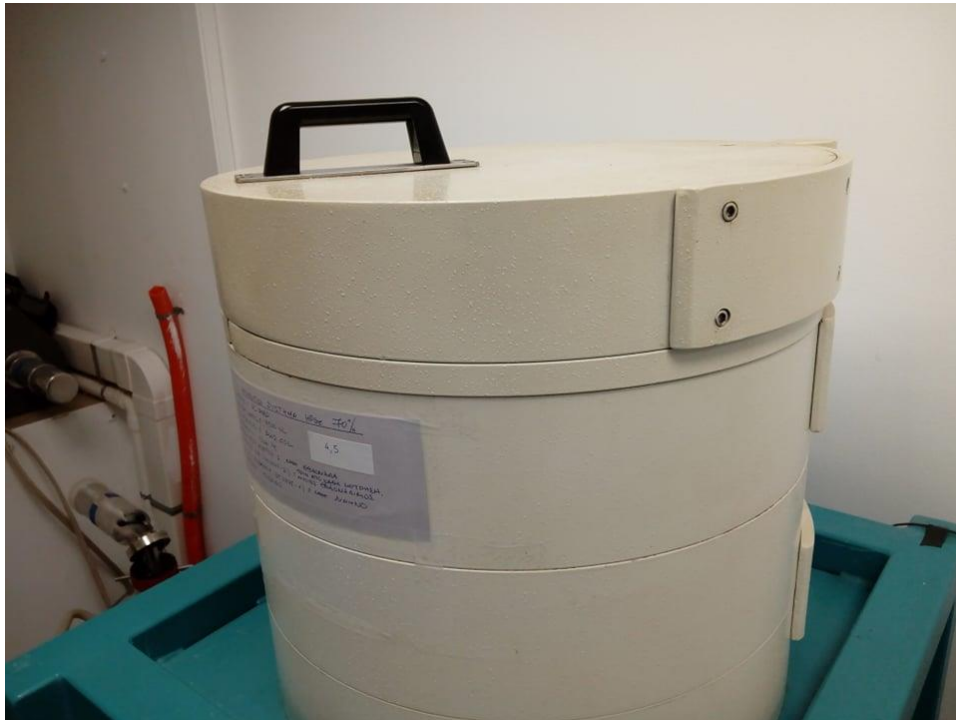
Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση βασίζεται στην κατάλληλη επεξεργασία του ενεργειακού φάσματος το οποίο προκύπτει από τα φωτόνια που ανιχνεύονται στο ανιχνευτικό μέσο – ανιχνευτής, μετά από την αποδιέγερση ραδιενεργών πυρήνων στο εξεταζόμενο δείγμα.

Μία τυπική ανιχνευτική διάταξη γ-φασματοσκοπίας απαρτίζεται από έναν ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου, τροφοδοτικό υψηλής τάσης, προενισχυτή (ο οποίος συχνά συμπεριλαμβάνεται ως μέρος του ανιχνευτή), ενισχυτή, μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC converter) και πολυκαναλικό αναλυτή (Multichannel Analyser, MCA). Συνοπτικά αναφέρεται ότι τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή, παράγοντας οπές και ηλεκτρόνια. Με εφαρμογή τάσης, τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από τον κρύσταλλο. Η προσανατολισμένη κίνηση των ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα) έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία παλμού, ο οποίος αρχικά ενισχύεται από τον προενισχυτή και εν συνεχεία ενισχύεται περαιτέρω και διαμορφώνεται στην κατάλληλη μορφή από τον ενισχυτή. Εν συνεχεία, η ένταση του παλμού μετατρέπεται σε αριθμητική τιμή από τον μετατροπέα ADC. Όλες οι αριθμητικές τιμές εισάγονται στον πολυκαναλικό αναλυτή (MCA) όπου και καταγράφονται. Τελικά, οι πληροφορίες οδηγούνται σε υπολογιστή, ο οποίος αποθηκεύει, εμφανίζει και επεξεργάζεται τα δεδομένα μέσω λογισμικών ανάλυσης φασμάτων. (5, 57)

Πλέον, με την πρόοδο της τεχνολογίας χρησιμοποιείται σε πολλά εργαστήρια, συμπεριλαμβανομένου και του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ) της ΕΕΑΕ, ένας διαφορετικός τύπος εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται εξοπλισμός επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSP ή DSA), ο οποίος αντικαθιστά τον ενισχυτή, το ADC και το MCA. Το DSA εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες με το αναλογικό σύστημα, με τη διαφορά ότι τις εφαρμόζει στη ψηφιακή μορφή του παλμού από τον προενισχυτή. (5, 23, 57)

Το DSA επεξεργάζεται και φιλτράρει τα σήματα που δέχεται χρησιμοποιώντας ταχύρρυθμους ψηφιακούς αριθμητικούς υπολογισμούς.

Αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα του DSA έναντι των παλαιών αναλογικών μεθόδων επεξεργασίας. Η επεξεργασία του σήματος μέσω αριθμητικών υπολογισμών προσφέρει στο χρήστη πλήθος δυνατοτήτων κατά την επιλογή των παραμέτρων μορφοποίησης του παλμού. Ακόμη, η ταχύτητα των διεργασιών ψηφιοποίησης και φιλτραρίσματος είναι ταχύτερες, επομένως το DSA διαθέτει μεγαλύτερη διεκπεραιωτική ικανότητα σε σχέση με τα αναλογικά συστήματα. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι το DSA παρέχει μεγαλύτερη σταθερότητα θερμοκρασίας, αφού μόλις ο παλμός ψηφιοποιηθεί, όλες οι μετέπειτα διεργασίες είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας. Τέλος, παρατηρούνται πολύ μικρότερες εναλλαγές στην διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή υπό συνθήκες υψηλού ρυθμού κρούσεων καθώς και σταθερότητα της θέσης των φωτοκορυφών. (23, 57)



Εικόνα 2.1 Φωτογραφία ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 70% του ΤΕΠΠ.



Εικόνα 2.2 Φωτογραφία εξοπλισμού επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSA).

2.2.1 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ

Ο ανιχνευτής αποτελεί το αναπόσπαστο κομμάτι μιας διάταξης γ-φασματοσκοπίας. Όπως είναι γνωστό, τα φωτόνια δεν ανιχνεύονται άμεσα από τον ανιχνευτή, δεδομένου ότι δεν είναι φορτισμένα. Έτσι, η ανίχνευση ακτινοβολίας-γ βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούν τα φωτόνια, μέσω των οποίων μεταφέρουν όλη ή μέρος της ενέργειάς του σε ηλεκτρόνια του μέσου.

Μόνο τα ηλεκτρόνια μπορούν να προσφέρουν πληροφορία σχετικά τις προσπίπτουσες ακτίνες-γ. Αυτά τα ηλεκτρόνια μπορούν να αποκτήσουν μέγιστη δυνατή ενέργεια ίση με την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου. Χάνουν ενέργεια μέσω διαδοχικών ιονισμών και διεγέρσεων των ατόμων της ύλης καθώς και λόγω πέδησης και έτσι παράγεται το σήμα στον ανιχνευτή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι εμφανές ότι ένας ανιχνευτής ακτινοβολίας-γ οφείλει να διεκπεραιώνει δύο διακριτές λειτουργίες. Αρχικά, πρέπει να δρα ως ένα μέσο μετατροπής, στο οποίο κάθε προσπίπτον φωτόνιο πρέπει να έχει μια αρκετά μεγάλη ενεργό διατομή αλληλεπίδρασης ώστε να παραχθούν ένα ή

παραπάνω ηλεκτρόνια. Επίσης οφείλει να ανιχνεύει τα δευτερογενή αυτά ηλεκτρόνια που παρήχθησαν. Όπως αναφέρεται εκτενώς στην εισαγωγή του κεφαλαίου 3.3, το μέγεθος του ανιχνευτή επηρεάζει τις παραπάνω λειτουργίες του. Σε ανιχνευτές πολύ μικρών διαστάσεων, όπου το μέγεθος τους είναι μικρότερο από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των δευτερογενών σωματιδίων, οι απώλειες στην ανίχνευσή τους είναι σημαντικές. Σε ανιχνευτές πολύ μεγάλων διαστάσεων το σήμα που παράγεται από τον ανιχνευτή κατά την απορρόφηση ενός φωτονίου είναι ανεξάρτητο των αλληλεπιδράσεων που πραγματοποιήθηκαν μέχρι το φωτόνιο να απορροφηθεί πλήρως. Επομένως προτιμώνται ανιχνευτές μεσαίου μεγέθους. **(38)**

2.2.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη γ-φασματοσκοπία είναι οι ανιχνευτές ημιαγωγών. Προσφέρουν τη βέλτιστη δυνατή διακριτική ικανότητα σε σχέση με τους αντίστοιχους ανιχνευτές σπινθηρισμού. Αποτελούνται από τρεις ζώνες. Η ζώνη σθένους αντιστοιχεί σε ηλεκτρόνια εξωτερικού κελύφους τα οποία είναι δεσμευμένα σε συγκεκριμένα κρυσταλλικά πλέγματα. Η ζώνη μεταβίβασης αντιστοιχεί σε ηλεκτρόνια τα οποία είναι ελεύθερα να κινούνται μέσα στον κρύσταλλο. Αυτά τα ηλεκτρόνια συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Μεταξύ των δύο ζωνών υπάρχει μικρό ενεργειακό χάσμα, έτσι ώστε το υλικό να δρα ως ημιαγωγός. Μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να δρα ως μονωτής, ενώ μικρότερο ενεργειακό χάσμα ή αλληλοεπικάλυψη των δύο ζωνών καθιστά το υλικό αγωγό. **(38)**

Στους ημιαγωγούς με θερμοκρασία 0 K, δηλαδή απουσία θερμικής διέγερσης, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται στη ζώνη σθένους και σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων του πλέγματος. Σε κανονικές θερμοκρασίες, η θερμική ενέργεια διεγείρει το πρώτο ηλεκτρόνιο ζώνης σθένους στην ζώνη μεταβίβασης, αφήνοντας έτσι μια οπή στην αρχική του θέση. Τότε, ένα δεύτερο γειτονικό ηλεκτρόνιο σθένους θα πάρει τη θέση του πρώτου, ένα τρίτο θα καταλάβει την παλιά θέση του δεύτερου, κ.ο.κ. Η οπή επομένως κινείται κατά μήκος του κρυστάλλου, δρώντας ως φορέας θετικού

φορτίου. Έτσι, σε έναν ημιαγωγό δημιουργείται ρεύμα με δυο τρόπους: Την κίνηση ελευθέρων ηλεκτρονίων στη ζώνη μεταβίβασης και την κίνηση της οπής στη ζώνη σθένους.

Τα υλικά των ημιαγωγών, περιέχουν προσμίξεις ή κρυσταλλικές ατέλειες, καθιστώντας πιο περίπλοκη τη διαδικασία της ανίχνευσης των φωτονίων. Προσμίξεις υλικών με 3 ηλεκτρόνια σθένους, π.χ. Βορίου (B), οδηγούν στην κατάληψη κάποιων θέσεων της κρυσταλλικής δομής από άτομα 3σθενούς πρόσμιξης, αντί ατόμων 4σθενούς, π.χ. Ge. Σε καθεμία από αυτές τις θέσεις υπάρχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους. Τέτοιες προσμίξεις ονομάζονται δέκτες. Η πιθανότητα πλήρωσης της οπής από θερμικά διεγερμένα ηλεκτρόνια είναι μεγάλη, αφήνοντας πίσω της οπές. Έτσι, για κάθε δέκτη δημιουργείται μία οπή. Όπως αναφέρθηκε, η ροή των οπών καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου και τέτοιοι ημιαγωγοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου p. Αντίστοιχα προσμίξεις 5σθενούς στοιχείου, π.χ. φωσφόρου (P), προκαλούν περίσσεια ενός ηλεκτρονίου του οποίου η στάθμη είναι πολύ κοντά στη στάθμη αγωγιμότητας. Τέτοιες προσμίξεις ονομάζονται δότες και συνεισφέρουν ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Οι αντίστοιχοι ημιαγωγοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου- n και η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τα ηλεκτρόνια και σε πολύ μικρότερο βαθμό από τις οπές.

Οι ανιχνευτές ημιαγωγών έχουν μεγάλη πυκνότητα, επομένως και μεγάλη ισχύ ανάλυσης (stopping power). Μετά από τη διέλευση/αλληλεπίδραση ακτινοβολίας ιονισμού, δημιουργείται ζεύγος οπών ηλεκτρονίων, καθώς κάποια ηλεκτρόνια, έχοντας διεγερθεί μεταπηδούν στη ζώνη μεταβίβασης αφήνοντας ίσο αριθμό οπών στη ζώνη σθένους. Σε έναν ημιαγωγό μεγάλης καθαρότητας, ο οποίος αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ενδογενής ημιαγωγός, η ισορροπία που επέρχεται από τη θερμική διέγερση των ηλεκτρονίων και τη μετέπειτα επανασύνδεσή τους, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στο υλικό ίσου αριθμού ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια που είναι ελεύθερα να κινηθούν στη ζώνη μεταβίβασης καθώς και οι οπές μεταφέρονται. Φτάνουν τελικά στα ηλεκτρόδια όπου δίνουν παλμό που μετριέται. Όπως είναι προφανές, οι οπές ταξιδεύουν αντίθετα από τα ηλεκτρόνια. Το ύψος του παλμού που μετριέται

επιτρέπει τον προσδιορισμό της ενέργειας που εναποτέθηκε στον ανιχνευτή. Στους ανιχνευτές ημιαγωγών τύπου p στους οποίους συγκαταλέγεται και ο ανιχνευτής του τμήματος ραδιενέργειας περιβάλλοντος της ΕΕΑΕ, το πλήθος των φορέων που καθορίζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι οι οπές. Έτσι, μετριέται τελικά ο θετικός παλμός από τις οπές. **(38, 74)**

Ιδιαίτερη μνεία οφείλει να γίνει στο γεγονός ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής είναι σαφώς μικρότερη από την ενέργεια που απαιτείται για να παραχθεί ένα ζεύγος ιόντων σε ανιχνευτή αερίου καθώς και μικρότερη από την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ενός φωτοηλεκτρονίου σε ανιχνευτή σπινθηρισμού. Άμεσο αποτέλεσμα τούτου είναι ο μεγαλύτερος αριθμός παραγόμενων φορέων στους ανιχνευτές ημιαγωγών. Κατά συνέπεια, η στατιστική διακύμανση του ύψους του παλμού είναι μικρότερη, κάτι που επιφέρει υψηλότερη διακριτική ικανότητα. **(38)**

Ακόμη, η ταχύτητα των ηλεκτρονίων μέσα στον ημιαγωγό οδηγεί σε γρήγορη συλλογή του πλήθους των παραγόμενων φορέων και σχηματισμό του αντίστοιχου παλμού. Ως αποτέλεσμα, οι ανιχνευτές ημιαγωγών αποκτούν πολύ καλή χρονική διακριτική ικανότητα. **(38, 74)**

2.2.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ

Μερικοί από τους πιο διαδεδομένους ανιχνευτές ημιαγωγών αποτελούν οι ανιχνευτές γερμανίου και οι ανιχνευτές πυριτίου. Συχνά, προτιμώνται οι ανιχνευτές γερμανίου διότι επιτρέπουν τη δημιουργία μεγαλύτερης ζώνης ανίχνευσης, μερικών εκατοστών. Έτσι καθιστούν δυνατή την πλήρη απορρόφηση ακτινών-γ μερικών MeV. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας, οι οποίοι αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία είτε ως ενδογενείς ανιχνευτές γερμανίου είτε ως ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGE). **(38, 57)**

Όταν αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά οι ανιχνευτές γερμανίου, υπήρχε η δυνατότητα κατασκευής μονάχα πολύ μικρών διαστάσεων κρυστάλλων, οι οποίοι λόγω έλλειψης καθαρότητας, δεν ήταν κατάλληλοι για χρήση. Οι

παραμένουσες προσμίξεις στον κρύσταλλο είχαν ως αποτέλεσμα την παγίδευση ηλεκτρονίων και οπών και τη σημαντική μείωση της απόδοσης του ανιχνευτή. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν από τους κατασκευαστές δύο λύσεις ώστε οι ανιχνευτές να καθιστούν λειτουργικοί.

Αρχικά δοκιμάστηκε ο εμπλουτισμός των κρυστάλλων με δότες, και συγκεκριμένα ιόντα λιθίου, αφού έχει ολοκληρωθεί η ανάπτυξη του κρυστάλλου. Έτσι αποκαθίσταται ισορροπία μεταξύ του αριθμού δοτών και αποδεκτών. Με αυτό τον τρόπο παράγεται η εγγενής περιοχή μέσω της οποίας τα ηλεκτρόνια και οι οπές καταλήγουν τελικά στα ηλεκτρόδια. Οι ανιχνευτές αυτοί ονομάστηκαν ανιχνευτές διάχυσης λιθίου, Ge(Li). **(38, 72, 74)**

Εν συνεχεία αναπτύχθηκαν περαιτέρω οι τεχνικές καθαρισμού των κρυστάλλων γερμανίου, οι οποίες επιτρέπουν τη δημιουργία υπερκαθάρων ανιχνευτών γερμανίου, γνωστούς ως HPGE. Ακόμη, χρησιμοποιείται πλέον η μέθοδος διάχυσης ιόντων λιθίου για την κατασκευή της τύπου-n ωμικής επαφής και η μέθοδος έγχυσης ιόντων βορείου για την κατασκευή της τύπου-p ωμικής επαφής. Το πάχος των επαφών τύπου-p και τύπου-n δημιουργεί νεκρές ζώνες περιμετρικά του κρυστάλλου. Όπως αναφέρεται εκτενώς στο κεφάλαιο 3.3 η ενέργεια που εναποτίθεται από τις αλληλεπιδράσεις φωτονίων μέσα σε αυτές τις ζώνες δεν είναι δυνατόν να ανιχνευθεί. Το τυπικό πάχος νεκρών ζωνών αντιστοιχεί σε μερικές εκατοντάδες μm για ένα στρώμα διάχυσης λιθίου (επαφή τύπου-n) και σε μερικές δεκάδες μm για στρώμα εμφύτευσης βορίου (επαφή τύπου-p). Ως αποτέλεσμα μειώνεται η απόδοση του ανιχνευτή, κυρίως για ενέργειες ανίχνευσης μικρότερες των 200 keV. Έτσι, έχει αναπτυχθεί πλέον η τεχνική εμφύτευσης ιόντων για τη δημιουργία των επαφών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νεκρών ζωνών μονάχα λίγων δεκάδων μm, βελτιώνοντας την απόδοση του ανιχνευτή στις χαμηλές ενέργειες. **(38, 74)**

Οι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου προτιμώνται σε σχέση με τους ανιχνευτές διάχυσης λιθίου διότι είναι πιο φιλικό στη χρήση. Οι ανιχνευτές διάχυσης λιθίου απαιτούν συνεχή διατήρηση σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ οι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου δύναται να διατηρηθούν σε θερμοκρασία δωματίου μεταξύ των χρήσεων.

2.2.4 ΨΥΞΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

Οι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου οφείλουν να λειτουργούν σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών διότι λόγω του μικρού ενεργειακού χάσματος μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης μεταβίβασης παρατηρούνται μεγάλες διαρροές λόγω θερμικής διέγερσης σε θερμοκρασίες δωματίου. Δηλαδή, είναι δυνατόν λόγω θερμικής διέγερσης, να μεταπηδήσουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη μεταβίβασης χωρίς την ύπαρξη ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται θόρυβος, ο οποίος οδηγεί στη μείωση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή. **(38, 74)**

Προς αποφυγή του θορύβου που προέρχεται από θερμικές διεγέρσεις ηλεκτρονίων, ο ανιχνευτής διατηρείται σε θερμοκρασία 77 K, με τη χρήση ενός μονωμένου δοχείου με υγρό άζωτο, το οποίο βρίσκεται σε θερμική επαφή με τον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής τοποθετείται μέσα σε κρυστάτη και βρίσκεται σε συνθήκες κενού, έτσι ώστε να μην υπάρχει θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του κρυστάλλου και του αέρα που τον περιβάλλει. Οι ανιχνευτές γερμανίου διαθέτουν ένα σύστημα ασφαλείας, τα οποίο δεν επιτρέπει την εφαρμογή υψηλής τάσης εάν ο ανιχνευτής δεν έχει φτάσει σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι, προστατεύεται η είσοδος του ηλεκτρονικού κυκλώματος του προενισχυτή από εξαιρετικά μεγάλα ρεύματα διαρροών. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί συστήματα ψύξεως τα οποία προσφέρουν αυτόματη ανακύκλωση του υγρού αζώτου, μειώνοντας έτσι σημαντικά το λειτουργικό κόστος. **(38, 74)**



Εικόνα 2.3 Φωτογραφία ανιχνευτή και δοχείου αζώτου.

2.2.5 ΣΧΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

Οι ανιχνευτές γερμανίου είναι δυνατόν να κατασκευαστούν σε πληθώρα σχημάτων και μεγεθών, βάσει του μεγίστου δυνατού μεγέθους υλικού ημιαγωγού και του μεγίστου δυνατού πάχους της ενδογενούς περιοχής. Ωστόσο, λόγω της απαραίτητης εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον κρύσταλλο χρησιμοποιούνται κυρίως ανιχνευτές δύο ειδών, ο επίπεδος και ο ομοαξονικός ανιχνευτής. Υπάρχουν διαφορετικά είδη ομοαξονικών ανιχνευτών, ανάλογα με το σχήμα καθώς και τη θέση της οπής. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα είδη αποτελούν ο ομοαξονικός ανοιχτού τύπου, κλειστού τύπου και σχήματος πηγαδιού. (38, 72)

2.2.6 Η ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΕΑΕ.

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκε από την εταιρία Cranberra (Mirion). Πρόκειται για ανιχνευτή ημιαγωγό, υπερκαθαρού γερμανίου, τύπου-p. Το μοντέλο του ανιχνευτή είναι GC7020 και ο σειριακός του αριθμός b99113. Ακόμη, ο ανιχνευτής είναι ομοαξονικός ανοιχτού τύπου. Η βέλτιστη τάση λειτουργίας του είναι τα 4000 V, ενώ η

τάση αποκοπής του αντιστοιχεί στα 3000 V. Η διαρροή ρεύματος κατά την εφαρμογή της βέλτιστης τάσης λειτουργίας του ανιχνευτή αντιστοιχεί σε 0.01 nA. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από στέγαση αλουμινίου καθώς και από θωράκιση τριών στρωμάτων: χαλκού, μολύβδου και χάλυβα.

Ο κρυστάτης του ανιχνευτή είναι κατακόρυφος, τύπου 2002CSL και είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο. Μέσα στον κρυστάτη συμπεριλαμβάνεται και προενισχυτής, μοντέλου 7500SL, ώστε η ψύξη να βελτιστοποιεί τη λειτουργία του. Τέλος, ο κρυστάτης είναι εμβαπτισμένος σε δοχείου υγρού αζώτου Dewar. Σύμφωνα με το πιστοποιητικό του ανιχνευτή, η σχετική απόδοση του είναι 70% και η διακριτική ικανότητα του είναι:

– FWHM: 1.05 keV για ενέργεια φωτονίων 122 keV.

– FWHM: 1.96 keV και FWTM: 3.66 keV για ενέργεια φωτονίων 1332 keV.

Το πιστοποιητικό του ανιχνευτή στο οποίο παρατίθενται όλες οι σχετικές πληροφορίες βρίσκεται στο Παράρτημα 2. Οι διαστάσεις του ανιχνευτή καθώς και αναλυτική περιγραφή της θωράκισής του συμπεριλαμβάνονται στο κεφάλαιο 3.5.

2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Η διαδικασία της ενεργειακής βαθμονόμησης βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό σχέσης, η οποία αντιστοιχεί κάθε κανάλι του πολυκαναλικού αναλυτή σε μια ενέργεια φωτονίων. Πρόκειται συνήθως περί μίας πρώτου ή δευτέρου βαθμού πολυωνυμικής σχέσης, αναλόγως με την ακρίβεια που επιθυμείται να επιτευχθεί. **(43, 57)**

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο πρώτης τάξης. Έτσι, η ενέργεια του φάσματος συνδέθηκε με τον αριθμό καναλιού σύμφωνα με τη γραμμική σχέση: $Energy = \alpha \cdot Channel + \beta$. Το α είναι η κλίση της ευθείας (ενεργειακή κλίμακα) και μετριέται σε keV/channel ενώ το β είναι το σημείο τομής με τον κατακόρυφο άξονα.

Με σκοπό την εύρεση της σχέσης ενέργειας ανά κανάλι είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των δύο αγνώστων ποσοτήτων α και β . Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πρότυπη πηγή, η οποία εμπεριέχει ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν σε πληθώρα διαφορετικών ενεργειών, καλύπτοντας το επιθυμητό φάσμα ενεργειών που μελετάται. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πρότυπη πηγή η οποία εκπέμπει πληθώρα φωτονίων διαφορετικών ενεργειών, όπως το Eu-152. Στην περίπτωση που η ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος είναι μέχρι τα 2000 keV συνηθίζεται η χρήση ενεργειακής κλίμακας περίπου 0.25 keV/channel, η οποία αναδεικνύει περισσότερο τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτικού συστήματος. Αντίθετα, στην περίπτωση της φασματοσκοπίας χαμηλών ενεργειών, συχνά αρκεί ενεργειακή κλίμακα της τάξης των 0.05 keV/channel. Επομένως, στην παρούσα εργασία αναμένεται μια τιμή ενεργειακής κλίμακας κοντά στα 0.25 keV/channel. **(38)**

Χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πηγή η οποία περιείχε Am-241 (59.54 keV), Cs-137 (661.62 keV) και Co-60 (1173.2 και 1332.3 keV), έτσι ώστε να καλύπτεται επαρκώς το ενεργειακό φάσμα από τα 50 μέχρι τα 2000 keV. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθεται ο αριθμός του καναλιού στο φάσμα και η ενέργεια στην οποία αντιστοιχεί. Ακολουθεί η εξαγόμενη γραφική παράσταση, εκ της οποίας προκύπτει η ζητούμενη σχέση.

Ενέργεια	Αριθμός Καναλιού
59.54	239
661.62	2648
1173.2	4695
1332.3	5333

Πίνακας 2.1 Ενέργεια εναπόθεσης φωτονίων στον ανιχνευτή συναρτήσει αριθμού διαύλων που αντιστοιχεί στο φάσμα.



Διάγραμμα 2.1 Βαθμονόμηση ενέργειας ανιχνευτικής διάταξης.

Ως εκ τούτου, η σχέση που συνδέει την ενέργεια που εναποτίθεται στον ανιχνευτή με το κανάλι που αποτυπώνεται στο φάσμα, ως

$$\text{Ενέργεια} = 0.2499 \cdot \text{Αριθμός Καναλιού} - 0.1239 \quad (2.1)$$

Καθίσταται πλέον δυνατός ο προσδιορισμός της ενέργειας οποιασδήποτε φωτοκορυφής στο φάσμα καθώς και η ταυτοποίηση άγνωστων στοιχείων βάση της ενέργειας των φωτονίων που παράγονται.

Ένας από τους ελέγχους ποιότητας που πρέπει να διενεργείται και σχετίζεται με τη σταθερότητα των ηλεκτρονικών του συστήματος, αφορά στην ενεργειακή βαθμονόμηση της διάταξης και πιο συγκεκριμένα, στις πιθανώς παρατηρούμενες μεταβολές των τιμών των συντελεστών της σχέσης (2.1). Ο έλεγχος πρέπει να είναι συστηματικός, να στηρίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια πχ. αποδεκτή απόκλιση από την ονομαστική ενέργεια, και να λαμβάνονται αν απαιτείται, οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες πχ. μικρορυθμίσεις στην ενίσχυση.

2.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Η βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας, η οποία συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως βαθμονόμηση εύρους ημίσειας ύψους FWHM (Full Width Half Maximum), αποσκοπεί στην εύρεση μιας συνάρτησης η οποία περιγράφει το πάχος / εύρος της φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειάς της. (5, 38, 57)

Όταν μελετάται μια μονοενεργειακή πηγή, αναμένεται θεωρητικά όλοι οι παλμοί που προέρχονται από γεγονότα πλήρους απορρόφησης να έχουν το ίδιο ύψος. Στην πράξη, οι διαφορετικές τιμές ύψους κατανομούνται σε ένα μικρό αριθμό καναλιών. Αυτό οφείλεται σε μεγαλύτερες στατιστικές διακυμάνσεις στον αριθμό των φορέων που δημιουργούνται στον ημιαγωγό κατά την αλληλεπίδρασή του με την ακτινοβολία και κατ' επέκταση στις διακυμάνσεις μεταξύ των παλμών. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας του ανιχνευτή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, σε πηγές θορύβου που πηγάζουν από την ανιχνευτική διάταξη καθώς και σε στατιστικό θόρυβο που προκύπτει από την ίδια τη φύση του παλμού που μετρείται. (5, 38)

Το πλήρες εύρος ημίσειας ύψους (FWHM) ορίζεται, όπως προκύπτει και από την ονομασία του, ως το πάχος της φωτοκορυφής (κατανομής) στο επίπεδο που αντιστοιχεί στο μισό ύψος της φωτοκορυφής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρεσή του, αποτελεί η αφαίρεση του συνεχούς υποστρώματος από την επιφάνεια της φωτοκορυφής, έτσι ώστε το ύψος που επιλέγεται να αποδίδεται μονάχα στα γεγονότα που είναι υπεύθυνα για το σχηματισμό της φωτοκορυφής. Έτσι, το FWHM χρησιμοποιείται ως μέτρο της ενεργειακής «διασποράς» και μέσω αυτού υπολογίζεται η διακριτική ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης σύμφωνα με τη σχέση $R = \frac{FWHM}{E_0}$, όπου R η διακριτική ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης και E_0 η ενέργεια στην οποία αντιστοιχεί το κέντρο της φωτοκορυφής.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η σχέση που συνδέει το FWHM και την ενέργεια είναι μια σχέση της μορφής: $FWHM = a \cdot (E_0)^{-\frac{1}{2}} + \beta$, όπου a και β σταθερές. **(57)**

Κατά τη μέτρηση της πρότυπης πηγής που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την ενεργειακή βαθμονόμηση, το λογισμικό Genie2000 παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης του αριθμού καναλιών που αντιστοιχεί στο FWHM κάθε φωτοκορυφής. Η μετατροπή αριθμού καναλιών σε keV καθίσταται δυνατή με τη βοήθεια της σχέσης (2.1) που προέκυψε από την ενεργειακή βαθμονόμηση. Έτσι πραγματοποιείται η αντίστοιχη γραφική απεικόνιση FWHM (keV) συναρτήσει της ρίζας της ενέργειας. Μέσω της γραφικής παράστασης προσδιορίζεται η γραμμική σχέση η οποία συνδέει το πλήρες εύρος ημίσεως ύψους με τη ρίζα της ενέργειας.

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για εξακρίβωση και δεν παρατίθεται στην εργασία, καθώς η εξίσωση βαθμονόμησης του εύρους ημίσεως ύψους υπολογίζεται άμεσα από το λογισμικό Genie 2000 ως:

$$FWHM = 9.059 \cdot 10^{-1} keV + 3.321 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{E} \quad (2.2)$$

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι θεωρώντας τη δημιουργία κάθε φορέα (ηλεκτρόνια και οπές) ως μία διεργασία που ακολουθεί την κατανομή Poisson, μπορεί να εξαχθεί μία προσεγγιστική σχέση η οποία συνδέει τη διακριτική ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης μονάχα με τον αριθμό των φορέων. **(38)** Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η σχέση είναι η εξής:

$$R = 2.35/(N)^{-\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (2.3)$$

όπου R η διακριτική ικανότητα και N ο αριθμός των φορέων. **(5, 38)** Η σχέση (2.3) αναφέρεται για να καταστεί σαφές ότι με αύξηση του αριθμού των φορέων αναμένεται μείωση (άρα βελτίωση) της διακριτικής ικανότητας του συστήματος.

2.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων μιας ανιχνευτικής διάταξης είναι ένα μέτρο του πλήθους των παλμών που παράγονται στον εν λόγω ανιχνευτή για ένα συγκεκριμένο πλήθος ακτινών- γ που εκπέμπονται από μία πηγή. Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την χρηστικότητα του ανιχνευτή και για αυτό θεωρείται ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.

Χρησιμοποιούνται διάφορα μεγέθη για να εκφράσουν την απόδοση ενός ανιχνευτή, όπως η απόδοση φωτοκορυφής, η ολική απόδοση, η εσωτερική απόδοση, η σχετική απόδοση κ.ά. Κάθε ένα από τα παραπάνω μεγέθη εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους και περιγράφει με διαφορετικό τρόπο τη δυνατότητα ανίχνευσης φωτονίων από το ανιχνευτικό σύστημα. Παρακάτω αναλύονται οι πιο σημαντικές εκφράσεις απόδοσης που χρησιμοποιούνται στη γ -φασματοσκοπία.

Η απόδοση του ανιχνευτή, όπως αναδεικνύεται παρακάτω, εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων, τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, το προς ανάλυση δείγμα καθώς και από την ανιχνευτική διάταξη. **(38, 50, 74)**

2.5.1 ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

2.5.1.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΚΟΡΥΦΗΣ

Η απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency- eff_{peak}) αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους του ανιχνευτή στη γ -φασματοσκοπία. Ορίζεται ως ο λόγος του πλήθους των φωτονίων που αλληλεπιδρώντας με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή εναποθέτουν όλη τους την ενέργεια σε αυτόν, προς τα συνολικά φωτόνια της ενέργειας αυτής που εκπέμπονται από την πηγή. Συμβολίζεται ως ϵ . Πρακτικά, η απόδοση φωτοκορυφής, εκφράζει την ικανότητα του ανιχνευτή να ανιχνεύει ένα φωτόνιο με την πλήρη του ενέργεια. Τα φωτόνια των οποίων η ενέργεια ανιχνεύεται πλήρως, καταγράφονται στο ενεργειακό φάσμα, δημιουργώντας τις φωτοκορυφές (ή αιχμές πλήρους απορρόφησης), με μορφή Gaussian, δηλαδή κανονικής κατανομής. **(38, 50, 74)**

Επομένως, ο λόγος της επιφάνειας της φωτοκορυφής προς πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή εκφράζει την απόδοση

φωτοκορυφής. Φυσικά, με σκοπό την ορθή εκτίμηση της επιφάνειας της φωτοκορυφής, είναι αναγκαίο να αφαιρείται η επιφάνεια που οφείλεται στο συνεχές υπόστρωμα. Αυτό είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί αυτόματα με τη χρήση του λογισμικού Genie2000. Κατά την επεξεργασία των φωτοκορυφών, με το συγκεκριμένο λογισμικό, αναφέρεται το άθροισμα του εμβαδού της φωτοκορυφής και του υποβάθρου της (Original Area), το εμβαδόν υποβάθρου κάτω από την φωτοκορυφή (Ambient Background), καθώς και το «καθαρό» εμβαδόν φωτοκορυφής (Subtracted Area). Όπως αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο 5, η απόδοση φωτοκορυφής χρησιμοποιείται στον ποσοτικό προσδιορισμό ισοτόπων κατά την ανάλυση ενός δείγματος. (74)

2.5.1.2 ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η ολική απόδοση (eff_{tot}) ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού αριθμού – ανεξαρτήτως ενέργειας – γεγονότων που καταγράφονται από το ανιχνευτικό σύστημα και οφείλονται σε φωτόνια συγκεκριμένης αρχικής ενέργειας, προς το πλήθος των εκπεμπόμενων φωτονίων της ενέργειας αυτής από την πηγή. Εκφράζει την ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης να ανιχνεύσει έστω και ένα μέρος της ενέργειας ενός φωτονίου συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπεται από την πηγή. Επομένως, κατά την εύρεση της ολικής απόδοσης δε λαμβάνονται μόνο υπόψιν φωτόνια που αλληλεπίδρασαν εναποθέτοντας όλη την ενέργειά τους στον κρύσταλλο, αλλά και φωτόνια που αλληλεπίδρασαν αφήνοντας μέρος της ενέργειάς τους σε αυτόν. Έτσι, υπό τις ίδιες συνθήκες διεξαγωγής μετρήσεων, η ολική απόδοση είναι πάντα μεγαλύτερη από την απόδοση φωτοκορυφής. (38, 74) Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί ότι ολική απόδοση χρησιμοποιείται συχνά στη γ-φασματοσκοπία με σκοπό τον προσδιορισμό συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. (74) Τέλος, παρεμφερής είναι ο όρος της απόλυτης ολικής απόδοσης, ο οποίος αναφέρεται στο λόγο του συνολικού αριθμού κρούσεων που παράγει ο ανιχνευτής για φωτόνια όλων των ενεργειών προς το πλήθος των εκπεμπόμενων φωτονίων όλων των ενεργειών που προέρχονται από την πηγή. (50)

2.5.1.3 ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Ο όρος σχετική απόδοση αναφέρεται στην απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή σε σχέση με έναν ανιχνευτή αναφοράς. Ως ανιχνευτής αναφοράς

χρησιμοποιείται ανιχνευτής ιωδιούχου νατρίου NaI(Tl) διαστάσεων 3" x 3". Όσον αφορά τις συνθήκες της μέτρησης, χρησιμοποιούνται τα φωτόνια ενέργειας 1.33 MeV σημειακής πηγής Co-60 τοποθετημένης σε απόσταση 25 cm από το παράθυρο του ανιχνευτή. (50, 74)

2.5.1.4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Ως εσωτερική απόδοση ορίζεται ο λόγος του πλήθους των φωτονίων που καταγράφει ο ανιχνευτής προς τον αριθμό των προσπιπτόντων σε αυτόν φωτονίων τα οποία δεν έχουν υποστεί σκέδαση. Διαφοροποιείται από την απόλυτη ολική απόδοση, καθώς ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή δεν ισούται με τον αριθμό των φωτονίων που καταλήγουν στον ανιχνευτή. (50, 74)

2.5.1.5 ΛΟΓΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΚΟΡΥΦΗΣ ΠΡΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Σε περιπτώσεις όπου ο προσδιορισμός της ολικής απόδοσης και της απόδοσης φωτοκορυφής ξεχωριστά είναι δύσκολος ή αδύνατος, χρησιμοποιείται ο λόγος απόδοσης φωτοκορυφής προς ολική απόδοση (PTT ratio) καθώς και ο λόγος ολικής απόδοσης προς απόδοση φωτοκορυφής (TTP ratio). (74) Ο συγκεκριμένος λόγος μπορεί να θεωρηθεί με ικανοποιητική προσέγγιση ανεξάρτητος της εκάστοτε γεωμετρίας πηγής-ανιχνευτή. (73, 74)

2.5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΚΟΡΥΦΗΣ

Η απόδοση φωτοκορυφής (peak efficiency) υπολογίζεται για την εκάστοτε ενέργεια σύμφωνα με τον τύπο:

$$\epsilon_E = \frac{cps}{gps} \quad (2.4)$$

όπου:

ϵ_E : η απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων (ή eff_{peak}),

cps : ο ρυθμός καταγραφόμενων γεγονότων των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας που εναποθέτουν όλη την ενέργεια τους στον ανιχνευτή στη μονάδα του χρόνου και καταγράφονται (counts per second),

gps : τα φωτόνια της συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή στη μονάδα του χρόνου (gammas per second).

Δεδομένου ότι το *cps* αποτελεί το ρυθμό καταγραφόμενων γεγονότων εξαιτίας φωτονίων που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή εναποθέτοντας όλη τους την ενέργεια, μπορεί να οριστεί ως:

$$cps = \frac{N}{t} \quad (2.5)$$

όπου:

N : Ο αριθμός γεγονότων ο οποίος αντιστοιχεί στην καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής. Μπορεί επομένως να εκφραστεί και ως το εμβαδόν της φωτοκορυφής μετά την αφαίρεση του συνεχούς υποστρώματος (Net Area),

t : ο πραγματικός χρόνος συλλογής του ενεργειακού φάσματος σε δευτερόλεπτα.

Επιπλέον, δεδομένου ότι το *gps* αποτελεί το ρυθμό εκπομπής των ακτινών-γ, μπορεί να οριστεί ως:

$$gps = A \cdot yield \quad (2.6)$$

όπου

A : η ενεργότητα η ενεργότητα (Activity) του ραδιοϊσοτόπου ενδιαφέροντος της πηγής σε Bq,

yield : Το ποσοστό εκπομπής ακτινών-γ της υπό μελέτης ενέργειας ανά διάσπαση πυρήνα. **(38, 74)**

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.5) και (2.6) στη σχέση (2.4) προκύπτει άμεσα η σχέση υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής για την ανίχνευση φωτονίων ενέργειας *E* ως:

$$\varepsilon_E = \frac{N}{A \cdot t \cdot yield} \cdot f_{tot} \quad (2.7)$$

όπου

ϵ_E : η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για την εκάστοτε προς μελέτη ενέργεια φωτοκορυφής (ή eff_{peak})

N : ο αριθμός των γεγονότων στην επιφάνεια της φωτοκορυφής (έχοντας αφαιρέσει τον αριθμό κρούσεων που οφείλεται σε σκεδάσεις ή σε ακτινοβολία υποβάθρου – συνεχές υπόστρωμα),

A : η ενεργότητα η ενεργότητα (Activity) του ραδιοϊσοτόπου ενδιαφέροντος της πηγής σε Bq,

yield : Το ποσοστό εκπομπής ακτινών-γ της υπό μελέτης ενέργειας ανά διάσπαση πυρήνα

t : Η διάρκεια της μέτρησης (Live Time)

f_{tot} : Συντελεστής διόρθωσης ο οποίος λαμβάνει υπόψιν διορθώσεις λόγω αυταπορρόφησης και λόγω φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης.
(5, 38, 43, 56, 72, 74)

Συμπεραίνεται ότι για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής δείγματος συγκεκριμένης ενεργότητας, απαιτείται η γνώση της ενέργειας φωτοκορυφής (μέσω της ενεργειακής βαθμονόμησης), του ποσοστού εκπομπής των φωτονίων αυτής της ενέργειας, του χρόνου μέτρησης και του εμβαδού της επιφάνειας της φωτοκορυφής. Ο χρόνος μέτρησης καθώς και το εμβαδόν της επιφάνειας της φωτοκορυφής παρέχονται άμεσα στο χρήστη μέσω του λογισμικού επεξεργασίας φασμάτων Genie2000. **(74)**

Συγκεκριμένα, αναγράφεται τόσο ο χρόνος μετρήσεων (Real Time), όσο και ο χρόνος κατά τον οποίο η φασματοσκοπική διάταξη λαμβάνει μετρήσεις (Live Time). Ο χρόνος που η φασματοσκοπική διάταξη έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μετρήσεις υπολογίζεται μέσω την αφαίρεση του νεκρού χρόνου (Dead Time) από το συνολικό χρόνο μετρήσεων (Real Time). Ο νεκρός χρόνος ορίζεται ως ο χρόνος που το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει καινούριο παλμό, καθώς ακόμη επεξεργάζεται τον τελευταίο παλμό που ανίχνευσε. Ο νεκρός χρόνος εξαρτάται από το ρυθμό κρούσεων, τον κρύσταλλο του ανιχνευτή καθώς και από τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών συσκευών της διάταξης. **(38)**

2.5.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η απόδοση του ανιχνευτή εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που συνοψίζονται στην ενέργεια των φωτονίων, τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, το προς ανάλυση δείγμα καθώς και την ανιχνευτική διάταξη. (38, 50, 74) Όμως, πληθώρα επιπλέον φαινομένων διέπουν τις μετρήσεις απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης. Έτσι, ο ακριβής προσδιορισμός της απόδοσης απαιτεί την εφαρμογή διορθώσεων με σκοπό τη μείωση της επίδρασης ή την εξάλειψη των συστηματικών σφαλμάτων. Στις διορθώσεις αυτές συγκαταλέγονται οι παράγοντες και τα φαινόμενα που επιδρούν στην απόδοση.

Με αφετηρία τη σχέση (2.7) υπολογισμού της απόδοσης, αναλύεται περαιτέρω ο διορθωτικός παράγοντας f_{tot} ως ένα γινόμενο τεσσάρων παραγόντων.

$$f_{tot} = f_g \cdot f_s \cdot f_d \cdot f_t \quad (2.8)$$

όπου

f_g : Παράγοντας γεωμετρίας πηγής-ανιχνευτή, ο οποίος εκφράζει τη στερεά γωνία Ω ,

f_s : Παράγοντας δείγματος ο οποίος εκφράζει την αυταπορρόφηση των φωτονίων μέσα στο δείγμα,

f_d : Παράγοντας ανιχνευτή ο οποίος εκφράζει την εσωτερική απόδοση του ανιχνευτή, δηλαδή την πιθανότητα τα φωτόνια που φτάνουν στον ανιχνευτή να εναποθέσουν όλη την ενέργεια τους σε αυτόν. Εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων προς εξέταση, τα ηλεκτρόνια της ανιχνευτικής διάταξης και τη μορφή του ανιχνευτή ,

f_t : Παράγοντας ο οποίος διορθώνει την απόδοση σχετικά με φαινόμενα σύμπτωσης και επικάλυψης παλμών. Συνήθως αφορά μόνο τη διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, λόγω της μεγάλης επίδρασής του στην απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης.

Οι παράγοντες και τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν αναλύονται στη συνέχεια.

Ενέργεια: η σχέση που συνδέει την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης με την ενέργεια μελετάται στο κεφάλαιο 2.10. Προσεγγιστικά, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η απόδοση αυξάνει γραμμικά με την ενέργεια μέχρι τα 200 keV και εν συνεχεία μειώνεται εκθετικά. Στην πράξη, με σκοπό την εξαγωγή ορθότερων αποτελεσμάτων, συσχετίζονται οι λογάριθμοι των δύο μεγεθών και χρησιμοποιείται ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού και άνω ως συνάρτηση αναδρομής. (κεφ.2.5.4) **(3, 36, 74)**

Η γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή: επιδρά σημαντικά στην απόδοση, διότι καθορίζει τη στερεά γωνία ανίχνευσης. Η επίδραση των διαστάσεων του κρυστάλλου του ανιχνευτή καθώς και του παραθύρου του, αναλύονται στο κεφάλαιο 3.3. Στην περίπτωση που δε μελετώνται μόνο σημειακές πηγές, αλλά και πηγές όγκου, η γεωμετρία της ίδιας της πηγής επηρεάζει άμεσα την ανιχνευτική ικανότητα του συστήματος, μεταβάλλοντας τη στερεά γωνία ανίχνευσης. **(38, 57, 74)**

Αυταπορρόφηση: η φύση του προς ανάλυση δείγματος επηρεάζει την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης. Συγκεκριμένα, η σύσταση, η πυκνότητα καθώς και οι διαστάσεις του δείγματος προκαλούν μεταβολές στην απόδοση του ανιχνευτή. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στο φαινόμενο της αυταπορρόφησης. **(57, 62)** Όταν τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών εκπέμπονται από πηγές όγκου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αυτά να απορροφηθούν ή να εξασθενήσουν από το ίδιο το υλικό της πηγής ή και από το δοχείο που την περιέχει, αδυνατώντας να φτάσουν στον ανιχνευτή ή φτάνοντας με χαμηλότερη ενέργεια. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αυταπορρόφηση και εμφανίζεται ακόμα και σε πηγές πάχους λίγων χιλιοστών, όταν το εκπεμπόμενο φωτόνιο είναι αρκετά χαμηλής ενέργειας. Τα κυριότερα στοιχεία που επηρεάζουν την αυταπορρόφηση των φωτονίων είναι η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων και η πυκνότητα και η σύσταση του εξεταζόμενου δείγματος. **(62, 74)**

Χαρακτηριστικά ανιχνευτικής διάταξης: τα χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης επιδρούν επίσης στην απόδοση του συστήματος. Τα υλικά κατασκευής του ανιχνευτή, του παραθύρου του, του περιβλήματός καθώς και της θωράκισης είναι υπεύθυνα για τη φύση των αλληλεπιδράσεων

που θα πραγματοποιηθούν. Οι ρυθμίσεις λειτουργίας και οι χρόνοι απόκρισης των ηλεκτρονικών της διάταξης επηρεάζουν επίσης την απόδοση του συστήματος.

Νεκρός χρόνος συστήματος: όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.5.2, ως νεκρός χρόνος ορίζεται ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται ύστερα από μια διέγερση του ανιχνευτή ώστε να επανέλθει στις αρχικές συνθήκες λειτουργίας του και να ανιχνεύσει το επόμενο σωματίδιο ως ξεχωριστό γεγονός. Στη γ-φασματοσκοπία, η τιμή του νεκρού χρόνου οφείλεται στον αναλυτή ύψους παλμών κατά τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυτής ο αναλυτής αδυνατεί να καταμετρήσει καινούριο παλμό. Μείωση του ρυθμού κρούσεων επιφέρει βελτίωση στην τιμή του νεκρού χρόνου, ο οποίος σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται πλέον άμεσα μέσω των λογισμικών γ-φασματοσκοπίας. **(38, 72)**

Επικάλυψη παλμών (pile up effect): Στους ανιχνευτές ημιαγωγών, ο νεκρός χρόνος δεν επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις. Συνήθως η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό είναι ταχύτατη, ειδικότερα με τη χρήση των νέων τεχνολογιών επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSA). Όμως, λόγω της περιορισμένης χρονικής διακριτικής ικανότητας (της τάξης των μs), είναι δυνατόν η συγχώνευση δύο παλμών κατά την ανίχνευση και η αναγνώρισή τους ως έναν, με ύψος παλμού ίσο με το άθροισμα των υψών των δύο παλμών που έφτασαν στον ανιχνευτή με ελάχιστη χρονική διαφορά. Ως αποτέλεσμα, τόσο ο χρόνος που ανιχνεύτηκε ο εκάστοτε παλμός καθώς και η ενέργειά του είναι αδύνατο να προσδιοριστούν. **(72)**

Τυχαία Άθροιση (random summing): το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης ορίζεται ως η ανίχνευση δύο τυχαίων ανεξάρτητων γεγονότων, ως ένα. Όπως και στο φαινόμενο επικάλυψης παλμών, το ύψος του παλμού που προκύπτει αντιστοιχεί στο άθροισμα του ύψους των παλμών που ανιχνεύτηκαν σχεδόν ταυτόχρονα. Η χρονική διαφορά των παλμών είναι της τάξης των ms ή μs . Έτσι, μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση ηλεκτρονικών καλής χρονικής διακριτικής ικανότητας που προσδίδουν στην ανιχνευτική διάταξη χρόνο απόκρισης της τάξης των μs . Ακόμη, το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης

εξαρτάται από το ρυθμό κρούσεων. Έτσι, είναι δυνατόν να περιοριστεί με αύξηση της απόστασης πηγής-ανιχνευτή. (72)

Πραγματική Σύμπτωση (true coincidence): Ως πραγματική σύμπτωση ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ή περισσότερα φωτόνια που εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο διάσπασης του πυρήνα ενός ισοτόπου, ανιχνεύονται ταυτόχρονα από την ανιχνευτική διάταξη και καταγράφονται ως ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με το άθροισμα των ενεργειών των επιμέρους φωτονίων. (72, 73, 74)

Κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα συνήθως προκύπτει πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση, για την αποδιέγερση του οποίου συχνά απαιτείται η εκπομπή πολλών διαδοχικών φωτονίων. Συνήθως, ο χρόνος ημιζωής της κάθε στάθμης είναι της τάξης των psec (10^{-12} sec) ή nsec (10^{-9} sec). Όμως ο χρόνος απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης (response time) είναι της τάξης των msec. Επομένως, όταν δύο ή περισσότερα διαδοχικά φωτόνια από την ίδια διάσπαση αλληλεπιδράσουν με τον ανιχνευτή, αυτός αδυνατεί να τα ανιχνεύσει σαν διαφορετικά, αλλά τα ανιχνεύει ως ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με το άθροισμα των ενεργειών τους. (56, 73, 74)

Ως αποτέλεσμα, εάν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι έντονο, καταγράφονται στο φάσμα πολλές κρούσεις οι οποίες οφείλονται στο άθροισμα της ενέργειας φωτονίων. Έτσι, δημιουργούνται ή αυξάνεται η επιφάνεια φωτοκορυφών, γεγονός το οποίο αποδίδεται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Ταυτόχρονα, αφαιρούνται κρούσεις από τις φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στην πραγματική ενέργεια των ανιχνευόμενων φωτονίων. Το φαινόμενο αύξησης της επιφάνειας φωτοκορυφής λόγω του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης ονομάζεται summing-in effect, ενώ το φαινόμενο μείωσης της επιφάνειας φωτοκορυφής καλείται summing-out effect. Εάν κάποιο από τα δύο φωτόνια που ανιχνεύονται ταυτόχρονα, ή και τα δύο, δεν αλληλεπιδράσουν με τον ανιχνευτή εναποθέτοντας όλη τους την ενέργεια, τότε το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης οδηγεί σε αύξηση του υποστρώματος.

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, οι οποίοι προς διευκόλυνση κατατάσσονται σε δύο μεγάλες

κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία παραμέτρων χαρακτηρίζει το μηχανισμό της διαδοχικής εκπομπής δύο ή περισσότερων φωτονίων από τον ίδιο πυρήνα και η δεύτερη το μηχανισμό της ταυτόχρονης ανίχνευσης τους από την ανιχνευτική διάταξη. (38, 74)

Επιγραμματικά, οι παράγοντες που εξαρτώνται από τον ραδιενεργό πυρήνα είναι:

- η δομή του διαγράμματος διάσπασης του εξεταζόμενου ισοτόπου,
- τα ποσοστά εκπομπής των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων του ίδιου κλάδου διάσπασης,
- ο χρόνος ημιζωής των ενδιάμεσων ενεργειακών σταθμών αποδιέγερσης,
- ο τρόπος διάσπασης του πυρήνα του ισοτόπου του φωτονίου που εξετάζεται (εκπομπή σωματιδίων-β, εκπομπή ακτινών-X)

Οι παράγοντες που σχετίζονται με την ταυτόχρονη ανίχνευση των φωτονίων είναι :

- το υλικό και το πάχος του παραθύρου του κρυστάτη, προκειμένου να ελεγχθεί αν το διαπερνούν ακτίνες-X,
- η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ανίχνευσης φωτονίων τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης,
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πηγής,
- η στερεά γωνία πηγής-ανιχνευτή καθώς, μικρότερη απόσταση πηγής-ανιχνευτή παρουσιάζει μεγαλύτερη πιθανότητα ταυτόχρονης καταγραφής δύο ή και περισσότερων φωτονίων και άρα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι πιο έντονο.

Μία ακόμα παράμετρος η οποία επιδρά στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αλλά δεν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ξεκάθαρα σε μια από τις δύο παραπάνω ομάδες παραγόντων, είναι η γωνιακή συσχέτιση (angular correlation), η γωνία δηλαδή που σχηματίζουν μεταξύ τους τα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια.

Έχοντας αναλύσει όλους τους παράγοντες και τα φαινόμενα που επιδρούν στον προσδιορισμό της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης είναι πλέον

δυνατό να διεξαχθεί βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης. (38, 74)

2.5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η βαθμονόμηση απόδοσης μιας ανιχνευτικής διάταξης αποσκοπεί στην εύρεση συνάρτησης η οποία εκφράζει την απόδοση φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας. Πρόκειται συνήθως για πολυωνυμική καμπύλη αναδρομής δευτέρου βαθμού και άνω (43). Η βαθμονόμηση απόδοσης αποτελεί σημαντική παράμετρο της γ-φασματοσκοπίας καθώς σχετίζεται άμεσα με τον ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιονουκλιδίων. (43, 74)

Αρχικά, απαιτείται η προετοιμασία εργαστηριακών πρότυπων πηγών κατάλληλης γεωμετρίας, χρησιμοποιώντας πιστοποιημένες πηγές γνωστής ενεργότητας. Παραδοσιακά, οι βαθμονομήσεις ανιχνευτών γερμανίου πραγματοποιούνται με τη χρήση ραδιενεργών μιγμάτων, μέσα σε υλικά διαφορετικών συστάσεων (1). Επιθυμείται οι πρότυπες πηγές να εκπέμπουν φωτόνια που να καλύπτουν όσο το δυνατόν πληρέστερα την ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος και να έχουν μεγάλο χρόνο ημιζωής ώστε να είναι κατάλληλα για βαθμονόμηση για μεγάλο χρονικό διάστημα (3). Με σκοπό την αποφυγή περαιτέρω εισαγωγής αβεβαιοτήτων στη διαδικασία της βαθμονόμησης, απαιτείται η πρότυπη πηγή να τοποθετείται στην ίδια θέση επί του ανιχνευτή στην οποία θα τοποθετηθεί το προς ανάλυση δείγμα. Τέλος, η συλλογή του φάσματος οφείλει να πραγματοποιείται για επαρκές χρονικό διάστημα προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική (π.χ. αβεβαιότητα μικρότερη του 1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ ανάλογα με την εφαρμογή και το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα). (38,74)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε δείγμα πολυενεργειακών πηγών, το οποίο κάλυπτε το ενεργειακό φάσμα ενδιαφέροντος 50-2000 keV. Ο διαλύτης όλων των πηγών ήταν εποξική ρητίνη διαφορετικών πυκνοτήτων, ενώ το μίγμα βρισκόταν εντός δοχείου πολυαιθυλενίου, συγκεκριμένης γεωμετρίας. Το δοχείο τοποθετούνταν κάθε φορά πάνω στο παράθυρο του ανιχνευτή, στο κέντρο αυτού. Χρησιμοποιήθηκαν δύο όγκοι πλήρωσης του δοχείου 260 mL και 100 mL. Παράλληλα, για κάθε όγκο πλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές πυκνότητες υλικού (εποξικής ρητίνης) ώστε να ληφθεί υπόψη το

φαινόμενο της αυταπορρόφησης. Για τις ανάγκες της πειραματικής βαθμονόμησης αξιοποιήθηκαν δεδομένα από παλαιότερες μετρήσεις απόδοσης που είχαν διεξαχθεί στο ΤΕΡΠ. Συγκεκριμένα, εκτός των πλαισίων της παρούσας εργασίας, λήφθηκε το φάσμα της εκάστοτε πολυενεργειακής πηγής και εν συνεχεία προσδιορίστηκε η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για κάθε ενέργεια ραδιοϊσοτόπου του δείγματος, με τη χρήση της προαναφερθείσας σχέσης:

$$\varepsilon_E = \frac{N}{A \cdot t \cdot \text{yield}} \cdot f_{tot} \quad (2.7)$$

Ο αριθμός των γεγονότων στην επιφάνεια της φωτοκορυφής (N) προσδιορίστηκε άμεσα μέσω του λογισμικού Genie2000 το οποίο ολοκληρώνει την επιφάνεια της φωτοκορυφής. Ακόμη, μέσω του λογισμικού παρατίθεται ο ακριβής χρόνος μέτρησης (t). Η ενεργότητα του εκάστοτε ραδιονουκλιδίου (A) υπολογίστηκε με τη χρήση του πιστοποιητικού της πηγής, λαμβάνοντας υπόψιν το νόμο εκθετικής μείωσης της ενεργότητας. Το ποσοστό εκπομπής ακτινών-γ της υπό μελέτης ενέργειας ανά διάσπαση πυρήνα (yield) αποτελεί χαρακτηριστικό του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου το οποίο λαμβάνεται από βιβλιογραφικές πηγές. Επομένως, απαιτείται η ορθή ενεργειακή βαθμονόμηση της διάταξης ώστε να ταυτοποιείται κάθε ραδιοϊσότοπο. Τέλος, δεδομένου ότι οι αποδόσεις δε διορθώνονται για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και την αυταπορρόφηση, ο συντελεστής διόρθωσης (f_{tot}) θεωρήθηκε ίσος με τη μονάδα. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίστηκε η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης (ε_E) για το σύνολο των διαφορετικών ενεργειών φωτονίων-γ που προέρχονται από την εκάστοτε πηγή. Τα δεδομένα αυτά κατέστησαν δυνατή τη διεξαγωγή της πειραματικής βαθμονόμησης της ανιχνευτικής διάταξης στην παρούσα εργασία.

Τέλος, επισημαίνεται ότι σύμφωνα με το πιστοποιητικό των πηγών παλαιού κυαθίου, όγκου πλήρωσης 260 και 100 mL, που παρατίθεται στο Παράρτημα 1, όλες οι αβεβαιότητες στην τιμή της απόδοσης των ραδιοϊσοτόπων αντιστοιχούν σε ποσοστό 1.5%, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Εξαιρέση αποτελεί η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής του Pb-210 που

αντιστοιχεί σε ποσοστό 5.7% (1 σ) και του Am-241 που αντιστοιχεί σε ποσοστό 1.8% (1 σ).



Εικόνα 2.4 Φωτογραφία παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου.

2.5.4.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ 260mL

Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται οι ενέργειες των φωτοκορυφών που εμφανίζονται στο φάσμα βαθμονόμησης καθώς και τα ραδιοϊσότοπα του μίγματος που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια. Ακόμη, συμπεριλαμβάνεται η απόδοση του ανιχνευτή σε κάθε ενέργεια, για εννέα διαφορετικές τιμές πυκνότητας της πηγής βαθμονόμησης¹.

Όπως έχει αναφερθεί, σκοπός της διαδικασίας είναι η εύρεση μιας συνάρτησης η οποία εκφράζει την απόδοση φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας. Η σχέση αυτή, η οποία προκύπτει με προσαρμογή κατάλληλης συνάρτησης ανάδρομης $\epsilon = f(E)$ στα ζεύγη πειραματικών σημείων (E , eff),

¹ Στην περίπτωση της πυκνότητας πηγής 2,0 g/cc, ελάχιστα φωτόνια του ισότοπου Pb-210 ανιχνεύονται στην επιφάνεια φωτοκορυφής λόγω του φαινομένου ανταπορρόφησης.

αποτελεί τη συνάρτηση βαθμονόμησης απόδοσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία (74).

Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μορφές συναρτήσεων αναδρομής, εμπειρικές ή ημιεμπειρικές, γραμμικές ή πολυωνυμικές, που εξαρτώνται από το είδος του ανιχνευτή και την ενεργειακή περιοχή βαθμονόμησης. Πάντως, έχει επικρατήσει συσχέτιση των μεγεθών μέσω των λογαρίθμων τους. Έτσι, χρησιμοποιούνται σχέσεις της μορφής $\ln(\varepsilon)=f(\ln(E))$. Ακόμη, σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές στις οποίες συγκρίνονται διαφορετικές μορφές συναρτήσεων αναδρομής, η χρήση πολυωνυμικών εξισώσεων μεγάλου βαθμού εξασφαλίζει πολύ ικανοποιητική προσαρμογή στα σημεία $(\ln(E), \ln(\varepsilon))$. (36)

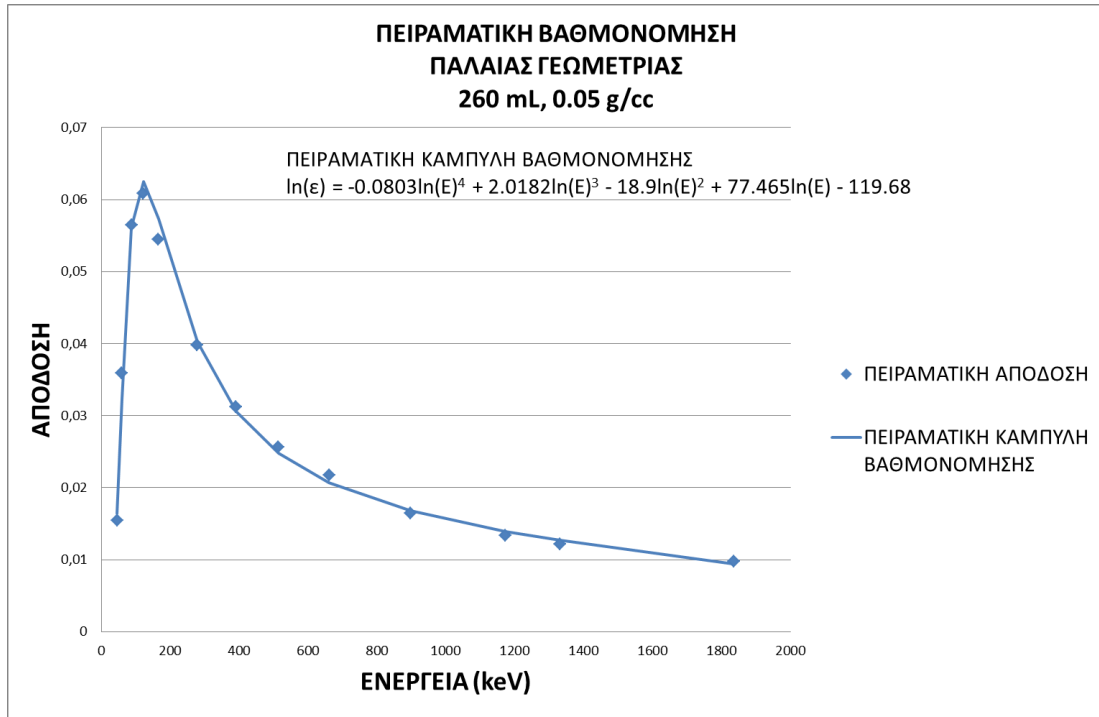
Έτσι, η σχέση αναδρομής που κυρίως χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία με σκοπό τη βαθμονόμηση απόδοσης ήταν πολυωνυμική 4^{ου} βαθμού της μορφής:

$$\ln(\varepsilon) = a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot (\ln(E))^2 + a_3 \cdot (\ln(E))^3 + a_4 \cdot (\ln(E))^4$$

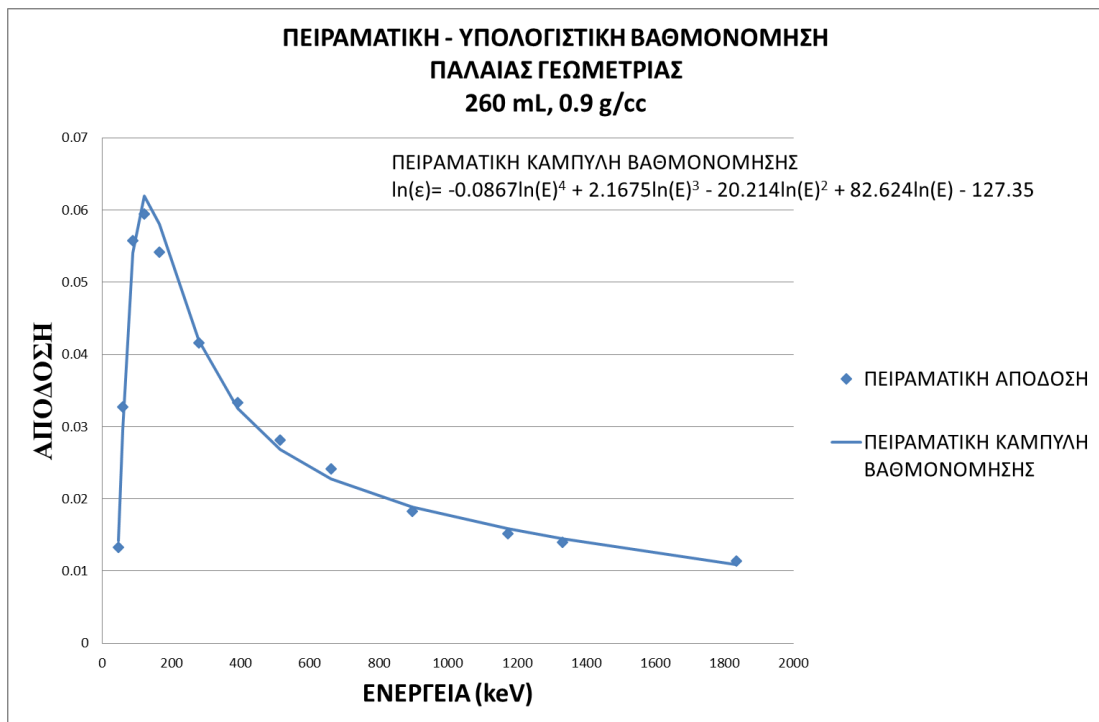
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματικές τιμές της απόδοσης για διαφορετικές πυκνότητες (g/cm ³)								
		0.05	0.5	0.7	0.9	1.0	1.3	1.5	1.7	2.0
Pb-210	46.54	0.01543	0.0146	0.01503	0.01328	0.01237	0.01024	0.00924	0.0069	
Am-241	59.54	0.03591	0.03692	0.03582	0.03274	0.0303	0.02924	0.02439	0.02035	0.02149
Cd-109	88.03	0.05646	0.06044	0.06052	0.05572	0.05246	0.04729	0.04339	0.03986	0.03903
Co-57	122.06	0.06085	0.06662	0.06501	0.05947	0.05427	0.0519	0.04705	0.04384	0.04421
Cd-109	165.85	0.05447	0.05989	0.05928	0.05419	0.05001	0.05119	0.04402	0.04153	0.04161
Hg-203	279.2	0.03982	0.04515	0.04479	0.04164	0.03832	0.03796	0.03423	0.03167	0.03157
Sn-113	391.69	0.03123	0.03582	0.03574	0.0333	0.03083	0.03052	0.028	0.02639	0.02714
Sr-85	513.99	0.0256	0.02953	0.02976	0.0281	0.02588	0.02625	0.02371	0.02238	0.02306
Cs-137	661.65	0.02175	0.02538	0.02452	0.02412	0.02249	0.02384	0.02078	0.01964	0.02044
Y-88	898.02	0.01641	0.01902	0.01932	0.01826	0.01702	0.01791	0.01581	0.01495	0.01549
Co-60	1173.22	0.01338	0.01567	0.01592	0.01518	0.01415	0.01426	0.01318	0.01256	0.01308
Co-60	1332.49	0.01218	0.01431	0.01465	0.01399	0.01307	0.0131	0.0122	0.01165	0.01207
Y-88	1836.01	0.0098	0.01159	0.01186	0.01136	0.01064	0.01129	0.01008	0.00957	0.01

Πίνακας 2.2 Τιμές απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας για όλες τις πυκνότητες της πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260mL.

Ακολουθώς, παρατίθενται ενδεικτικά οι καμπύλες της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή συναρτήσει της ενέργειας για όγκο δοχείου 260mL και δύο διαφορετικές πυκνότητες πηγής (0.05 και 0.9 g/cc). Ακόμη, αναφέρεται η τετάρτου βαθμού πολυωνυμική εξίσωση αναδρομής που προέκυψε για κάθε πυκνότητα καθώς και ο εκάστοτε συντελεστής συσχέτισης. Οι καμπύλες απόδοσης για όλες τις πυκνότητες πηγών παρατίθενται στο Παράρτημα 3.



Διάγραμμα 2.2 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 0.05 g/cc.



Διάγραμμα 2.3 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 0.9 g/cc.

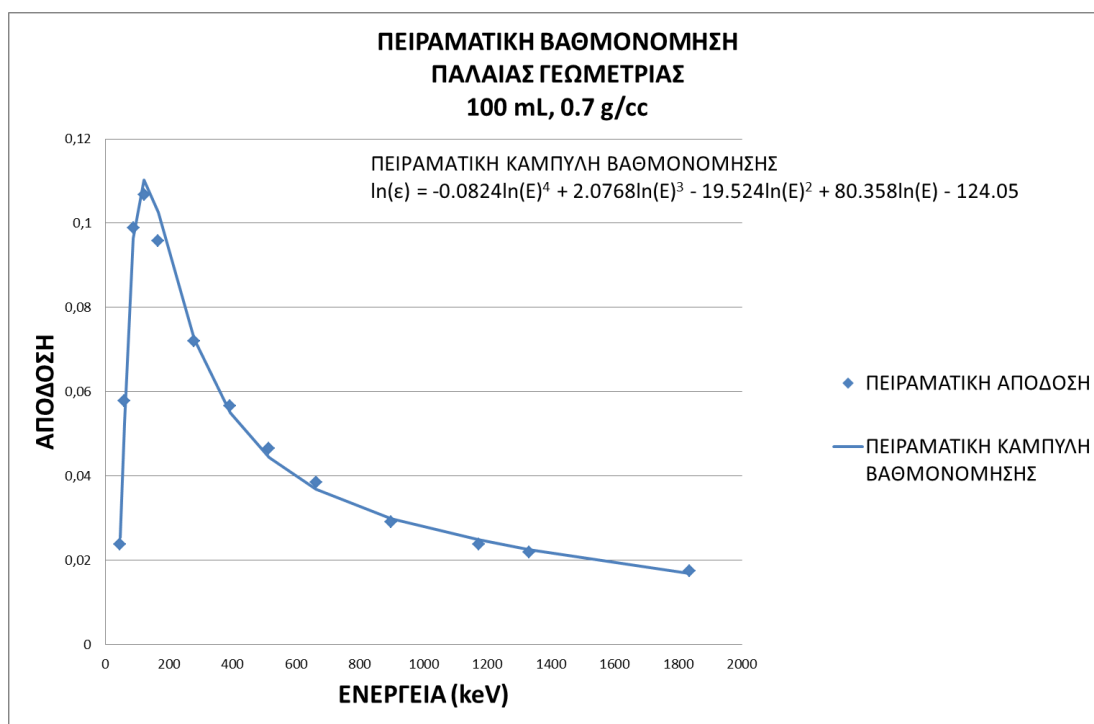
2.5.4.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ 100mL

Σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε με σκοπό την πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης πηγής όγκου 260mL, πραγματοποιήθηκε και βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για πηγές όγκου 100mL, έξι διαφορετικών πυκνοτήτων, με τη χρήση της εξίσωσης 2.7. Στον Πίνακα 2.3 παρατίθενται οι ενέργειες των φωτοκορυφών που εμφανίζονται στο φάσμα καθώς και τα ραδιοϊσότοπα του μίγματος που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια. Συμπεριλαμβάνεται η απόδοση του ανιχνευτή σε κάθε ενέργεια, για τις έξι διαφορετικές τιμές πυκνότητας της εποξικής ρητίνης της πηγής.

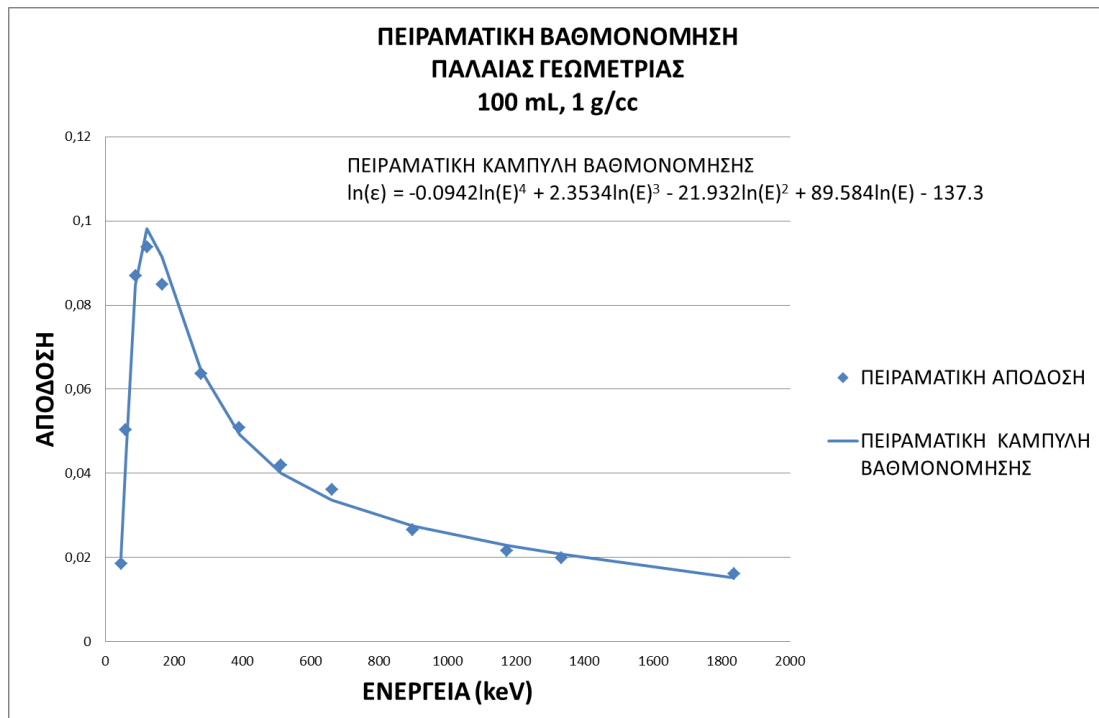
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματικές τιμές της απόδοσης για διαφορετικές πυκνότητες (g/cm ³)					
		0.7	1.0	1.3	1.7	2.0	3.0
Pb-210	46.54	0.02379	0.01841	0.01667	0.01273		0.00059
Am-241	59.54	0.05775	0.05035	0.04781	0.04089	0.04266	
Cd-109	88.03	0.09893	0.08701	0.08216	0.07569	0.07371	0.00306
Co-57	122.06	0.10667	0.09373	0.08853	0.08317	0.08266	0.00796
Cd-109	165.85	0.09581	0.08484	0.08194	0.07697	0.07635	0.0164
Hg-203	279.2	0.07194	0.06372	0.06008	0.05501	0.05438	0.02961
Sn-113	391.69	0.05656	0.05078	0.04933	0.04692	0.04672	0.03447
Sr-85	513.99	0.04646	0.04193	0.0408	0.03891	0.03915	0.03414
Cs-137	661.65	0.03849	0.03619	0.03596	0.03368	0.03393	0.03072
Y-88	898.02	0.02903	0.02645	0.02574	0.02474	0.02486	0.02327
Co-60	1173.22	0.02381	0.02164	0.02114	0.02037	0.02049	0.01952
Co-60	1332.49	0.02182	0.01986	0.01942	0.01872	0.01873	0.01815
Y-88	1836.01	0.01747	0.01604	0.01571	0.01518	0.01539	0.01515

Πίνακας 2.3 Τιμές απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας για όλες τις πυκνότητες της πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100mL.

Όπως και προηγουμένως, τα μεγέθη συσχετίστηκαν μέσω των αλγορίθμων τους και χρησιμοποιήθηκε ως συνάρτηση αναδρομής πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού. Ακολούθως παρατίθενται ενδεικτικά οι καμπύλες της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή συναρτήσει της ενέργειας για όγκο δοχείου 100 mL και δύο διαφορετικές πυκνότητες πηγής (0.7 και 1.0 g/cc). Ακόμη, αναφέρεται η τετάρτου βαθμού πολυωνυμική εξίσωση αναδρομής που προέκυψε για κάθε πυκνότητα καθώς και ο εκάστοτε συντελεστής συσχέτισης. Οι καμπύλες απόδοσης για όλες τις πυκνότητες πηγών παρατίθενται στο Παράρτημα 3. Η συνάρτηση αναδρομής αναλύεται περαιτέρω στην παράγραφο 4.1.2, όπου συγκρίνονται οι συναρτήσεις αναδρομής που προκύπτουν από την πειραματική και την υπολογιστική βαθμονόμηση.



Διάγραμμα 2.4 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 0.7 g/cc.



Διάγραμμα 2.5 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 1.0 g/cc.

2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε και παρουσιάστηκε η έννοια της απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης. Περιγράφηκε η διαδικασία ενεργειακής βαθμονόμησης και βαθμονόμησης απόδοσης με έμφαση στη απόδοση φωτοκορυφής, ενώ παρουσιάστηκαν και οι παράμετροι οι οποίοι επιδρούν στον υπολογισμό / εκτίμησή της.

Ειδικά για την ανιχνευτική διάταξη του ΤΕΡΠ με ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου σχετικής απόδοσης 70% περιγράφηκε η διαδικασία βαθμονόμησης τους για τις χρησιμοποιούμενες πηγές όγκου. Παρουσιάστηκαν οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής για την παλαιά γεωμετρία κυαθίου. Όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια, οι εν λόγω καμπύλες θα αποτελέσουν τη βάση για την περαιτέρω βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης και σε άλλες γεωμετρίες όγκου.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

3.1 ΚΩΔΙΚΑΣ PENELOPE

3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται η διαδικασία υπολογιστικής βαθμονόμησης του ανιχνευτή HPGe (σχετικής απόδοσης 70%) του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ. Για την υλοποίηση της βαθμονόμησης, αξιοποιήθηκε ο κώδικας προσομοίωσης Monte Carlo, PENELOPE.

Ο κώδικας PENELOPE είναι ένας υπολογιστικός κώδικας με τον οποίο εξετάζονται τα φαινόμενα διάδοσης φωτονίων και σωματιδίων-β στην ύλη, με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo. Το όνομα PENELOPE αποτελεί ακρωνύμιο του PENetration and Energy Loss of Positrons and Electrons, δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις φωτονίων προστέθηκαν σε νεότερες εκδόσεις του κώδικα. Ο κώδικας αναπτύχθηκε από τους F.Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau και είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77. Επομένως, είναι δυνατόν να εκτελεστεί σε όλα τα λειτουργικά συστήματα με τη χρήση ενός μεταγλωττιστή Fortran. (20, 42, 74)

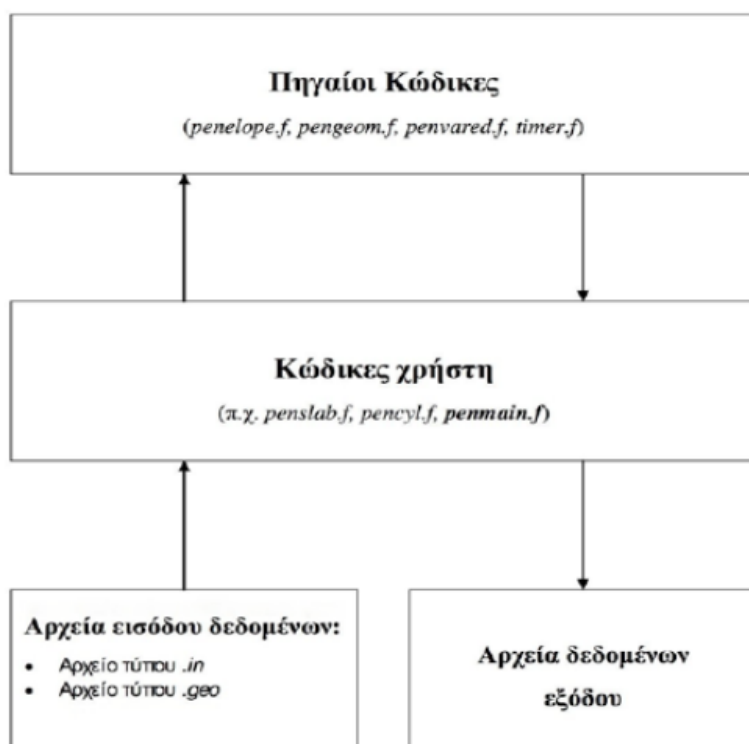
Ο αλγόριθμος προσομοίωσης βασίζεται σε ένα μοντέλο διασποράς, το οποίο συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων με αναλυτικά μοντέλα ενεργών διατομών για τους διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης φωτονίων και ποζιτρονίων. Εφαρμόζεται σε ενέργειες φωτονίων από 50 eV μέχρι 1 GeV. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης που λαμβάνονται υπόψιν για τα φωτόνια είναι η ελαστική σκέδαση (Rayleigh), η ανελαστική σκέδαση (Compton), η δίδυμη γένεση και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η προσομοίωση της μετάδοσης φωτονίων πραγματοποιείται σύμφωνα με την λεπτομερή διαδικασία, δηλαδή τα γεγονότα αλληλεπίδρασης στην ιστορία των φωτονίων προσομοιώνονται με χρονολογική σειρά. Αντιστοίχως, οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης που

λαμβάνονται υπόψιν για τα σωματίδια-β είναι η ελαστική σκέδαση, η ανελαστική σκέδαση, η εξαύλωση, η ακτινοβολία πέδησης και ο ιονισμός εσωτερικών στοιβάδων ατόμου. Η προσομοίωση της διαδρομής τους πραγματοποιείται μέσω ενός σύνθετου αλγορίθμου. (20, 74, 49)

Στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση PENELOPE2018 του κώδικα. Τον κώδικα μπορεί να αποκτήσει κανείς μέσω της NEA Data Bank του ΟΟΣΑ.

3.1.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Ο κώδικας αποτελείται από το κυρίως πρόγραμμα (main programme) το οποίο συντάσσεται από το χρήστη και περιγράφει τη διαδικασία της προσομοίωσης και από ένα πλήθος υπορουτίνων οι οποίες αλληλοεπιδρούν με το κυρίως πρόγραμμα και το καθιστούν λειτουργικό. Έτσι, εξασφαλίζεται η ομαλή διεξαγωγή της εκάστοτε προσομοίωσης.



Εικόνα 3.1 Δομή λειτουργίας του κώδικα PENELOPE2018

Το σύνολο των αρχείων που χρησιμοποιούνται για την «εκτέλεση» του κώδικα, δομείται στις ακόλουθες κατηγορίες αρχείων:

- *Fsource*. Περιλαμβάνει τις υπορουτίνες της προσομοίωσης, δηλαδή πηγαίους κώδικες ο καθένας εκ των οποίων συμβάλλει σε διαφορετικές λειτουργίες και χρήσεις της προσομοίωσης. Ενδεικτικά, πρόκειται για πακέτα γεωμετρίας, μοντέλα προσομοιώσεων, μοντέλα μείωσης στατιστικών αποκλίσεων, κ.ά. Πιο βασικό κρίνεται το πακέτο υπορουτίνας *Penelope.f*, το οποίο ορίζει τα χαρακτηριστικά αλληλεπιδράσεων σε υλικά και ουσιαστικά παρακολουθεί τις προσομοιώσεις.
- *Pendbase*. Περιέχει φακέλους απαραίτητους για τη δημιουργία των αρχείων που περιλαμβάνονται οι ενεργές διατομές και τα φυσικά χαρακτηριστικά υλικών.
- *Other*. Εμπεριέχει λογισμικά τα οποία σχετίζονται με την οπτικοποίηση δεδομένων καθώς και περαιτέρω μοντέλα προσομοιώσεων. Από αυτά, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα λογισμικά *gview2d* και *gview3d* τα οποία επιτρέπουν αντίστοιχα τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας της προσομοίωσης, όπως αυτή δημιουργήθηκε από το χρήστη. Επιτρέπουν την περιστροφή της γεωμετρίας, την απεικόνισή της υπό διαφορετικές γωνίες καθώς και τη μεγέθυνσή της. Λιγότερο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *tables*, το οποίο αναπαράγει δεδομένα σχετικά με τη σύσταση υλικών, ενεργές διατομές, εμβέλεια σωματιδίων στο υλικό κ.ά.
- *Mains*. Περιλαμβάνονται τα κυρίως προγράμματα του κώδικα σε συνδυασμό με πλήθος παραδειγμάτων προσομοιώσεων δομημένων με βάση αυτά τα προγράμματα. Για κάθε προσομοίωση απαιτείται η χρήση ενός κυρίως προγράμματος, ωστόσο για τη διευκόλυνση των χρηστών, υπάρχουν διαθέσιμα κυρίως προγράμματα τα οποία καλύπτουν την πλειοψηφία των εφαρμογών που θα χρειαστεί να προσομοιωθούν από το χρήστη **(20, 74, 49)**

3.1.3 ΚΥΡΙΩΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Από τα διαθέσιμα κυρίως προγράμματα του κώδικα, αυτά που κυρίως αφορούν τις εφαρμογές σχετικές με τη ραδιενέργεια περιβάλλοντος, αλλά και τις ιατρικές εφαρμογές, είναι τα: *pencyl* και *penmain*.

Το πρόγραμμα `rencyl` προσομοιώνει κυλινδρικές γεωμετρίες στις οποίες τόσο η πηγή όσο και τα υλικά αλληλεπίδρασης είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα Z. Αντίστοιχα, το πρόγραμμα `renmain` επιτρέπει την προσομοίωση γεωμετριών (πχ. κωνικών τομών και επιπέδων), οι οποίες αποτελούν υπερσύνολο των γεωμετριών του `rencyl`. Σε κάθε περίπτωση, η γεωμετρία του προβλήματος περιγράφεται σε ξεχωριστό αρχείο εισόδου, το οποίο «διαβάζει» το κυρίως πρόγραμμα.

Επομένως, το πρόγραμμα `renmain` επιτρέπει την εκτέλεση προσομοιώσεων σε πιο σύνθετες γεωμετρίες. Δεδομένων των προσομοιώσεων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, κρίθηκε ως καταλληλότερο κυρίως πρόγραμμα το `renmain`. Τα όσα ακολούθως εκτίθενται αφορούν στη δική του δομή και χαρακτηριστικά. **(4, 20, 42, 49, 74)**

3.1.4 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ RENMAIN

Τα αρχεία εισόδου διακρίνονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες. Υπάρχουν τα αρχεία:

- `file.mat` στα οποία περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των υλικών της προσομοιούμενης γεωμετρίας,
- `file.geo` στα οποία περιγράφεται η γεωμετρία προσομοίωσης και
- `file.in` στα οποία εισάγονται οι διάφορες παράμετροι της προσομοίωσης (π.χ. είδος και ενέργεια σωματιδίων ή φωτονίων, γεωμετρία και χαρακτηριστικά πηγής εκπομπής, τύπος ανιχνευτών που θα χρησιμοποιηθούν, τρόπος εμφάνισης αποτελεσμάτων κλπ). **(4, 20, 74)**

3.1.4.1 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ FILE.MAT

Τα αρχεία `file.mat` αποτελούν τις βιβλιοθήκες με τα χαρακτηριστικά των υλικών τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σε σχέση με τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με τις ακτινοβολίες. Περιλαμβάνονται στοιχεία όπως ο μαζικός και ο ατομικός αριθμός του υλικού, η πυκνότητά του, καθώς και πλήθος ενεργών διατομών για τους διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης. Τα αρχεία αυτά παράγονται από το χρήστη μέσω της βάσης δεδομένων `rendbase` που διαθέτει ο κώδικας.

Για την παραγωγή των εν λόγω αρχείων, «εκτελείται» το πρόγραμμα material.exe. Εν συνεχεία επιλέγεται από το χρήστη το στοιχείο ή η ένωση που θα χρησιμοποιηθεί από τη βιβλιοθήκη. Αν κάποια χημική ένωση δεν περιλαμβάνεται στη βιβλιοθήκη μπορεί να εισαχτεί από το χρήστη, εισάγοντας τον ατομικό αριθμό των στοιχείων που την απαρτίζουν καθώς και τον αριθμό ατόμων του εκάστοτε στοιχείου ανά μόριο της ένωσης. **(4, 20, 42)**

3.1.4.2 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ FILE.GEO

Τα αρχεία file.geo περιγράφουν τη γεωμετρία του συστήματος πάνω στην οποία θα εξελιχθεί η διαδικασία της προσομοίωσης. Ορίζονται όλες οι δομές που απαρτίζουν τη διάταξη προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, ο χρήστης ορίζει σταθερά επίπεδα στο χώρο και κωνικές τομές. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν μόνο επίπεδα και κύλινδροι για τη δημιουργία δομών γεωμετρίας πχ. ανιχνευτής, κυάθιο, άγνωστη πηγή κλπ.. Εν συνεχεία, οριοθετούνται οι δομές έτσι ώστε να προκύψουν τα γεωμετρικά σώματα στο χώρο (bodies), ως ένα σύνολο επιφανειών. Κάθε γεωμετρικό σώμα αντιστοιχείται με ένα αρχείο υλικού (.mat) το οποίο έχει παραχθεί σύμφωνα με τα παραπάνω και καλείται από το αρχείο εισόδου file.in. **(4, 20, 74)**

3.1.4.3 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ FILE.IN

Τα αρχεία file.in συντάσσονται από το χρήστη σε καθορισμένη μορφή (format), για κάθε κυρίως πρόγραμμα, και εμπεριέχουν πληροφορίες για τις συνθήκες διεξαγωγής της προσομοίωσης.

Αρχικά και σε ό,τι αφορά στο κυρίως πρόγραμμα renmain που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία, επιλέγονται τα χαρακτηριστικά της πηγής, ή με άλλα λόγια πραγματοποιείται η προσομοίωση της πηγής ενδιαφέροντος. Ο χρήστης με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων μπορεί να προσομοιώσει σημειακή πηγή ή πηγή όγκου, πηγή η οποία εκπέμπει ισότροπα ή σε συγκεκριμένη στερεά γωνία, ή τέλος μπορεί να ορίσει οποιοδήποτε γεωμετρικό σώμα του αρχείου γεωμετρίας ως πηγή. Επιλέγεται το είδος των πρωτογενών σωματιδίων ή φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή, καθώς και η ενέργειά τους. Ακόμη, είναι δυνατόν να επιλεγούν μονοενεργειακές πηγές ή πηγές που να εκπέμπουν σωματίδια σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. **(4, 20, 74)**

Εν συνεχεία, καλούνται τα αρχεία υλικών που έχει δημιουργήσει ο χρήστης και ορίζονται οι τιμές παραμέτρων προσομοίωσης για το κάθε υλικό (π.χ. όριο ενέργειας κάτω από το οποίο θεωρείται ότι υπάρχει απορρόφηση στο υλικό – cut off energy). Μετέπειτα, καλείται και το αρχείο γεωμετρίας.

Επιλέγεται ακόμη το είδος των ανιχνευτών που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και τα χαρακτηριστικά τους και γίνεται αντιστοίχιση του ενεργού όγκου του ανιχνευτή σε αντίστοιχο γεωμετρικό σώμα από το αρχείο γεωμετρίας. Το είδος ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή είναι ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας. Ο ανιχνευτής αυτός καταγράφει το ενεργειακό φάσμα αποτιθέμενης ενέργειας από τα φωτόνια ή/και σωματίδια που προσπίπτουν σε αυτόν. Σε ό,τι αφορά στους άλλους τύπους ανιχνευτών που μπορούν να αξιοποιηθούν από το χρήστη πρόκειται για: (α) τον ανιχνευτή δόσης, ο οποίος καταγράφει την κατανομή δόσης στον όγκο του και (β) για τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, ο οποίος καταγράφει το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων ή/και σωματιδίων που προσπίπτουν σε αυτόν.

Αναφορικά με τις παραμέτρους του ανιχνευτή που προσδιορίζονται, αφορούν κυρίως στον τρόπο απόδοσης του ενεργειακού φάσματος που «αποδίδουν» και πιο συγκεκριμένα στην ελάχιστη και μέγιστη ενέργεια ανίχνευσης και στο πλήθος των ενεργειακών καναλιών διαμέρισης (ενεργειακό παράθυρο) του ενεργειακού φάσματος. **(4, 20, 74)**

Τέλος, μέσω του αρχείου εισόδου file.in, επιλέγονται ο μέγιστος χρόνος προσομοίωσης ή ο μέγιστος αριθμός πρωτογενών σωματιδίων τα οποία θα προσομοιωθούν (ιστορίες), τα αρχεία όπου θα αποθηκεύονται προσωρινά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς και το χρονικό βήμα της προσωρινής αποθήκευσης. **(20, 74)** Σημειώνεται ότι οι προσομοιώσεις που διεξήχθησαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας διαρκούσαν περίπου είκοσι λεπτά της ώρας², χρονικό διάστημα που διαφοροποιούνταν βάση των συνθηκών διεξαγωγής τους.

² Σημειώνεται ότι ο επεξεργαστής του υπολογιστή στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις είχε τα εξής χαρακτηριστικά: Intel(R) Core (TM) i7-2600K CPU @ 3.40 GHz 3.70 GHz.

3.1.5 ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ PENMAIN

Τα αρχεία εισόδου σε συνδυασμό με το κυρίως πρόγραμμα και τις υπορουτίνες αυτού, διατελούν την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καταγράφονται στα αρχεία εξόδου. Μετά το πέρας της προσομοίωσης παράγονται έξι αρχεία εξόδου:

- Penmain-res.dat. Εμπεριέχει χρήσιμες γενικές πληροφορίες για την προσομοίωση. Μεταξύ άλλων αναφέρονται ο χρόνος που διήρκεσε η προσομοίωση, η ταχύτητά της, ο αριθμός πρωτογενών σωματιδίων ή φωτονίων που προσομοιώθηκαν, οι πιθανότητες δημιουργίας δευτερογενών σωματιδίων καθώς και ο αριθμός πρωτογενών σωματιδίων ή φωτονίων τα οποία εξέρχονται από τα όρια της γεωμετρίας. Το αρχείο αυτό ανανεώνεται αυτόματα κάθε φορά που τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποθηκεύονται προσωρινά.
- Src-end-xx.dat. Σε αυτό το αρχείο εμπεριέχεται το ενεργειακό φάσμα εξόδου που κατέγραψε ο ανιχνευτής εναποτιθέμενης ενέργειας με αύξοντα αριθμό xx κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Από την προσομοίωση παράγονται τόσα αρχεία όσα και οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας που ορίστηκαν. Οι πληροφορίες κάθε αρχείου είναι οργανωμένες σε τρεις στήλες. Η πρώτη στήλη περιλαμβάνει το σύνολο των ενεργειών που εναποτέθηκαν στον ανιχνευτή, σε μονάδες eV. Για κάθε ενεργειακό κανάλι δίνεται η ενδιάμεση ενέργεια. Η μέγιστη και η ελάχιστη ενέργεια ανίχνευσης καθώς και το βήμα της ενεργειακής διαμέρισης έχουν επιλεγεί από το χρήστη στο αρχείο εισόδου file.in. Η δεύτερη στήλη αντιστοιχεί στη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας pdf (probability density function), δηλαδή στην πιθανότητα εναπόθεσης ενέργειας στο αντίστοιχο εύρος ενεργειακών καναλιών, διαιρεμένη με το εύρος του ενεργειακού παραθύρου ΔE_{bin} . Το ΔE_{bin} μπορεί να υπολογιστεί είτε με την αφαίρεση δυο διαδοχικών ενεργειακών καναλιών είτε σύμφωνα με τη σχέση $E_{bin} = (E_l - E_u)/NBE$, όπου E_l και E_u η μέγιστη και η ελάχιστη ενέργεια ανίχνευσης, αντιστοίχως και NBE ο αριθμός ενεργειακών καναλιών. Τέλος, η τρίτη στήλη αναφέρεται στην αβεβαιότητα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ.

- Penmain.dat. Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει αναλυτικά τα δεδομένα της προσομοίωσης τα οποία εισήχθησαν από το χρήστη στο αρχείο εισόδου file.in. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της πηγής, των ανιχνευτών καθώς και των υλικών που συμμετείχαν στη διαδικασία της προσομοίωσης.
- Material.dat. Το αρχείο εμπεριέχει λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στη γεωμετρία της προσομοίωσης καθώς και τις παραμέτρους προσομοίωσης που έχουν επιλεγεί για κάθε υλικό. (π.χ. την τιμή της ελάχιστης ενέργειας κάτω από την οποία θεωρείται ότι κάποιο σωματίδιο απορροφάται στο εκάστοτε υλικό.)
- Dump.dmp. Σε αυτό το αρχείο αποθηκεύονται τα τελευταία αποτελέσματα της προσομοίωσης. Εάν η προσομοίωση διακοπεί και ο χρήστης επιθυμεί να τη συνεχίσει με σκοπό πχ. τη βελτίωση της στατιστικής, αναπαράγονται από τον κώδικα τα τελευταία αποτελέσματα και η προσομοίωση συνεχίζει από το σημείο εκείνο που διεκόπη.
- Geometry-gep. Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τα δεδομένα της γεωμετρίας της προσομοίωσης, όπως αυτά εισήχθησαν από το χρήστη στο αρχείο εισόδου file.geo.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι πληροφορίες που δίδονται από τα δύο πρώτα αρχεία εξόδου που αναφέρθηκαν (Penmain-res.dat και Spc-end.dat), ενώ έμμεσα έγινε χρήση και του αρχείου εξόδου Dump.dmp όταν ήταν απαραίτητη η βελτίωση της στατιστικής κάποιας προσομοίωσης. **(4, 20, 74)**

3.1.6 ΧΡΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε, ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης πραγματοποιείται μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων του αρχείου εξόδου spc-enddet-01.dat. Το αρχείο πρακτικά αποτελεί την αριθμητική καταγραφή ενός αντίστοιχου πειραματικού φάσματος. Η δεύτερη στήλη περιγράφει την πιθανότητα ενός σωματίδιο να εναποθέσει στον ανιχνευτή ενέργεια μέσα στα όρια του αντίστοιχου ενεργειακού καναλιού. Η πιθανότητα αυτή είναι ανηγμένη στο εύρος της

ενεργειακής διαμέρισης και το πλήθος των σωματιδίων ή φωτονίων που προσομοιώθηκαν. Ως εκ τούτου, πολλαπλασιάζοντας την πιθανότητα με το εύρος της ενεργειακής διαμέρισης, λαμβάνεται η απόδοση φωτοκορυφής. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι η πιθανότητα ανά αρχικά εκπεμπόμενο φωτόνιο να αποτεθεί όλη η αρχική ενέργειά του. Αυτό το μέγεθος αντιστοιχεί στην απόδοση φωτοκορυφής για την ενέργεια αυτή. (74) Έτσι

$$\varepsilon_E = pdf_E * bin_width \quad (3.1)$$

όπου:

ε_E : η απόδοση φωτοκορυφής για την ενέργεια εκπομπής των φωτονίων,
 pdf_E : η τιμή της πιθανότητας εναπόθεσης ενέργειας που αντιστοιχεί στο κανάλι της ενέργειας εκπομπής των φωτονίων E, όπως δίνεται από το αρχείο `src-enddet-01.dat`.

bin_width : Το ενεργειακό εύρος των καναλιών.

Το ενεργειακό εύρος των καναλιών, bin_width , υπολογίζεται αφαιρώντας δύο διαδοχικά ενεργειακά επίπεδα:

$$bin_width = E_n - E_{n-1} \quad (3.2)$$

Με σκοπό τη μέγιστη δυνατή προσέγγιση των πειραματικών συνθηκών, λαμβάνονται υπόψη επιπλέον παράγοντες κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής. Στην περίπτωση της προσομοίωσης ο θεωρούμενος ανιχνευτής είναι ιδανικής διακριτικής ικανότητας και οι υπολογιστικές φωτοκορυφές που λαμβάνονται έχουν μηδενικό εύρος ημίσεως ύψους. Ωστόσο, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, οι φωτοκορυφές του πειραματικού φάσματος έχουν ορισμένο πλάτος, το οποίο καθορίζεται από το εύρος ημίσεως ύψους τους (FWHM). Μέσα στα όρια των φωτοκορυφών αυτών καταγράφονται και φωτόνια τα οποία αποθέτουν στον ανιχνευτή ελαφρώς μειωμένη ενέργεια, λόγω σκεδάσεων που πραγματοποιούν με τα υλικά τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής και του κρυστάλλου ανίχνευσης. (34, 60)

Μελετώντας ένα υπολογιστικό φάσμα, παρατηρείται ότι στα κανάλια που αντιστοιχούν σε υψηλότερες ενέργειες από την ενέργεια εκπομπής υπάρχει μηδενική πιθανότητα εναπόθεσης ενέργειας, κάτι που είναι αναμενόμενο. Αντίθετα, σε κανάλια μικρότερων αλλά κοντινών ενεργειών παρουσιάζονται αυξημένες τιμές της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας, κάτι που επιβεβαιώνει την ύπαρξη προηγούμενων σκεδάσεων με πολύ μικρή απώλεια ενέργειας.

Προκειμένου λοιπόν να λαμβάνονται υπόψη και τα φωτόνια αυτά, ενδείκνυται ο συνυπολογισμός στην απόδοση και των ενεργειών που περιλαμβάνονται έως το κάτω όριο της φωτοκορυφής. Έτσι, συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές απόδοσης στο ενεργειακό εύρος από $E-1.5 \cdot FWHM$ (3.3) μέχρι E . (34, 73, 74) Επομένως, η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής ανάγεται στην :

$$\epsilon_E = bin_width \cdot \sum_{E-1.5 \cdot FWHM}^E(pdf_E) \quad (3.4)$$

Η τιμή του εύρους ημίσειας ύψους (FWHM) εξαρτάται από την ενέργεια φωτοκορυφής και υπολογίζεται από τη σχέση (2.2) που προσδιορίστηκε κατά τη βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας της ανιχνευτικής διάταξης στο κεφάλαιο 2.

Ενδεικτικά, αντικαθιστώντας στη σχέση (2.2) την ενέργεια φωτονίων- γ που παράγονται από τη διάσπαση της πηγής Αμερικίου-241, υπολογίζεται

$$FWHM_{59.54keV} = 1.16 keV$$

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (3.3), το ενεργειακό εύρος εναπόθεσης ενέργειας των φωτονίων που συμπεριλαμβάνεται στην φωτοκορυφή υπολογιστικού φάσματος είναι από 57.8 μέχρι 59.54 keV.

3.1.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ

Όσον αφορά τις αβεβαιότητες κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, ο χρόνος προσομοίωσης επιλέχθηκε έτσι ώστε για κάθε απόδοση φωτοκορυφής η αβεβαιότητα να είναι μικρότερη του 1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1 σ . Όπως έχει αναφερθεί, η τρίτη στήλη του αρχείου sprc-enddet-01.dat περιλαμβάνει την απόλυτη αβεβαιότητα της πιθανότητας εναπόθεσης ενέργειας στα όρια του αντίστοιχου καναλιού $\delta(pdf_i)$ ανά eV σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3 σ . Σημειώνεται ότι το χρονικό διάστημα της εκάστοτε προσομοίωσης διαφοροποιείται ανάλογα με τις συνθήκες διεξαγωγής της, αλλά κατά μέσο όρο διαρκεί περίπου είκοσι λεπτά.

Δεδομένου ότι διαφορετικές ενέργειες φωτονίων και διαφορετικές πυκνότητες πηγών επέφεραν αλλαγές στον απαιτούμενο χρόνο διεξαγωγής της προσομοίωσης για την επίτευξη της ζητούμενης στατιστικής, η αβεβαιότητα ελεγχόταν πριν το πέρας κάθε προσομοίωσης. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιήθηκε η σχέση :

$$\sigma_{pdf}\% = \left(\frac{\delta(pdf_E)}{pdf} \right) \cdot \left(\frac{100}{3} \right) \quad (3.5)$$

Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας της υπολογιστικής απόδοσης υπολογίζεται στη συγκεκριμένη εργασία σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ σύμφωνα με τη σχέση :

$$\sigma_{\varepsilon_E} = \sqrt{\sum_{E+1.5FWHM}^E \left(\frac{(\delta(pdf_E))^2}{3} \right)} \cdot \Delta E \quad (3.6)$$

όπου

$\delta(pdf)$: η απόλυτη αβεβαιότητα στην ανηγμένη πιθανότητα εναπόθεσης ενέργειας σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ

ΔE : η διαφορά δύο διαδοχικών ενεργειακών καναλιών. (bin_width)

Το άθροισμα των απόλυτων αβεβαιοτήτων $\left(\sum_{E+1.5FWHM}^E \left(\frac{(\delta(pdf))^2}{3} \right) \right)$ που υπεισέρχεται στη σχέση (3.6), οφείλεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο γεγονός ότι λαμβάνονται υπόψη και οι αβεβαιότητες των πιθανοτήτων εναπόθεσης ενέργειας από φωτόνια που σκεδάζονται με πολύ μικρή απώλεια ενέργειας και συμπεριλαμβάνονται στην φωτοκορυφή.

Με αφετηρία τη σχέση (3.6), υπολογίστηκε η σχετική αβεβαιότητα της εκάστοτε απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{\varepsilon_E}\% = \frac{\sigma_{\varepsilon_E}}{\varepsilon_E} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Επομένως όλες οι σχετικές αβεβαιότητες των αποδόσεων που παρατίθενται στην παρούσα εργασία έχουν προσδιοριστεί με τη χρήση της σχέσης (3.7), έχοντας υπολογίσει αρχικά τις τυπικές αβεβαιότητες με τη χρήση της σχέσης (3.6). **(74)**

3.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΩΔΙΚΑ PENELOPE

3.2.1 ΘΕΤΟΝΤΑΣ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στο πλαίσιο εξοικείωσης με το λογισμικό «PENELOPE», μελετήθηκε ο συντελεστής εξασθένησης ακτινοβολίας κατά τη διέλευσή της μέσα από την ύλη. Στην τρέχουσα προσομοίωση υπολογίστηκε ο συντελεστής εξασθένησης του χαλκού (Cu) για δέσμη ενέργειας 662 keV, που προήλθε από ραδιενεργό πηγή Καισίου-137 (Cs-137).

Ο συντελεστής εξασθένησης ορίζει το πόσο εύκολα μπορεί να διεισδύσει μια λεπτή παράλληλη δέσμη φωτονίων σε ένα υλικό ή αντίστροφα πόσο αποδοτική θωράκιση μπορεί να αποτελέσει το υλικό για τη δέσμη αυτή. Η τιμή του συντελεστή εξασθένησης εξαρτάται από το υλικό που εξετάζεται και από την ενέργεια της δέσμης. Η μονάδα μέτρησής του στο σύστημα SI είναι metres^{-1} και συμβολίζεται με το γράμμα μ . Αποτελεί μέτρο πιθανότητας αλληλεπίδρασης ανά μονάδα μήκους της διαδρομής των φωτονίων της δέσμης με το εκάστοτε υλικό

Όταν μία λεπτή δέσμη φωτονίων προσπέσει κάθετα σε ένα υλικό, θα χάσει ενέργεια λόγω των αλληλεπιδράσεων (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton, δίδυμη γένεση) των φωτονίων με την ύλη. Αν η πιθανότητα σκεδάσεων εμπεριέχεται στο συντελεστή σκεδάσεων μ_s ενώ η πιθανότητα απορρόφησης στο συντελεστή απορρόφησης μ_{ab} , ο συντελεστής εξασθένησης μ ορίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω ως το άθροισμα των δύο αυτών συντελεστών.

Η εξασθένηση λεπτής μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων η οποία προσπίπτει κάθετα σε υλικό πάχους x περιγράφεται από τη σχέση.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.8)$$

όπου

I_0 : το πλήθος των αρχικών φωτονίων της δέσμης

I : το πλήθος των φωτονίων που δεν αλληλεπίδρασαν κατά τη διέλευσή τους από το υλικό (παρθενικά)

μ : ο συντελεστής εξασθένησης

x : το πάχος του υλικού

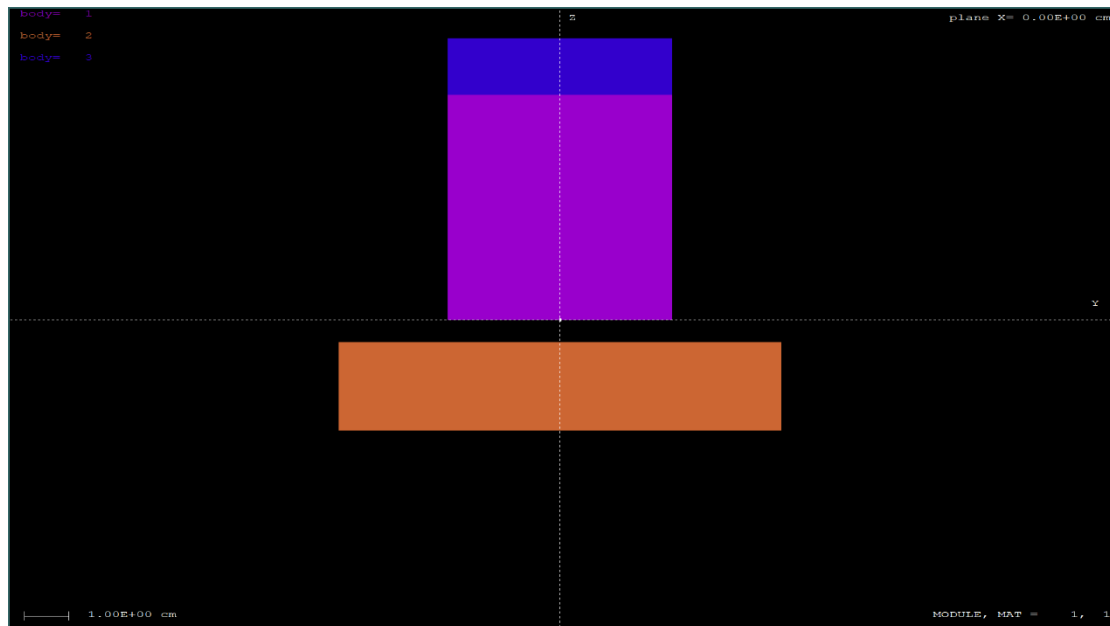
3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Αρχικά, προσομοιώθηκε η λεπτή μονοενεργειακή δέσμη η οποία προσέπιπτε κάθετα σε στρώμα χαλκού. Πίσω από το στρώμα χαλκού υπήρχε ανιχνευτής, η απορρόφηση φωτονίων στον οποίο καταγραφόταν στο ενεργειακό φάσμα εξόδου της προσομοίωσης.

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας PENELOPE και το κυρίως πρόγραμμα renmain. Σκοπός ήταν η δημιουργία μιας διάταξης προσομοίωσης που θα αποτελούνταν από έναν ανιχνευτή ιωδιούχου νατρίου με μία επίστρωση σιδήρου στο πίσω μέρος του (πρόκειται για γεωμετρία ανιχνευτή που υπήρχε έτοιμη στην έκδοση της PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε), μία σημειακή πηγή Cs-137 καθώς και μία πλάκα χαλκού ενδιάμεσα.

Επομένως, η δέσμη φωτονίων αλληλεπιδρά με τρία υλικά, το χαλκό, το ιωδιούχο νάτριο και το σίδηρο. Για την ορθή διεξαγωγή της προσομοίωσης είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών του κάθε υλικού, όπως ο ατομικός αριθμός και η πυκνότητά του, καθώς και το σύνολο των πιθανοτήτων που διέπουν κάθε δυνατό τρόπο αλληλεπίδρασης των φωτονίων διαφορετικών ενεργειών με το υλικό αυτό. Όλες αυτές οι πληροφορίες, εμπεριέχονται στο αρχείο των υλικών που δημιουργήθηκαν και αποτελούν μέρος των αρχείων εισόδου της προσομοίωσης.

Σε ό,τι αφορά στο αρχείο εισόδου που σχετίζεται με τη γεωμετρία του πειράματος, επιλέχθηκαν η θέση στο χώρο καθώς και οι διαστάσεις του ανιχνευτή και της πλάκας χαλκού. Η πλάκα χαλκού έχει επιλεγεί ώστε να έχει πάχος 2 cm και να απέχει μισό εκατοστό από τον ανιχνευτή. Εκτελώντας το αρχείο εισόδου με το “gview2d.exe” προκύπτει η δισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος:

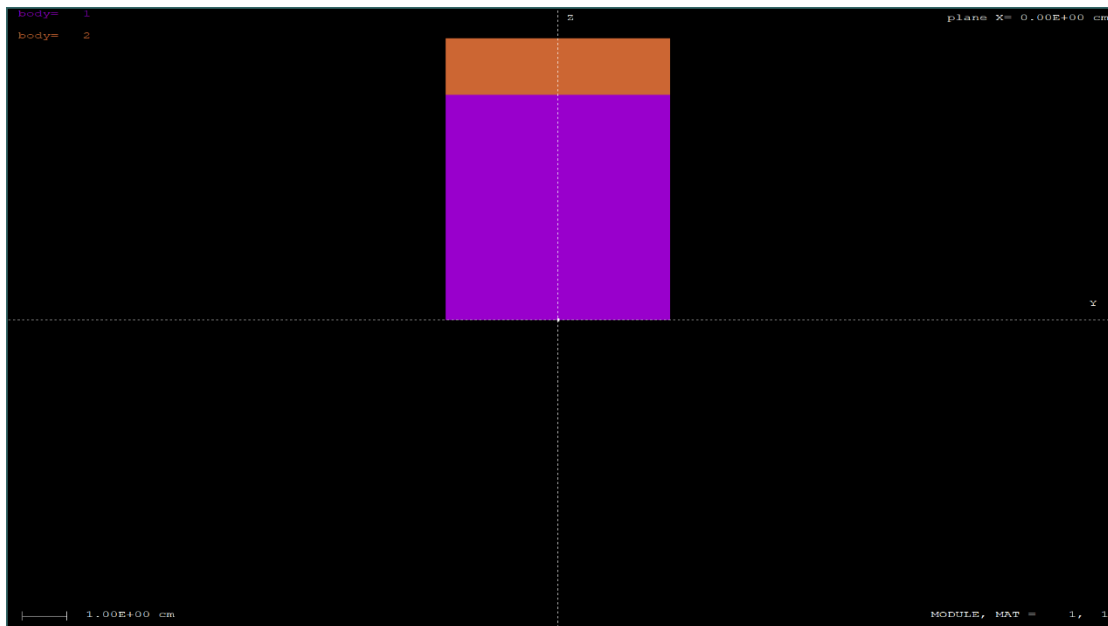


Εικόνα 3.2. Ο ανιχνευτής απεικονίζεται με τα χρώματα ροζ (ιωδιούχο νάτριο) και μπλε (σίδηρος) ενώ η πλάκα χαλκού με το χρώμα πορτοκαλί.

Σε ό,τι αφορά στο αρχείο εισόδου `.in`, εκεί περιγράφονται οι συνθήκες διεξαγωγής της προσομοίωσης. Εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά της πηγής η οποία επιλέχθηκε ως μονοενεργειακή πηγή Cs-137 σε απόσταση 3.5 cm από την πλάκα χαλκού, η οποία για τις ανάγκες του πειράματος δεν εκπέμπει ισοτροπικά αλλά σε μία λεπτή δέσμη. Επιλέχθηκε το είδος του ανιχνευτή ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας.

Με επιλεγμένες όλες τις παραμέτρους, πραγματοποιήθηκε η «εκτέλεση» του προγράμματος.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και στη δεύτερη προσομοίωση, χωρίς να ληφθούν υπόψη τα δεδομένα που αφορούσαν στο στρώμα χαλκού. Η γεωμετρία της προσομοίωσης ήταν η εξής:



Εικόνα 3.3 Ο ανιχνευτής απεικονίζεται με τα χρώματα ροζ (ιωδιούχο νάτριο) και πορτοκαλί (σίδηρος).

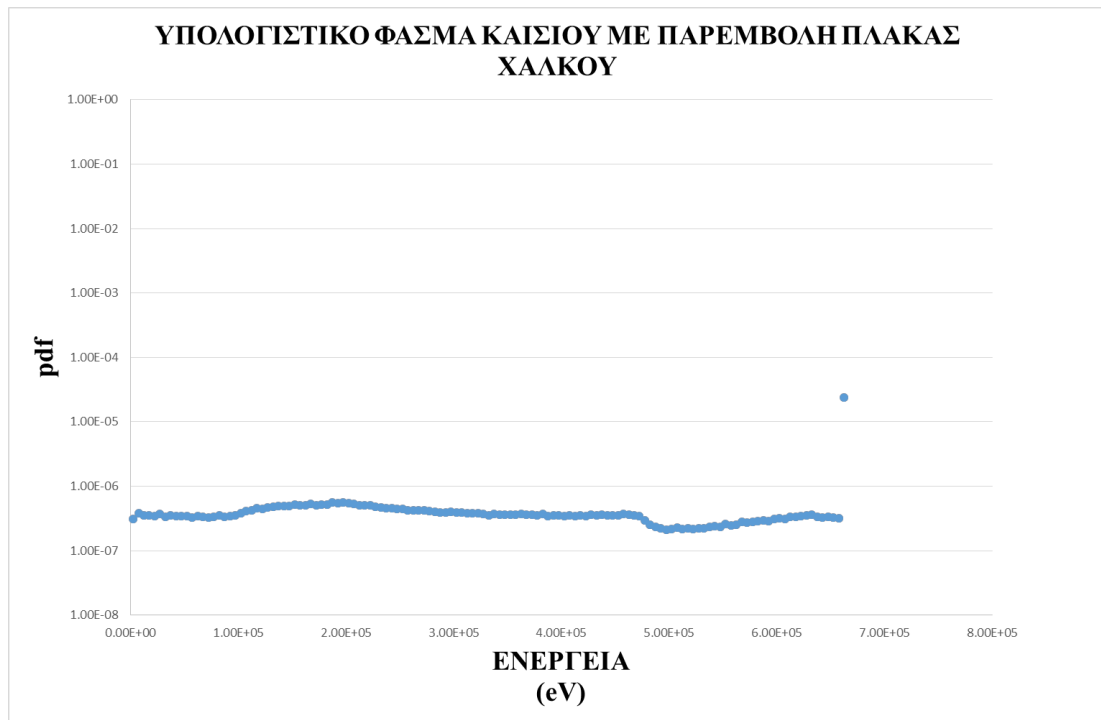
3.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εκάστοτε προσομοίωση τερματίστηκε μετά το πέρας χρονικού διαστήματος το οποίο επαρκούσε ώστε να μειωθεί αρκετά το στατιστικό της σφάλμα.

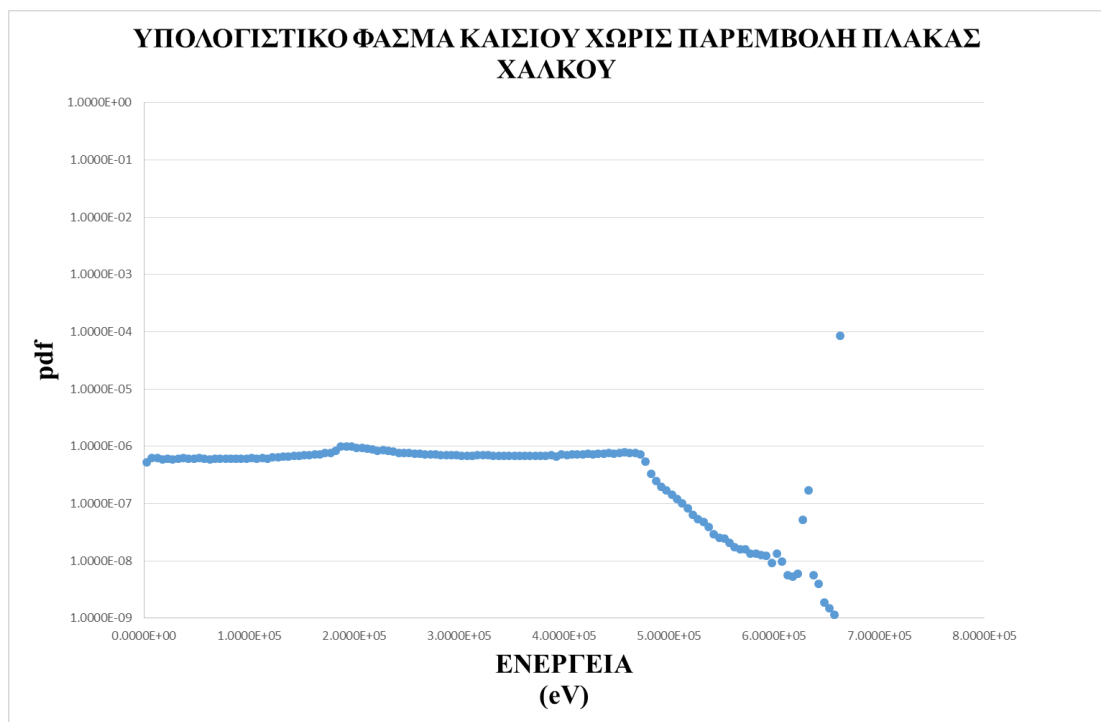
Στο αρχείο εξόδου renmain-res.dat συγκεντρώνονται πληροφορίες σχετικά με το χρόνο και την ταχύτητα της προσομοίωσης, τον αριθμό πρωτογενών σωματιδίων και το ποσοστό τους που ξεφεύγει από τη γεωμετρία του πειράματος καθώς και οι πιθανότητες εμφάνισης δευτερογενών σωματιδίων.

Στο αρχείο εξόδου src-enddet-01.dat εμπεριέχονται οι πληροφορίες που αξιοποιήθηκαν στη μελέτη της συγκεκριμένης εφαρμογής. Όπως έχει ήδη περιγραφεί, πρόκειται για το ενεργειακό φάσμα αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή συνοδευόμενο από την αντίστοιχη αβεβαιότητα. Παρατίθενται τα δύο υπολογιστικά φάσματα του καισίου, με την παρεμβολή της πλάκας χαλκού μεταξύ πηγής και ανιχνευτή αλλά και χωρίς αυτή.

Όπως παρατηρείται, τα φάσματα συνάδουν με τη μορφή που αναμενόταν θεωρητικά σύμφωνα με την παράγραφο 3.2.2.



Εικόνα 3.4 Υπολογιστικό φάσμα καισίου με παρεμβολή πλάκας χαλκού μεταξύ πηγής και ανιχνευτή



Εικόνα 3.5 Υπολογιστικό φάσμα καισίου χωρίς παρεμβολή πλάκας χαλκού μεταξύ πηγής και ανιχνευτή

Τα ενεργειακά φάσματα εξόδου αποτελούνται από δύο διακριτά μέρη:

- τη φωτοκορυφή (μηδενικού fwhm) καταγραφής των φωτονίων 662 keV. Πρόκειται για φωτόνια που αλληλεπίδρασαν με τον ανιχνευτή αποθέτοντας πλήρως την ενέργειά τους σε αυτόν, και
- το υπόλοιπο φάσμα στην περιοχή ενεργειών <662 keV το οποίο αντιστοιχεί στην ενέργεια που αποτέθηκε στον ανιχνευτή από τα σκεδαζόμενα σε αυτόν φωτόνια ή από φωτόνια που σκεδάστηκαν σε άλλα σημεία της γεωμετρίας προσομοίωσης και τα παραγόμενα δευτερογενή σωματίδια ή σκεδαζόμενα φωτόνια που απέθεσαν την ενέργειά τους (ή μέρος αυτής) στον ανιχνευτή .

Στο τμήμα Α καταγράφηκαν τα φωτόνια τα οποία δεν αλληλεπίδρασαν με την πλάκα Cu και έτσι έφτασαν στον ανιχνευτή. Πρόκειται δηλαδή για τα φωτόνια I της σχέσης (3.8). Εξαίρεση σε αυτό αποτέλεσαν τα φωτόνια που αλληλεπίδρασαν με Rayleigh και καταγράφηκαν από τον ανιχνευτή. Αντίστοιχα, στο τμήμα Β καταγράφηκαν φωτόνια τα οποία αλληλεπίδρασαν με Compton είτε στην πλάκα Cu είτε στον ίδιο τον ανιχνευτή. Για την εκτίμηση των αρχικών φωτονίων της δέσμης, επαναλήφθηκε η προσομοίωση χωρίς της παρουσία της πλάκας χαλκού. Σε αυτή την περίπτωση το τμήμα Α του ενεργειακού φάσματος που λαμβάνεται αποτελεί τον όρο I_0 της σχέσης (3.8).

Από τα διαθέσιμα δεδομένα των δύο προσομοιώσεων, υπολογίστηκε ο ζητούμενος συντελεστής διόρθωσης ως ακολούθως. Ανατρέχοντας στα δεδομένα που λήφθηκαν από την προσομοίωση χωρίς την πλάκα χαλκού, υπολογίστηκε ο λόγος I'/I_0' . Όπως προκύπτει από τον ορισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας:

$$I' = pdf \cdot \Delta E_{bin} \cdot I_0' \quad (3.9)$$

Το εύρος του ενεργειακού παραθύρου ΔE_{bin} υπολογίστηκε εύκολα αφαιρώντας δύο διαδοχικά ενεργειακά κανάλια. Βρέθηκε ίσο με 5 keV. Διαφορετικά, θα μπορούσε να υπολογιστεί σύμφωνα με τον τύπο

$$\Delta E_{bin} = (E_l - E_u)/NBE \quad (3.10)$$

όπου E_l και E_u το μέγιστο και ελάχιστο ενεργειακό όριο ανίχνευσης αντιστοίχως και NBE ο αριθμός ενεργειακών καναλιών που χρησιμοποιήθηκαν. Τελικά προέκυψε ότι

$$\left(\frac{I'}{I_0'}\right) = 4.213 \cdot 10^{-1} \quad (3.11)$$

Η τιμή αυτή, 42.13%, εκφράζει την απόδοση του ανιχνευτή που προσομοιώθηκε .

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της προσομοίωσης με την πλάκα χαλκού. Υπολογίστηκε το $\Delta E_{bin} = 5 \text{ keV}$, όπως και προηγουμένως, αφού δε μεταβλήθηκαν οι συνθήκες διεξαγωγής της προσομοίωσης. Για τα φωτόνια που κατέληξαν στον ανιχνευτή με ενέργεια 662 keV, δηλαδή που δεν αλληλεπιδράσαν με το στρώμα χαλκού, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.9)

$$I = 0.118 \cdot I_0 \quad (3.12)$$

Για τον υπολογισμό του ζητούμενου λόγου συντελεστή ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απόδοση του ανιχνευτή, όπως αυτή εκτιμήθηκε στη σχέση (3.11). Τελικά,

$$e^{-\mu x} = \frac{0.118}{0.4231} = 0.278 \text{ και } \mu = 0.64 \text{ cm}^{-1}$$

Η βιβλιογραφικά αναμενόμενη τιμή του συντελεστή μ , είναι $\mu = 0.655 \text{ cm}^{-1}$, δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερη. (53) Οι δύο τιμές έχουν απόκλιση 2.3% η οποία κρίνεται ικανοποιητική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, δεδομένων και των αβεβαιοτήτων της προσομοίωσης αλλά και των παραδοχών που έγιναν για την υλοποίησή της. Ενδεικτικά αναφέρεται η περίπτωση φωτονίων που σκεδάζονται ελαστικά στην πλάκα και καταλήγουν στον ανιχνευτή ή φωτόνια τα οποία δεν αλληλεπιδρούν με την πλάκα αλλά ούτε και με τον ανιχνευτή. Δεν γίνεται αναλυτικότερη αναφορά στις αβεβαιότητες που συνοδεύουν τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης καθώς η παρούσα εφαρμογή αποτελεί μια απλή εξοικείωση με τον κώδικα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, ότι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων στα αρχεία εισόδου, όπως πχ. η ενέργεια φωτονίων και το υλικό της πλάκας που παρεμβάλλεται, να υπολογίσει το συντελεστή εξασθένησης για πληθώρα υλικών και ενεργειών.

3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των σωμάτων που συμμετέχουν στην προσομοίωση είναι απαραίτητη ώστε αυτά να εισαχθούν στο αρχείο γεωμετρίας file.geo και να περιγραφεί κατά το δυνατό πιστά το πείραμα που προσομοιώνεται. Οι διαστάσεις τους επηρεάζουν τη διαδικασία ανίχνευσης ποικιλοτρόπως. Μεταβάλλουν σημαντικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, επομένως είναι σημαντικό οι διαστάσεις όλων των σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος της εργασίας να ταυτίζονται με αυτές που εισάγονται στον κώδικα.

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι διαστάσεις της πηγής επιδρούν σημαντικά στην απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης, καθώς διαφοροποίηση των διαστάσεων μεταβάλλει τόσο τη στερεά γωνία ανίχνευσης όσο και την επίδραση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης. **(38, 57, 62, 74)**

Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία **(45, 58, 64, 74, 75)** ότι οι διαστάσεις του ανιχνευτή επηρεάζουν την ολική του απόδοση καθώς και την απόδοση φωτοκορυφής. Η απόδοση του ανιχνευτή επηρεάζεται επίσης σημαντικά, όπως αναφέρεται εκτενώς και στο κεφάλαιο 2.5, από τα υλικά από τα οποία απαρτίζονται τα σώματα της ανιχνευτικής διάταξης. Κάθε υλικό έχει διαφορετική ενεργό διατομή για κάθε ενέργεια, επομένως ευνοεί διαφορετικές αλληλεπιδράσεις.

3.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΑΘΙΟΥ ΠΑΛΑΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Με σκοπό την εύρεση των διαστάσεων του δοχείου που εμπεριείχε τις ραδιενεργές πηγές και την εποξική ρητίνη, μετρήθηκαν όλες οι διαστάσεις ενός κενού δοχείου παλαιάς γεωμετρίας. Συγκριμένα, παρατίθενται αναλυτικά οι διαστάσεις του δείγματος που εισήχθησαν στο αρχείο γεωμετρίας του κώδικα PENELOPE :

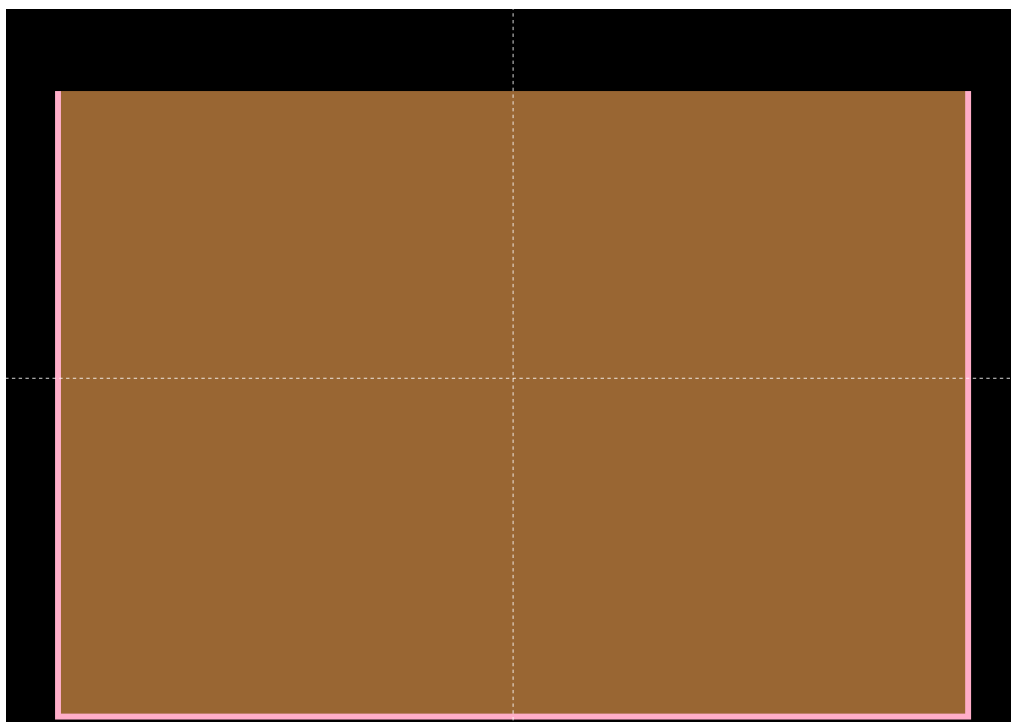
- Διάμετρος πηγής : 7.834 cm
- Ύψος πηγής : 5.515 cm για 260 mL, 2.0746 cm για 100 mL
- Πάχος δοχείου πηγής : 0.203 cm
- Απόσταση δοχείου από παράθυρο ανιχνευτή : 0.052 cm

Επισημαίνεται ότι το δοχείο (κυάθιο, container) που περικλείει την πηγή έχει σταθερό πάχος στο κάτω αλλά και στα πλαϊνά του μέρη. Θεωρήθηκε ότι δεν περικλείει την πηγή από την πάνω πλευρά, καθώς τα φωτόνια που σκεδάζονται εκεί δεν επιδρούν στις μετρήσεις. Οφείλει να αναφερθεί ότι το δοχείο της πηγής παρουσίαζε εσοχές στην κάτω πλευρά. Αυτές οι εσοχές λήφθηκαν υπόψη εισάγοντας την απόσταση του δοχείου από το παράθυρο του ανιχνευτή ως 0.052 cm. Όλα αυτά τα δεδομένα συμπεριλήφθηκαν στο αρχείο γεωμετρίας.

Στο αρχείο εισόδου συμπεριλαμβάνονται οι συντεταγμένες της θέσης της πηγής στο χώρο και οι διαστάσεις της επί των τριών αξόνων. Το ύψος της πηγής μεταβάλλεται ανάλογα με τον όγκο πλήρωσης του δοχείου. Η συνολική επιφάνεια της πηγής λαμβάνεται ως η τομή των διαστάσεών της που έχουν περιγραφεί στο αρχείο γεωμετρίας με τις διαστάσεις που έχουν περιγραφεί στο αρχείο εισόδου.



Εικόνα 3.6 Φωτογραφία γεωμετρίας πηγής παλαιού κυαθίου.



Εικόνα 3.7 Αποτύπωση πηγής γεωμετρίας παλαιού κυαθίου (καφέ χρώμα) και περιβλήματος πολυαιθυλενίου (ροζ χρώμα) μέσω του κώδικα PENELOPE.

3.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

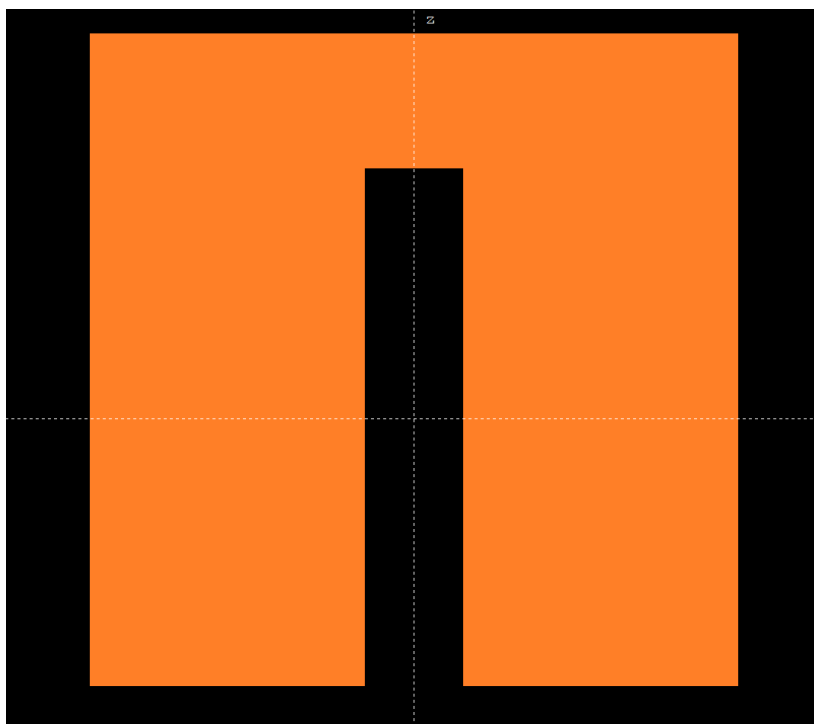
3.5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι διαστάσεις, καθώς και τα υλικά κατασκευής όλων των δομών της ανιχνευτικής διάταξης λήφθηκαν από το πιστοποιητικό του προμηθευτή. Το πιστοποιητικό παρατίθεται στο Παράρτημα 2. Όπως αναδεικνύεται παρακάτω, σε κάποιες περιπτώσεις οι πληροφορίες που διατίθενται από το πιστοποιητικό δεν είναι επαρκείς.

Κρύσταλλος ανιχνευτή

Όσον αφορά τις διαστάσεις του κρυστάλλου του ανιχνευτή, η διάμετρος του αναφέρεται στο πιστοποιητικό ως 7.2 cm, το μήκος του 7.25 cm και η απόσταση του κρυστάλλου από το παράθυρο του ανιχνευτή 0.5 cm. Πληροφορίες σχετικά με τις διαστάσεις της οπής και την απόστασή της από το παράθυρο του ανιχνευτή δε συμπεριλαμβάνονταν στο σχετικό πιστοποιητικό. Τέλος, ως υλικό του κρυστάλλου του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε το γερμάνιο. Οι διαστάσεις φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 3.8. Είναι εμφανές ότι για την έκφραση της γεωμετρίας είναι

απαραίτητη η γνώση των διαστάσεων της οπής καθώς και της απόστασής της από το παράθυρο του ανιχνευτή.



Εικόνα 3.8 Προσομοίωση της γεωμετρίας του κρυστάλλου του ανιχνευτή σύμφωνα με το πιστοποιητικό του.

Περίβλημα ανιχνευτή

Οι διαστάσεις του περιβλήματος του ανιχνευτή επηρεάζουν και αυτές τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η απόσταση του κρυστάλλου από το περίβλημα είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς μέρος των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή αλληλεπιδρά με το περίβλημα, κυρίως με σκεδάσεις. Έτσι, οι διαστάσεις του επηρεάζουν σημαντικά τον αριθμό φωτονίων που καταλήγουν στον ανιχνευτή χωρίς να έχουν αλληλεπιδράσει. Ακόμη, κάποια φωτόνια σκεδάζονται και με το υλικό του παραθύρου το οποίο περιβάλλει τον ανιχνευτή. Έτσι, είτε καταλήγουν στον ανιχνευτή έχοντας χάσει ενέργεια, είτε δεν ανιχνεύονται καθόλου. **(37, 75)**

Το μήκος του περιβλήματος εκτιμήθηκε ως 13.5 cm, με πάχος (μεταξύ παραθύρου ανιχνευτή και πηγής) 0.1 cm, ενώ η εξωτερική διάμετρος του περιβλήματος του ανιχνευτή μετρήθηκε 4.45 cm, με πάχος 0.15 cm. Το πάχος του κάτω μέρους του περιβλήματος δεν ήταν γνωστό με ακρίβεια, επομένως θεωρήθηκε ίσο με 0.1 cm. Μία τέτοια θεώρηση καθίσταται δυνατή, καθώς οι διαστάσεις του κάτω μέρους του περιβλήματος δεν επηρεάζουν σημαντικά

την απόδοση του ανιχνευτή. Τέλος, το υλικό του περιβλήματος ήταν ο χαλκός.

Θωράκιση ανιχνευτή

Η θωράκιση του εκάστοτε ανιχνευτή επηρεάζει το φάσμα που λαμβάνεται. Ρόλος της θωράκισης είναι ο περιορισμός της ακτινοβολίας υποβάθρου, η οποία προσδίδει αβεβαιότητα στις μετρήσεις και αυξάνει τα όρια ανίχνευσης. **(74)**

Το μήκος της θωράκισης του ανιχνευτή όπως αναφέρεται στο σχετικό πιστοποιητικό ήταν 35 cm, με μπροστινό πάχος 5 cm και οπίσθιο πάχος 1.5 εκατοστό. Η διάμετρός της μετρήθηκε 20 cm, με πάχος 5 cm. Η θωράκιση απαρτίζεται από δύο ή τρία στρώματα υλικών. Συνήθως το εσωτερικό στρώμα είναι κατασκευασμένο από χαλκό, το ενδιάμεσο από μόλυβδο και το εξωτερικό από χάλυβα. Αυτό συμβαίνει διότι ο χαλκός έχει μεγάλη ενεργό διατομή απορρόφησης (πιθανότητα φωτοηλεκτρικού φαινομένου) στις χαμηλές ενέργειες. Έτσι, απορροφά τις ακτίνες X και γ που προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις φωτονίων υψηλής ενέργειας με το στρώμα του μολύβδου. **(55)**

Στο πλαίσιο των προσομοιώσεων της εργασίας και καθώς οι υπολογισμοί αφορούσαν στην απόδοση φωτοκορυφής, δεν λήφθηκε υπόψη η θωράκιση του ανιχνευτή³. Εάν είχε συμπεριληφθεί η θωράκιση στο αρχείο γεωμετρίας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δε θα μεταβάλλονταν, αλλά θα σημειωνόταν σημαντική αύξηση στο χρόνο της προσομοίωσης καθώς θα υπολογίζονταν και οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με τα υλικά της θωράκισης. Αντίθετα, στην περίπτωση κατά την οποία οι υπολογισμοί αφορούσαν και στην ολική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης θα έπρεπε να συμπεριληφθεί η θωράκιση ώστε να μην υποεκτιμάται το φαινόμενο Compton. **(56)**

³ Πρακτικά η θωράκιση περιγράφηκε μεν στο αρχείο γεωμετρίας και ορίστηκαν οι δομές της, ώστε να είναι ολοκληρωμένο το αρχείο για μελλοντική χρήση, όμως, ως υλικό θωράκισης χρησιμοποιήθηκε το κενό, έτσι ώστε να μη λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση οι αλληλεπιδράσεις των ακτινοβολιών με αυτή.

3.5.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΗΣΤΗ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβλήματος καθώς και της θωράκισης είναι δυνατόν να περιγραφούν με ακρίβεια από το χρήστη, με τη χρήση των δεδομένων από το πιστοποιητικό αλλά και με άμεσες μετρήσεις.

Αντίθετα δεν είναι άμεσος ο προσδιορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων του κρυστάλλου καθώς αυτός βρίσκεται εντός του περιβλήματος. Όσον αφορά στον κρύσταλλο του ανιχνευτή, καταρχάς οφείλουν να προσδιοριστούν οι διαστάσεις της οπής καθώς και η απόστασή της από το παράθυρό του. Όμως, ακόμη και η γνώση αυτών των δεδομένων δεν επαρκεί για την ακριβή προσομοίωση του κρυστάλλου. Συγκεκριμένα, για την αντιπροσωπευτικότερη περιγραφή του είναι απαραίτητη και η εκτίμηση της έκτασης των νεκρών ζωνών του.

3.6 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΕΚΡΩΝ ΖΩΝΩΝ

Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου τύπου-p, έχει μία επαφή n+ και μια επαφή p+, οι οποίες δημιουργούνται από την έγχυση ατόμων λιθίου και βορείου αντιστοίχως. Η επαφή n+ καλύπτει μέρος της μπροστά και της πλαϊνής επιφάνειας του κρυστάλλου γερμανίου και τον συνδέει με το θετικό ηλεκτρόδιο. Η επαφή p+ καλύπτει μέρος της επιφάνειας του κρυστάλλου γύρω από την οπή και τον συνδέει με το αρνητικό ηλεκτρόδιο. **(30, 31,74)**

Οι νεκρές ζώνες δημιουργούνται από την επαφή λιθίου n+ ή βορείου p+. Πρόκειται για ανενεργές περιοχές, στις οποίες δε συλλέγεται η ενέργεια από τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν ή απορροφώνται και δεν παράγεται σήμα από τον ανιχνευτή. **(30, 31,74)** Η ενέργεια η οποία απορροφάται στις περιοχές αυτές έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μειωμένου σήματος. **(24)**

Η σωστή επιλογή του πάχους της νεκρής ζώνης του ανιχνευτή είναι καθοριστικής σημασίας για την προσομοίωση, καθώς επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, με αύξηση του πάχους της νεκρής ζώνης μειώνεται η ολική απόδοση του ανιχνευτή και η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή, ενώ αυξάνεται ο λόγος TTP (total to peak ratio) **(45, 74)**. Η

απόδοση του ανιχνευτή συναρτήσει του πάχους των περιοχών νεκρών ζωνών οφείλεται σε δύο διαφορετικά φαινόμενα. Αρχικά, η αύξηση πάχους των νεκρών ζωνών προκαλεί περαιτέρω θωράκιση στις ακτίνες γ που διεισδύουν στον κρύσταλλο, μειώνοντας έτσι την απόδοσή του **(6, 9, 65)**. Ακόμη, αύξηση πάχους των νεκρών ζωνών επιφέρει μείωση του ενεργού όγκου του κρυστάλλου γερμανίου, το οποίο επιφέρει και αυτό με τη σειρά του μείωση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης. **(6, 65)** Η επίδραση του φαινομένου θωράκισης είναι έντονη μόνο για χαμηλές ενέργειες, ενώ η επίδραση του φαινομένου αλλαγής του ενεργού όγκου του ανιχνευτή επηρεάζει όλες τις ενέργειες **(2, 58)** Επομένως, μικρές μεταβολές στο πάχος της νεκρής ζώνης λιθίου μπορούν να επηρεάσουν αρκετά την απόδοση του ανιχνευτή στο φάσμα των χαμηλών ενεργειών. **(26)** Το πάχος της νεκρής ζώνης εξαρτάται από τη γεωμετρία του ανιχνευτή, το βάθος και το είδος της επαφής, την καθαρότητα του γερμανίου και την υψηλή τάση πόλωσης που εφαρμόζεται. **(6, 74)**

Τέλος, έχει παρατηρηθεί η ύπαρξη ενός στρώματος μετάβασης, μεταξύ του γερμανίου του ενεργού όγκου του κρυστάλλου και των νεκρών ζωνών **(2, 65)** Η χαμηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε αυτό το στρώμα έχει ως αποτέλεσμα την ατελή καθώς και αργή συλλογή φορτίου. Ως αποτέλεσμα, τα γεγονότα τα οποία προέρχονται από αλληλεπιδράσεις σε αυτό το στρώμα αυξάνουν το υπόβαθρο. Η ύπαρξη αυτού του στρώματος δυσκολεύει τον προσδιορισμό του πάχους των νεκρών ζωνών **(2, 58)** Στην παρούσα εργασία, κατά τη διαδικασία του προσδιορισμού κατάλληλων τιμών πάχους νεκρών ζωνών, το στρώμα μετάβασης δε λήφθηκε υπόψη.

3.7 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΠΑΧΩΝ ΝΕΚΡΩΝ ΖΩΝΩΝ

Οι πληροφορίες που παρέχονται από τον κατασκευαστή σχετικά με τις διαστάσεις της νεκρής ζώνης του ανιχνευτή είναι συχνά ανακριβείς. (2, 44, 58) Ενδεικτικά, εκτιμάται ότι οι διαστάσεις της νεκρής ζώνης είναι περίπου διπλάσιες από τις εκτιμώμενες (9, 45, 58, 74) Ακόμη, έχει παρατηρηθεί ότι οι διαστάσεις της νεκρής ζώνης αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. (6, 10, 30, 31) Αυτό το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί κυρίως σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου, και οφείλεται στη συνεχή έγχυση ατόμων Λιθίου μέσα στον κρύσταλλο. Επομένως, το πάχος των νεκρών ζωνών έχει την ελάχιστη τιμή αμέσως μετά την κατασκευή του ανιχνευτή. (31)

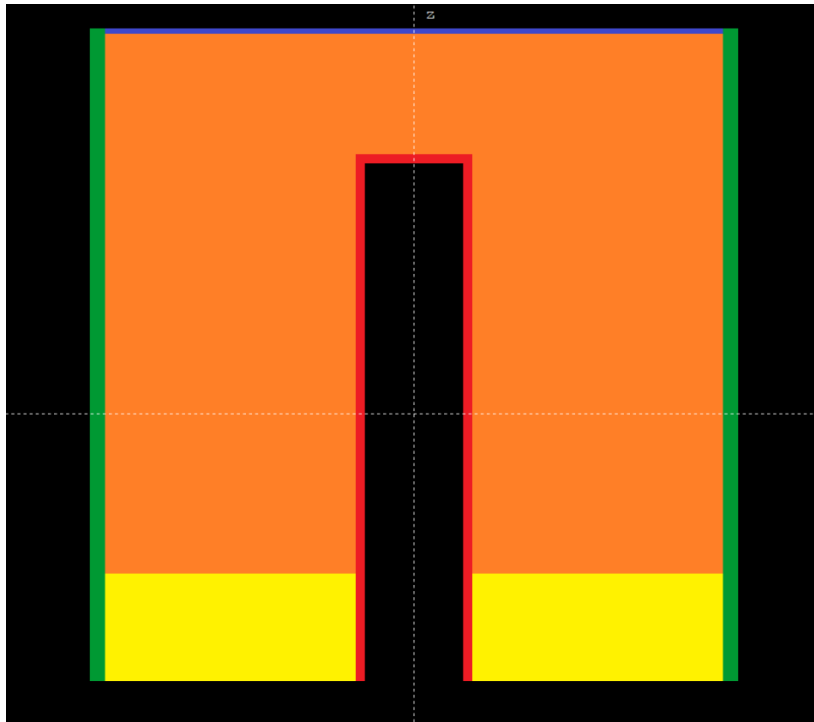
Όσον αφορά τον υπό μελέτη ανιχνευτή, δε συμπεριλαμβάνονταν στο πιστοποιητικό του δεδομένα που αφορούν τις νεκρές ζώνες. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ακόμη και εάν αυτά τα δεδομένα διατίθενται, ο επαναπροσδιορισμός τους καθίσταται απαραίτητος. Ακόμη, στα πλαίσια αυτής της παραγράφου προσδιορίστηκαν εκτός από τα πάχη των νεκρών ζωνών και οι διαστάσεις της οπής του ανιχνευτή, καθώς και η απόστασή της από το παράθυρό του.

Πριν την παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, οφείλουν να αναφερθούν οι παρακάτω παρατηρήσεις και παραδοχές:

- Με σκοπό τη μεταφορά της γεωμετρίας των νεκρών ζωνών στην προσομοίωση, θεωρήθηκε ότι ο ανιχνευτής παρουσιάζει τέσσερις διαφορετικές περιοχές νεκρών ζωνών. Η μπροστά περιοχή, η πίσω περιοχή, η πλαϊνή περιοχή και η περιοχή της οπής. Η γεωμετρία του κρυστάλλου καθώς και οι διαφορετικές περιοχές των νεκρών ζωνών είναι εμφανής στην Εικόνα 3.8
- Κάθε περιοχή νεκρής ζώνης επιδρά διαφορετικά στα φωτόνια που προσπίπτουν σε αυτή, άρα και στην απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή, αναλόγως με την ενέργεια των εκάστοτε φωτονίων. Συγκεκριμένα, τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας επηρεάζονται κυρίως από την μπροστινή νεκρή ζώνη, καθώς χάνουν ενέργεια και απορροφώνται πριν φτάσουν σε μεγάλο βάθος μέσα στον ανιχνευτή. (6, 74) Τα φωτόνια μέσης ενέργειας επηρεάζονται κυρίως από την

πλαϊνή νεκρή ζώνη και από τη νεκρή ζώνη της οπής. Τα φωτόνια μεγάλης ενέργειας επηρεάζονται κυρίως από την πίσω νεκρή ζώνη, δεδομένου ότι διαπερνούν το μεγαλύτερο μέρος του ανιχνευτή χωρίς να αλληλεπιδράσουν με αυτόν και τελικά χάνουν ενέργεια σε μεγάλο βάθος μέσα στον ανιχνευτή.

- Οι νεκρές ζώνες του ανιχνευτή δεν παρουσιάζουν ομοιογένεια. Ωστόσο, για τις ανάγκες της προσομοίωσης, το πάχος της εκάστοτε νεκρής ζώνης θεωρήθηκε σταθερό και ομοιογενές. Αυτό δε συμβαδίζει με την πραγματικότητα, καθώς οι νεκρές ζώνες αποτελούνται από συνεχώς αυξανόμενη συγκέντρωση προσμίξεων, ανάλογη με το βάθος. **(7)** Δεδομένου όμως ότι στην παρούσα εργασία μελετάται η απόδοση φωτοκορυφής, η προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε είναι αποδεκτή. **(8, 10, 27)** Σύμφωνα με κάποιες μελέτες, η θεώρηση ομοιογένειας της νεκρής ζώνης μπορεί να επιφέρει αποκλίσεις των υπολογιστικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά. **(68)** Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των προσπιπτόντων σωματιδίων, τόσο μικρότερες είναι οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται λόγω ανομοιογένειας. **(6)**
- Ως υλικό προσομοίωσης για τις περιοχές νεκρών ζωνών χρησιμοποιήθηκε το γερμάνιο προσεγγιστικά. **(10, 74)**
- Οι τιμές νεκρών ζωνών που υπολογίζονται δεν ανταποκρίνονται σε φυσικά μεγέθη. Αποτελούν μία από τις άπειρες δυνατές λύσεις ώστε να περιγραφούν οι διαστάσεις του κρυστάλλου του ανιχνευτή οδηγώντας σε αποδεκτές αποκλίσεις υπολογιστικών – πειραματικών αποτελεσμάτων. **(26)**
- Οι τιμές πάχους νεκρών ζωνών, όπως αυτές εκτιμήθηκαν, λαμβάνουν υπόψη και τις ατέλειες του ανιχνευτή που οδηγούν σε μερική συλλογή φορτίου. **(26)**



Εικόνα 3.9 Κρύσταλλος του ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου και οι διαφορετικές περιοχές νεκρών ζωνών του. (ενεργός όγκος ανιχνευτή-πορτοκαλί, μπροστά νεκρή ζώνη-μπλε, πλαϊνή νεκρή ζώνη-πράσινο, πίσω νεκρή ζώνη-κίτρινο, νεκρή ζώνη οπής-κόκκινο χρώμα)

Καταλήγοντας, με σκοπό την εύρεση κατάλληλων τιμών για τα πάχη των νεκρών ζωνών καθώς και τις διαστάσεις της οπής του ανιχνευτή και την απόστασή της από το παράθυρό του, εφαρμόστηκε επαναληπτική διαδικασία με βάση την οποία:

- επιλεγόταν μια ομάδα γεωμετρικών χαρακτηριστικών (π.χ. πάχος μπροστινής νεκρής ζώνης του ανιχνευτή
- μέσω προσομοίωσης γινόταν εκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για την παλαιά γεωμετρία κυαθίων
- η υπολογιστική απόδοση συγκρινόταν με την αντίστοιχη πειραματική τιμή και
- η διαδικασία επαναλαμβανόταν μέχρι να επέλθει σύγκλιση της τάξης του 5%

Οι προσομοιώσεις διενεργήθηκαν υπό τις ακριβείς συνθήκες με τις οποίες υπολογίστηκαν οι πειραματικές αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης στην παράγραφο 2.5.4. Ο ανιχνευτής ήταν τοποθετημένος σε καθορισμένη απόσταση από πρότυπη πηγή όγκου, γνωστής ενεργότητας. Οι διαστάσεις του ανιχνευτή καθώς και του περιβλήματός του εισήχθησαν στον κώδικα

σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι διαστάσεις της πηγής καθώς και του δοχείου που την εμπεριείχε μετρήθηκαν και εισήχθησαν και αυτές στον κώδικα. Επισημαίνεται όμως ότι όλες οι πηγές που προσομοιώθηκαν ήταν πηγές που αντιστοιχούσαν στη γεωμετρία παλαιού κυαθίου, όγκου πλήρωσης 260mL. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, εκτός από την ενέργεια των φωτονίων, η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης επηρεάζεται και από την πυκνότητα του διαλύματος των ραδιενεργών πηγών. Επομένως είναι αναγκαίο όλες οι πηγές να έχουν την ίδια πυκνότητα, ώστε να τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα πειραματικά. Επιλέχθηκαν πηγές σε διάλυμα epoxy resin, πυκνότητας $0.9 \frac{gr}{cm^3}$. Οι υπόλοιπες επιλογές ήταν πυκνότητες 0.05, 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.7 και $2 \frac{gr}{cm^3}$. Πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τιμές πυκνοτήτων αποφεύχθηκαν για αυτή τη διαδικασία, διότι όπως αναλύεται σε επόμενα κεφάλαια συνοδεύονται από υψηλότερες αβεβαιότητες.

Με βάση την ενεργειακή εξάρτηση διαφορετικών περιοχών νεκρών ζωνών, χρησιμοποιήθηκαν τρεις πρότυπες πηγές για τον προσδιορισμό των ζητούμενων παχών. Το Am-241 με φωτόνια ενέργειας 59 keV για τον προσδιορισμό της μπροστινής νεκρής ζώνης, το Cs-137 με φωτόνια ενέργειας 662 keV για τον προσδιορισμό των πλαϊνών νεκρών ζωνών και το K-40 με φωτόνια ενέργειας 1460 keV για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης. Τέλος, το πάχος της νεκρής ζώνης της οπής θεωρήθηκε αρχικά μηδενικό, ενώ οι διαστάσεις και η απόσταση της οπής από το παράθυρο του ανιχνευτή αρχικά επιλέχθηκαν αυθαίρετα. Αναμένεται να επηρεάζονται τόσο από τα φωτόνια μεσαίων όσο και από τα φωτόνια υψηλών ενεργειών.

Καθώς μεταβαλλόταν το πάχος μιας περιοχής, τα πάχη των υπολοίπων διατηρούνταν σταθερά. Για την κάθε περιοχή που εξετάστηκε, γινόταν επιλογή δύο αυθαίρετων αλλά ακραίων τιμών πάχους. Εν συνεχεία, γινόταν σύγκριση της υπολογιστικής τιμής της προσομοίωσης με την αντίστοιχη πειραματική στη βάση της τιμής της σχετικής τους απόκλισης (relative bias) για κάθε ενέργεια φωτονίων που εξετάστηκε:

$$Rb = \frac{\epsilon_{υπολ} - \epsilon_{πειρ}}{\epsilon_{πειρ}} \quad (3.13)$$

όπου

Rb : η σχετική απόκλιση της υπολογιστικής τιμής από την πειραματική τιμή

$\epsilon_{υπολ}$: η υπολογιστική τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για μια ενέργεια φωτονίων

$\epsilon_{πειρ}$: η αντίστοιχη πειραματική τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για την ίδια ενέργεια φωτονίων.

Συγκρίνοντας τις τιμές τις προσομοίωσης με τις αντίστοιχες πειραματικές, διαμορφώνονται από το χρήστη τα πάχη των νεκρών ζωνών μέχρι οι τιμές των προσομοιώσεων να αποκλίνουν από τις πειραματικές κατά ένα ποσοστό μικρότερο του 5%. (17) Ελεγχόταν κάθε φορά το πρόσημο και η τιμή της απόκλισης από την πειραματική απόδοση και με βάση αυτό επιλεγόταν η επόμενη τιμή πάχους για την προσομοίωση. Θετική απόκλιση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πάχος της νεκρής ζώνης πρέπει να αυξηθεί, ενώ αρνητική απόκλιση συνεπάγεται ότι το πάχος της νεκρής ζώνης πρέπει να μειωθεί. Η διαδικασία συνεχιζόταν έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση και ακολουθούσε η αντίστοιχη διαδικασία για τις υπόλοιπες ζώνες. Σύμφωνα με κάποιες βιβλιογραφίες, είναι αποδεκτές ακόμη και αποκλίσεις της τάξης 5-10%, λόγω του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης (19, 65, 68)

Οι τιμές των που δοκιμάστηκαν για κάθε ζητούμενη γεωμετρική παράμετρο του κρυστάλλου, καθώς και οι αντίστοιχες υπολογιστικές αποδόσεις παρατίθενται στους Πίνακες 3.1-3.10. Για κάθε τιμή υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής παρατίθεται η σχετική αβεβαιότητά της όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (3.7), καθώς και η απόκλισή της από την αντίστοιχη πειραματική απόδοση, όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (3.13).

Πειράματα με πηγή Am-241 για τον προσδιορισμό της μπροστινής νεκρής ζώνης.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε σημειακή πρότυπη πηγή αμερικίου-241, όγκου 260 mL και πυκνότητας $0.9 \frac{gr}{cm^3}$, με σκοπό τον προσδιορισμό της μπροστινής νεκρής ζώνης. Επιλέχθηκε αυθαίρετα τιμή πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης 1 cm, απόσταση οπής-παραθύρου ανιχνευτή 2 cm και ακτίνα οπής 0.55 cm και οι τιμές αυτή παρέμειναν σταθερές.

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε, παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 οι υπολογιστικές αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης με την αντίστοιχη

αβεβαιότητα (1σ) για τα πάχη μπροστινής νεκρής ζώνης που δοκιμάστηκαν καθώς και η απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από την πειραματική απόδοση. Η πειραματική απόδοση είχε υπολογιστεί στο ΤΕΡΠΙ ίση με $0.03274 \pm 1.8\%$ (1σ).

Μεταβάλλοντας συνεχώς το πάχος της μπροστινής νεκρής ζώνης τελικά προέκυψε τιμή η οποία απέκλινε ικανοποιητικά της πειραματικής, η οποία αντιστοιχούσε σε πάχος μπροστινής νεκρής ζώνης ίσο με 0.065 cm.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το πάχος ημίσειας διαδρομής για φωτόνια ενέργειας 60 keV στο γερμάνιο είναι $d_{\frac{1}{2}} = 0.7$ mm. Επομένως, μεταβολή του πάχους της μπροστινής νεκρής ζώνης κατά 0.1 mm, επιφέρει 10% διαφοροποίηση στην απόδοση του ανιχνευτή, θεωρώντας ότι τα φωτόνια προσπίπτουν κάθετα. Δεδομένου ότι πλήθος φωτονίων προσπίπτουν υπό γωνία, η διαφοροποίηση είναι ακόμη μεγαλύτερη. (7)

Προσδιορισμός μπροστά νεκρής ζώνης με πηγή Am-241			
ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΪΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
0	0.1	$0.0056 \pm 0.35\%$	-82%
0.2	0.1	$0.08234 \pm 0.11\%$	151%
0.1	0.1	$0.02042 \pm 0.20\%$	-37%
0.075	0.1	$0.02849 \pm 0.32\%$	-12%
0.055	0.1	$0.03745 \pm 0.24\%$	14%
0.065	0.1	$0.03265 \pm 0.28\%$	-0.25%

Πίνακας 3.1 Προσδιορισμός πάχους μπροστινής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 59.54 keV του Am-241.

Πειράματα με πηγή Cs-137 για τον προσδιορισμό της πλαϊνής νεκρής ζώνης

Κρατώντας σταθερή την τιμή 0.065 cm η οποία υπολογίστηκε παραπάνω για τη μπροστινή νεκρή ζώνη, καθώς και τις τιμές που επιλέχτηκαν όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της οπής, υπολογίστηκε με την ίδια μεθοδολογία η τιμή πάχους πλαϊνής νεκρής ζώνης, χρησιμοποιώντας πρότυπη πηγή Cs-137. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, τελικά η βέλτιστη τιμή πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης ήταν τα 0.16 cm.

Στον Πίνακα 3.2 παρατίθενται οι υπολογιστικές αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης για την πληθώρα παχών πλαϊνής νεκρής ζώνης που δοκιμάστηκαν

μαζί με τις αβεβαιότητές τους (1σ), καθώς και η σχετική απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από την πειραματική απόδοση. Η πειραματική απόδοση είχε υπολογιστεί στο ίση με $0.02412 \pm 1.5\%$ (1σ).

Προσδιορισμός πλαϊνής νεκρής ζώνης με πηγή Cs-137			
ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΪΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
0.065	0.1	$0.02517 \pm 0.12\%$	4.3%
0.065	0.2	$0.02359 \pm 0.08\%$	-2.1%
0.065	0.15	$0.02438 \pm 0.08\%$	1.0%
0.065	0.17	$0.02407 \pm 0.08\%$	-0.18%
0.065	0.16	$0.02423 \pm 0.08\%$	0.49%

Πίνακας 3.2 Προσδιορισμός πάχους πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 661.65 keV του Cs-137.

Πείραμα με πηγές Am-241 και Cs-137 για επαλήθευση και βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.

Έχοντας όμως μεταβάλλει την τιμή της πλαϊνής νεκρής ζώνης, είναι απαραίτητο να επαληθευτεί εάν τα νέα δεδομένα επιδρούν ή εξακολουθούν να οδηγούν σε αποδεκτές τιμές απόκλισης για τις προσομοιώσεις με Am-241 που παρουσιάστηκαν προηγούμενα. Όπως φαίνεται παρακάτω, στον Πίνακα 3.3, η απόκλιση της απόδοσης του ανιχνευτή για το Am-241 αποκλίνει πλέον από τη θεωρητική τιμή κατά ένα ποσοστό της τάξης του -3%. Μία τέτοια απόκλιση είναι αποδεκτή, παρόλα αυτά έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα των αλλαγών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Όπως φαίνεται, οι αποκλίσεις είναι εντός των αποδεκτών ορίων.

Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων Am-241			
ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΪΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
0.065	0.16	0.03178±0.19%	-2.9%
0.063	0.16	0.03258±0.21%	-0.47%

Cs-137			
ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΪΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
0.063	0.16	0.02417±0.33%	0.25%

Πίνακας 3.3 Έλεγχος των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV και 661.65 keV.

Πειράματα με πηγή K-40 για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης.

Έχοντας προσδιορίσει τιμές για τη μπροστά και την πλαϊνή νεκρή ζώνη, χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πηγή καλίου-40, ενέργειας 1460 keV, με σκοπό τον προσδιορισμό του πάχους της πίσω νεκρής ζώνης.

Σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα πρότυπης πηγής, αναφέρεται ότι το ΤΕΡΠΙ δεν διαθέτει πιστοποιημένη πρότυπη πηγή βαθμονόμησης με K-40. Οι διαθέσιμες πηγές με εκπομπή φωτονίων στην αντίστοιχη ενεργειακή περιοχή περιείχαν ισότοπα όπως το Co-60 και το Y-88, των οποίων η συμμετοχή στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Υπενθυμίζεται ότι οι υπολογιστικές τιμές της προσομοίωσης είναι απαλλαγμένες από το εν λόγω φαινόμενο.

Για να αντιμετωπιστεί η συγκεκριμένη έλλειψη αξιοποιήθηκαν δείγματα από άσκηση διασύγκρισης που συμμετείχε η ΕΕΑΕ. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από διεργαστηριακή άσκηση διασύγκρισης 2018, στα πλαίσια του προγράμματος Procorad. Η άσκηση περιελάμβανε την ανάλυση δειγμάτων ούρων στα οποία η τιμή της συγκέντρωσης K-40 δόθηκε τελικά από τους διοργανωτές. Η ονομαστική αυτή τιμή του K-40 αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής στην ενέργεια των 1461 keV και εκτιμήθηκε ίση με $1.280E-02 \pm 0.05\%$.

Όπως προηγουμένως, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις διατηρώντας σταθερά τα πάχη μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης που ήδη προσδιορίστηκαν καθώς

και τις επιλεγμένες τιμές διαστάσεων και θέσης της οπής. Δεδομένου όμως ότι η τιμή του πάχους της πίσω νεκρής ζώνης φαίνεται να επηρεάζει αρκετά την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης και στις μεσαίες ενέργειες, στον Πίνακα 3.4 συμπεριλαμβάνονται και οι αντίστοιχες αποδόσεις και αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές για το Cs-137.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4, η βέλτιστη απόκλιση από την πειραματική τιμή 0.78% εμφανίζεται στο κάλιο για πάχος πίσω νεκρής ζώνης 1.5 cm. Η αντίστοιχη τιμή του Κεσίου είναι οριακά μη αποδεκτή, αφού υποεκτιμάται κατά 4.5%. Έτσι, ως βέλτιστη τιμή του πάχους της πίσω νεκρής ζώνης θεωρήθηκαν τα 1.2 cm, δεδομένου ότι παρατηρούνται οριακά αποδεκτές τιμές αποκλίσεων τόσο για την υπολογιστική απόδοση της ενέργειας του καλλίου όσο και για αυτή του κεσίου. (3.56% και -2.91% αντιστοίχως). Παρόλα αυτά, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω προσπάθειες βελτιστοποίησης των αποκλίσεων.

Προσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης					
	ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Cs-137	0.063	0.165	0.24	0.02431±0.53%	0.77%
K-40	0.063	0.165	0.24	0.01415±0.85%	9.7%
Cs-137	0.063	0.165	1.0	0.02349±0.43%	-2.5%
K-40	0.063	0.165	1.0	0.01353±0.74%	4.8%
Cs-137	0.063	0.165	1.5	0.02301±0.48%	-4.6%
K-40	0.063	0.165	1.5	0.01300±0.85%	0.78%
Cs-137	0.063	0.165	1.2	0.02342±0.47%	-2.9%
K-40	0.063	0.165	1.2	0.01335±0.82%	3.5%

Πίνακας 3.4 Προσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 661.65 keV και 1460 keV.

Πειράματα με πηγές Cs-137 και K-40 για βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.

Είναι εμφανές ότι διαμορφώνοντας μόνο το πάχος της πίσω νεκρής ζώνης δεν επέρχεται το ιδανικό αποτέλεσμα. Έτσι, επιχειρήθηκε η μεταβολή περαιτέρω παραμέτρων του κρυστάλλου του ανιχνευτή. Στο πλαίσιο αυτό αρχικά εισήχθη περιοχή νεκρής ζώνης γύρω από την οπή του ανιχνευτή, εν συνεχεία διαφοροποιήθηκε η απόσταση της οπής από το παράθυρο του ανιχνευτή και τέλος οι διαστάσεις της οπής. Όπως και προηγουμένως,

μεταβάλλεται κάθε φορά μόνο η προς μελέτη παράμετρος, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές.

Αρχικά επιχειρήθηκε η εισαγωγή περιοχής νεκρής ζώνης γύρω από την οπή του ανιχνευτή. Παρατηρείται ότι όσο περισσότερο αυξάνεται το πάχος της νεκρής ζώνης γύρω από την οπή, τόσο βελτιστοποιείται η απόκλιση τις υπολογιστικής απόδοσης του καλίου από την πειραματική απόδοση. Όμως, η αντίστοιχη απόκλιση της υπολογιστικής απόδοσης για την ενέργεια του κεσίου υπερεκτιμάται σημαντικά σε σχέση με την πειραματική απόδοση, όπως παρατίθεται στον Πίνακα 3.5. Επομένως, κρίθηκε ότι η εισαγωγή νεκρής ζώνης γύρω από την οπή δεν οδηγεί σε βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, το πάχος της νεκρής ζώνης οπής θεωρήθηκε ίσο με το μηδέν.

Προσδιορισμός νεκρής ζώνης οπής						
	ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Cs-137	0.063	0.165	1.2	0	0.02342±0.47%	-2.9%
K-40	0.063	0.165	1.2	0	0.01335±0.82%	3.6%
Cs-137	0.063	0.165	1.2	0.1	0.02257±0.53%	-6.4%
K-40	0.063	0.165	1.2	0.1	0.01280±0.86%	-0.71%

Πίνακας 3.5 Προσδιορισμός νεκρής ζώνης οπής συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 661.65 keV και 1460 keV.

Εν συνεχεία, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις μεταβάλλοντας την απόσταση της οπής από το παράθυρο του ανιχνευτή (ύψος οπής). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν αμετάβλητες στις τιμές που προσδιορίστηκαν ή επιλέχθηκαν. Μειώνοντας το ύψος της οπής, δηλαδή αυξάνοντας τον ενεργό όγκο του ανιχνευτή, παρατηρήθηκε περαιτέρω υποεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης για την ενέργεια 662keV του κεσίου σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική απόδοση, πέρα από τα αποδεκτά όρια. Αντιθέτως, αυξάνοντας το ύψος της οπής, παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης για την ενέργεια 1460keV του καλίου σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική πέρα από τα αποδεκτά όρια. Ταυτοχρόνως, η απόκλιση της υπολογιστικής απόδοσης για την ενέργεια του κεσίου δε βελτιωνόταν σημαντικά. Τα παραπάνω παρατίθενται αναλυτικά στον πίνακα

3.6. Επομένως κρίθηκε ότι η διαφοροποίηση της απόστασης της οπής από το παράθυρο του ανιχνευτή δεν επιφέρει βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων και προτιμήθηκε η αρχική τιμή 2 cm που επιλέχθηκε αυθαίρετα.

Προσδιορισμός θέσης οπής							
	ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΘΕΣΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Cs-137	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.02342±0.47%	-2.9%
K-40	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.01335±0.82%	3.5%
Cs-137	0.063	0.165	1.2	0	-3	0.02331±0.43%	-3.4%
K-40	0.063	0.165	1.2	0	-3	0.01355±0.74%	5.1%
Cs-137	0.063	0.165	1.2	0	-1	0.02286±0.22%	-5.2%
K-40	0.063	0.165	1.2	0	-1	0.01312±0.38%	1.8%

Πίνακας 3.6 Προσδιορισμός θέσης οπής συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 661.65 keV και 1460 keV.

Τέλος, δοκιμάστηκε η αλλαγή των διαστάσεων της ακτίνας της οπής. Μείωση της ακτίνας της οπής, δηλαδή αύξηση του ενεργού όγκου του ανιχνευτή επέφερε υπερεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης για την ενέργεια του καλίου σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική απόδοση πέρα από τα αποδεκτά όρια. Αντιθέτως, αύξηση της ακτίνας της οπής είχε ως αποτέλεσμα σοβαρή υποεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης για την ενέργεια του κεσίου σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική απόδοση. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 3.7. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διαφοροποίηση της ακτίνας της οπής δεν οδηγεί σε ταυτόχρονη σύγκλιση εντός του ποσοστού 3% των υπολογιστικών και πειραματικών αποδόσεων για την ενέργεια του κεσίου και του καλίου. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε ως βέλτιστη τιμή ακτίνας οπής η αρχική εκτίμηση 0.55cm.

Προσδιορισμός ακτίνας οπής								
	ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΘΕΣΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΑΚΤΙΝΑ ΟΠΗΣ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Cs	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.55	0.0234±0.47%	-2.9%
K	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.55	0.0133±0.82%	3.5%
Cs	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.4	0.02332±0.21%	-3.3%
K	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.4	0.01343±0.37%	4.1%
Cs	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.7	0.0227±0.53%	-5.8%
K	0.063	0.165	1.2	0	-2	0.7	0.0131±0.92%	1.6%

Πίνακας 3.7 Προσδιορισμός της ακτίνας οπής συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 661.65 keV και 1460 keV.

Πειράματα με πηγές Cs-137 και K-40 για επαναπροσδιορισμό πίσω νεκρής ζώνης.

Δεδομένου ότι η μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων δεν οδήγησε σε βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, επιχειρήθηκε επαναπροσδιορισμός της πίσω νεκρής ζώνης μεταβάλλοντας την τιμή πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν σταθερές στις βέλτιστες τιμές που προσδιορίστηκαν. Ως τιμή πάχους πλαϊνής νεκρής ζώνης επιλέχθηκαν τα 1.2 cm. Έτσι, μεταβάλλοντας μόνο την τιμή της πίσω νεκρής ζώνης, υπολογίστηκε τελικά η βέλτιστη τιμή πάχους της πίσω νεκρής ζώνης ως 1.5 cm.

Στον Πίνακα 3.8 παρατίθενται οι υπολογιστικές αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης για την πληθώρα παχών πίσω νεκρής ζώνης που δοκιμάστηκαν μαζί με τις αβεβαιότητές τους (1σ), καθώς και η σχετική απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από την πειραματική απόδοση.

Επαναπροσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης					
	ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Cs-137	0.063	0.12	1.8	0.0232±0.56%	-3.6%
K-40	0.063	0.12	1.8	0.0129±0.92%	0.75%
Cs-137	0.063	0.12	1.7	0.0233±0.51%	-3.3%
K-40	0.063	0.12	1.7	0.0131±0.92%	1.6%
Cs-137	0.063	0.12	1.6	0.02337±0.39%	-3.1%
K-40	0.063	0.12	1.6	0.01321±0.61%	2.5%
Cs-137	0.063	0.12	1.55	0.02338±0.34%	-3.1%
K-40	0.063	0.12	1.55	0.01330±0.60%	3.2%
Cs-137	0.063	0.12	1.5	0.0236±0.55%	-2.1%
K-40	0.063	0.12	1.5	0.0133±0.90%	3.8%

Πίνακας 3.8 Επαναπροσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 661.65 keV και 1460 keV.

Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με αυτό τον τρόπο ολοκληρώθηκε η διαδικασία προσδιορισμού κατάλληλων γεωμετρικών παραμέτρων για τον κρύσταλλο του ανιχνευτή, ώστε οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις ενέργειες 59, 662 και 1460 keV να αποκλίνουν σε ποσοστό 3% από τις αντίστοιχες πειραματικές.

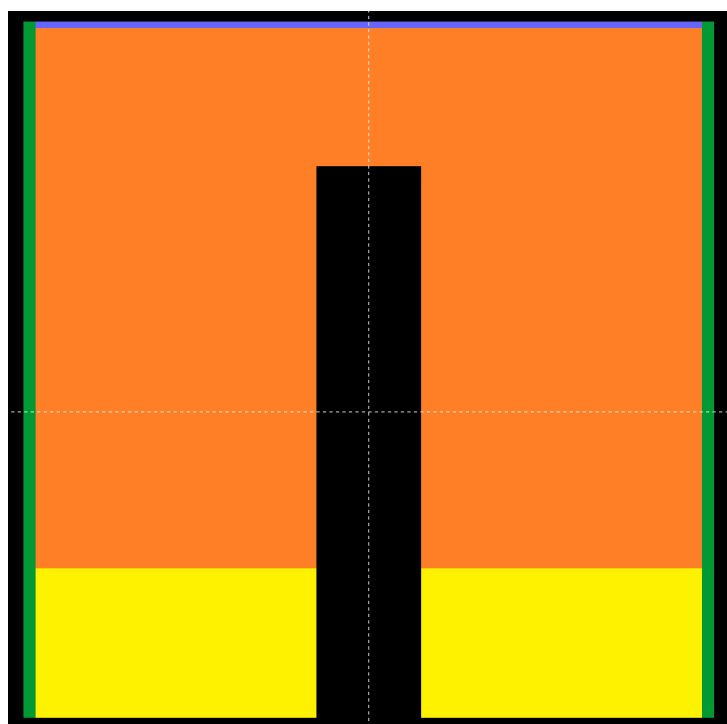
Στον Πίνακα 3.9 παρατίθενται οι υπολογιστικές αποδόσεις των προς μελέτη ενεργειών καθώς και οι αποκλίσεις τους από τις αντίστοιχες πειραματικές για τις τιμές παραμέτρων που προσδιορίστηκαν. Στον Πίνακα 3.10 παρατίθενται οι βέλτιστες παράμετροι του ανιχνευτή που προσδιορίστηκαν σε αυτή την παράγραφο.

	ΜΠΡΟΣΤΑ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ (cm)	ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΘΕΣΗ ΟΠΗΣ (cm)	ΑΚΤΙΝΑ ΟΠΗΣ (cm)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Am-241	0.063	0.12	1.55	0	-2	0.55	0.03305±0.15%	0.96%
Cs-137	0.063	0.12	1.55	0	-2	0.55	0.02338±0.34%	-3.1%
K-40	0.063	0.12	1.55	0	-2	0.55	0.01330±0.60%	3.2%

Πίνακας 3.9 Αποκλίσεις των υπολογιστικών από τις πειραματικές αποδόσεις για τις βέλτιστες διαστάσεις γεωμετρικών παραμέτρων που προσδιορίστηκαν.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (cm)
ΜΠΡΟΣΤΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ	0.063
ΠΛΑΙΝΗ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ	0.12
ΠΙΣΩ ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ	1.55
ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ ΟΠΗΣ	0
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΟΠΗΣ ΑΠΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ	2.0
ΑΚΤΙΝΑ ΟΠΗΣ	0.55

Πίνακας 3.10 Βέλτιστες παράμετροι ανιχνευτή.



Εικόνα 3.10 Οι βέλτιστες διαστάσεις του κρυστάλλου που προσδιορίστηκαν (ενεργός όγκος ανιχνευτή-πορτοκαλί, μπροστά νεκρή ζώνη-μπλε, πλαϊνή νεκρή ζώνη-πράσινο, πίσω νεκρή ζώνη-κίτρινο, οπή-μαύρο χρώμα)

3.8 ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφηκε ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE, ο οποίος αξιοποιήθηκε στο πλαίσιο της υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης του ΤΕΡΠ. Περιγράφηκε η δομή του κώδικα, ο τρόπος με τον οποίο συντάσσονται τα αρχεία εισόδου και η λήψη και καταγραφή αποτελεσμάτων στα αρχεία εξόδου.

Στο πλαίσιο της εξοικείωσης με τον κώδικα πραγματοποιήθηκε υπολογιστική εκτίμηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης φωτονίων ενέργειας 662 keV σε θωράκιση Χαλκού (Cu). Η τιμή που λήφθηκε συγκρίθηκε με την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή και βρέθηκε ότι η απόκλιση που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 2.3%, η οποία κρίθηκε ικανοποιητική.

Ακολούθως περιγράφηκε η διαδικασία μοντελοποίησης της ανιχνευτικής διάταξης. Για την επιτυχημένη προσομοίωση, κρίσιμη θεωρείται η διαδικασία προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Οι κρύσταλλοι των ανιχνευτών γερμανίου διαθέτουν νεκρές ζώνες, οι οποίες μειώνουν την απόδοση του ανιχνευτή, αφενός μεν μειώνοντας τον ενεργό όγκο του, αφετέρου δε εξασθενώντας φωτόνια. Τα πάχη των νεκρών ζωνών, ακόμα και όταν προσφέρονται από τον κατασκευαστή, δεν παρέχουν απαραίτητα ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πάχους τους με το χρόνο καθώς και στην ύπαρξη ζώνης μεταβίβασης όπου πραγματοποιείται μερική συλλογή φορτίου. (17)

Η παραμετροποίηση των διαστάσεων του ανιχνευτή είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές Monte Carlo. Οι διαστάσεις του ανιχνευτή και τα πάχη των νεκρών ζωνών τροποποιήθηκαν έτσι ώστε οι υπολογιστικές αποδόσεις να αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο του 5% από τις αντίστοιχες πειραματικές για ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Η εν λόγω απόκλιση θεωρείται ικανοποιητική για τις εφαρμογές της μελέτης ραδιενέργειας περιβάλλοντος.

Όσον αφορά στην αβεβαιότητα των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν, δίδεται ξεχωριστά η σχετική αβεβαιότητα για κάθε τιμή υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής στους πίνακες της παραγράφου, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Όλες οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογιστικών

αποδόσεων έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (3.7). Οφείλει να αναφερθεί ότι η αβεβαιότητα των πειραματικών μετρήσεων απόδοσης (αβεβαιότητες τύπου A) που είχαν διεξαχθεί στο παρελθόν στο εργαστήριο θεωρήθηκαν αμελητέες συγκριτικά με τις αβεβαιότητες που εισάγει η ίδια η πηγή βαθμονόμησης (αβεβαιότητα τύπου B), η οποία με βάση του πιστοποιητικό του κατασκευαστή ήταν της τάξης του 1.5% (1σ) για όλα τα ισότοπα, 1.8% (1σ) για το Am-241 και 5.7% (1σ) για τον Pb-210. Ομοίως, το πλήθος των ιστοριών της προσομοίωσης και αντίστοιχα ο χρόνος προσομοίωσης, επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι αβεβαιότητες της υπολογιστικής τιμής της απόδοσης να είναι σημαντικά μικρότερη από 1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ακόμη, οι παράγοντες που επιδρούν στην πειραματική καθώς και την υπολογιστική διαδικασία εκτίμησης απόδοσης, καθώς και οι αβεβαιότητες που ενίοτε προκύπτουν από τη διαδικασία περιγράφονται αναλυτικότερα και στο επόμενο κεφάλαιο.

Εναλλακτικά, οι νεκρές ζώνες θα μπορούσαν να υπολογιστούν και με τη χρήση του Eu-152. Το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο εκπέμπει φωτόνια σε ευρύ φάσμα ενεργειών, με μεγάλη ένταση. Έτσι, διαφορετικές περιοχές των νεκρών ζωνών θα μπορούσαν να εκτιμηθούν με τη χρήση διαφορετικής ενέργειας φωτονίων. (9)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καθώς και το υπολογιστικό μοντέλο του ανιχνευτή αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο του επόμενου κεφαλαίου για την εφαρμογή της τεχνικής μεταφοράς απόδοσης τη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης και την εν συνεχεία βαθμονόμηση απόδοσης στη νέα γεωμετρία κυαθίου αλλά και το χαρακτηρισμό άγνωστων ραδιενεργών δειγμάτων. (7)

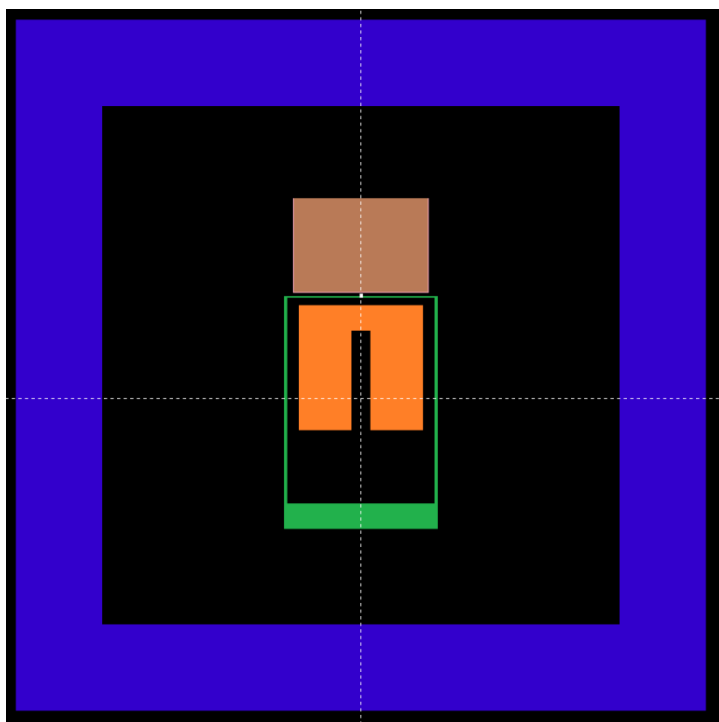
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΛΑΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με αφετηρία την αύξηση των δυνατοτήτων υπολογισμού των σύγχρονων υπολογιστών, χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο οι τεχνικές Monte Carlo για την προσομοίωση των ανιχνευτικών συστημάτων. Έτσι, στην προηγούμενη παράγραφο υπολογίστηκαν μέσω των τεχνικών προσομοίωσης οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών του ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου του ΤΕΡΠ. Αυτό πραγματοποιήθηκε συγκλίνοντας την πειραματική απόδοση του ανιχνευτή με την αντίστοιχη υπολογιστική εντός του ποσοστού 5%, για πηγές χαμηλής (αμερίκιο), μέσης (καίσιο) και μεγάλης (κάλιο) ενέργειας, επιλέγοντας μια σταθερή πυκνότητα πηγής 0.9 gr/cm^3 .

Η παράγραφος αυτή αποσκοπεί στη χρήση αυτών των διαστάσεων, καθώς και των διαστάσεων των πηγών παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2, για τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης για πληθώρα πυκνοτήτων πηγών της συγκεκριμένης γεωμετρίας. Έτσι, καθίσταται δυνατή η υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή για διαφορετικές πυκνότητες πηγής παλαιάς γεωμετρίας, καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες πειραματικές βαθμονομήσεις.



Εικόνα 4.1 Η ανιχνευτική διάταξη που προσομοιώθηκε για τις μετρήσεις απόδοσης κuaθίου παλαιάς γεωμετρίας, όγκου 260 mL (μίγμα πηγών παλαιού κuaθίου-καφέ, κρυσταλλος ανιχνευτή-πορτοκαλί, περίβλημα ανιχνευτή-πράσινο, θωράκιση ανιχνευτή-μπλε).

4.1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Με σκοπό τη βαθμονόμηση, προσδιορίστηκε η υπολογιστική απόδοση (μέσω προσομοίωσης) της ανιχνευτικής διάταξης για τη «νέα γεωμετρία κuaθίων» σε όλες τις γεωμετρίες (δηλ. 260 mL και 100 mL) και πυκνότητες. Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες και διαγράμματα:

- οι τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής που λήφθηκαν από την προσομοίωση
- η σχετική αβεβαιότητα των μετρήσεων απόδοσης
- η απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από τις πειραματικές τιμές
- διαγράμματα απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσεως της ενέργειας, συμπεριλαμβανόμενων των αβεβαιοτήτων των τιμών αποδόσεων
- Σχέσεις αναδρομής για πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμηση
- Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων

Όπως έχει επισημανθεί και στο κεφάλαιο 2.5, όπου πραγματοποιήθηκε η πειραματική βαθμονόμηση των κuaθίων, κάποιες αποδόσεις για

συγκεκριμένες ενέργειες ραδιονουκλιδίων δεν έχουν συμπεριληφθεί στους πίνακες. Συγκεκριμένα, σε όλες τις πυκνότητες δεν έχουν συμπεριληφθεί οι μετρήσεις απόδοσης που αφορούν την ενέργεια 136.48 keV του Κοβαλτίου-57 και την ενέργεια 255.12 του Κασσίτερου-113, καθώς τα αποτελέσματα αλλοιώνονται σημαντικά, εξαιτίας του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης. Ακόμη, για μεγάλες πυκνότητες εποξικής ρητίνης, δε συμπεριλαμβάνονται οι μετρήσεις απόδοσης για την ενέργεια 46.54 keV που αντιστοιχεί στο Μόλυβδο-210 και την ενέργεια 59.54 keV που αντιστοιχεί στο Αμερίκιο-241. Οι μετρήσεις αυτές δεν είναι ακριβείς, καθώς λόγω του μεγάλου συντελεστή αυτοαπορρόφησης της πηγής, τοποθετούνται πολύ κοντά στο όριο ανίχνευσης της διάταξης.

Ιδιαίτερη μνεία στις αβεβαιότητες που διακατέχουν τις μετρήσεις γίνεται στο τέλος του κεφαλαίου. Όμως, οφείλει να αναφερθεί πριν την παρουσίαση των μετρήσεων ότι, στους πίνακες παρατίθενται οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογιστικών αποδόσεων σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη σχέση (3.7).

Ακόμη, οι αποκλίσεις υπολογιστικών τιμών αποδόσεων από τις πειραματικές θεωρούνται μέσα στο όριο αβεβαιότητας όταν είναι μικρότερες του 3%. Πληθώρα παραγόντων επηρεάζουν τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς, αλλά όλοι εμπίπτουν μέσα στην αβεβαιότητα που πηγάζει από τις ραδιενεργές πηγές και αγγίζει το 3%.

Όπως θα αναλυθεί, μετρήσεις με ακόμη μεγαλύτερες αποκλίσεις θεωρούνται αποδεκτές καθώς επηρεάζονται από το φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης. Έτσι, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιείται το κέσιο ως σημείο αναφοράς για όλες τις πυκνότητες των διαφορετικών όγκων πλήρωσης που μελετήθηκαν, καθώς δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

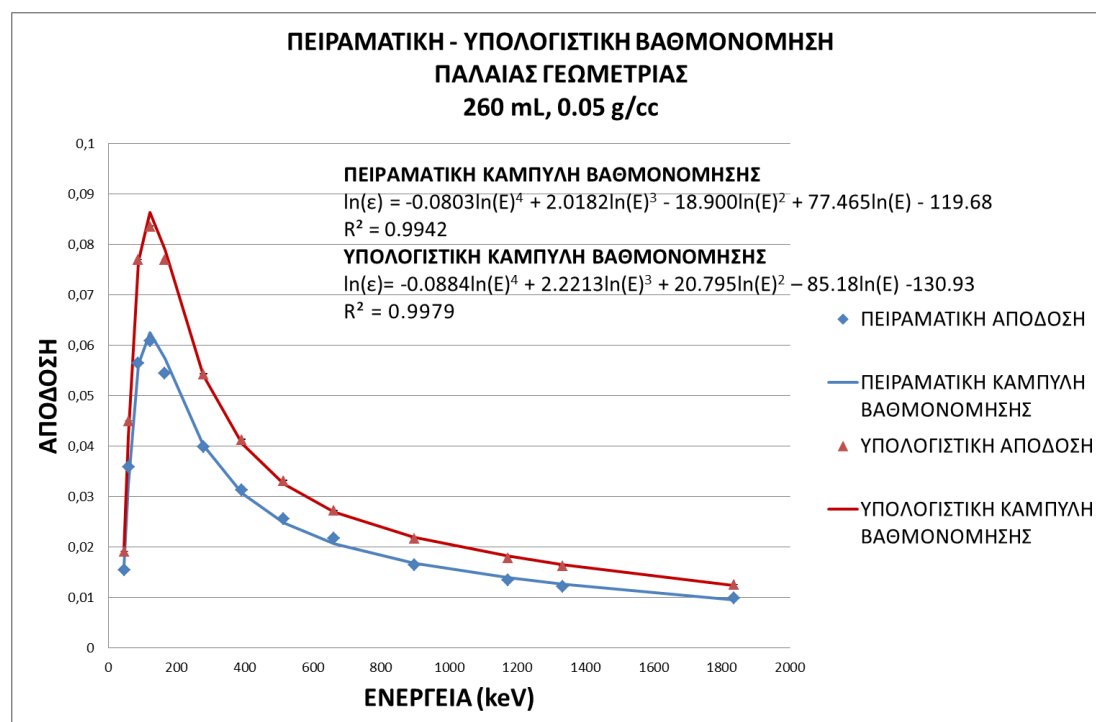
Τέλος, όπως έχει επισημανθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η σχέση αναδρομής που χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στην παρούσα εργασία με σκοπό τη βαθμονόμηση απόδοσης είναι της μορφής:

$$\ln(\varepsilon) = a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot (\ln(E))^2 + a_3 \cdot (\ln(E))^3 + a_4 \cdot (\ln(E))^4$$

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 260mL

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.05 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.019080±0.02%	23%
Am-241	59.54	0.04495±0.08%	25%
Cd-109	88.03	0.07702±0.03%	36%
Co-57	122.06	0.08359±0.07%	37%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.07695±0.10%	41%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.05432±0.13%	36%
Sn-113	391.69	0.04128±0.16%	32%
Sr-85	513.99	0.03314±0.19%	29%
Cs-137	661.65	0.02722±0.16%	25%
Y-88	898.02	0.021751±0.01%	32%
Co-60	1173.22	0.01785±0.28%	33%
Co-60	1332.49	0.01623±0.31%	33%
Y-88	1836.01	0.01254±0.28%	27%

Πίνακας 4.1 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.05 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.1 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.05 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα προσδιορίστηκαν οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης, πειραματικά και υπολογιστικά:

- Πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης:

$$y = -0.0803x^4 + 2.0182x^3 - 18.9x^2 + 77.465x - 119.68$$

Δεδομένου ότι $y = \ln(\varepsilon)$ και $x = \ln(E)$, όπου ε η απόδοση και E η ενέργεια, τελικά:

$$\ln(\varepsilon) = -0.0803\ln(E)^4 + 2.0182\ln(E)^3 - 18.9\ln(E)^2 + 77.465\ln(E) - 119.68, \text{ με συντελεστή συσχέτισης } R^2 = 0.9942.$$

- Υπολογιστική καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης:

$$y = -0.0884x^4 + 2.2213x^3 - 20.795x^2 + 85.18x - 130.93$$

Δεδομένου ότι $y = \ln(\varepsilon)$ και $x = \ln(E)$, όπου ε η απόδοση και E η ενέργεια, τελικά:

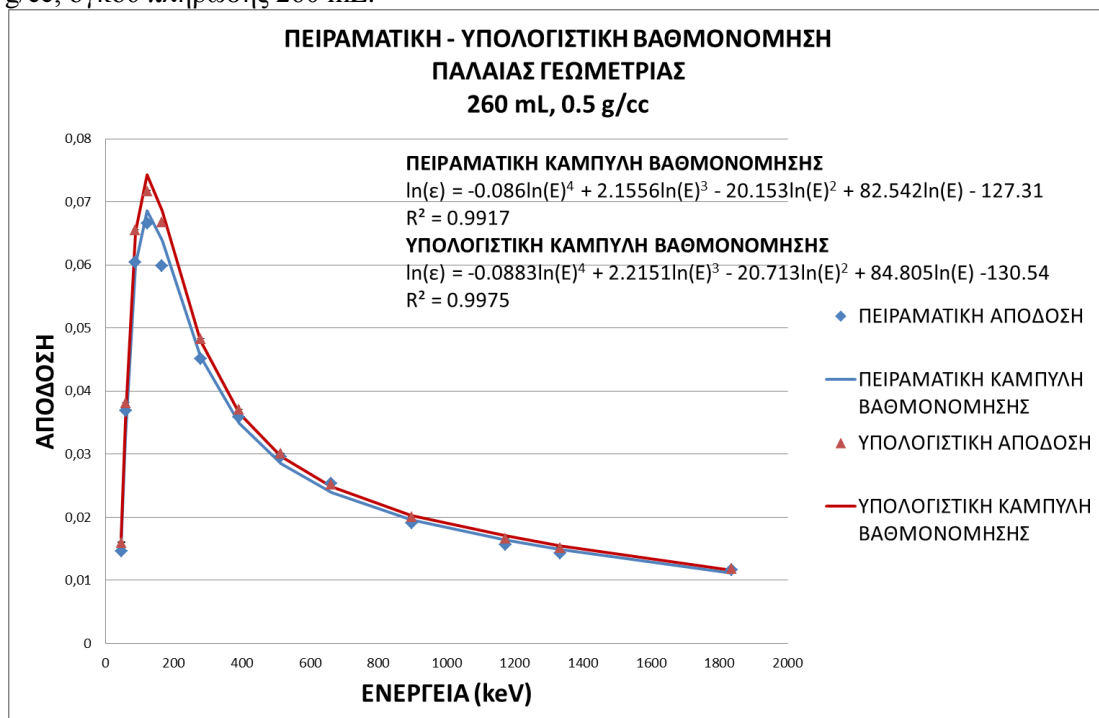
$$\ln(\varepsilon) = -0.0884\ln(E)^4 + 2.2213\ln(E)^3 - 20.795\ln(E)^2 - 85.18\ln(E) - 130.93, \text{ με συντελεστή συσχέτισης } R^2 = 0.9979.$$

Παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών τιμών απόδοσης για την πυκνότητα 0.05 gr/cm^3 . Συγκεκριμένα, η απόδοση που προσδιορίζεται μέσω της τεχνικής Monte Carlo υπερεκτιμάται κατά 32% μέσο όρο. Οι αποκλίσεις συγκαταλέγονται στο εύρος 23-41%. Αποκλίσεις τέτοιας τάξης μεγέθους δε θεωρούνται αποδεκτές.

Λόγω της μεγάλης απόκλισης που συνοδεύει τη σύγκριση των πειραματικών αποδόσεων με τις υπολογιστικές, η οποία δε συνάδει με τις αντίστοιχες αποκλίσεις για τις υπόλοιπες τιμές πυκνοτήτων, ακολούθησε διερεύνηση του φαινομένου. Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 4.1.3, η μεγάλη τιμή των αποκλίσεων θα μπορούσε να οφείλεται σε σφάλματα κατά τη διαδικασία της πειραματικής εύρεσης αποδόσεων για τις πηγές πυκνότητας 0.05 gr/cm^3 . Οι πειραματικές μετρήσεις δεν πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.5 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01604±0.13%	9.83%
Am-241	59.54	0.03814±0.09%	3.30%
Cd-109	88.03	0.06556±0.07%	8.47%
Co-57	122.06	0.07176±0.06%	7.72%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.06680±0.09%	11.53%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.04831±0.10%	6.99%
Sn-113	391.69	0.03712±0.12%	3.63%
Sr-85	513.99	0.03014±0.15%	2.07%
Cs-137	661.65	0.02519±0.17%	-0.75%
Y-88	898.02	0.020116±0.01%	5.76%
Co-60	1173.22	0.01667±0.29%	6.37%
Co-60	1332.49	0.01522±0.32%	6.33%
Y-88	1836.01	0.01184±0.41%	2.16%

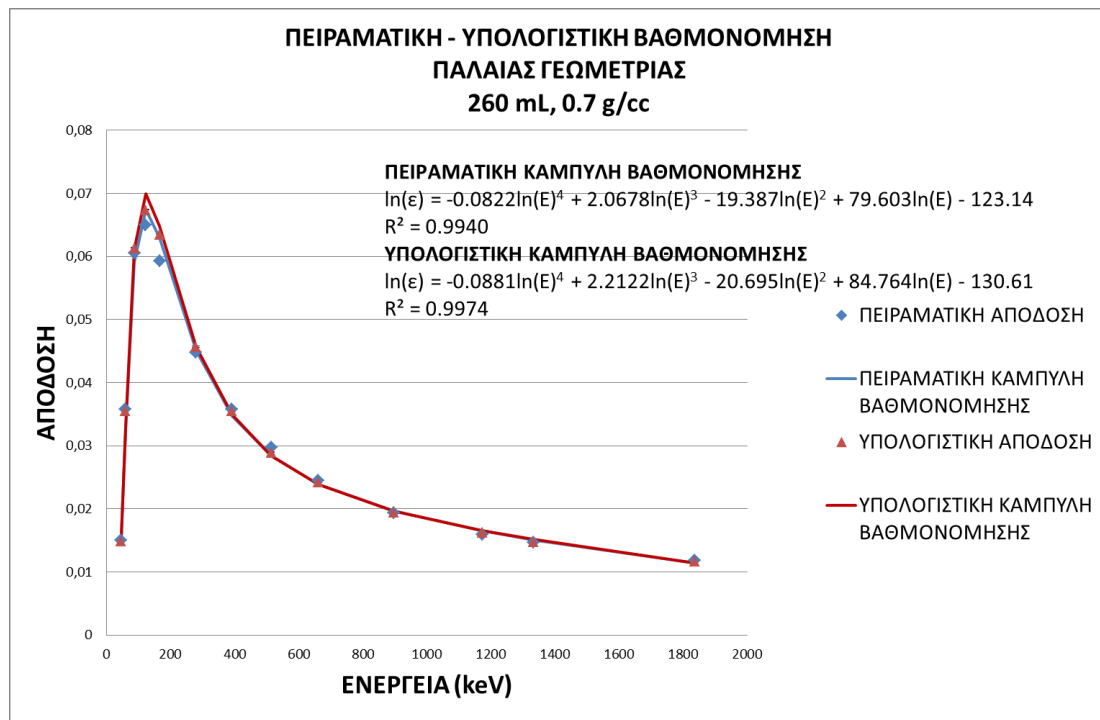
Πίνακας 4.2 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.5 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.2 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.05 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.7 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01491±0.19%	-0.74%
Am-241	59.54	0.03556±0.13%	-0.70%
Cd-109	88.03	0.06135±0.11%	1.39%
Co-57	122.06	0.06742±0.11%	3.72%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.06353±0.13%	7.18%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.04571±0.17%	2.06%
Sn-113	391.69	0.03551±0.19%	-0.64%
Sr-85	513.99	0.02897±0.23%	-2.64%
Cs-137	661.65	0.02420±0.28%	-1.30%
Y-88	898.02	0.01949±0.01%	0.91%
Co-60	1173.22	0.01629±0.21%	2.38%
Co-60	1332.49	0.01483±0.27%	1.26%
Y-88	1836.01	0.01167±0.34%	-1.59%

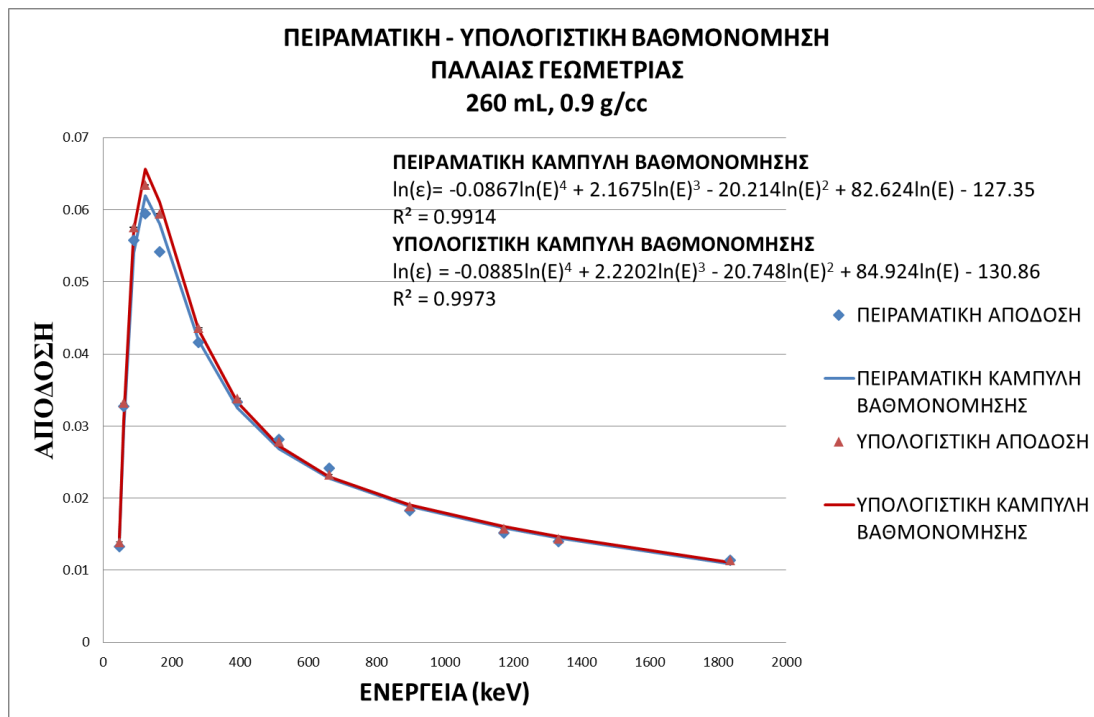
Πίνακας 4.3 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.3 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.9 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.013894±0.02%	4.62%
Am-241	59.54	0.03319±0.07%	1.36%
Cd-109	88.03	0.05754±0.06%	3.27%
Co-57	122.06	0.06344±0.10%	6.68%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.05946±0.13%	9.73%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.04356±0.18%	4.62%
Sn-113	391.69	0.03380±0.21%	1.50%
Sr-85	513.99	0.02788±0.24%	-0.80%
Cs-137	661.65	0.02330±0.20%	-3.41%
Y-88	898.02	0.018894±0.01%	3.47%
Co-60	1173.22	0.01574±0.35%	3.72%
Co-60	1332.49	0.01440±0.30%	2.90%
Y-88	1836.01	0.01135±0.38%	-0.09%

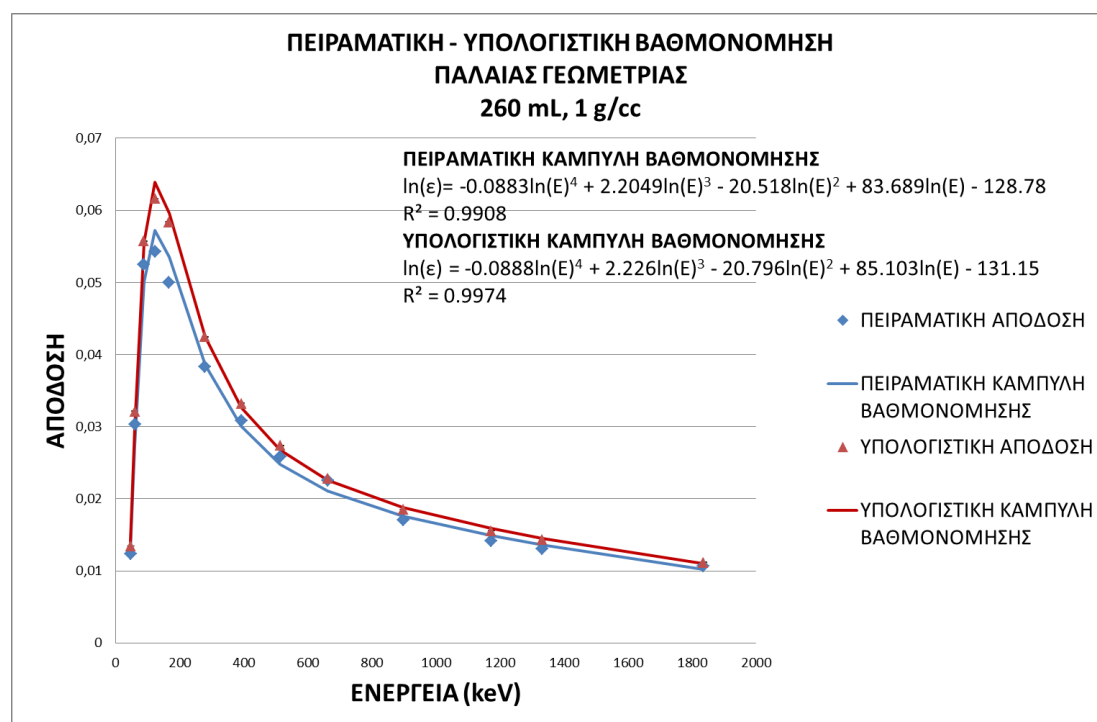
Πίνακας 4.4 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κuahίου πυκνότητας 0.9 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.4 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κuahίου πυκνότητας 0.9 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01345±0.18%	8.7%
Am-241	59.54	0.03214±0.12%	6.1%
Cd-109	88.03	0.05574±0.06%	6.3%
Co-57	122.06	0.06165±0.11%	13%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.05837±0.12%	16%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.04248±0.16%	10%
Sn-113	391.69	0.03323±0.20%	7.8%
Sr-85	513.99	0.02738±0.20%	5.8%
Cs-137	661.65	0.02284±0.21%	1.6%
Y-88	898.02	0.018580±0.01%	9.2%
Co-60	1173.22	0.01558±0.27%	10%
Co-60	1332.49	0.01432±0.30%	9.6%
Y-88	1836.01	0.01119±0.38%	5.2%

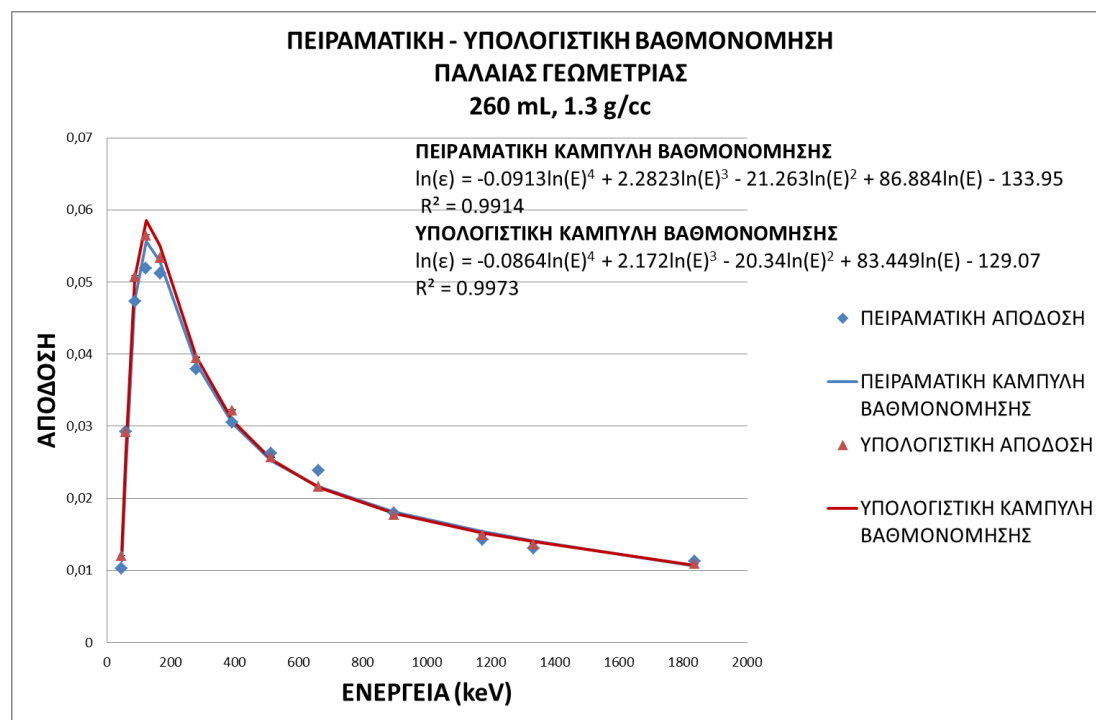
Πίνακας 4.5 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 1 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.5 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 1 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.3 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01206±0.28%	17%
Am-241	59.54	0.02928±0.19%	0.14%
Cd-109	88.03	0.05082±0.16%	7.5%
Co-57	122.06	0.05645±0.17%	8.8%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.05334±0.18%	4.2%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.03956±0.24%	4.2%
Sn-113	391.69	0.03219±0.29%	5.5%
Sr-85	513.99	0.02571±0.24%	-2.1%
Cs-137	661.65	0.02163±0.28%	-9.3%
Y-88	898.02	0.0177836±0.01%	-0.71%
Co-60	1173.22	0.01492±0.09%	4.6%
Co-60	1332.49	0.01371±0.10%	4.6%
Y-88	1836.01	0.01092±0.13%	-3.3%

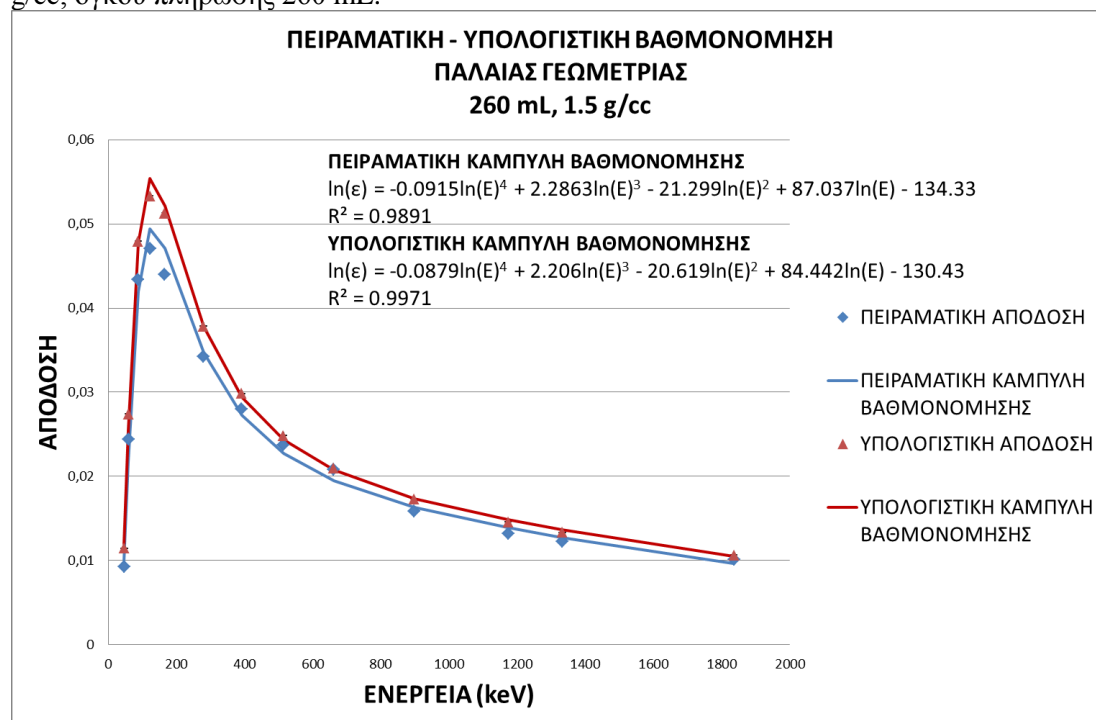
Πίνακας 4.6 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κuahίου πυκνότητας 1.3 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.6 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κuahίου πυκνότητας 1.3 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.5 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (1σ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01144±0.28%	23%
Am-241	59.54	0.02742±0.19%	12%
Cd-109	88.03	0.04795±0.16%	10%
Co-57	122.06	0.05332±0.12%	13%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.05126±0.14%	16%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.03783±0.18%	10%
Sn-113	391.69	0.02984±0.22%	6.6%
Sr-85	513.99	0.02483±0.26%	4.8%
Cs-137	661.65	0.02092±0.31%	0.70%
Y-88	898.02	0.017249±0.01%	9.1%
Co-60	1173.22	0.01459±0.32%	10%
Co-60	1332.49	0.01332±0.34%	9.2%
Y-88	1836.01	0.01065±0.43%	5.7%

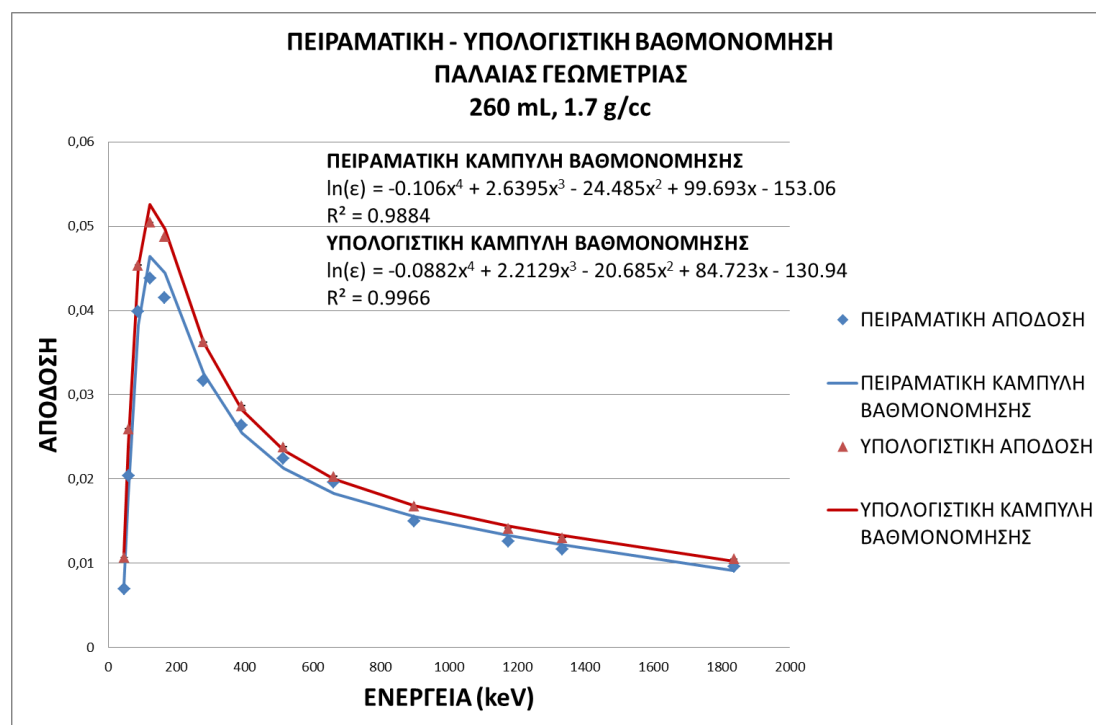
Πίνακας 4.7 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 1.5 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.7 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 1.5 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.7 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (1σ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01068±0.19%	54%
Am-241	59.54	0.02596±0.13%	27%
Cd-109	88.03	0.04535±0.11%	13%
Co-57	122.06	0.05047±0.11%	15%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.04873±0.12%	17%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.03624±0.16%	14%
Sn-113	391.69	0.02868±0.20%	8.7%
Sr-85	513.99	0.02382±0.17%	6.5%
Cs-137	661.65	0.02031±0.20%	3.4%
Y-88	898.02	0.01677±0.01%	12%
Co-60	1173.22	0.01413±0.29%	12%
Co-60	1332.49	0.01301±0.31%	11%
Y-88	1836.01	0.01049±0.38%	9.6%

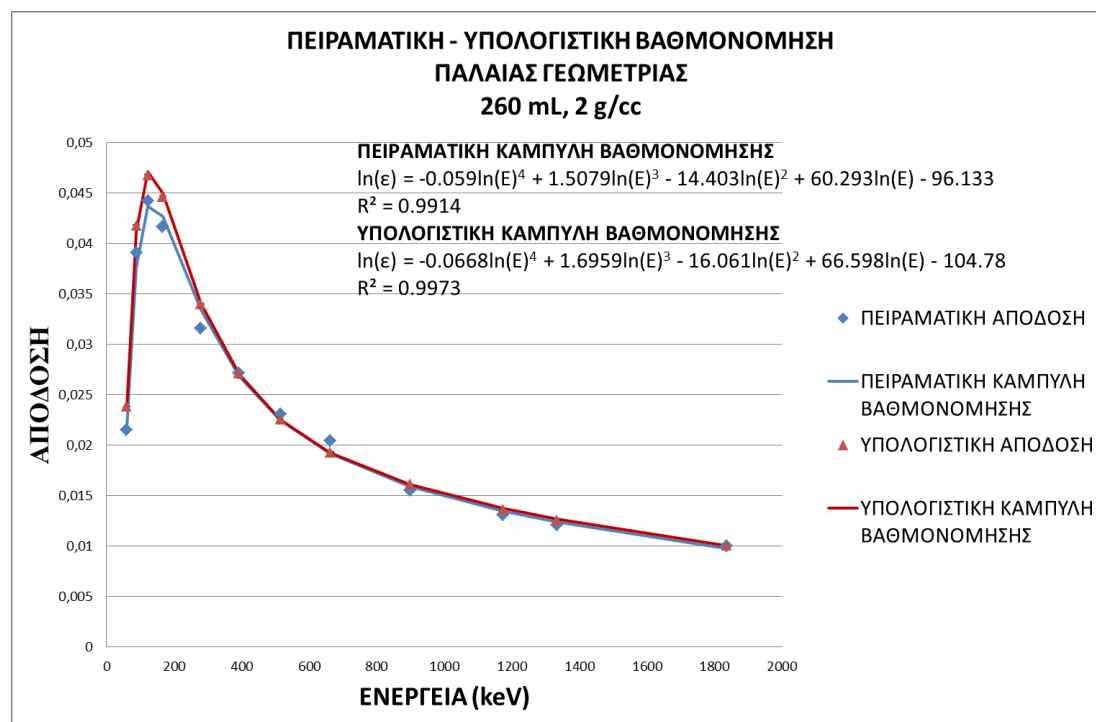
Πίνακας 4.8 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 1.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.



Διάγραμμα 4.8 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 1.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 2 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (1σ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54		
Am-241	59.54	0.02383±0.11%	10%
Cd-109	88.03	0.04179±0.08%	7.1%
Co-57	122.06	0.04681±0.13%	5.9%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.04465±0.18%	7.3%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.03396±0.22%	7.6%
Sn-113	391.69	0.02712±0.26%	-0.08%
Sr-85	513.99	0.02258±0.27%	-2.1%
Cs-137	661.65	0.01931±0.26%	-5.5%
Y-88	898.02	0.016166±0.01%	4.4%
Co-60	1173.22	0.01367±0.44%	4.5%
Co-60	1332.49	0.01259±0.37%	4.3%
Y-88	1836.01	0.01009±0.59%	0.87%

Πίνακας 4.9 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 2 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

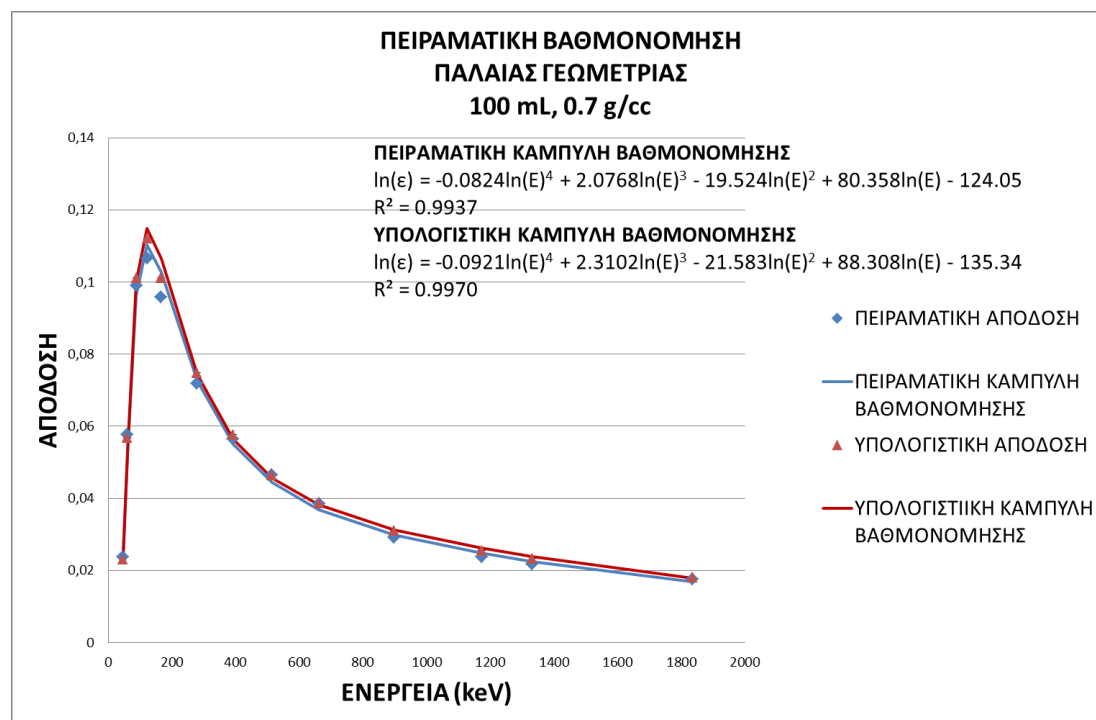


Διάγραμμα 4.9 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κιαθίου πυκνότητας 2 g/cc, όγκου πλήρωσης 260 mL.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 100mL

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.7 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (1σ)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.02313±0.24%	-2.8%
Am-241	59.54	0.05684±0.16%	-1.6%
Cd-109	88.03	0.10122±0.14%	2.3%
Co-57	122.06	0.11215±0.11%	5.1%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.10122±0.14%	5.7%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.07490±0.14%	4.1%
Sn-113	391.69	0.05769±0.20%	2.0%
Sr-85	513.99	0.04657±0.15%	0.24%
Cs-137	661.65	0.03868±0.25%	0.50%
Y-88	898.02	0.03105±0.32%	6.9%
Co-60	1173.22	0.02563±0.33%	7.7%
Co-60	1332.49	0.02331±0.36%	6.9%
Y-88	1836.01	0.01822±0.11%	4.3%

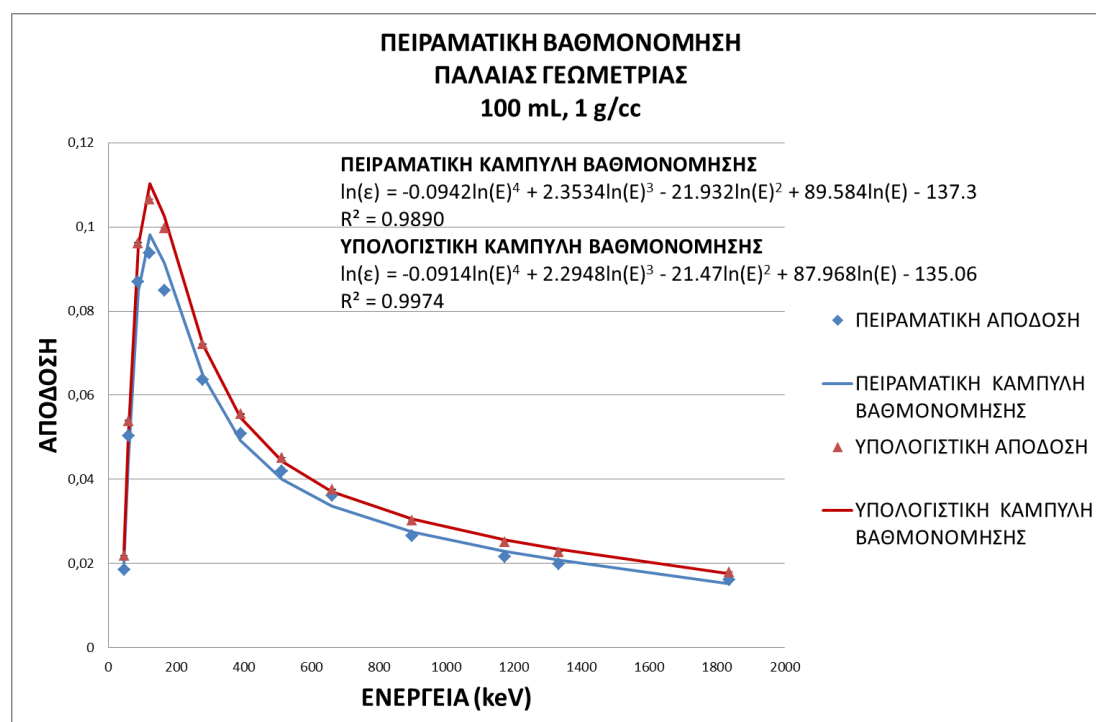
Πίνακας 4.10 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.



Διάγραμμα 4.10 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 0.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.02186±0.16%	18%
Am-241	59.54	0.05394±0.11%	7.1%
Cd-109	88.03	0.09617±0.09%	10%
Co-57	122.06	0.10664±0.09%	22%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.09972±0.10%	17%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.07216±0.11%	13%
Sn-113	391.69	0.05559±0.13%	9.5%
Sr-85	513.99	0.04519±0.16%	7.8%
Cs-137	661.65	0.03763±0.19%	3.9%
Y-88	898.02	0.03030±0.23%	14%
Co-60	1173.22	0.02515±0.54%	16%
Co-60	1332.49	0.02276±0.59%	14%
Y-88	1836.01	0.01793±0.76%	11%

Πίνακας 4.11 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 1 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

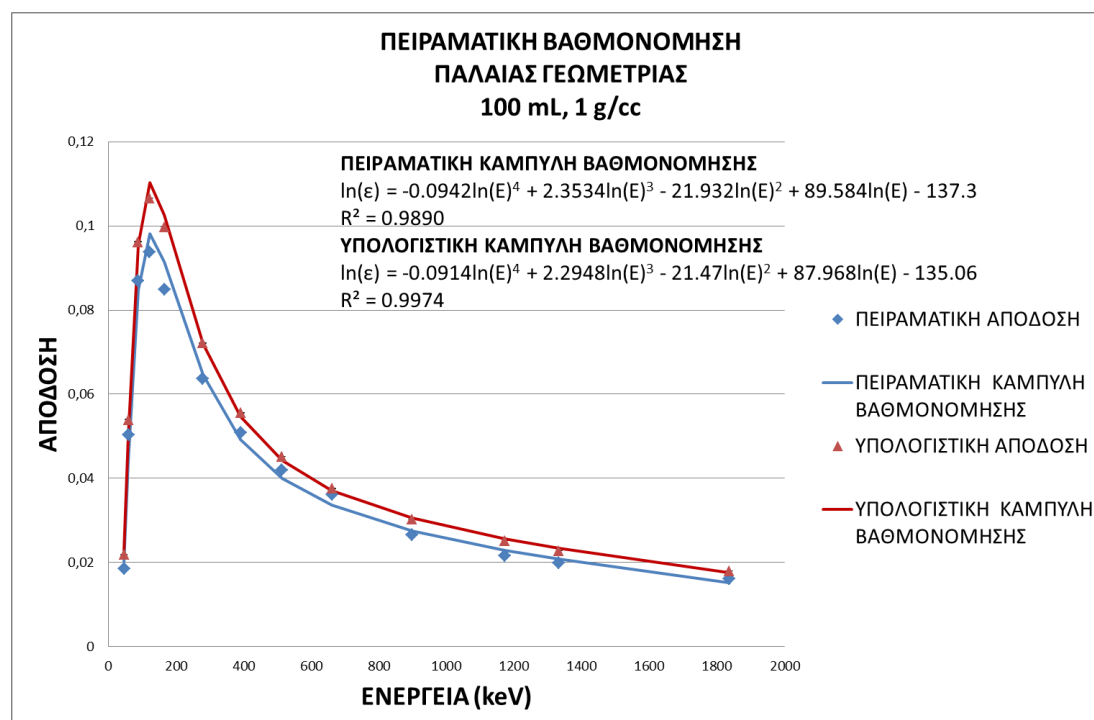


Διάγραμμα 4.11 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 1 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.3 g/cc

ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.02075±0.20%	24%
Am-241	59.54	0.05125±0.14%	7.2%
Cd-109	88.03	0.09138±0.11%	11%
Co-57	122.06	0.10168±0.12%	14%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.09517±0.13%	16%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.06949±0.18%	15%
Sn-113	391.69	0.05381±0.22%	9.1%
Sr-85	513.99	0.04381±0.26%	7.4%
Cs-137	661.65	0.03665±0.25%	1.9%
Y-88	898.02	0.02952±0.32%	14%
Co-60	1173.22	0.02464±0.38%	16%
Co-60	1332.49	0.02242±0.09%	15%
Y-88	1836.01	0.01760±0.12%	12%

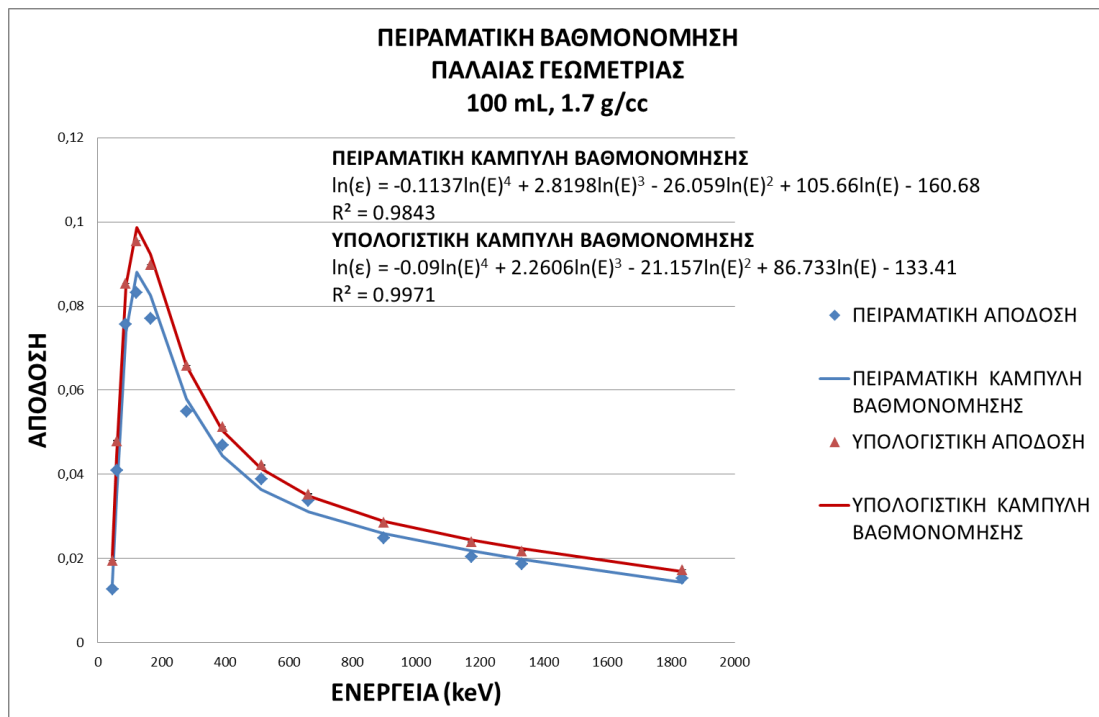
Πίνακας 4.12 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 1.3 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.



Διάγραμμα 4.12 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 1.3 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.7 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01949±0.24%	53%
Am-241	59.54	0.04793±0.16%	17%
Cd-109	88.03	0.08542±0.14%	12%
Co-57	122.06	0.09542±0.15%	14%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.08977±0.16%	16%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.06584±0.20%	19%
Sn-113	391.69	0.05137±0.25%	9.5%
Sr-85	513.99	0.04224±0.16%	8.6%
Cs-137	661.65	0.03530±0.19%	4.8%
Y-88	898.02	0.02858±0.24%	15%
Co-60	1173.22	0.02388±0.28%	17%
Co-60	1332.49	0.02178±0.31%	16%
Y-88	1836.01	0.01729±0.39%	13%

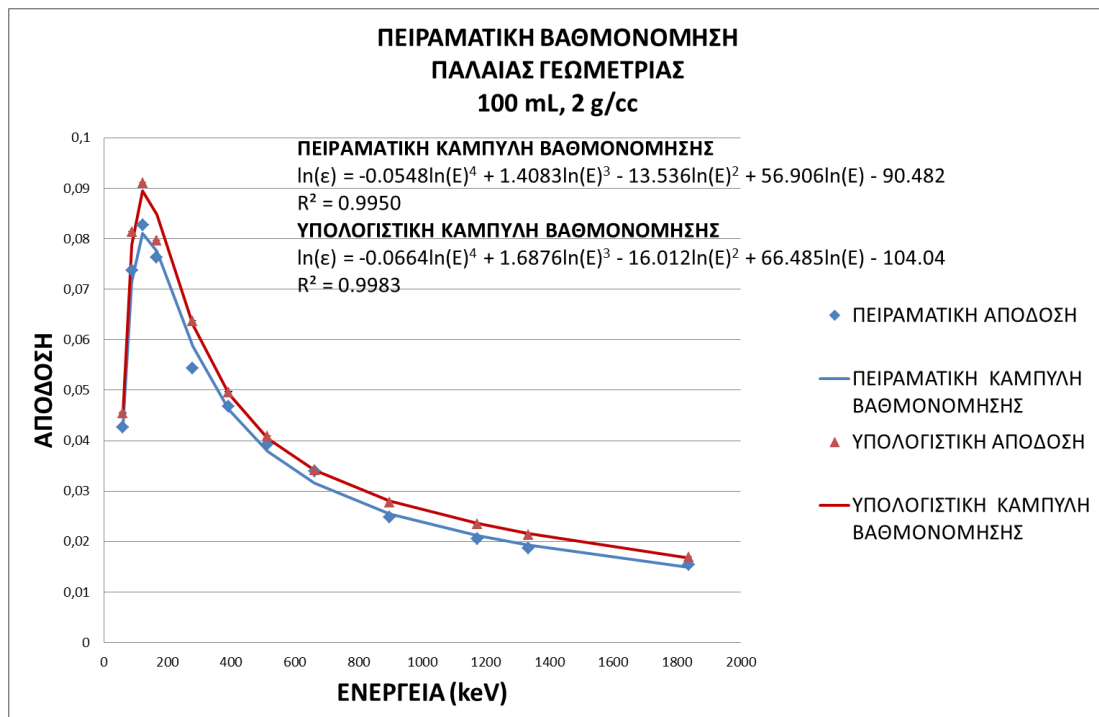
Πίνακας 4.13 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 1.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.



Διάγραμμα 4.13 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 1.7 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 2 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54		
Am-241	59.54	0.04551±0.19%	6.7%
Cd-109	88.03	0.08147±0.13%	10%
Co-57	122.06	0.09111±0.13%	10%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.07977±0.13%	4.5%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.06375±0.17%	17%
Sn-113	391.69	0.04969±0.14%	6.4%
Sr-85	513.99	0.04087±0.24%	4.4%
Cs-137	661.65	0.03423±0.29%	0.89%
Y-88	898.02	0.02787±0.31%	12%
Co-60	1173.22	0.02347±0.39%	14%
Co-60	1332.49	0.02143±0.10%	14%
Y-88	1836.01	0.01698±0.12%	10%

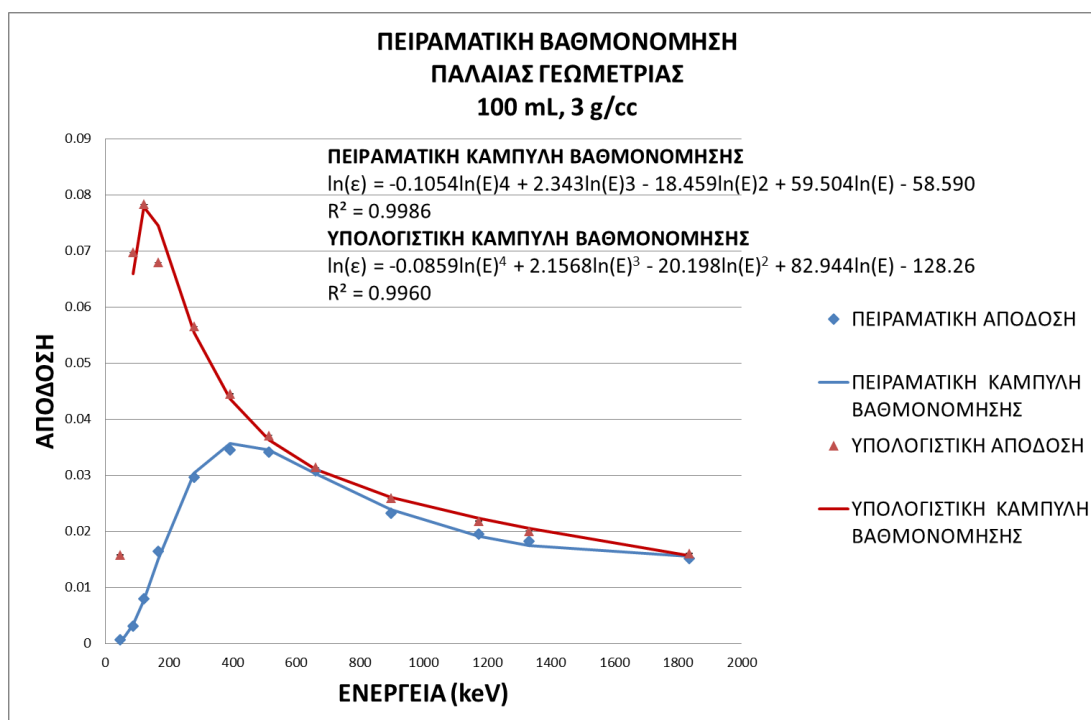
Πίνακας 4.14 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 2 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.



Διάγραμμα 4.14 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής καθαίου πυκνότητας 2 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 3 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.01578±0.13%	2574%
Am-241	59.54		
Cd-109	88.03	0.06973±0.15%	2178%
Co-57	122.06	0.07834±0.15%	884%
Co-57	136.48		
Cd-109	165.85	0.06790±0.15%	314%
Sn-113	255.12		
Hg-203	279.2	0.05653±0.19%	90%
Sn-113	391.69	0.04452±0.16%	29%
Sr-85	513.99	0.03706±0.27%	8.2%
Cs-137	661.65	0.03141±0.33%	2.3%
Y-88	898.02	0.02594±0.34%	11%
Co-60	1173.22	0.02180±0.42%	11%
Co-60	1332.49	0.02005±0.11%	10%
Y-88	1836.01	0.01602±0.14%	5.8%

Πίνακας 4.15 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κυαθίου πυκνότητας 3 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.



Διάγραμμα 4.15 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κυαθίου πυκνότητας 3 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL.

4.1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ 0.05 g/cc ΠΑΛΑΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΟΓΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ 260mL

Όπως έχει σημειωθεί, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών τιμών απόδοσης για την πυκνότητα 0.05 gr/cc. Αναλυτικά, η απόδοση που προσδιορίζεται μέσω της τεχνικής Monte Carlo υπερεκτιμάται κατά μέσο όρο 32% για όλες τις ενέργειες που εξετάστηκαν. Οι αποκλίσεις συγκαταλέγονται στο εύρος 23-41%. Αποκλίσεις τέτοιας τάξης μεγέθους δε θεωρούνται αποδεκτές. Με αφετηρία τις ανωτέρω αποκλίσεις των μετρήσεων της συγκεκριμένης πυκνότητας, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω διερεύνηση η οποία και παρουσιάζεται ακολούθως.

Βιβλιογραφικά, αναμένεται μείωση της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή αυξανόμενης της πυκνότητας της πηγής. Δεδομένου ότι δε μεταβάλλεται καμία άλλη από τις παραμέτρους της μέτρησης, ούτε η σύσταση του κυαθίου, είναι αναμενόμενο αυξάνοντας την πυκνότητα της πηγής να αυξάνεται ο συντελεστής εξασθένησης των φωτονίων-γ στο μέσο. Ως εκ τούτου, αναμένεται να αυξηθεί η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των φωτονίων εντός της πηγής (σκεδάσεις και απορροφήσεις). Έτσι, ο αριθμός των καταγραφόμενων φωτονίων που αντιστοιχεί σε γεγονότα πλήρους αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή, αναμένεται να μειωθεί. Πρόκειται για το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης το οποίο έχει διατυπωθεί στο κεφάλαιο 2.

Εξετάστηκαν τα πειραματικά δεδομένα για την παλαιά γεωμετρία, όγκου πλήρωσης 260mL, για τις 9 διαφορετικές πυκνότητες. Μελετώντας τις τιμές των πειραματικών αποδόσεων, αλλά και εξετάζοντας κοινά διαγράμματα πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων συναρτήσει της πυκνότητας, παρατηρούνται τα κάτωθι:

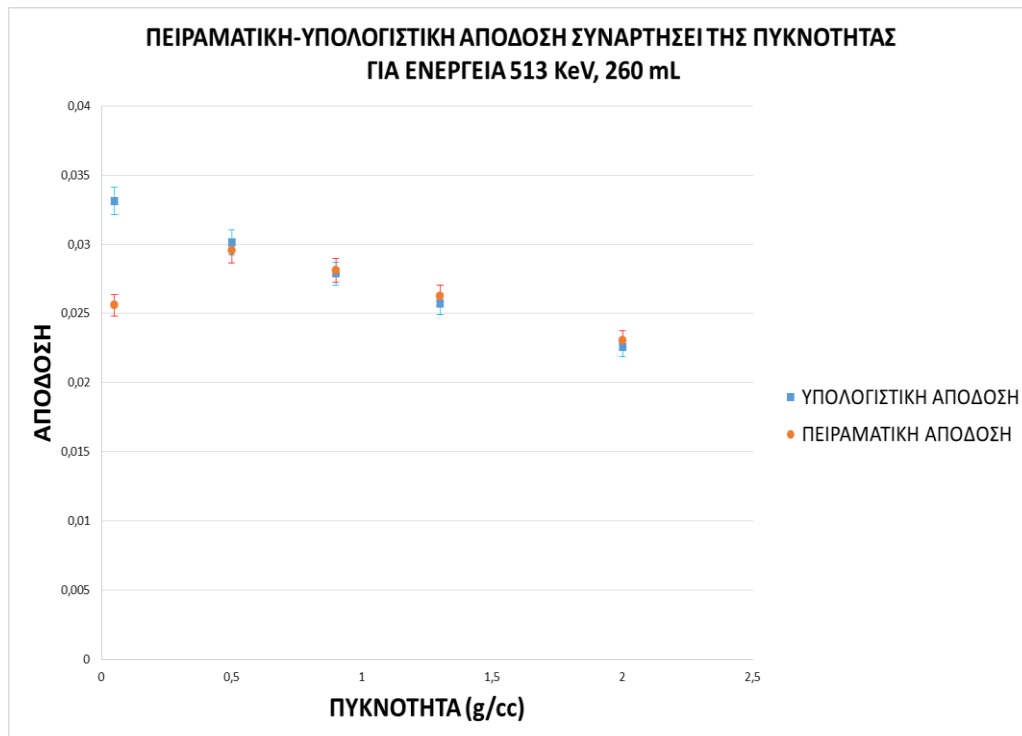
- Η πειραματική απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας της πηγής από 0.05g/cc σε 0.5g/cc, για όλες τις τιμές των ενεργειών που εκπέμπονται από την πηγή. Όπως αναλύθηκε, αυτό δε συνάδει με τα θεωρητικώς αναμενόμενα αποτελέσματα.

- Η υπολογιστική απόδοση, όπως αναμένεται, μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας της πηγής από 0.05g/cc σε 0.5g/cc για όλες τις ενέργειες.
- Οι τιμές των πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων συναρτήσει των υπόλοιπων πυκνοτήτων αποκλίνουν εντός των αποδεκτών ορίων για τη πληθώρα των προς μελέτη ενεργειών. Αποκλίσεις μέχρι 10% αναμένονται, λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, αρκεί η μορφή των διαγραμμάτων να είναι ίδια, δηλαδή η απόδοση να μειώνεται συναρτήσει της πυκνότητας.

Επομένως συμπεραίνεται ότι υπάρχουν αβεβαιότητες οι οποίες επιβαρύνουν τις πειραματικές μετρήσεις απόδοσης για την πυκνότητα 0.05g/cc. Η επανάληψη των συγκεκριμένων μετρήσεων δεν πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας.

Παρατίθεται ενδεικτικά το κοινό διάγραμμα πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων συναρτήσει της πυκνότητας για την ενέργεια 513 keV του Στροντίου-90, όπου είναι εμφανής η αύξηση της πειραματικής απόδοσης όταν η πυκνότητα της πηγής μεταβάλλεται από 0.05g/cc σε 0.5g/cc. Με σκοπό την μεγαλύτερη συνάφεια έχουν συμπεριληφθεί μόνο οι πυκνότητες 0.05, 0.5, 0.9, 1.3 και 2 g/cc, παραλείποντας τις ενδιάμεσες τιμές πυκνοτήτων που μελετήθηκαν.

Ο σχηματισμός φωτοκορυφής από το Sr-90 στην ενέργεια των 513 keV προσεγγίζει την ενέργεια των 511 keV που αντιστοιχεί στα φωτόνια- γ που προκύπτουν από εξαύλωση ποζιτρονίων που προέρχονται από το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης. Μεγαλύτερη ακρίβεια θα παρατηρούνταν, όπως έχει εξηγηθεί, συγκρίνοντας τις πειραματικές και υπολογιστικές αποδόσεις συναρτήσει της πυκνότητας για την ενέργεια του κεσίου, δεδομένου ότι δεν εμπεριέχονται φαινόμενα σύμπτωσης. Αυτό αποφεύγεται, καθώς όπως αναλύεται παρακάτω, η τιμή της πειραματικής απόδοσης του κεσίου για την πυκνότητα 1.3g/cc εμπεριέχει και αυτή αβεβαιότητες.



Διάγραμμα 4.16 Πειραματική και υπολογιστική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης συναρτήσει της πυκνότητας, για την ενέργεια 513 keV, κυαθίου παλαιάς γεωμετρίας όγκου πλήρωσης 260 mL και πυκνότητας 0.05 g/cc.

Σημειώνεται ότι οι αβεβαιότητες των τιμών των αποδόσεων που έχουν εισαχθεί στο διάγραμμα είναι της τάξης του 1.5% (1σ) και προέρχονται από την αβεβαιότητα που προσδίδεται στις μετρήσεις από τις ραδιενεργές πηγές.

Με σκοπό την επικύρωση του συμπεράσματος που εξήχθη περί της ανακρίβειας των πειραματικών τιμών, ακολούθησε η διαδικασία εύρεσης ενός συντελεστή διόρθωσης, ο οποίος αφαιρεί την επίδραση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης. Έτσι, στην περίπτωση που όλες οι πειραματικές μετρήσεις ήταν ορθές, θα αναμενόταν η εξίσωση των τιμών της απόδοσης για όλες τις πυκνότητες πηγής, εντός των ορίων αβεβαιότητας.

Ο συντελεστής διόρθωσης προκύπτει χωρίζοντας την πηγή σε μικρές πλάκες αμελητέου πάχους και ολοκληρώνοντας ως προς το ύψος της, ενώ λαμβάνει υπόψη το συντελεστή εξασθένησης των φωτονίων στο μέσο, καθώς και την πυκνότητα του μέσου. Διαιρώντας αυτό το συντελεστή με την υπολογιστική και την πειραματική απόδοση για κάθε πυκνότητα, προκύπτουν οι διορθωμένες αποδόσεις, οι οποίες είναι ανεξάρτητες της πυκνότητας της πηγής για κάθε ενέργεια. Ως αναγκαία παραδοχή, θεωρείται ότι τα φωτόνια από την πηγή προσπίπτουν κάθετα.

Ο συντελεστής διόρθωσης ορίστηκε ως: $CF = \int_0^d e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho x} dx$ (3.14) , όπου
μ: ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής για την προς μελέτη ενέργεια,
ρ: η πυκνότητα της πηγής,
d: το ύψος της πηγής.

Ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης υπολογίστηκε για τις 13 διαφορετικές ενέργειες των ραδιονουκλιδίων του μίγματος, πραγματοποιώντας τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής για τα δεδομένα που λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων, θεωρώντας ως υλικό της πηγής το πολυαιθυλένιο, λόγω παρόμοιας χημικής σύστασης με την εποξική ρητίνη. (53)

Πολλαπλασιάζοντας το μαζικό συντελεστή εξασθένησης με την εκάστοτε πυκνότητα, υπολογίστηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για όλες τις ενέργειες 5 διαφορετικών πυκνοτήτων (0.05, 0.5, 0.9, 1.3 και 2 g/cc). Ως ύψος της πηγής χρησιμοποιήθηκε η τιμή 5.397 cm, σύμφωνα με το όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω. Έτσι, προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διόρθωσης για τις 13 ενέργειες και των 5 διαφορετικών πυκνοτήτων. Οφείλει να αναφερθεί ότι συγκρίνοντας τις τιμές των μαζικών συντελεστών εξασθένησης που προέκυψαν από τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής με τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές, παρατηρούνται αποκλίσεις μέχρι 5%.

Εν συνεχεία διαιρέθηκε ο εκάστοτε συντελεστής διόρθωσης με τις αντίστοιχες πειραματικές και υπολογιστικές αποδόσεις του ανιχνευτή στη συγκεκριμένη ενέργεια και πυκνότητα. Σε όλα τα διαγράμματα των διορθωμένων για την αυταπορρόφηση υπολογιστικών και πειραματικών αποδόσεων συναρτήσεως της πυκνότητας, για σταθερή ενέργεια φωτονίων, αναμένεται σταθερή τιμή της απόδοσης συναρτήσεως της πυκνότητας της πηγής. Όμως παρατηρείται ότι η πειραματική απόδοση του μίγματος πυκνότητας 0.05g/cc διαφοροποιείται των υπολοίπων. Επομένως συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη μέτρηση περιέχει ανακρίβειες, είτε ότι τα χαρακτηριστικά της πηγής διαφέρουν από αυτά που αναγράφονται στο πιστοποιητικό της.

Τα παραπάνω παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 3.26, όπου παρουσιάζονται ενδεικτικά οι υπολογισμοί των διορθωμένων για το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης αποδόσεων για το Στρόντιο-90. Όπως

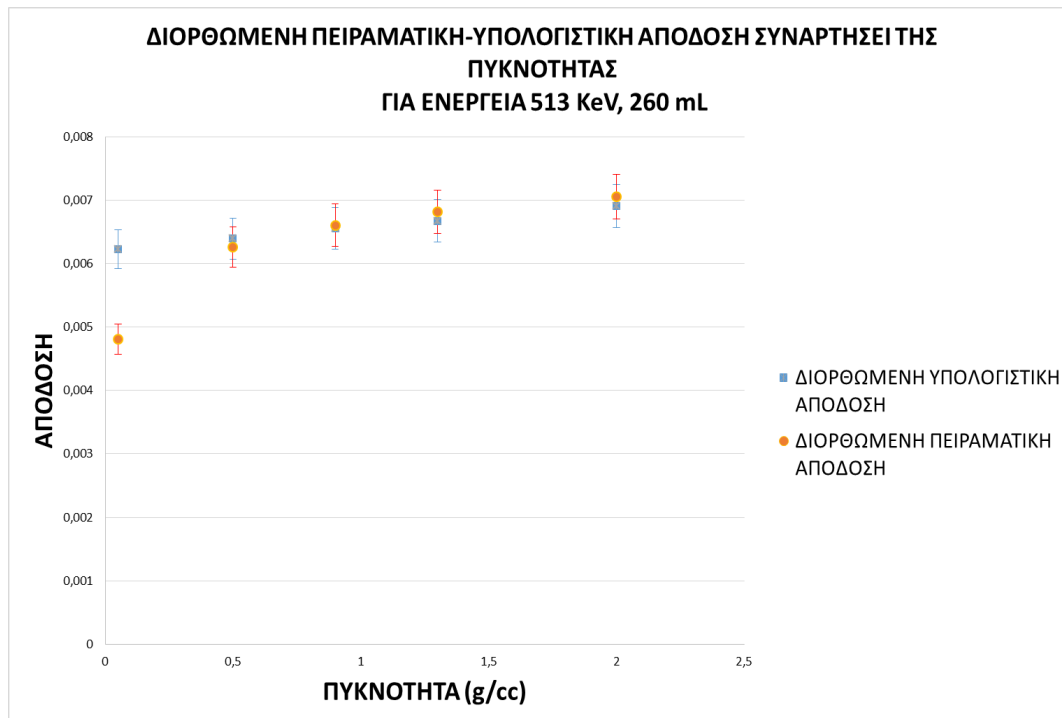
αναλύεται παρακάτω όλες οι τιμές των αποδόσεων βαρύνονται από αβεβαιότητα σε ποσοστό 5%.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cc)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ
0.05	0.03314	0.02560	5.3233
0.5	0.03014	0.02953	4.7171
0.9	0.02787	0.02810	4.2547
1.3	0.02570	0.02625	3.8530
2	0.02258	0.02306	3.2700
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cc)	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	
0.05	0.006225	0.004809	
0.5	0.006389	0.00626	
0.9	0.006551	0.00660	
1.3	0.006671	0.006812	
2	0.00690	0.007051	

Πίνακας 4.16 Υπολογισμός των διορθωμένων για το φαινόμενο αυτοαπορρόφησης αποδόσεων για το Στρόντιο.

Παρατηρείται ότι όσον αφορά τις διορθωμένες υπολογιστικές αποδόσεις, οι τιμές ταυτίζονται καθώς οι μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι της τάξης του 5%. Όσον αφορά τις διορθωμένες πειραματικές αποδόσεις, όλες οι αποδόσεις αποκλίνουν μεταξύ τους μέχρι 5%, με εξαίρεση την απόδοση για την πυκνότητα 0.05 g/cc, η οποία αποκλίνει των υπολοίπων κατά μέσο όρο 27%. Επομένως είναι εμφανές ότι η συγκεκριμένη πειραματική μέτρηση βαρύνεται από σφάλματα. Η αποκλίσεις 5% που παρατηρούνται μεταξύ των υπόλοιπων αποδόσεων αποδίδονται σε αβεβαιότητες που προκύπτουν από τη χρήση της μεθόδου γραμμικής παρεμβολής, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

Παρατίθεται ενδεικτικά το διάγραμμα της ενέργειας 513 keV του Στροντίου-90, όπου είναι εμφανές ότι οι πειραματικές τιμές απόδοσης που έχουν διορθωθεί ως προς το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης δεν ταυτίζονται.



Διάγραμμα 4.17 Διορθωμένη για το φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης πειραματική και υπολογιστική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης συναρτήσει της πυκνότητας, για την ενέργεια 513 keV, καθαίου παλαιάς γεωμετρίας όγκου πλήρωσης 260 mL και πυκνότητας 0.05 g/cc.

Επισημαίνεται ότι η μελέτη των αποδόσεων είναι ποιοτική, δηλαδή δεν υπολογίζονται οι ορθές τιμές των αποδόσεων σε περίπτωση που δεν υπήρχε το φαινόμενο αυταπορρόφησης από την πηγή, αλλά μελετάται η ταύτισή τους απουσία του φαινομένου.

Όπως αναφέρθηκε, οι αβεβαιότητες των τιμών διορθωμένων αποδόσεων είναι 5%. Υπεισέρχεται τόσο η αβεβαιότητα των ραδιενεργών πηγών (3%) αλλά και η αβεβαιότητα στον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης αυτοαπορρόφησης μέσω της εκτίμησης του συντελεστή εξασθένησης με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής (5%).

4.1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ 3 g/cc ΠΑΛΑΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΟΓΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ 100mL

Οι υπολογιστικές αποδόσεις του πλήθους ενεργειών του μίγματος πηγών πυκνότητας 3 g/cc, παλαιάς γεωμετρίας και όγκου πλήρωσης κυαθίου 100mL, απέκλιναν από τις πειραματικές κατά μέσο όρο 510%, με εύρος τιμών από 2574% μέχρι 2.26% κατά απόλυτη τιμή. Οι πολύ μεγάλες τιμές αποκλίσεων αποτέλεσαν εφιαλτήριο για τη διερεύνηση του φαινομένου.

Παρατηρείται ότι με αύξηση της ενέργειας από τα 46 μέχρι τα 391 keV μειώνονται οι αποκλίσεις των υπολογιστικών αποδόσεων από τις πειραματικές, μέχρι που τελικά συγκλίνουν εντός των αποδεκτών ορίων για ενέργειες μεγαλύτερες των 513 keV. Ενδεικτικά, για ενέργεια 88 keV οι υπολογιστικές μέθοδοι προσομοίωσης υπερεκτιμούν την απόδοση κατά 2178%, ενώ για ενέργεια 391 keV η απόδοση υπερεκτιμάται πλέον κατά 29%. Η βέλτιστη τιμή απόδοσης παρατηρείται στο κέσιο, ενέργειας 662 keV και αντιστοιχεί σε 2.2%. Για μεγαλύτερες ενέργειες, η απόκλιση αυξάνεται λόγω του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης, αλλά διατηρείται σε αποδεκτά όρια, κοντά στο 10%.

Η μεγάλη υπερεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης στις χαμηλές ενέργειες και η ταύτισή της με την πειραματική απόδοση σε υψηλότερες ενέργειες, υπονοεί διαφοροποιήσεις στη σύσταση της πηγής. Στα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό περιγραφής της πηγής, το οποίο ήταν σε συμφωνία με όλα τα προηγούμενα πειραματικά δεδομένα. Όμως, κατά τη μελέτη πηγών μεγαλύτερης τιμής πυκνότητας (3g/cc), η ύπαρξη τυχόν προσμίξεων βαρύτερων υλικών στο μίγμα της εποξικής ρητίνης επιδρά περισσότερο στα αποτελέσματα.

Αρχικά, υποτέθηκε η παρουσία μόλυβδου στο κυάθιο. Για τις ανάγκες της εκτέλεσης μεθόδου δοκιμής και σφάλματος, περιεγράφηκε μέσω του κώδικα ένα υποθετικό υλικό το οποίο έχει όλα τα χαρακτηριστικά του μόλυβδου αλλά η πυκνότητά του ισούται με 3 g/cc. Ακολούθησαν συγκρίσεις της υπολογιστικής απόδοσης που προέκυψε για το συγκεκριμένο υλικό με τις αντίστοιχες πειραματικές αποδόσεις. Η απόκλιση των υπολογιστικών τιμών από τις πειραματικές αντιστοιχούσε πλέον σε απόλυτη τιμή 14 %, με εύρος

τιμών από 28% μέχρι 4%. Η μείωση στις τιμές των αποκλίσεων ιδίως στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών ήταν αισθητή.

Επιχειρώντας τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων περιεγράφηκε μέσω του κώδικα προσομοίωσης ένα ακόμη υποθετικό υλικό, το οποίο έχει όλα τα χαρακτηριστικά του οξειδίου του μόλυβδου (PbO), αλλά πυκνότητα 3 g/cc. Το οξείδιο του μόλυβδου χρησιμοποιείται συχνά από τους κατασκευαστές για την παρασκευή πηγών μεγάλης πυκνότητας. Θεωρήθηκε αναλογία μόλυβδου και οξυγόνου 1:1.

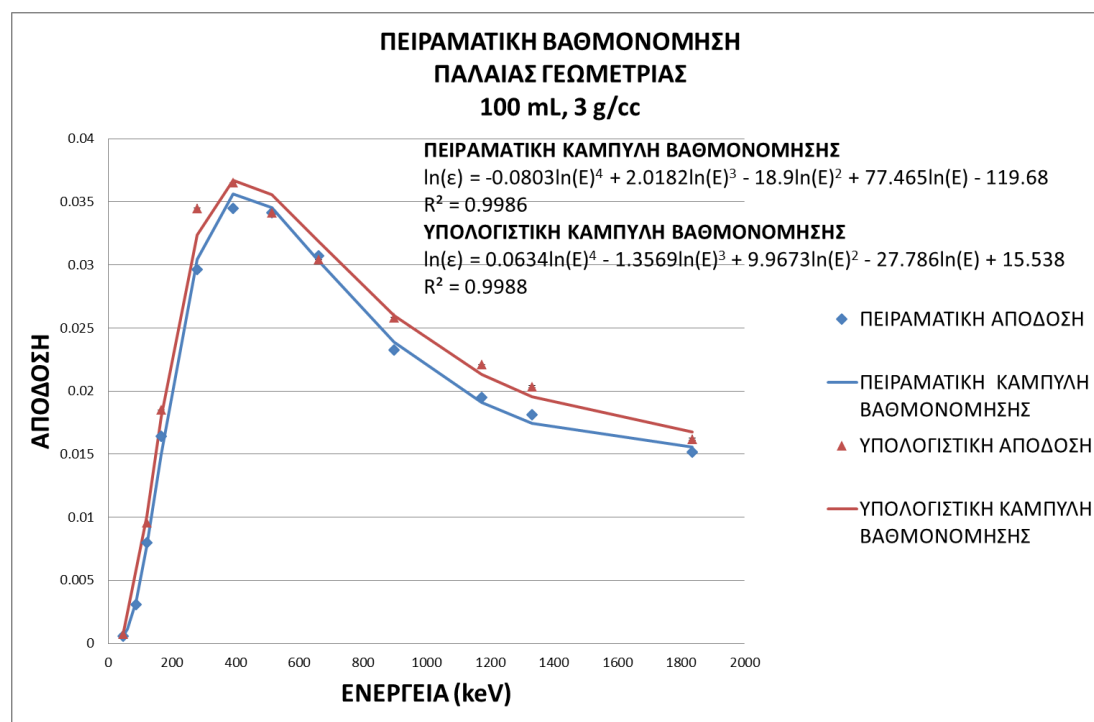
Η προσαρμογή των δεδομένων ήταν ακόμη καλύτερη. Η απόκλιση των υπολογιστικών τιμών από τις πειραματικές αντιστοιχούσε πλέον σε απόλυτη τιμή 12%, με εύρος τιμών από 24% μέχρι 3.8%

Προς τελειοποίηση των αποτελεσμάτων επιχειρήθηκε η μεταβολή της αναλογίας μόλυβδου και οξυγόνου στο δείγμα. Παρατηρώντας μεγάλη υποεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για χαμηλές ενέργειες, μειώθηκε η αναλογία του βαρύτερου μόλυβδου στο δείγμα και αυξήθηκε η αναλογία του οξυγόνου. Τα βέλτιστα αποτελέσματα επήλθαν θεωρώντας αναλογία μόλυβδου και οξυγόνου 0.45:0.55. Οι αντίστοιχες υπολογιστικές αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης, μαζί με τις σχετικές αβεβαιότητές τους σε επίπεδο 1σ, καθώς και η απόκλισή τους από τις πειραματικές παρατίθεται στον Πίνακα 3.27. Παρατίθεται ακόμη η αντίστοιχη γραφική παράσταση, όπου αναφέρονται η υπολογιστική και η πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης.

Η απόκλιση των υπολογιστικών τιμών απόδοσης από τις αντίστοιχες πειραματικές, αντιστοιχεί σε απόλυτη τιμή 11%, με εύρος τιμών από 22% μέχρι 0.03%. Δεδομένου ότι η απόκλιση της υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής του καισίου από την αντίστοιχη πειραματική αποκλίνει σε ποσοστό μικρότερο του 1%, οι μετρήσεις θεωρούνται αποδεκτές. Όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.14, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αυξάνει τις αποκλίσεις των αποδόσεων, ακόμη και κατά 10%.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 3 g/cc			
ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
Pb-210	46.54	0.000722±2.1%	22%
Co-57	122.06	0.009591±0.46%	20%
Cd-109	165.85	0.018496±0.36%	12%
Hg-203	279.2	0.034500±0.28%	16%
Sn-113	391.69	0.036511±0.27%	5.92%
Sr-85	513.99	0.034128±0.28%	-0.03%
Cs-137	661.65	0.030459±0.13%	-0.85%
Y-88	898.02	0.025829±0.14%	11%
Co-60	1173.22	0.022107±0.16%	13%
Co-60	1332.49	0.020363±0.17%	12%
Y-88	1836.01	0.016210±0.21%	7.0%

Πίνακας 4.17 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κυαθίου πυκνότητας 3 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL, με μεταβολή σύστασης πηγής.



Διάγραμμα 4.17 Υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής κυαθίου πυκνότητας 3 g/cc, όγκου πλήρωσης 100 mL, με μεταβολή σύστασης πηγής.

4.1.4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Έχοντας πλέον προσδιορίσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή HPGE σχετικής απόδοσης 70% του ΤΕΡΠ με τη βοήθεια του κώδικα PENELOPE, πραγματοποιήθηκε η υπολογιστική βαθμονόμησή της.

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για την παλαιά γεωμετρία κυαθίου σε πλήρη πλήρωση (260 mL) καθώς και σε μερική πλήρωση (100 mL). Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν οι υπολογιστικές αποδόσεις για 9 διαφορετικές πυκνότητες πηγών παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου όγκου πλήρωσης 260 mL και για 5 διαφορετικές πυκνότητες παλαιάς γεωμετρίας όγκου πλήρωσης 100 mL. Εν συνεχεία, προσδιορίστηκε η καμπύλη βαθμονόμησης στους λογαρίθμους των τιμών απόδοσης-ενέργειας, για κάθε σειρά μετρήσεων, ως πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού. Οι καμπύλες παρουσίασαν πολύ καλή προσαρμογή, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ήταν πάντα μεγαλύτερος της τιμής 0.99.

Ακολούθησε σύγκριση των υπολογιστικών βαθμονομήσεων με τις αντίστοιχες πειραματικές βαθμονομήσεις όπως αυτές περιγράφηκαν στο 2^ο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε για κάθε τιμή πυκνότητας και για τους δύο όγκους πληρώσεως, η απόκλιση των υπολογιστικών τιμών των αποδόσεων από τις πειραματικές αποδόσεις κάθε ενέργειας. Οι αποκλίσεις απεικονίζονται με τη χρήση κοινών διαγραμμάτων απόδοσης-ενέργειας όπου παρουσιάζονται οι υπολογιστική και η πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης για κάθε σειρά μετρήσεων.

Η μέση τιμή των αποκλίσεων μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών τιμών απόδοσης ήταν < 10% για τον όγκο πλήρωσης 260 mL και <12% για τον όγκο πλήρωσης 100 mL. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και είναι αναμενόμενες.

Η βέλτιστη προσαρμογή των καμπύλων βαθμονόμησης και οι κατ' επέκταση ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών τιμών της απόδοσης, παρατηρούνται για τις μετρήσεις που αφορούν στην πυκνότητα πηγής 0.9 g/cc, καθώς και για τις κοντινές σε αυτή τιμές πυκνότητας, για την περίπτωση πλήρους πλήρωσης του κυαθίου. Η παρατήρηση θα πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι η μοντελοποίηση του ανιχνευτή, η εύρεση δηλαδή των παραμέτρων της γεωμετρίας του,

πραγματοποιήθηκε στη βάση αυτής της πυκνότητας και γεωμετρίας. Δεδομένου ότι υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί διαστάσεων για τα πάχη των νεκρών ζωνών – αλλά και των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες λύσεις που αφορούν στη συγκεκριμένη γεωμετρία και πυκνότητα.

Όσο η πυκνότητα μεταβάλλεται λαμβάνοντας τιμές οι οποίες απομακρύνονται από την τιμή 0.9 g/cc, οι αποκλίσεις υπολογιστικών – πειραματικών τιμών απόδοσης τείνουν να αυξηθούν, αλλά όχι σε επίπεδα τέτοια που να καθίσταται αναγκαίος ο επαναπροσδιορισμός των διαστάσεων του ανιχνευτή. Υπενθυμίζεται ότι τα πάχη των νεκρών ζωνών και ο τρόπος με τον οποία έχουν μοντελοποιηθεί δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στην πραγματικότητα, οδηγούν ωστόσο σε προσομοιώσεις ικανοποιητικής ακρίβειας.

Αντίστοιχη παρατήρηση ισχύει και όταν αντί της πυκνότητας, εξετάζεται ο όγκος πλήρωσης του κυathίου. Κατά την μετακίνηση της μελέτης από όγκο πλήρωσης 260 mL σε όγκο πλήρωσης 100 mL, οι αποκλίσεις φαίνεται να αυξάνονται χωρίς και σε αυτή την περίπτωση να απαιτείται επαναπροσδιορισμός των διαστάσεων του ανιχνευτή.

Εν γένει, όσο η γεωμετρία προσομοίωσης προσεγγίζει τη γεωμετρία στη βάση της οποίας έγινε ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ανιχνευτικής διάταξης, τόσο τα υπολογιστικά αποτελέσματα που λαμβάνονται με την προσομοίωση αναμένεται να προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά.

Σε ό,τι αφορά στη σύγκριση υπολογιστικών – πειραματικών τιμών απόδοσης, μια επιπλέον παρατήρηση που πρέπει να γίνει αφορά στη συστηματική υπερεκτίμηση της υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής σε σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές της. Η παρατήρηση, η οποία είναι εντονότερη στην περίπτωση ισοτόπων όπως το Y-88 και Co-60, αποδίδεται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης κυρίως και της τυχαίας άθροισης δευτερευόντως.

Πιο συγκεκριμένα και σε ό,τι αφορά στην πραγματική σύμπτωση, η απώλεια γεγονότων από τις φωτοκορυφές ενδιαφέροντος (summing out effect) κατά τον πειραματικό υπολογισμό των αποδόσεων οδηγεί αντίστοιχα, σε μειωμένες τιμές απόδοσης φωτοκορυφής. **(7, 39, 40)** Αντίθετα, κατά τον προσδιορισμό

των υπολογιστικών τιμών της απόδοσης το φαινόμενο δεν προσομοιώνεται, καθώς σε κάθε προσομοιούμενη ιστορία, προσομοιώνεται ένα μόνο φωτόνιο.

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι αποκλίσεις είναι εντονότερες σε περιπτώσεις ισοτόπων με έντονη συμμετοχή στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Ενδεικτικά αναφέρονται οι περιπτώσεις των Co-60, Y-98 στα οποία κυριαρχούν οι γ - γ αθροίσεις και η περίπτωση του Ce-139 στο οποίο κυριαρχούν οι γ -X αθροίσεις. (9, 14, 22, 28, 40, 47, 61)

Περαιτέρω και σε ό,τι αφορά στην τυχαία άθροιση σημειώνεται και πάλι η διαφορά πειράματος και προσομοίωσης καθώς και σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο δεν λαμβάνεται υπόψη – δεν προσομοιώνεται.

Πέρα από τα φαινόμενα σύμπτωσης που αναλύονται παραπάνω, η ύπαρξη στροντίου στο μίγμα βαθμονόμησης οδηγεί στο σχηματισμό φωτοκορυφής στην ενέργεια των 513 keV προσεγγίζει την ενέργεια των 511 keV που αντιστοιχεί στα φωτόνια- γ που προκύπτουν από εξαύλωση ποζιτρονίων που προέρχονται από το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης. (47) Δεδομένου ότι το μίγμα εμπεριέχει ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν σε ενέργειες μεγαλύτερες του 1.02 MeV, το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης εμφανίζεται.

Σε ό,τι αφορά στον όγκο των 260 mL καθαίου, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων παρατηρήθηκαν στην πηγή πυκνότητας 0.05 g/cc. Οι αποκλίσεις ήταν της τάξης του 32% ενώ στις υπόλοιπες πυκνότητες η μέση τιμή των αποκλίσεων ήταν 7.12%. Περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας ανέδειξε προβληματισμό σε σχέση με τα διαθέσιμα πειραματικά σημεία ειδικά για την περίπτωση της πηγής βαθμονόμησης με πυκνότητα 0.05 g/cc.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του όγκου πλήρωσης των 100 mL, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στην περίπτωση της πηγής βαθμονόμησης με πυκνότητα 3 g/cc. Οι υψηλές αυτές αποκλίσεις αφορούσαν την περιοχή ενεργειών 50 – 500 keV, ενώ εξαλείφονταν στις υψηλότερες ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα οι υπολογιστικές αποδόσεις ήταν σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες πειραματικές. Δεδομένης της έντονης παρουσίας του φαινομένου της αυταπορρόφησης, εξετάστηκε η πιθανή επίδραση της σύστασης του δείγματος βαθμονόμησης. Αποδείχθηκε ότι με κατάλληλη επιλογή υλικών σύστασης του υλικού της πηγής, οι αρχικά

παρατηρούμενες υψηλές αποκλίσεις, μειώθηκαν στα επιθυμητά αποδεκτά επίπεδα.

Αποκλίσεις στην απόδοση μπορεί να εισάγει και η επιλογή των παραμέτρων της προσομοίωσης από το χρήστη. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, φωτόνια που μεταφέρουν συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή καταγράφονται μέσα σε συγκεκριμένα ενεργειακά παράθυρα. Αυτά τα ενεργειακά παράθυρα καθορίζονται από το χρήστη, όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.1., επηρεάζοντας πιθανά τον αριθμό των φωτονίων που ανιχνεύονται στην ενεργειακή περιοχή της φωτοκορυφής. Ακόμη, επιλέγεται από το χρήστη ένα συγκεκριμένο όριο ενέργειας αποκοπής. Όταν κατά την παρακολούθηση των αλληλεπιδράσεων ενός φωτονίου ή ενός φορτισμένου σωματιδίου η ενέργειά τους μειωθεί κάτω από την προαναφερθείσα ενέργεια αποκοπής, η παρακολούθηση της ιστορίας σταματά και η το φωτόνιο ή σωματίδιο αποθέτει όλο του το ενεργειακό περιεχόμενο τοπικά. Μεγαλύτερες τιμές ενέργειας αποκοπής μειώνουν το χρόνο της προσομοίωσης, αλλά μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση των αποκλίσεων πειραματικών – υπολογιστικών αποτελεσμάτων ειδικά σε περιπτώσεις κατά τις οποίες πέρα από τις φωτοκορυφές πλήρους απορρόφησης εξετάζονται και άλλα τμήματα του ενεργειακού φάσματος. **(34, 61)**

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3.1, συχνά οι διαστάσεις του ανιχνευτή που προσφέρονται από τον κατασκευαστή δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές. **(39, 40)** Αυτό αντισταθμίζεται με την εύρεση των παχών των νεκρών ζωνών του ανιχνευτή, αλλά ακριβής γνώση των διαστάσεων του ανιχνευτή θα προσέφερε ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στις υπολογιστικές μετρήσεις απόδοσης. Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 6 κάτι τέτοιο είναι δυνατόν με τη χρήση της μεθόδου της ραδιογραφίας ή με σάρωση του ανιχνευτή με πηγή αμερικίου-241. **(15, 17)** Έτσι, λαμβάνονται υπόψη και τυχόν ατέλειες του κρυστάλλου, οι οποίες επίσης επηρεάζουν τις μετρήσεις.

Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες, όπου έχει πραγματοποιηθεί σάρωση του ανιχνευτή, παρατηρούνται μεταβολές στην απόδοσή του από σημείο σε σημείο. Συγκεκριμένα, στο χαμηλότερο σημείο του κρυστάλλου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στην απόδοση, κυρίως λόγω ανομοιογένειας στην κατεύθυνση και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζει τις πειραματικές μετρήσεις απόδοσης. Θα

μπορούσε στο μέλλον να μελετηθεί η απόδοση διαφορετικών σημείων του ανιχνευτή με τη χρήση ευθυγραμμισμένων πηγών. **(28, 39, 40)**

Οι κώδικες προσομοίωσης βασίζονται απαραίτητες παραδοχές, οι οποίες βασίζονται σε απλουστεύσεις των αλληλεπιδράσεων φωτονίων και ηλεκτρονίων. Έτσι, υπεισέρχεται αβεβαιότητα στις τιμές των ενεργών διατομών των αλληλεπιδράσεων. Οι αβεβαιότητες αυτές, ειδικά για χαμηλές ενέργειες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. **(15)**. Ακόμη, οι κώδικες προσομοίωσης Monte Carlo υπολογίζουν τις τιμές ενεργών διατομών μέσω της μεθόδου παρεμβολής, καθώς είναι αδύνατον να περιλαμβάνονται στα αρχεία εισόδου όλες οι δυνατές πιθανότητες αλληλεπιδράσεων για κάθε ενέργεια. Λόγω της μεθόδου παρεμβολής, υπεισέρχονται αβεβαιότητες στην υπολογιστική βαθμονόμηση, οι οποίες όμως θεωρούνται αμελητέες. **(61)** Τέλος, λόγω της συμμετοχής του κρυσταλλικού πλέγματος στις αλληλεπιδράσεις φωτονίων, πραγματοποιούνται φαινόμενα όπως αυτό της διοχέτευσης (channeling), τα οποία δεν αποτυπώνονται στην προσομοίωση. **(19)**

4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΝΕΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΥΑΘΙΟΥ

4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχοντας προσδιορίσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογιστική βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής του για την παλαιά γεωμετρία κυαθίου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά της πειραματικής βαθμονόμησης, αναδείχθηκε ότι η μέθοδος εύρεσης απόδοσης με τη χρήση του κώδικα PENELOPE είναι ακριβής. Ο μέσος όρος των αποκλίσεων πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων ήταν της τάξης του 10% τόσο για τις πηγές όγκου πλήρωσης 260 mL όσο και για τις όγκου πλήρωσης 100 mL. Οι αποκλίσεις αυτές θα μπορούσαν να θεωρηθούν αποδεκτές με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία. **(20, 27, 39, 58, 63)**

Σκοπό αυτού του κεφαλαίου αποτελεί η βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης που αφορά τη νέα γεωμετρία

κυαθίου. Η εκ νέου βαθμονόμηση είναι απαραίτητη, καθώς μεταβάλλοντας τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή διαφοροποιείται η στερεά γωνία ανίχνευσης, άρα και η απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος. Ακόμη, οι αλλαγές των διαστάσεων των πηγών επηρεάζουν το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν οι απαραίτητες πηγές αναφοράς για τη διεξαγωγή της πειραματικής βαθμονόμησης, πραγματοποιείται υπολογιστική βαθμονόμηση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αναμενόμενη ακρίβεια της διαδικασίας αυτής θα ήταν της τάξης του 10%. Με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού της βαθμονόμησης απόδοσης της νέας γεωμετρίας κυαθίου, εφαρμόστηκε η μέθοδος της μεταφοράς απόδοσης που αναλύεται παρακάτω..

4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Στη βιβλιογραφία, συναντώνται δύο βασικές μέθοδοι προσδιορισμού της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσεως της ενέργειας.

Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό της μαθηματικής σχέσης που συνδέει την απόδοση με την ενέργεια άμεσα, με τη χρήση κώδικα Monte Carlo. Σε αυτή τη μέθοδο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει τις παραμέτρους του ανιχνευτή που προσφέρονται από τον κατασκευαστή, ή να τις τροποποιήσει προς βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, εάν χρησιμοποιηθούν οι διαστάσεις που προσφέρονται από τον κατασκευαστή, αναμένονται μεγάλες αποκλίσεις ακόμη και 40%. Εάν ο χρήστης προβεί σε διορθώσεις των διαστάσεων που παρέχονται από τον κατασκευαστή και εκ νέου προσδιορισμό των νεκρών ζωνών, αναμένεται σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες μία υπερεκτίμηση των υπολογιστικών αποδόσεων κατά 10%. **(11 , 41, 66)**

Η δεύτερη μέθοδος, η οποία είναι ημιεμπειρική, βασίζεται στον προσδιορισμό μιας σχέσης μεταφοράς απόδοσης. Αυτό πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις πειραματικές και υπολογιστικές τιμές απόδοσης που έχουν ληφθεί από μια γεωμετρία αναφοράς. **(11, 66)** Παρουσιάζει σαφώς μικρότερες αποκλίσεις από τις μεθόδους άμεσης βαθμονόμησης, περίπου 5%.

Αυτές οι αποκλίσεις αυξάνονται αναλόγως με τη γεωμετρία του ανιχνευτή και των πηγών, καθώς και τις συνθήκες της μέτρησης, αλλά η συγκεκριμένη μέθοδος παραμένει η πιο ακριβής **(11, 41, 66)** και για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

Η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης, η οποία προτάθηκε πρώτη φορά από τους Moens et al (1981), βασίζεται στην υπόθεση ότι η πιθανότητα καταγραφής της πλήρους ενέργειας ενός φωτονίου εξαρτάται μόνο από την ενέργειά του. **(11, 41, 46)** Ακόμη, η συγκεκριμένη μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση φωτονίων με το φαινόμενο της ελαστικής σκέδασης. **(46, 67)** Έτσι, για τις ανάγκες της μεθόδου, ορίζεται ένα νέο μέγεθος, ο λόγος εικονικής ολικής απόδοσης προς την εικονική απόδοση φωτοκορυφής. Αυτό το μέγεθος αναφέρεται στο λόγο ολικής απόδοσης ως προς την απόδοση φωτοκορυφής (TTP), το οποίο αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2. Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι δε λαμβάνονται υπόψη σκεδάσεις φωτονίων σε περιοχές εκτός του ενεργού όγκου του κρυστάλλου του ανιχνευτή, ούτε το φαινόμενο της ελαστικής σκέδασης. **(46, 67, 69)** Επομένως σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, ο λόγος εικονικής ολικής απόδοσης προς την εικονική απόδοση φωτοκορυφής (Virtual TTP), είναι ανεξάρτητος θέσης, σχήματος, και σύστασης πηγής. Αποτελεί ενδογενές χαρακτηριστικό του κρυστάλλου του ανιχνευτή.

Μετά τη δημοσίευση της μεθόδου, ακολούθησαν μελέτες σχετικά με την εξακρίβωση της σταθερότητας του λόγου VTTP. Όπως αναδείχθηκε, ο λόγος μπορεί να θεωρηθεί σταθερός, αρκεί η πηγή να μην είναι σε επαφή με τον κρύσταλλο, αλλά να παρεμβάλλεται μία απόσταση μεταξύ του παραθύρου του ανιχνευτή και του κρυστάλλου. Αυτό ως επί των πλείστων ικανοποιείται στους μοντέρνους ανιχνευτές γ-φασματοσκοπίας. Ακόμη, οφείλει να αναφερθεί ότι ο λόγος παραμένει σταθερός στους ομοαξονικούς ανιχνευτές, αλλά μεταβάλλεται για ενέργειες μεγαλύτερες των 200 keV σε επίπεδους ανιχνευτές. Επομένως δεδομένου ότι το εργαστήριο του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ διαθέτει ομοαξονικό ανιχνευτή, η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια. **(67)**

Σύμφωνα με τα παραπάνω, δεδομένου ότι ο λόγος VTTP είναι σταθερός, προκύπτει άμεσα:

$$\varepsilon_x/T_x = \varepsilon_{ref}/T_{ref} \quad (4.1)$$

όπου

ε_x : η ζητούμενη απόδοση φωτοκορυφής για τη γεωμετρία προς μελέτη

T_x : η ολική απόδοση για τη γεωμετρία προς μελέτη

ε_{ref} : η απόδοση φωτοκορυφής για τη γεωμετρία αναφοράς

T_{ref} : η ολική απόδοση για τη γεωμετρία αναφοράς

Ακόμη, η εκάστοτε ολική απόδοση μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$T = \Omega/4\pi \quad (4.2)$$

όπου

T : η ολική απόδοση για οποιαδήποτε γεωμετρία

Ω : η ενεργός στερεά γωνία για την αντίστοιχη γεωμετρία

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.1) και (4.2), η ζητούμενη απόδοση υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{ref} \frac{\Omega_x}{\Omega_{ref}} \quad (4.3)$$

όπου

ε_x : η ζητούμενη απόδοση φωτοκορυφής για τη γεωμετρία προς μελέτη

ε_{ref} : η απόδοση φωτοκορυφής για τη γεωμετρία αναφοράς

Ω_x : η ενεργός στερεά γωνία για γεωμετρία προς μελέτη

Ω_{ref} : η ενεργός στερεά γωνία για γεωμετρία

(11, 35, 41, 46, 54, 66, 69)

Σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται η ορολογία «ενεργός στερεά γωνία» και όχι στερεά γωνία. Η ενεργός στερεά γωνία, εκτός των γεωμετρικών

χαρακτηριστικών των δειγμάτων, λαμβάνει ακόμη υπόψη τις μεταβολές στο φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης και στην απόκριση του ανιχνευτή. Μεταβάλλοντας μόνο τη στερεά γωνία ανιχνευτή-πηγής δε λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές αυτές, οι οποίες δύναται να επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των υπολογισμών. Κατ' ουσία, ο όρος ενεργός στερεά γωνία εισάγεται για τις ανάγκες της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης και ορίζεται ως η πιθανότητα ένα φωτόνιο να καταλήξει στον ενεργό όγκο του κρυστάλλου χωρίς να αλληλεπιδράσει με την πηγή ή τα γύρω υλικά, καθώς και χωρίς να αλληλεπιδράσει με ελαστική σκέδαση. **(11, 46)**

4.2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΥΑΘΙΟΥ

Με αφετηρία την παραπάνω μεθοδολογία, στην παρούσα εργασία η ζητούμενη απόδοση για τη νέα γεωμετρία υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\epsilon_{\text{πειραματική}} = \epsilon_{\text{refπειραματική}} \frac{\epsilon_{\text{υπολογιστική}}}{\epsilon_{\text{refυπολογιστική}}} \quad (4.4)$$

όπου

$\epsilon_{\text{πειραματική}}$: η ζητούμενη πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για την προς μελέτη γεωμετρία και ενέργεια

$\epsilon_{\text{refπειραματική}}$: η πειραματική απόδοση φωτοκορυφής για τη γεωμετρίας αναφοράς

$\epsilon_{\text{υπολογιστική}}$: η υπολογιστική φωτοκορυφής απόδοση για τη γεωμετρία προς μελέτη

$\epsilon_{\text{refυπολογιστική}}$: η υπολογιστική απόδοση φωτοκορυφής για τη γεωμετρία αναφοράς **(35, 41)**

Με άλλα λόγια ο λόγος των πειραματικών αποδόσεων φωτοκορυφής για μια ενέργεια και δύο διαφορετικές γεωμετρίες είναι ίδιος με τον αντίστοιχο λόγο υπολογιστικών αποδόσεων

Η υπολογιστική απόδοση για τη νέα γεωμετρία και τη γεωμετρία αναφοράς προσδιορίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού PENELOPE. Ο λόγος τους ορίζεται ως συντελεστής μεταφοράς (TF). **(69)** Επομένως,

$$TF = \frac{\varepsilon_{\text{υπολογιστική}}}{\varepsilon_{\text{ref υπολογιστική}}} \quad (4.5)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο συντελεστής μεταφοράς λαμβάνει υπόψη τις διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή καθώς και στην αυτοαπορρόφηση της πηγής **(11, 41)**, ενώ χρησιμοποιώντας το λόγο των αποδόσεων οι όποιες αβεβαιότητες τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της προσομοίωσης απλοποιούνται ή συμπίεζονται. **(35, 69, 70)** Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη, καθώς επιτρέπει τη βαθμονόμηση απόδοσης της ζητούμενης γεωμετρίας πηγών με τη χρήση οποιασδήποτε γεωμετρίας αναφοράς. **(70)** Όμως, οφείλει να σημειωθεί ότι όσο περισσότερο η προς εξέταση γεωμετρία προσεγγίζει τη γεωμετρία αναφοράς, τόσο πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμβάνονται. **(25)**

Ως γεωμετρία αναφοράς στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η παλιά γεωμετρία κυαθίου με όγκο πλήρωσης 260 mL και 100 mL. Η πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμησή τους πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Για την προσομοίωση της νέας γεωμετρίας κυαθίου χρησιμοποιήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, όπως προσδιορίστηκαν προηγούμενα, αυτό εξάλλου είναι και το πλεονέκτημα της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης.

4.2.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Με σκοπό τον προσδιορισμό της υπολογιστικής απόδοσης για τη νέα γεωμετρία κυαθίου, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι του ανιχνευτή που προσδιορίστηκαν στο κεφάλαιο 3.1. Δεδομένου ότι μελετάται η νέα γεωμετρία κυαθίου, μεταβλήθηκαν οι διαστάσεις της πηγής στο αρχείο γεωμετρίας καθώς και στο αρχείο εισόδου του κώδικα PENELOPE. Οι διαστάσεις της νέας γεωμετρίας κυαθίου μετρήθηκαν με παχύμετρο ως ακολούθως:

- Εσωτερική διάμετρος κυαθίου : 8.28 cm
- Εσωτερικό ύψος κυαθίου : 4.113 cm για 205 mL, 1.764 cm για 100 mL
- Πάχος τοιχωμάτων κυαθίου : 0.136 cm
- Απόσταση δοχείου από παράθυρο ανιχνευτή : 0.2 cm

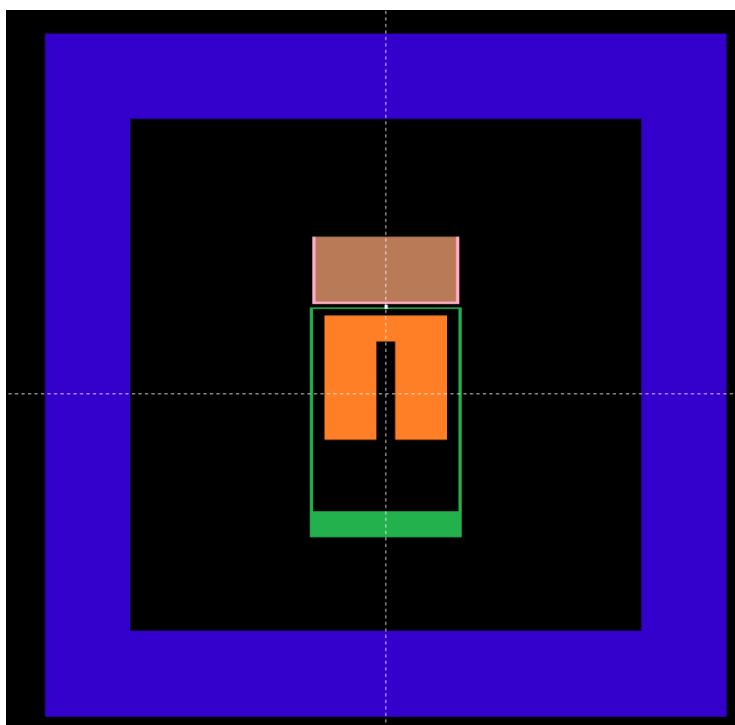
Επισημαίνεται ότι το κυάθιο (container) που περικλείει την πηγή έχει σταθερό πάχος στο κάτω αλλά και στα πλαϊνά του μέρη. Οφείλει να αναφερθεί ότι στην πραγματικότητα το δοχείο της πηγής δεν ήταν συμμετρικό, αλλά παρουσίαζε εσοχές στην κάτω πλευρά. Αυτές οι εσοχές λήφθηκαν υπόψη εισάγοντας την απόσταση του δοχείου από το παράθυρο του ανιχνευτή ως 0.2 cm. Ακόμη, το ύψος της πηγής μεταβάλλεται ανάλογα με τον όγκο πλήρωσης του δοχείου.



Εικόνα 4.2 Φωτογραφία νέας γεωμετρίας κυαθίου.



Εικόνα 4.3 Αποτύπωση πηγής γεωμετρίας νέου κουαθίου (καφέ χρώμα) και περιβλήματος πολυαιθυλενίου (ροζ χρώμα) μέσω του κώδικα PENELOPE.



Εικόνα 4.4 Η ανιχνευτική διάταξη που προσομοιώθηκε για τις μετρήσεις απόδοσης κουαθίου νέας γεωμετρίας, όγκου 205 mL (μίγμα πηγών παλαιού κουαθίου-καφέ, κρύσταλλος ανιχνευτή-πορτοκαλί, περίβλημα-πράσινο, θωράκιση-μπλε).

4.2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Μέσω της υπολογιστικής βαθμονόμησης απόδοσης με τη χρήση κώδικα PENELOPE, προσδιορίστηκε η απόδοση φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για εννιά πηγές διαφορετικών πυκνοτήτων με όγκο πλήρωσης

205 mL και έξι πηγές διαφορετικών πυκνοτήτων όγκου πλήρωσης 100 mL της νέας γεωμετρίας κυαθίου. Τα ραδιονουκλίδια που εμπεριέχονται στο μίγμα, άρα και οι ενέργειες βαθμονόμησης, είναι ίδια με αυτό της παλαιάς γεωμετρίας. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής βαθμονόμησης παρατίθενται στους πίνακες 4.1- 4.15 και τα αντίστοιχα διαγράμματα, σε συνδυασμό με αυτά της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης.

Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε η παλαιά γεωμετρία (για την οποία πραγματοποιήθηκε πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμηση στα προηγούμενα κεφάλαια) ως γεωμετρία αναφοράς. Μέσω των υπολογιστικών και πειραματικών αποδόσεων του ανιχνευτή για τη γεωμετρία αναφοράς καθώς και την υπολογιστική απόδοση του ανιχνευτή για τη νέα γεωμετρία, υπολογίζεται με τη χρήση της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης η αντίστοιχη πειραματική απόδοση για κάθε ενέργεια φωτοκορυφής των ραδιονουκλιδίων του μίγματος, σχέση (4.2).

Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, με την επιλογή ως δείγματος αναφοράς πηγής η οποία διαθέτει παρόμοιες διαστάσεις, χημική σύσταση και πυκνότητα με την πηγή προς μελέτη, μειώνονται οι αποκλίσεις της μεθόδου. **(25)** Με βάση αυτή την παρατήρηση, όσον αφορά στον όγκο πλήρωσης 205mL της νέας γεωμετρίας, χρησιμοποιήθηκε ως γεωμετρία αναφοράς η παλαιά γεωμετρία όγκου πλήρωσης 260 mL. Ομοίως, όσον αφορά στον όγκο πλήρωσης 100 mL της νέας γεωμετρίας, επιλέχθηκε ως γεωμετρία αναφοράς η παλαιά γεωμετρία όγκου πλήρωσης 100 mL. Για κάθε γεωμετρία, η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης πραγματοποιήθηκε για ίδια πυκνότητα πηγών αναφοράς και μελέτης.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται για κάθε σειρά υπολογισμών και για κάθε ενέργεια ραδιονουκλιδίων του μίγματος:

- Υπολογιστικές τιμές αποδόσεων της νέας γεωμετρίας κυαθίου
- Υπολογιστικές τιμές αποδόσεων της παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου
- Πειραματικές τιμές αποδόσεων της παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου
- Συντελεστής μεταφοράς (Transfer Factor)
- Πειραματικές τιμές αποδόσεων της νέας γεωμετρίας
- Σχετικές αβεβαιότητες όλων των μεγεθών σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ

- Αποκλίσεις πειραματικών τιμών αποδόσεων της νέας γεωμετρίας από τις αντίστοιχες υπολογιστικές.

Ακόμη παρατίθενται τα κοινά διαγράμματα υπολογιστικών και πειραματικών αποδόσεων της νέας γεωμετρίας συναρτήσει της ενέργειας, μαζί με τις αβεβαιότητες της εκάστοτε τιμής απόδοσης. Προσδιορίζονται και παρατίθενται οι αντίστοιχες υπολογιστικές και πειραματικές καμπύλες βαθμονόμησης.

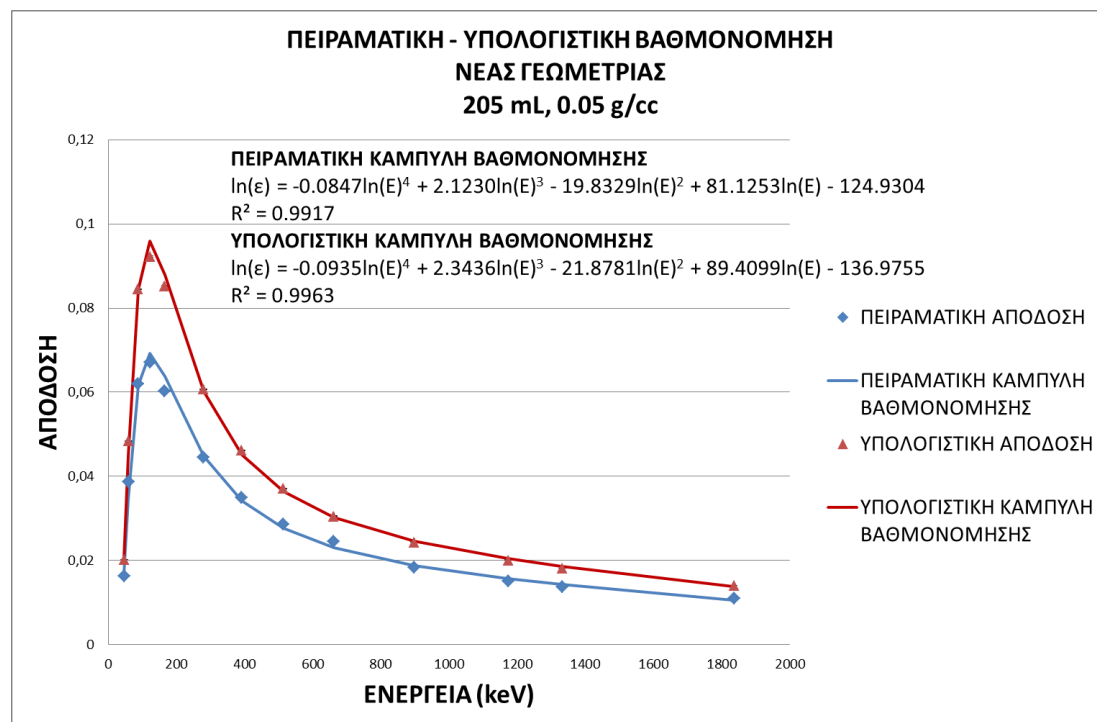
Νέα γεωμετρία κβαθίου με όγκο πλήρωσης 205 mL.

Παρατίθενται όλες οι μετρήσεις, υπολογισμοί και τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν στη μεταφορά απόδοσης σε πηγές όγκου πλήρωσης 205 mL της νέας γεωμετρίας κβαθίου.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.05 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{\text{υπολ}}$	$\epsilon_{\text{ref υπολ}}$	$\epsilon_{\text{ref πειρ}}$
47	0.02019±0.18%	0.019080±0.02%	0.01543±5.7
59	0.04840±0.12%	0.04495±0.08%	0.03591±1.8
88	0.08447±0.11%	0.07703±0.03%	0.05646±1.5
122	0.0922±0.11%	0.08359±0.07%	0.06085±1.5
165	0.0852±0.13%	0.07696±0.10%	0.05447±1.5
279	0.0607±0.18%	0.05432±0.13%	0.03982±1.5
391	0.04615±0.15%	0.04129±0.16%	0.03123±1.5
513	0.03709±0.18%	0.03314±0.19%	0.0256±1.5
662	0.03055±0.23%	0.02723±0.16%	0.02175±1.5
898	0.02435±0.28%	0.02175±0.01%	0.01641±1.5
1170	0.02008±0.32%	0.01785±0.28%	0.01338±1.5
1330	0.01818±0.25%	0.01623±0.31%	0.01218±1.5
1836	0.01406±0.36%	0.01254±0.28%	0.0098±1.5

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{\text{πειρ}}$
47	1.0583±0.17%	0.0163±5.7%
59	1.0768±0.14%	0.0386±1.8%
88	1.0966±0.10%	0.0619±1.5%
122	1.1032±0.12%	0.0671±1.5%
165	1.1075±0.15%	0.0603±1.5%
279	1.1179±0.20%	0.0445±1.5%
391	1.1179±0.19%	0.0349±1.5%
513	1.1191±0.23%	0.0286±1.5%
662	1.1221±0.25%	0.0244±1.5%
898	1.1196±0.25%	0.0183±1.5%
1170	1.1251±0.38%	0.0150±1.6%
1330	1.1203±0.35%	0.0136±1.6%
1836	1.1207±0.41%	0.0109±1.6%

Πίνακας 4.18 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κυάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.05 g/cc.

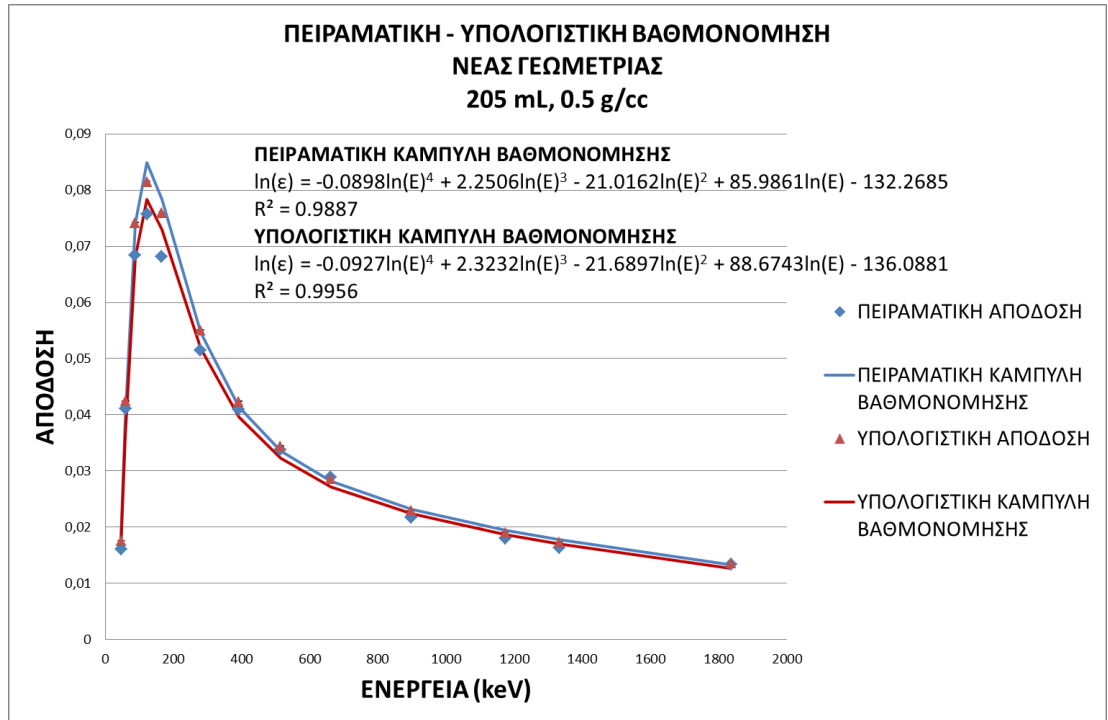


Διάγραμμα 4.19 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κυάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.05 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.5 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{\chi_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
47	0.01758±0.21%	0.01604±0.13%	0.0146±5.7%
59	0.04244±0.14%	0.03814±0.09%	0.03692±1.8%
88	0.07422±0.12%	0.06556±0.07%	0.06044±1.5%
122	0.0815±0.13%	0.07176±0.06%	0.06662±1.5%
165	0.0759±0.15%	0.06680±0.09%	0.05989±1.5%
279	0.0551±0.20%	0.04831±0.10%	0.04515±1.5%
391	0.04239±0.17%	0.03712±0.12%	0.035 82±1.5%
513	0.03446±0.20%	0.03014±0.15%	0.02953±1.5%
662	0.02862±0.25%	0.02519±0.17%	0.02538±1.5%
898	0.02293±0.30%	0.020116±0.01%	0.01902±1.5%
1170	0.01906±0.36%	0.01667±0.29%	0.01567±1.5%
1330	0.01734±0.27%	0.01522±0.32%	0.01431±1.5%
1836	0.01360±0.40%	0.01184±0.01%	0.01159±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (ΤΓ)	$\epsilon_{\chi_{\text{πειρ}}}$
47	1.0965±0.22%	0.0160±5.7%
59	1.1128±0.15%	0.0410±1.8%
88	1.1320±0.13%	0.0684±1.5%
122	1.1362±0.13%	0.0757±1.5%
165	1.1370±0.15%	0.0681±1.5%
279	1.1397±0.19%	0.0514±1.5%
391	1.1420±0.18%	0.0409±1.5%
513	1.1431±0.22%	0.0337±1.5%
662	1.1359±0.27%	0.0288±1.5%
898	1.1397±0.26%	0.0216±1.5%
1170	1.1437±0.40%	0.0179±1.6%
1330	1.1395±0.37%	0.0163±1.6%
1836	1.1485±0.35%	0.0133±1.6%

Πίνακας 4.19 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.5 g/cc.



Διάγραμμα 4.20 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.5 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.7 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{πειρ}}$
47	0.01664±0.15%	0.01492±0.19%	0.01503±5.7%
59	0.04016±0.10%	0.03557±0.13%	0.03582±1.8%
88	0.07019±0.09%	0.06136±0.11%	0.06052±1.5%
122	0.07741±0.09%	0.06743±0.11%	0.06501±1.5%
165	0.07239±0.10%	0.06353±0.13%	0.05928±1.5%
279	0.05293±0.14%	0.04571±0.17%	0.04479±1.5%
391	0.04094±0.17%	0.03551±0.19%	0.03574±1.5%
513	0.03324±0.15%	0.02898±0.23%	0.02976±1.5%
662	0.02778±0.18%	0.02420±0.28%	0.02452±1.5%
898	0.02240±0.22%	0.019496±0.01%	0.01932±1.5%
1170	0.01857±0.26%	0.01630±0.21%	0.01592±1.5%
1330	0.01704±0.28%	0.01483±0.27%	0.01465±1.5%
1836	0.01339±0.35%	0.01167±0.34%	0.01186±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{πειρ}}$
47	1.1154±0.22%	0.0167±5.7%
59	1.1290±0.15%	0.0404±1.8%
88	1.1439±0.12%	0.0692±1.5%
122	1.1480±0.13%	0.0746±1.5%
165	1.1394±0.14%	0.0675±1.5%
279	1.1580±0.19%	0.0518±1.5%
391	1.1530±0.22%	0.0412±1.5%
513	1.1471±0.24%	0.0341±1.5%
662	1.1479±0.29%	0.0281±1.5%
898	1.1491±0.19%	0.0222±1.5%
1170	1.1392±0.29%	0.0181±1.5%
1330	1.1484±0.34%	0.0168±1.5%
1836	1.1469±0.43%	0.0136±1.6%

Πίνακας 4.20 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.7 g/cc.



Διάγραμμα 4.21 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.7 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.9 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{πειρ}}$
47	0.01579±0.23%	0.013894±0.02%	0.01328±5.7%
59	0.03808±0.16%	0.03319±0.07%	0.03274±1.8%
88	0.06638±0.14%	0.05754±0.06%	0.05572±1.5%
122	0.0737±0.14%	0.06344±0.10%	0.05947±1.5%
165	0.0693±0.16%	0.05946±0.13%	0.05419±1.5%
279	0.0506±0.22%	0.04356±0.18%	0.04164±1.5%
391	0.03935±0.18%	0.03380±0.21%	0.0333±1.5%
513	0.03220±0.22%	0.02788±0.24%	0.0281±1.5%
662	0.02699±0.28%	0.02330±0.20%	0.02412±1.5%
898	0.02182±0.32%	0.018894±0.01%	0.01826±1.5%
1170	0.01822±0.39%	0.01574±0.35%	0.01518±1.5%
1330	0.01667±0.29%	0.01440±0.30%	0.01399±1.5%
1836	0.01311±0.43%	0.01135±0.34%	0.01136±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{πειρ}}$
47	1.1365±0.20%	0.0150±5.7%
59	1.1474±0.15%	0.0375±1.8%
88	1.1537±0.13%	0.0642±1.5%
122	1.1618±0.15%	0.0690±1.5%
165	1.1650±0.18%	0.0631±1.5%
279	1.1622±0.24%	0.0483±1.5%
391	1.1642±0.24%	0.0387±1.5%
513	1.1552±0.28%	0.0324±1.5%
662	1.1583±0.30%	0.0279±1.5%
898	1.1550±0.28%	0.0210±1.5%
1170	1.1575±0.45%	0.0175±1.6%
1330	1.1579±0.36%	0.0162±1.6%
1836	1.1548±0.48%	0.0131±1.6%

Πίνακας 4.21 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.9 g/cc.

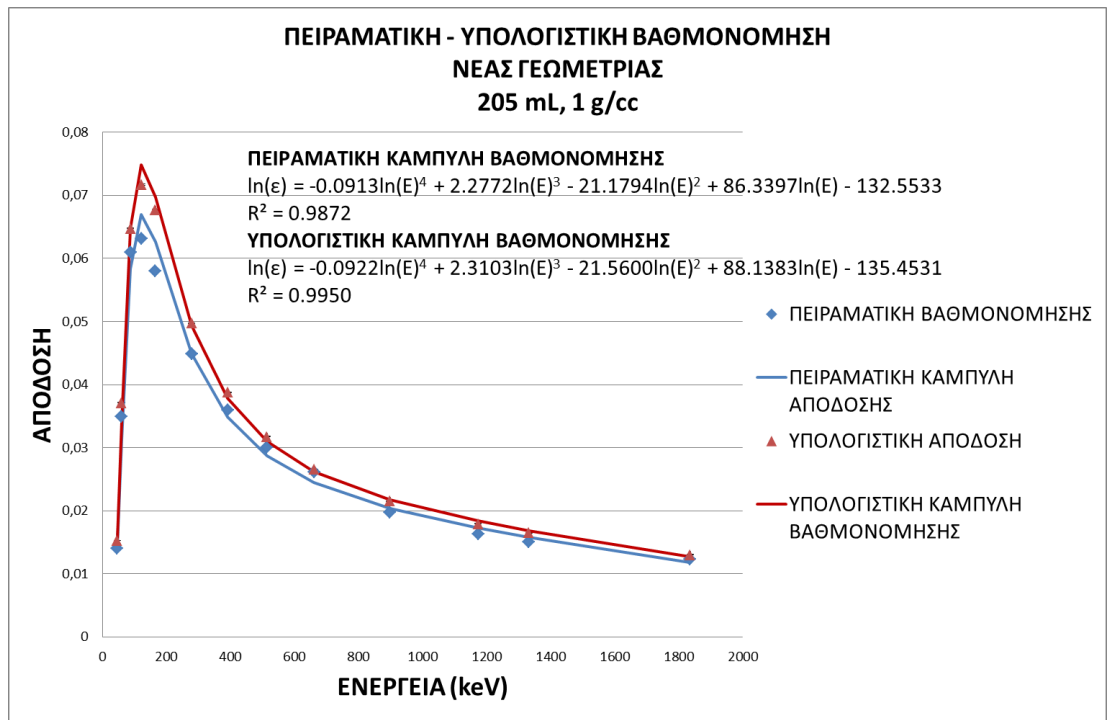


Διάγραμμα 4.22 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 0.9 g/cc.

Πυκνότητα 1 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{\chi_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
47	0.01527±0.23%	0.01345±0.18%	0.01237±5.7%
59	0.03710±0.16%	0.03215±0.12%	0.0303±1.8%
88	0.06478±0.13%	0.05574±0.06%	0.05246±1.5%
122	0.07168±0.14%	0.06165±0.11%	0.05427±1.5%
165	0.0677±0.15%	0.05838±0.12%	0.05001±1.5%
279	0.04972±0.16%	0.04248±0.16%	0.03832±1.5%
391	0.03877±0.19%	0.03323±0.20%	0.03083±1.5%
513	0.03175±0.23%	0.02739±0.20%	0.02588±1.5%
662	0.02658±0.19%	0.02284±0.21%	0.02249±1.5%
898	0.02155±0.23%	0.018580±0.01%	0.01702±1.5%
1170	0.01795±0.27%	0.01558±0.27%	0.01415±1.5%
1330	0.01650±0.30%	0.01433±0.30%	0.01307±1.5%
1836	0.01301±0.37%	0.01120±0.38%	0.01064±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{\chi_{\text{πειρ}}}$
47	1.1357±0.26%	0.0140±5.7%
59	1.1541±0.17%	0.0349±1.8%
88	1.1622±0.12%	0.0609±1.5%
122	1.1627±0.15%	0.0631±1.5%
165	1.1595±0.17%	0.0579±1.5%
279	1.1704±0.19%	0.0448±1.5%
391	1.1666±0.24%	0.0359±1.5%
513	1.1592±0.26%	0.0300±1.5%
662	1.1634±0.24%	0.0261±1.5%
898	1.1598±0.20%	0.0197±1.5%
1170	1.1522±0.34%	0.0163±1.5%
1330	1.1516±0.37%	0.0150±1.6%
1836	1.1615±0.46%	0.0123±1.6%

Πίνακας 4.22 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1 g/cc.

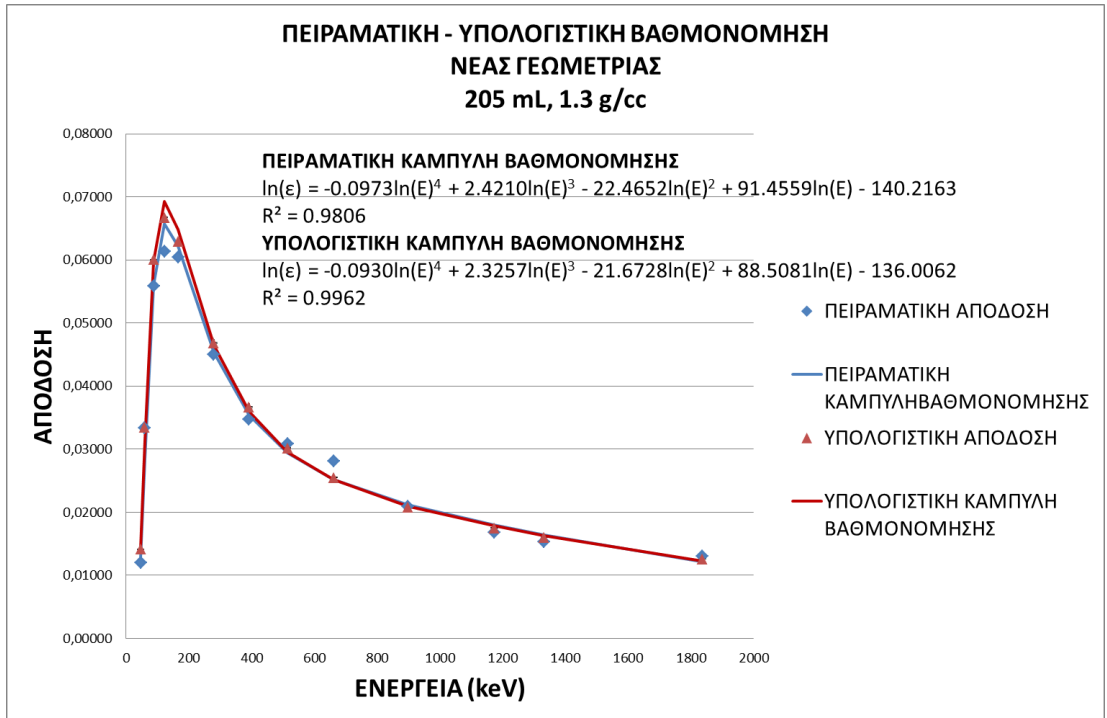


Διάγραμμα 4.23 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.3 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{ref_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{ref_{\text{πειρ}}}$
47	0.01411±0.20%	0.01206±0.28%	0.01024±5.7%
59	0.03341±0.14%	0.02928±0.19%	0.02924±1.8%
88	0.06006±0.11%	0.05082±0.16%	0.04729±1.5%
122	0.06677±0.12%	0.05645±0.17%	0.0519±1.5%
165	0.06296±0.13%	0.05334±0.18%	0.05119±1.5%
279	0.04685±0.18%	0.03956±0.24%	0.03796±1.5%
391	0.03667±0.22%	0.03219±0.29%	0.03052±1.5%
513	0.03016±0.19%	0.02571±0.24%	0.02625±1.5%
662	0.02551±0.22%	0.02163±0.28%	0.02384±1.5%
898	0.02076±0.26%	0.0177836±0.01%	0.01791±1.5%
1170	0.01750±0.31%	0.01492±0.09%	0.01426±1.5%
1330	0.01599±0.34%	0.01371±0.10%	0.0131±1.5%
1836	0.01258±0.43%	0.01092±0.36%	0.01129±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{\text{πειρ}}}$
47	1.1698±0.30%	0.0119±5.7%
59	1.1411±0.21%	0.0333±1.8%
88	1.1820±0.17%	0.0559±1.5%
122	1.1829±0.17%	0.0613±1.5%
165	1.1804±0.19%	0.0604±1.5%
279	1.1842±0.25%	0.0449±1.5%
391	1.1392±0.32%	0.0347±1.5%
513	1.1731±0.26%	0.0307±1.5%
662	1.1795±0.30%	0.0281±1.5%
898	1.1674±0.23%	0.0209±1.5%
1170	1.1734±0.28%	0.0167±1.5%
1330	1.1666±0.31%	0.0152±1.5%
1836	1.1515±0.49%	0.0130±1.6%

Πίνακας 4.23 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1.3 g/cc.

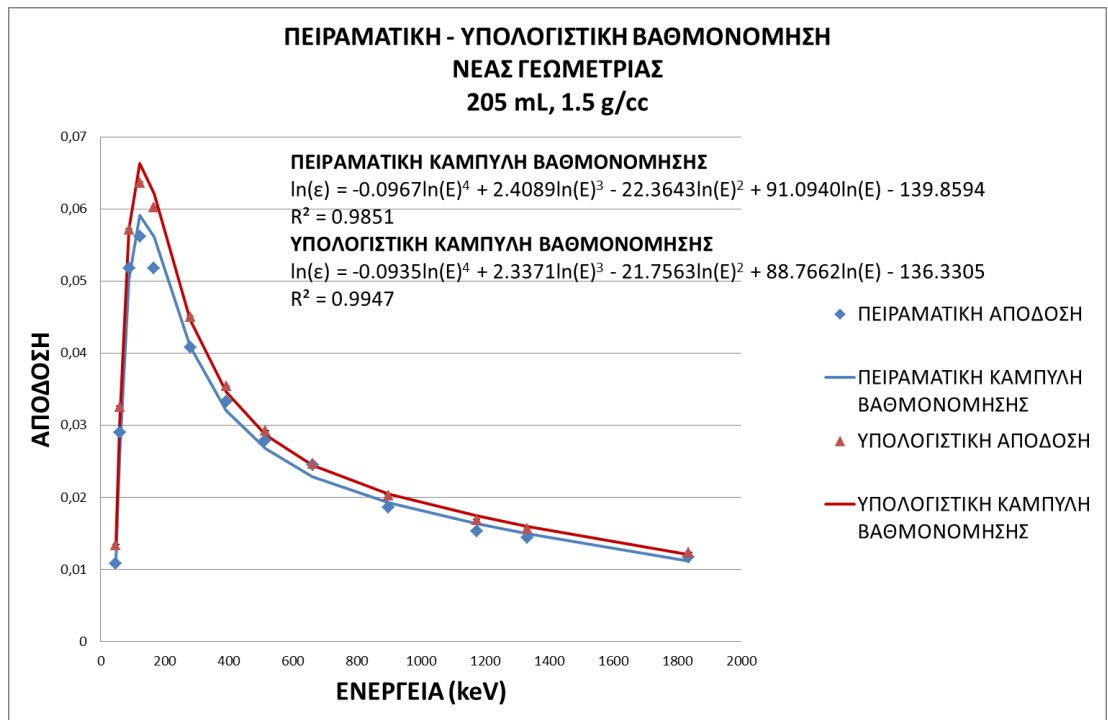


Διάγραμμα 4.24 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1.3 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.5 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
47	0.01342±0.23%	0.01145±0.28%	0.00924±5.7
59	0.03263±0.16%	0.02742±0.19%	0.02439±1,8%
88	0.05716±0.13%	0.04795±0.16%	0.04339±1,5%
122	0.06364±0.10%	0.05332±0.12%	0.04705±1,5%
165	0.06027±0.12%	0.05127±0.14%	0.04402±1,5%
279	0.04507±0.15%	0.03784±0.18%	0.03423±1,5%
391	0.03544±0.19%	0.02984±0.22%	0.028±1,5%
513	0.02923±0.26%	0.02484±0.26%	0.02371±1,5%
662	0.02469±0.21%	0.02093±0.31%	0.02078±1,5%
898	0.02033±0.26%	0.017249±0.01%	0.01581±1,5%
1170	0.01691±0.31%	0.01459±0.32%	0.01318±1,5%
1330	0.01572±0.33%	0.01332±0.34%	0.0122±1,5%
1836	0.01235±0.42%	0.01066±0.43%	0.01008±1,5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{\text{πειρ}}}$
47	1.1727±0.31%	0.0108±5,7%
59	1.1898±0.21%	0.0290±1,8%
88	1.1919±0.18%	0.0517±1,5%
122	1.1934±0.13%	0.0561±1,5%
165	1.1756±0.15%	0.0517±1,5%
279	1.1911±0.20%	0.0407±1,5%
391	1.1875±0.25%	0.0332±1,5%
513	1.1769±0.31%	0.0279±1,5%
662	1.1799±0.32%	0.0245±1,5%
898	1.1786±0.22%	0.0186±1,5%
1170	1.1590±0.38%	0.0152±1,6%
1330	1.1802±0.40%	0.0144±1,6%
1836	1.1587±0.51%	0.0116±1,6%

Πίνακας 4.24 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1.5 g/cc.

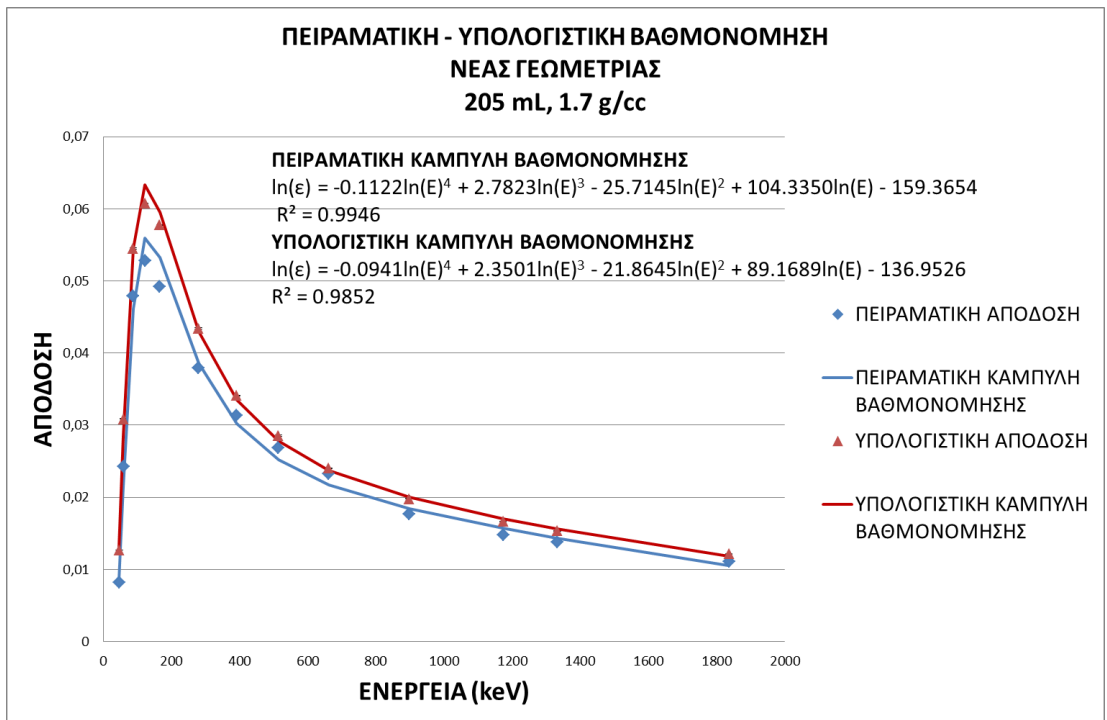


Διάγραμμα 4.25 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1.5 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.7 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{πειρ}}$
47	0.01267±0.20%	0.01068±0.19%	0.0069±5.7%
59	0.03089±0.14%	0.02596±0.13%	0.02035±1,8%
88	0.05450±0.12%	0.04535±0.11%	0.03986±1,5%
122	0.06075±0.12%	0.05047±0.11%	0.04384±1,5%
165	0.05776±0.13%	0.04873±0.12%	0.04153±1,5%
279	0.04343±0.18%	0.03624±0.16%	0.03167±1,5%
391	0.03411±0.19%	0.02868±0.20%	0.02639±1,5%
513	0.02855±0.22%	0.02382±0.17%	0.02238±1,5%
662	0.02404±0.21%	0.02031±0.20%	0.01964±1,5%
898	0.01979±0.26%	0.016770±0.01%	0.01495±1,5%
1170	0.01666±0.31%	0.01413±0.29%	0.01256±1,5%
1330	0.01536±0.33%	0.01301±0.31%	0.01165±1,5%
1836	0.01214±0.42%	0.01049±0.38%	0.00957±1,5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{πειρ}}$
47	1.1867±0.23%	0.0081±5,7%
59	1.1899±0.16%	0.0242±1,8%
88	1.2017±0.13%	0.0479±1,5%
122	1.2036±0.14%	0.0527±1,5%
165	1.1854±0.15%	0.0492±1,5%
279	1.1982±0.20%	0.0379±1,5%
391	1.1892±0.23%	0.0313±1,5%
513	1.1986±0.23%	0.0268±1,5%
662	1.1838±0.25%	0.0232±1,5%
898	1.1798±0.22%	0.0176±1,5%
1170	1.1794±0.36%	0.0148±1,6%
1330	1.1804±0.39%	0.0137±1,6%
1836	1.1575±0.49%	0.0110±1,6%

Πίνακας 4.25 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1.7 g/cc.

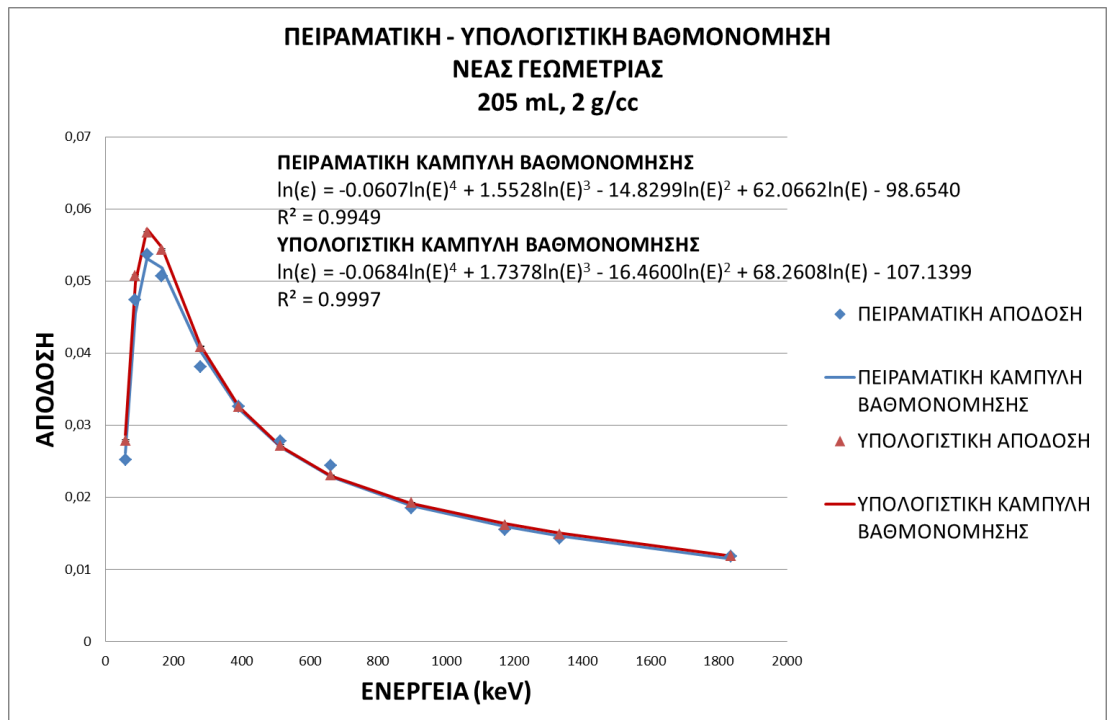


Διάγραμμα 4.26 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 1.7 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 2 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{πειρ}}$
47			
59	0.02787±0.21%	0.02383±0.11%	0.02149±1.8%
88	0.05075±0.18%	0.04179±0.08%	0.03903±1.5%
122	0.05682±0.19%	0.04681±0.13%	0.04421±1.5%
165	0.05438±0.21%	0.04465±0.18%	0.04161±1.5%
279	0.04092±0.28%	0.03396±0.22%	0.03157±1.5%
391	0.03260±0.23%	0.02712±0.26%	0.02714±1.5%
513	0.02716±0.29%	0.02258±0.27%	0.02306±1.5%
662	0.02305±0.34%	0.01931±0.26%	0.02044±1.5%
898	0.01924±0.39%	0.016166±0.01%	0.01549±1.5%
1170	0.01618±0.32%	0.01367±0.44%	0.01308±1.5%
1330	0.01489±0.41%	0.01259±0.37%	0.01207±1.5%
1836	0.01190±0.56%	0.01009±0.42%	0.01±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{πειρ}}$
47		
59	1.1697±0.20%	0.0251±1.8%
88	1.2143±0.16%	0.0473±1.5%
122	1.2138±0.19%	0.0536±1.5%
165	1.2179±0.23%	0.0506±1.5%
279	1.2049±0.30%	0.0380±1.5%
391	1.2021±0.29%	0.0326±1.5%
513	1.2029±0.33%	0.02771.6%
662	1.1935±0.36%	0.0243±1.6%
898	1.1902±0.33%	0.0184±1.5%
1170	1.1838±0.46%	0.0154±1.6%
1330	1.1826±0.47%	0.0142±1.6%
1836	1.1798±0.59%	0.0118±1.7%

Πίνακας 4.26 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 2 g/cc.



Διάγραμμα 4.27 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας 3 g/cc.

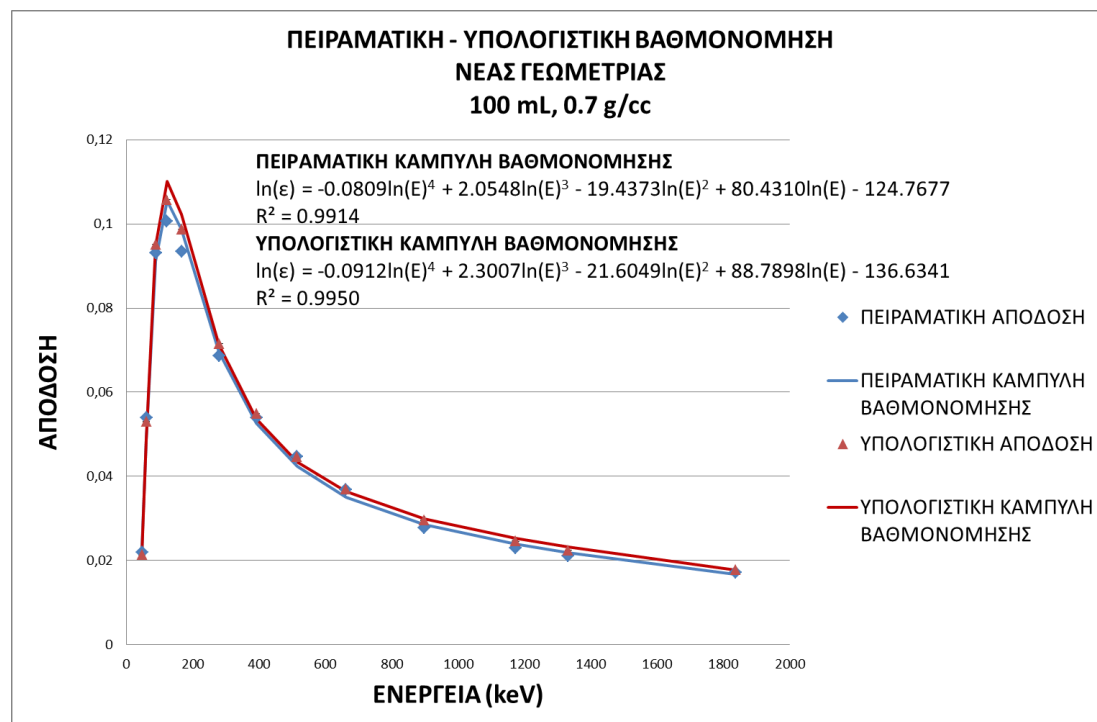
Νέα γεωμετρία κυαθίου με όγκο πλήρωσης 100 mL

Παρατίθενται όλες οι μετρήσεις, υπολογισμοί και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που αφορούν τη μεταφορά απόδοσης σε πηγές όγκου πλήρωσης 100 mL της νέας γεωμετρίας κυαθίου.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 0.7 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{\chi_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
47	0.02134±0.16%	0.02313±0.24%	0.02379±5.7%
59	0.05300±0.11%	0.05685±0.16%	0.05775±1.8%
88	0.09517±0.15%	0.10122±0.14%	0.09893±1.5%
122	0.10574±0.09%	0.11215±0.11%	0.10667±1.5%
165	0.09873±0.10%	0.10122±0.14%	0.09581±1.5%
279	0.07150±0.14%	0.07491±0.14%	0.07194±1.5%
391	0.05494±0.17%	0.05770±0.20%	0.05656±1.5%
513	0.04471±0.21%	0.04657±0.15%	0.04646±1.5%
662	0.03700±0.25%	0.03868±0.25%	0.03849±1.5%
898	0.02961±0.30%	0.03106±0.32%	0.02903±1.5%
1170	0.02465±0.37%	0.02563±0.33%	0.02381±1.5%
1330	0.02243±0.26%	0.02332±0.36%	0.02182±1.5%
1836	0.01782±0.11%	0.01822±0.11%	0.01747±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{\chi_{πειρ}}$
47	0.9227±0.32%	0.0219±5.7%
59	0.9324±0.21%	0.0538±1.8%
88	0.9402±0.21%	0.0930±1.5%
122	0.9428±0.15%	0.1005±1.5%
165	0.9753±0.18%	0.0934±1.5%
279	0.9545±0.21%	0.0686±1.5%
391	0.9522±0.28%	0.0538±1.5%
513	0.9600±0.26%	0.0446±1.5%
662	0.9565±0.37%	0.0368±1.5%
898	0.9533±0.46%	0.0276±1.6%
1170	0.9616±0.51%	0.0229±1.6%
1330	0.9621±0.46%	0.0209±1.6%
1836	0.9781±0.16%	0.0170±1.5%

Πίνακας 4.27 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κυάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 0.7 g/cc.

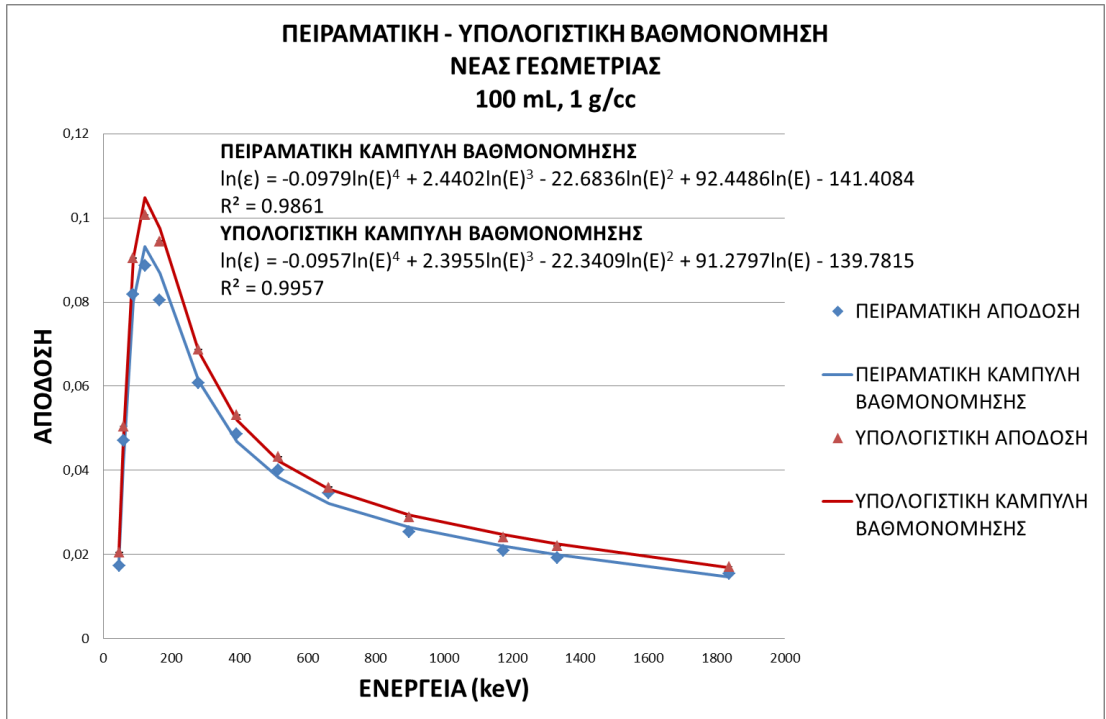


Διάγραμμα 4.28 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κυάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 0.7 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
47	0.02046±0.15%	0.02186±0.16%	0.01841±1.5%
59	0.05047±0.10%	0.05395±0.11%	0.05035±1.5%
88	0.09050±0.08%	0.09618±0.09%	0.08701±1.5%
122	0.10078±0.08%	0.10665±0.09%	0.09373±1.5%
165	0.09450±0.09%	0.09972±0.10%	0.08484±1.5%
279	0.06873±0.13%	0.07216±0.11%	0.06372±1.5%
391	0.05315±0.16%	0.05560±0.13%	0.05078±1.5%
513	0.04322±0.19%	0.04519±0.16%	0.04193±1.5%
662	0.03599±0.23%	0.03763±0.19%	0.03619±1.5%
898	0.02900±0.28%	0.03030±0.23%	0.02645±1.5%
1170	0.02421±0.27%	0.02516±0.54%	0.02164±1.5%
1330	0.02202±0.29%	0.02277±0.59%	0.01986±1.5%
1836	0.017187±0.01%	0.01794±0.76%	0.01604±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{\text{πειρ}}}$
47	0.9358±0.23%	0.0172±5.7%
59	0.9356±0.16%	0.0471±1.8%
88	0.9409±0.13%	0.0818±1.5%
122	0.9450±0.13%	0.0885±1.5%
165	0.9476±0.15%	0.0803±1.5%
279	0.9524±0.17%	0.0606±1.5%
391	0.9561±0.22%	0.0485±1.5%
513	0.9564±0.26%	0.0401±1.5%
662	0.9565±0.31%	0.0346±1.5%
898	0.9571±0.38%	0.0253±1.5%
1170	0.9623±0.63%	0.0208±1.6%
1330	0.9672±0.68%	0.0192±1.6%
1836	0.9581±0.79%	0.0153±1.7%

Πίνακας 4.28 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 1 g/cc.

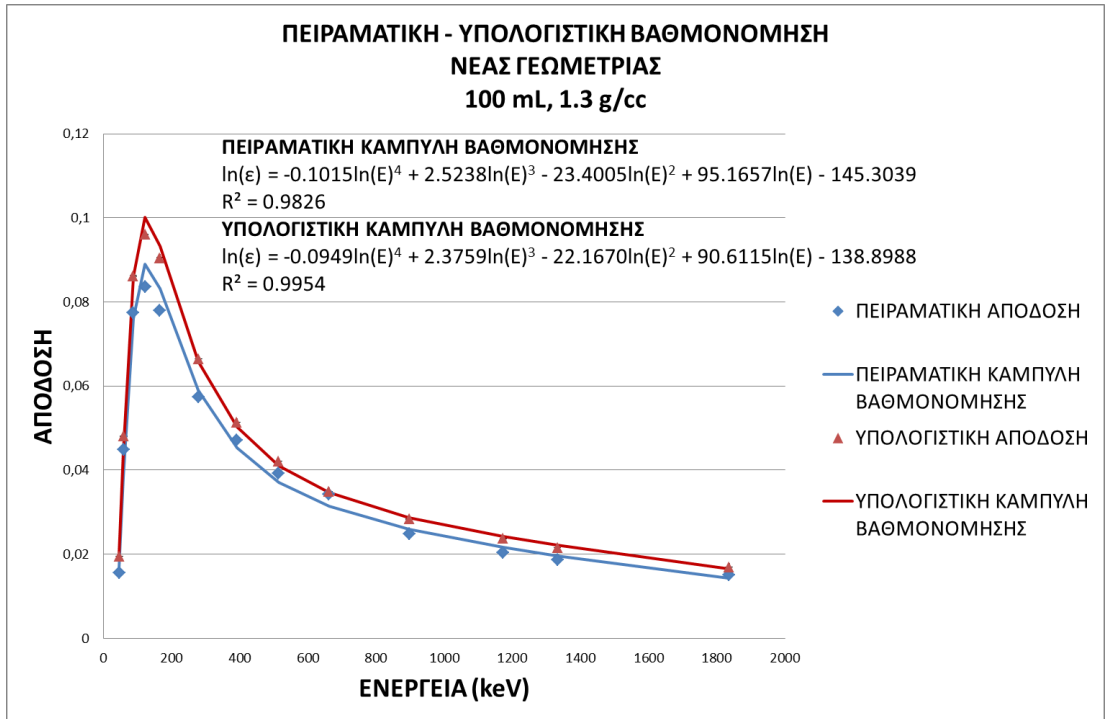


Διάγραμμα 4.29 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 1 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.3 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
47	0.01948±0.20%	0.02076±0.20%	0.01667±5.7%
59	0.04811±0.13%	0.05125±0.14%	0.04781±1.8%
88	0.08619±0.11%	0.09138±0.11%	0.08216±1.5%
122	0.09607±0.11%	0.10168±0.12%	0.08853±1.5%
165	0.09050±0.08%	0.09518±0.13%	0.08194±1.5%
279	0.06648±0.19%	0.06949±0.18%	0.06008±1.5%
391	0.05144±0.23%	0.05382±0.22%	0.04933±1.5%
513	0.04206±0.61%	0.04381±0.26%	0.04080±1.5%
662	0.03497±0.34%	0.03666±0.25%	0.03596±1.5%
898	0.02840±0.28%	0.02953±0.32%	0.02574±1.5%
1170	0.02372±0.34%	0.02464±0.38%	0.02114±1.5%
1330	0.02159±0.28%	0.02242±0.09%	0.01942±1.5%
1836	0.01694±0.35%	0.01761±0.12%	0.01571±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{\text{πειρ}}}$
47	0.9385±0.30%	0.0156±5.7%
59	0.9387±0.20%	0.0448±1.8%
88	0.9432±0.17%	0.0774±1.5%
122	0.9448±0.17%	0.0836±1.5%
165	0.9509±0.16%	0.0779±1.5%
279	0.9566±0.27%	0.0574±1.5%
391	0.9558±0.33%	0.0471±1.5%
513	0.9600±0.69%	0.0391±1.6%
662	0.9540±0.44%	0.0343±1.6%
898	0.9620±0.44%	0.0247±1.6%
1170	0.9626±0.53%	0.0203±1.6%
1330	0.9628±0.30%	0.0187±1.5%
1836	0.9622±0.38%	0.0151±1.5%

Πίνακας 4.29 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 1.3 g/cc.

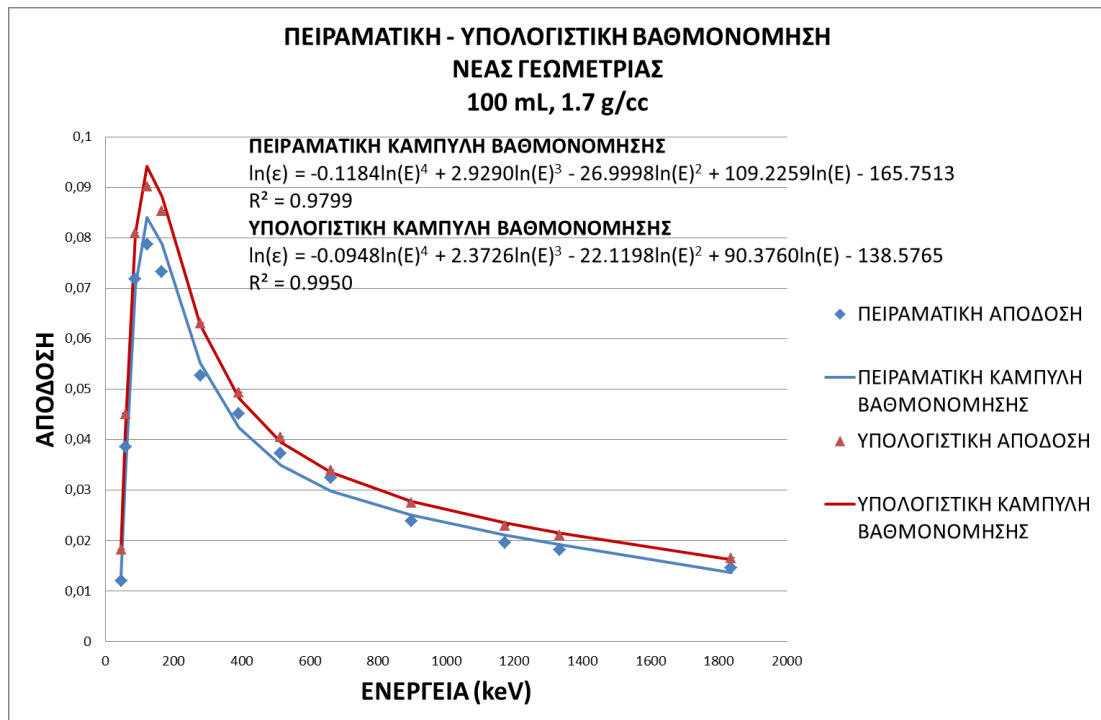


Διάγραμμα 4.30 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 1.3 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 1.7 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{ref_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{ref_{\text{πειρ}}}$
47	0.01826±0.31%	0.01949±0.24%	0.01273±5.7
59	0.04517±0.21%	0.04794±0.16%	0.04089±1.8
88	0.08101±0.17%	0.08542±0.14%	0.07569±1.5%
122	0.09029±0.18%	0.09542±0.15%	0.08317±1.5%
165	0.08539±0.14%	0.08977±0.16%	0.07697±1.5%
279	0.06310±0.19%	0.06584±0.20%	0.05501±1.5%
391	0.04945±0.23%	0.05137±0.25%	0.04692±1.5%
513	0.04053±0.28%	0.04225±0.16%	0.03891±1.5%
662	0.03398±0.28%	0.03530±0.19%	0.03368±1.5%
898	0.02749±0.23%	0.02858±0.24%	0.02474±1.5%
1170	0.02296±0.28%	0.02388±0.28%	0.02037±1.5%
1330	0.02113±0.30%	0.02179±0.31%	0.01872±1.5%
1836	0.01655±0.38%	0.01730±0.39%	0.01518±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{\text{πειρ}}}$
47	0.9366±0.41%	0.0119±5.7%
59	0.9424±0.28%	0.0385±1.8%
88	0.9483±0.23%	0.0717±1.5%
122	0.9462±0.24%	0.0787±1.5%
165	0.9513±0.23%	0.0732±1.5%
279	0.9584±0.29%	0.0527±1.5%
391	0.9625±0.35%	0.0451±1.5%
513	0.9594±0.34%	0.0373±1.5%
662	0.9627±0.35%	0.0324±1.5%
898	0.9617±0.35%	0.0237±1.5%
1170	0.9615±0.41%	0.0195±1.6%
1330	0.9699±0.45%	0.0181±1.6%
1836	0.9567±0.57%	0.0145±1.6%

Πίνακας 4.30 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 1.7 g/cc.

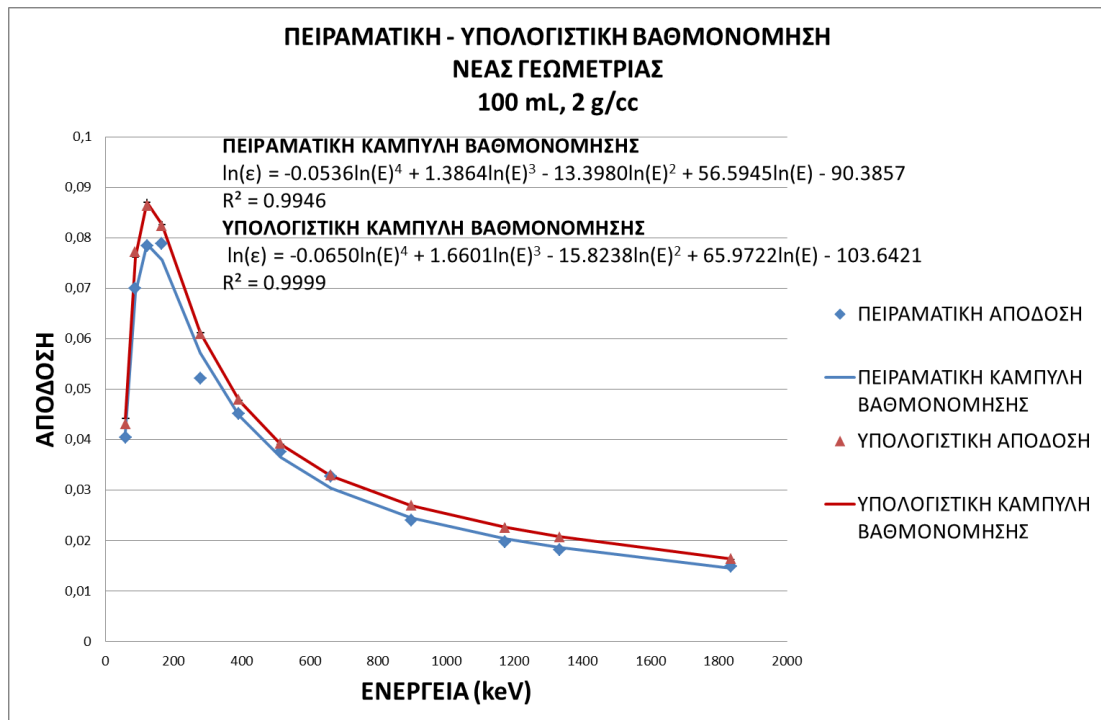


Διάγραμμα 4.31 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 1.7 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 2.0 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{πειρ}}$
47			
59	0.04311±0.12%	0.04551±0.19%	0.04266±1.8
88	0.07726±0.12%	0.08147±0.13%	0.07371±1.5%
122	0.08646±0.12%	0.09112±0.13%	0.08266±1.5%
165	0.08235±0.14%	0.07978±0.13%	0.07635±1.5%
279	0.06103±0.22%	0.06375±0.17%	0.05438±1.5%
391	0.04794±0.27%	0.04970±0.14%	0.04672±1.5%
513	0.03923±0.21%	0.04088±0.24%	0.03915±1.5%
662	0.03296±0.25%	0.03423±0.29%	0.03393±1.5%
898	0.02693±0.30%	0.02787±0.31%	0.02486±1.5%
1170	0.02255±0.36%	0.02347±0.39%	0.02049±1.5%
1330	0.02072±0.28%	0.02143±0.10%	0.01873±1.5%
1836	0.01635±0.37%	0.01699±0.12%	0.01539±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{πειρ}}$
47		
59	0.9473±0.24%	0.0404±1.8%
88	0.9484±0.19%	0.0699±1.5%
122	0.9489±0.19%	0.0784±1.5%
165	1.0322±0.18%	0.0788±1.5%
279	0.9574±0.29%	0.0520±1.5%
391	0.9647±0.32%	0.0450±1.5%
513	0.9597±0.34%	0.0375±1.5%
662	0.9628±0.40%	0.0326±1.6%
898	0.9663±0.45%	0.0240±1.6%
1170	0.9608±0.55%	0.0196±1.5%
1330	0.9669±0.31%	0.0181±1.6%
1836	0.9624±0.41%	0.0148±1.6%

Πίνακας 4.31 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 2 g/cc.

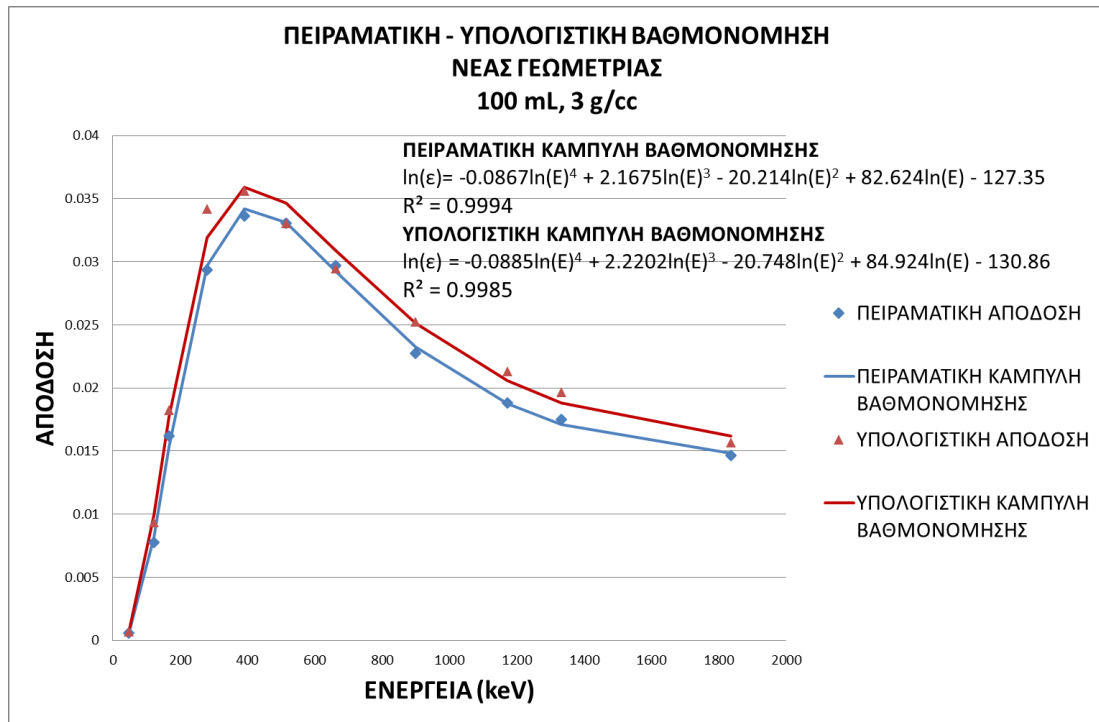


Διάγραμμα 4.32 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 2 g/cc.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 3 g/cc			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{x_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{υπολ}}$	$\epsilon_{ref_{πειρ}}$
47	0.00069±2.2%	0.00072±2.1%	0.00059±5.7
59			
122	0.00936±0.44%	0.00959±0.46%	0.0164±1.5%
165	0.01825±0.34%	0.01850±0.36%	0.02961±1.5%
279	0.03419±0.31%	0.03450±0.28%	0.03447±1.5%
391	0.03563±0.31%	0.03651±0.27%	0.03414±1.5%
513	0.03305±0.32%	0.03413±0.28%	0.03072±1.5%
662	0.02947±0.30%	0.03046±0.13%	0.02327±1.5%
898	0.02523±0.33%	0.02583±0.14%	0.01952±1.5%
1170	0.02131±0.29%	0.02211±0.16%	0.01815±1.5%
1330	0.01965±0.32%	0.02036±0.17%	0.01515±1.5%
1836	0.01569±0.37%	0.01621±0.21%	0.00059±1.5%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{x_{πειρ}}$
47	0.9512±3.2%	0.0006±6.5%
59		
122	0.9755±0.65%	0.0078±1.6%
165	0.9867±0.50%	0.0162±1.6%
279	0.9910±0.42%	0.0293±1.6%
391	0.9759±0.42%	0.0336±1.6%
513	0.9683±0.44%	0.0331±1.6%
662	0.9675±0.33%	0.0297±1.5%
898	0.9768±0.37%	0.0227±1.5%
1170	0.9641±0.34%	0.0188±1.5%
1330	0.9651±0.37%	0.0175±1.5%
1836	0.9679±0.44%	0.0147±1.6%

Πίνακας 4.32 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κιάθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 3 g/cc.



Διάγραμμα 4.33 Διεξαγωγή μεθόδου μεταφοράς απόδοσης για το κύαθιο νέας γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 100 mL και πυκνότητας 3 g/cc.

4.2.6 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΥΑΘΙΟΥ

Η παράγραφος αυτή αποσκοπεί στην επικύρωση των πειραματικών καμπύλων βαθμονόμησης νέας γεωμετρίας κυαθίου, που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μέσω της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης. Για το σκοπό αυτό, αναλύθηκε δείγμα το οποίο είχε λάβει το ΤΕΡΠ κατά τη διεξαγωγή διεργαστηριακής άσκησης διασύγκρισης το 2017, στα πλαίσια του προγράμματος Procorad.

Το Procorad διοργανώνει ετήσιες ασκήσεις ραδιοτοξικών διασυγκρίσεων με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας μετρήσεων των εργαστηρίων, καθώς και την ανάδειξη βέλτιστων μεθοδολογιών. Χρησιμοποιούνται δείγματα τα οποία εμπεριέχουν τα πλέον διαδεδομένα ραδιονουκλίδια κατά την εργασιακή έκθεση.

Στα πλαίσια της εν λόγω διεργαστηριακής άσκησης ελήφθησαν δείγματα ούρων. Για την επικύρωση της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης χρησιμοποιήθηκε το ένα εκ των δειγμάτων, καταχωρημένο ως Procorad 2017-C. Ακολούθηθηκε η εξής διαδικασία:

- Ποσότητα του επιλεγμένου δείγματος ούρων, πυκνότητας $1 \frac{g}{cc}$, εισήχθη στο κυάθιο νέας γεωμετρίας, έτσι ώστε ο όγκος πλήρωσης του κυαθίου να αντιστοιχεί σε 205 mL.
- Το δείγμα μετρήθηκε στον υπό μελέτη ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου, σχετικής απόδοσης 70% του ΤΕΡΠ.
- Από την ισχύουσα ενεργειακή βαθμονόμηση, όπως αυτή έχει καταχωρηθεί στο λογισμικό επεξεργασίας φάσματος GENIE2000 προσδιορίστηκαν τα ραδιονουκλίδια που εμπεριέχονται στο δείγμα.
- Χρησιμοποιώντας την πειραματική καμπύλη βαθμονόμησης για τη νέα γεωμετρία κυαθίου, όγκου πλήρωσης 205 mL και πυκνότητας $1 \frac{g}{cc}$ (Διάγραμμα 4.22), υπολογίστηκαν οι αποδόσεις φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης για όλες τις ενέργειες των ραδιονουκλιδίων που ανιχνεύτηκαν στο δείγμα.

- Χρησιμοποιώντας τις αποδόσεις φωτοκορυφής που προσδιορίστηκαν μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης για κάθε ενέργεια ραδιοϊσοτόπου του δείγματος, υπολογίστηκε η ενεργότητα του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου.
- Οι τιμές ενεργότητας που προσδιορίστηκαν συγκρίθηκαν με τις τιμές αναφοράς ενεργότητας που δόθηκαν από τους διοργανωτές της άσκησης.

Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας (A) του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.7). Η καθαρή επιφάνεια κάθε φωτοκορυφής (N), ο χρόνος μέτρησης (t) καθώς και το ποσοστό εκπομπής ακτινών-γ της υπό μελέτης ενέργειας φωτοκορυφής ανά διάσπαση πυρήνα (yield), αναφέρονται στην ανάλυση της μέτρησης, η οποία παρατίθεται στο Παράρτημα 4. Σε κάθε ενέργεια φωτοκορυφής αντιστοιχίζεται η πειραματική απόδοση (ϵ_E), όπως αυτή προσδιορίστηκε από την καμπύλη βαθμονόμησης που προέκυψε με τη μέθοδο μεταφοράς απόδοσης. Σε περίπτωση που κάποιο ραδιοϊσότοπο εκπέμπει φωτόνια-γ διαφορετικών ενεργειών, η ενεργότητά του υπολογίζεται ως η σταθμισμένη μέση τιμή της ενεργότητας που υπολογίστηκε για την εκάστοτε φωτοκορυφή του.

Στον Πίνακα 4.33 παρατίθενται η ενεργότητα κάθε ραδιοϊσοτόπου όπως υπολογίστηκε με βάση τη βαθμονόμηση απόδοσης νέας γεωμετρίας που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες. Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια-γ σε περισσότερες από μία ενέργειες, χρησιμοποιήθηκε η σταθμισμένη μέση τιμή των τιμών ενεργότητας που υπολογίστηκαν, ενώ λήφθηκαν υπόψη οι ακόλουθες πηγές αβεβαιότητας:

- Αβεβαιότητες τύπου A: αφορά στην καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής και λαμβάνεται από το λογισμικό της ανάλυσης.
- Αβεβαιότητες τύπου B: αφορά στην αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής και στη μέτρηση της μάζας του δείγματος.

ΙΣΟΤΟΠΟ	ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ (Bq/L)	ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (Bq/L)
Cs-134	10.60 ± 0.84	10.50 ± 0.18
Cs-137	10.60 ± 0.41	10.30 ± 0.26
Co-60	11.60 ± 0.42	11.40 ± 0.19
K-40	58.3 ± 3.0	58.30 ± 5.05

Πίνακας 4.33 Ενεργότητα που υπολογίστηκε στα πλαίσια της εργασίας και ενεργότητα αναφοράς των ραδιοϊσοτόπων του δείγματος Procorad 2017-C.

Με σκοπό τη σύγκριση και την αξιολόγηση των τιμών ενεργότητας, χρησιμοποιήθηκαν δύο κριτήρια, τα οποία αναλύονται ακολούθως. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.34.

(α) Η σχετική απόκλιση (relative bias, B_{rel}):

Η σχετική απόκλιση υπολογίστηκε για κάθε ενεργότητα ραδιοϊσοτόπου από τη σχέση:

$$B_{rel} = \frac{A_j - A_{ref}}{A_{ref}} \cdot 100\% \quad (4.10)$$

όπου

B_{rel} : η σχετική απόκλιση της εκάστοτε τιμής ενεργότητας που προσδιορίστηκε από την τιμή αναφοράς της άσκησης διασύγκρισης.

A_j : η τιμή ενεργότητας για κάθε ραδιοϊσότοπο, όπως υπολογίστηκε με βάση τη βαθμονόμηση απόδοσης για τη νέα γεωμετρία.

A_{ref} : η τιμή αναφοράς της ενεργότητας κάθε ραδιοϊσοτόπου στο δείγμα. **(73)**

(β) Στατιστικός έλεγχος με U-test:

Το U-test χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη σύγκριση των ενεργοτήτων που υπολογίστηκαν στα πλαίσια της εργασίας, με τις ενεργότητες αναφοράς, ώστε να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με το εάν οι τιμές μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά ίσες. Πρόκειται για ένα δίπλευρο στατιστικό τεστ που στηρίζεται στην τιμή της μεταβλητής U. Η τιμή αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$U = \frac{A_j - A_{ref}}{\sqrt{(\delta(A_j))^2 + (\delta(A_{ref}))^2}} \quad (4.11)$$

όπου

A_j : η τιμή ενεργότητας για κάθε ραδιοϊσότοπο, όπως υπολογίστηκε με βάση τη βαθμονόμηση απόδοσης για τη νέα γεωμετρία.

$\delta(A_j)$: η απόλυτη αβεβαιότητα της εκάστοτε τιμής ενεργότητας που προσδιορίστηκε στα πλαίσια της εργασίας, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

A_{ref} : η τιμή αναφοράς της ενεργότητας κάθε ραδιοϊσοτόπου στο δείγμα.

$\delta(A_{ref})$: η απόλυτη αβεβαιότητα της εκάστοτε τιμής ενεργότητας αναφοράς, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ακόμη, ορίζεται η μηδενική και η εναλλακτική υπόθεση H_0 και H_1 :

$$H_0: A_j = A_{ref}$$

$$H_1: A_j \neq A_{ref}$$

Σύμφωνα με το U-test:

- για $|U| \leq 1.96$ οι δύο τιμές δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά άρα θεωρούνται ίσες, με βαθμό εμπιστοσύνης 95%. Επομένως ισχύει η μηδενική υπόθεση.
- αν $1.96 < |U| \leq 2.58$ δεν είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος.
- αν $2.58 < |U|$ οι δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. **(73, 74)**

ΙΣΟΤΟΠΟ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΤΙΜΗ U
Cs-134	-0.9%	0.1
Cs-137	-2.7%	0.7
Co-60	-1.7%	0.5
K-40	0%	0

Πίνακας 4.34 Σύγκριση τιμών ενεργότητας που υπολογίστηκε στα πλαίσια της εργασίας και ενεργότητα αναφοράς των ραδιοϊσοτόπων του δείγματος Procorad 2017-C.

Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση είναι ικανοποιητικά. Η σχετική απόκλιση είναι για όλα τα ισότοπα μικρότερη του 3% ενώ σε ό,τι αφορά στην τιμή του U , ισχύει ότι $U < 1.96$ σε κάθε περίπτωση. Επομένως τα αποτελέσματα που λήφθηκαν δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από τις τιμές αναφοράς, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Επομένως, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

4.2.7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ο προσδιορισμός της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των εργαστηρίων που μελετώνται πληθώρα δειγμάτων, διαφορετικών γεωμετριών, πυκνοτήτων και συστάσεων. **(11)**

Αρχικά πραγματοποιήθηκε υπολογιστική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής της νέας γεωμετρίας κυαθίου. Όπως έχει επισημανθεί, οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν επαρκούν για την ακριβή βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης.

Έτσι, διενεργήθηκε επιτυχώς η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης, με τη χρήση της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η βεβαιότητα της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης έγκειται στο 3%. **(11, 41)** Όμως, κατά τη μελέτη πηγών όγκου οι αποκλίσεις μπορεί να αυξάνονται σε 5%. **(41)**

Οι αβεβαιότητες στις τιμές των υπολογιστικών τιμών αποδόσεων είναι κάτω από 1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Αυτό έχει επιτευχθεί με κατάλληλη επιλογή του χρόνου διεξαγωγής των προσομοιώσεων. Για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων όλων των υπολογιστικών αποδόσεων χρησιμοποιήθηκε η σχέση (3.7). Όπως έχει αναφερθεί, η αβεβαιότητα των πειραματικών τιμών που δεν πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε αμελητέα.

Ακόμη, οφείλει να αναφερθεί ότι η ολική απόλυτη αβεβαιότητα στην τιμή του συντελεστή διόρθωσης προσδιορίστηκε σύμφωνα με το νόμο διάδοσης σφαλμάτων από τη σχέση:

$$\sigma_{TF} = TF \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varepsilon_{\chi \text{ υπολογιστική}}}}{\varepsilon_{\chi \text{ υπολογιστική}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\varepsilon_{ref \text{ υπολογιστική}}}}{\varepsilon_{ref \text{ υπολογιστική}}}\right)^2} \quad (4.6)$$

Κατ' επέκταση, η σχετική αβεβαιότητα στην τιμή του συντελεστή μετάδοσης, η οποία παρατίθεται στους πίνακες υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{TF} \% = \frac{\sigma_{TF}}{TF} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Ομοίως, η ολική απόλυτη αβεβαιότητα στην τιμή των πειραματικών αποδόσεων της νέας γεωμετρίας κβαθίου προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{\varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}}} = \varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varepsilon_{\chi \text{ υπολογιστική}}}}{\varepsilon_{\chi \text{ υπολογιστική}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\varepsilon_{ref \text{ υπολογιστική}}}}{\varepsilon_{ref \text{ υπολογιστική}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}}}}{\varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}}}\right)^2} \quad (4.8)$$

Η σχετική αβεβαιότητα στην τιμή των πειραματικών αποδόσεων της νέας γεωμετρίας κβαθίου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{\varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}}} \% = \frac{\sigma_{\varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}}}}{\varepsilon_{\chi \text{ πειραματική}}} \cdot 100 \quad (4.9)$$

Έχοντας διεξάγει επιτυχώς τη βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης του ΤΕΡΠ, είναι πλέον δυνατή η άμεση ποσοτική και ποιοτική μελέτη δειγμάτων που υπάγονται στη νέα γεωμετρία.

5. ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

ΑΓΝΩΣΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός ραδιενέργειας άγνωστου αντικειμένου / υλικού. Ο ποιοτικός προσδιορισμός αναφέρεται στην ταυτοποίηση του ραδιενεργού ισότοπου και ο ποσοτικός προσδιορισμός ραδιενέργειας αναφέρεται στον υπολογισμό της ενεργότητάς του.

Τα ραδιενεργά υλικά τα οποία δεν απορρίπτονται σύμφωνα με τις ενδεδειγμένες μεθόδους, συχνά καταλήγουν σε φορτία παλαιού σιδηρομεταλλεύματος, εργοστάσια επεξεργασίας και εργοστάσια ανακύκλωσης μετάλλων. **(16, 18)**

Προκειμένου να διασφαλιστεί η προστασία των εργαζομένων, του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από πιθανή ραδιολογική ρύπανση, απαιτείται η λήψη καταλλήλων μέτρων προστασίας. Έτσι, εγκαθίστανται στις χαλυβουργίες σταθερές ανιχνευτικές διατάξεις για τον εντοπισμό ραδιενεργών υλικών, ορφανών ή/και πηγών. Κατά την ενεργοποίηση των εν λόγω ανιχνευτικών συστημάτων, ο οργανισμός προβαίνει στις απαραίτητες ενέργειες με βάση το εσωτερικό σχέδιο απόκρισής του, ενώ ενημερώνεται και η ΕΕΑΕ. **(16)**

Το συγκεκριμένο ραδιενεργό υλικό εντοπίστηκε στις 05/3/2018 σε εργοστάσιο επεξεργασίας μετάλλων, μετά από επιτόπιο έλεγχο της ΕΕΑΕ. **(16)** Το υλικό που απαρτίζει το δείγμα είναι ο χαλκός.



Εικόνα 5.1 Φωτογραφία ελάσματος χαλκού.

5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΗΡΓΕ

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μέτρηση του δείγματος στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου σχετικής απόδοσης 70% του εργαστηρίου του ΤΕΡΠ. Στο Παράρτημα 4 παρατίθεται η ανάλυση της μέτρησης. Η επεξεργασία του φάσματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Genie 2000. Από την ανάλυση της μέτρησης, λαμβάνονται οι εξής χρήσιμες πληροφορίες για τη μελέτη του δείγματος:

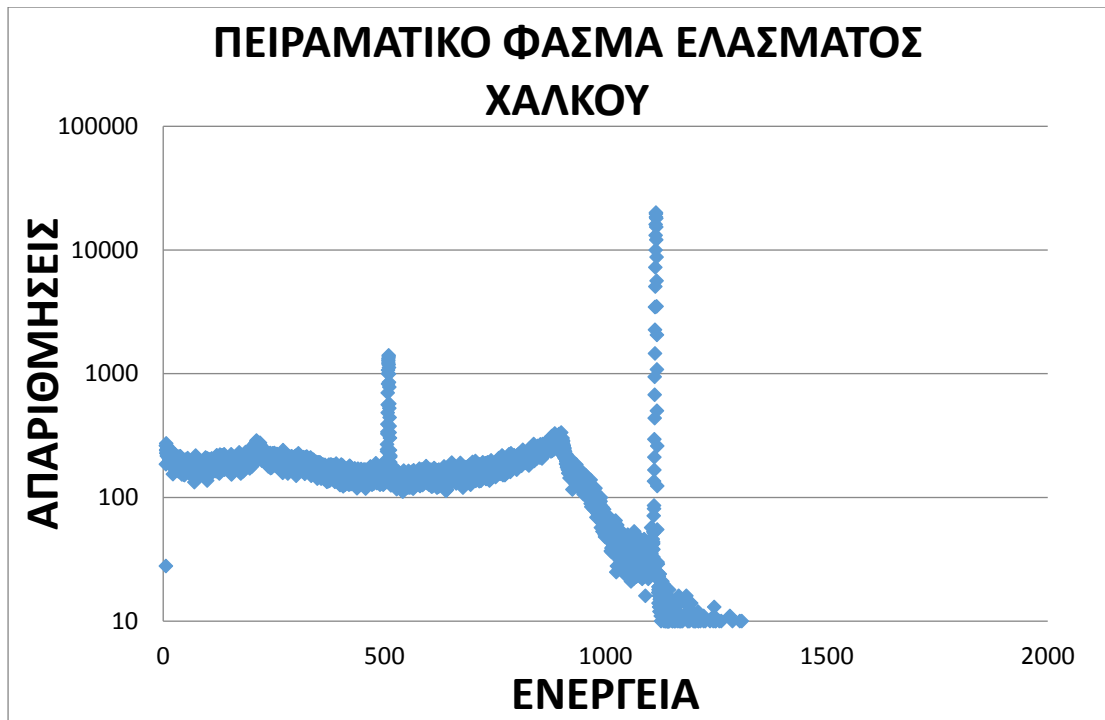
- Ο πραγματικός χρόνος μέτρησης του δείγματος αντιστοιχούσε σε 200 sec. Το δείγμα μετρήθηκε για συνολικό χρόνο 216.3 sec, επομένως ο νεκρός χρόνος της ανιχνευτικής διάταξης κάλυπτε το 7.54% της μέτρησης. Λόγω της υψηλής ενεργότητας του δείγματος, επετεύχθη η επιθυμητή αβεβαιότητα της επιφάνειας φωτοκορυφής σε ποσοστό κάτω από 1% σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Στο γ-φάσμα ανάλυσης ανιχνεύτηκαν δύο φωτοκορυφές στις ενέργειες των 511 keV και 1115.75 keV. Ο άμεσος προσδιορισμός της ενέργειας φωτοκορυφών είναι δυνατός με βάση τη διαδικασία ενεργειακής βαθμονόμησης η οποία περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 .
- Η ανίχνευση της φωτοκορυφής στην ενέργεια των 511 keV αποδίδεται στο φαινόμενο της δίδυμης γένεσης.
- Όσον αφορά στη φωτοκορυφή ενέργειας 1115.75 keV, η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής αντιστοιχεί σε $1.86 \cdot 10^5$ κρούσεις, με

αβεβαιότητα $4.40 \cdot 10^2$ (1σ) κρούσεις. Επομένως η σχετική αβεβαιότητα της μέτρησης αντιστοιχεί σε 0.24% 9(1σ).

Ακολούθως παρατίθεται στην εικόνα 5.2 το πειραματικό φάσμα από τη μέτρηση του ελάσματος χαλκού. Επισημαίνεται ότι στο φάσμα παρατίθενται οι απαριθμήσεις συναρτήσει του αριθμού καναλιών. Χρησιμοποιώντας τη σχέση ενεργειακής βαθμονόμησης (2.1), προσδιορίζονται οι απαριθμήσεις συναρτήσει της ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, παρατίθενται στην εικόνα 5.3 το πειραματικό φάσμα του ελάσματος χαλκού συναρτήσει της ενέργειας.



Εικόνα 5.2 Πειραματικό φάσμα ελάσματος χαλκού, απαριθμήσεων συναρτήσει αριθμού καναλιών.



Εικόνα 5.3 Πειραματικό φάσμα ελάσματος χαλκού, απαριθμήσεων συναρτήσεως ενέργειας.

5.3 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα ακολούθησε ο ποιοτικός προσδιορισμός του άγνωστου υλικού, δηλαδή η ταυτοποίηση του ραδιονουκλιδίου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Janis. Στη βάση δεδομένων του λογισμικού Janis⁴, εμπεριέχονται μεταξύ άλλων όλες οι δυνατές αποδιεγέρσεις ραδιονουκλιδίων. Εκτός από την ενέργεια κάθε αποδιέγερσης συμπεριλαμβάνονται ο χρόνος ημιζωής του ραδιοϊσοτόπου καθώς και το ποσοστό εκπομπής ακτινών-γ της υπό μελέτης ενέργειας ανά διάσπαση πυρήνα (ένταση εκπομπής). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω δεδομένα είναι δυνατή η ταυτοποίηση κάθε ραδιονουκλιδίου σε ένα φάσμα γ-φασματοσκοπίας.

Δεδομένου ότι η ενέργεια της υπό μελέτη φωτοκορυφής αντιστοιχούσε στην ενέργεια των 1115.75 keV, αναζητήθηκαν μέσω του λογισμικού Janis όλα τα ραδιονουκλίδια που διασπώνται εκπέμποντας φωτόνια-γ στο ενεργειακό παράθυρο 1115-1116 keV. (32)

⁴ Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 4.0 του λογισμικού JANIS. Το λογισμικό αναπτύχθηκε από την OECD Nuclear Energy Agency και είναι διαθέσιμο μέσω της αντίστοιχης ιστοσελίδας www.oecd-nea.org. Επιτρέπει την προβολή δεδομένων που αφορούν πυρηνικές αλληλεπιδράσεις.

Αρχικά απορρίφθηκαν όσα ραδιονουκλίδια είχαν μικρό χρόνο ημιζωής. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι το υλικό μετρήθηκε δύο χρόνια μετά την εύρεση του, απορρίφθηκαν όσα ραδιονουκλίδια είχαν χρόνο ημιζωής από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές ημέρες. Έτσι, απέμειναν μόνο 5 υποψήφιος ραδιενεργές πηγές. Η απόρριψη των υπόλοιπων ραδιονουκλιδίων πραγματοποιήθηκε στη βάση της παρατήρησης των φωτονίων που εκπέμπουν σε σχέση και με το ποσοστό εκπομπής τους. Σε πιο σύνθετα φάσματα θα μπορούσε να εξεταστεί και η πιθανότητα ύπαρξης συγκεκριμένων ραδιονουκλιδίων στο υλικό σε σχέση και με πιθανές πληροφορίες για την προέλευσή του.

Τελικά, το μόνο ραδιονουκλίδιο που ικανοποιούσε το φάσμα που λήφθηκε ήταν ο Zn-65. Ο χρόνος ημιζωής του είναι 243.9 ημέρες και η ένταση εκπομπής του (yield) για την ανωτέρω ενέργεια είναι 50.7%. **(32)**

Το συγκεκριμένο ισότοπο του ψευδαργύρου Zn-65, διασπάται με σύλληψη ηλεκτρονίου σε ποσοστό 98.3%, εκπέμποντας φωτόνια-γ ενέργειας 1115 keV. Ακόμη, διασπάται με εκπομπή ποζιτρονίων, ενέργειας 300 keV, σε ποσοστό 1.7%. Επομένως συμπεραίνεται ότι η φωτοκορυφή ενέργειας περίπου 511 keV που παρατηρήθηκε στο φάσμα, δεν οφείλεται μόνο στο φαινόμενο της δίδυμης γένεσης που πραγματοποιείται για φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης των 1020 keV (και μετέπειτα εξαύλωση του ποζιτρονίου που παράγεται από το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης), αλλά μπορεί να οφείλεται και σε εξαύλωση ποζιτρονίων που παράγονται από την πηγή. **(32, 59)**

Η ύπαρξη ψευδαργύρου στο δείγμα χαλκού επαληθεύεται από τη βιβλιογραφία. Ο φυσικός χαλκός αποτελείται από δύο σταθερά ραδιοϊσότοπα, το Cu-63 κατά 69% και το Cu-65 κατά 31%. Όπως αναφέρθηκε, το ραδιοϊσότοπο Zn-65 του ψευδαργύρου διασπάται με εκπομπή ποζιτρονίων σε ποσοστό 1.7%. Μέσω αυτής της διάσπασης παράγεται το σταθερό ισότοπο του χαλκού Cu-65. **(52)** Η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι η εξής:

$${}^{65}\text{Zn} \rightarrow {}^{65}\text{Cu} + \beta + \nu_e$$

Ακόμη, μέσω της πυρηνικής αντίδρασης ${}^{65}\text{Cu}(p,n){}^{65}\text{Zn}$ παράγεται το ραδιενεργό ισότοπο του δείγματος από φυσικό χαλκό, καθώς η παρουσία του Cu-63 δεν επηρεάζει την αντίδραση. Τέτοιες αντιδράσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε εργαστήρια επιταχυντών σωματιδίων, καθώς η ενέργεια κατωφλιού της δέσμης πρωτονίων που προσπίπτει στο στόχο χαλκού

αντιστοιχεί σε 3 MeV. (59) Επομένως το δείγμα ίσως προέρχεται από κάποιο στόχο που χρησιμοποιήθηκε σε ερευνητικό κέντρο και εν συνεχεία δεν απορρίφθηκε σύμφωνα με τις ενδεδειγμένες μεθόδους.

5.4 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Με σκοπό τον ποσοτικό προσδιορισμό της ραδιενέργειας του δείγματος, σύμφωνα με τη σχέση (2.7) είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για τη γεωμετρία του δείγματος. Η εύρεση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για το δείγμα χαλκού πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης, όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης αποτελεί αρχικά η προσομοίωση της γεωμετρίας του δείγματος και η εύρεση της υπολογιστικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και ενέργεια πηγής 1115 keV. Ως πηγή αναφοράς χρησιμοποιείται το μίγμα πηγών παλαιάς γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 260 mL και πυκνότητας 0.9 g/cc.

Συνοπτικά τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

- Προσομοίωση της γεωμετρίας του άγνωστου υλικού / δείγματος με χρήση του κώδικα PENELOPE.
- Εύρεση υπολογιστικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για την ενέργεια 1115 keV και τη γεωμετρία του άγνωστου υλικού.
- Εύρεση της υπολογιστικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για την ενέργεια 1115 keV στη γεωμετρία αναφοράς.
- Προσδιορισμός της πειραματικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για την ενέργεια 1115 keV στη γεωμετρία αναφοράς.
- Εφαρμογή της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης και εύρεση της πειραματικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για την ενέργεια 1115 keV και τη γεωμετρία του άγνωστου υλικού.
- Προσδιορισμός της ενεργότητας του υλικού.

- Εκτίμηση των αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς.

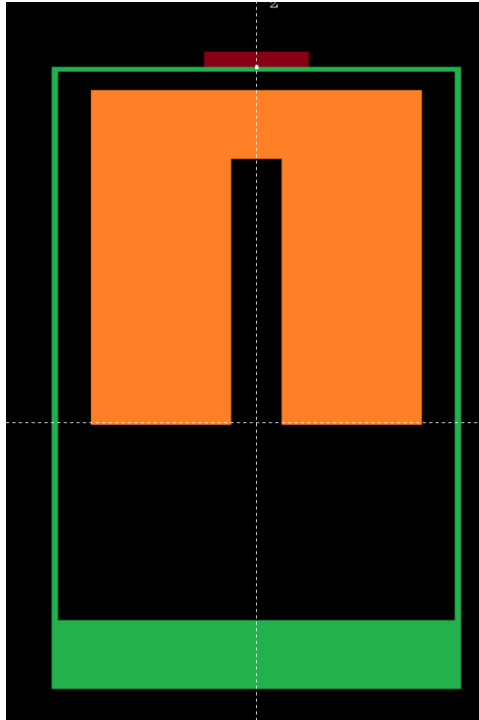
5.4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Με σκοπό τον προσδιορισμό της υπολογιστικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για την ενέργεια 1115 keV και τη γεωμετρία του δείγματος χαλκού, αρχικά καταχωρήθηκε η γεωμετρία του υλικού προς μελέτη στον κώδικα PENELOPE.

Το δείγμα θεωρήθηκε ότι απαρτίζεται εξ' ολοκλήρου από χαλκό, πυκνότητας 8.96 g/cc. Ακόμη, η προσομοίωση υλοποιήθηκε υπό την παραδοχή ότι το υλικό εκπέμπει ομοιογενώς φωτόνια ενέργειας 1115.75 keV από όλο του τον όγκο. Η μέτρηση των διαστάσεων του πραγματοποιήθηκε με χρήση παχυμέτρου. Αναλυτικά οι διαστάσεις του δείγματος που εισήχθησαν στο αρχείο γεωμετρίας του κώδικα PENELOPE:

- Μήκος :53 mm
- Πλάτος : 22.3 mm
- Ύψος : 3.4 mm
- Μήκος προεξοχών : 8.5 mm
- Πλάτος προεξοχών : 11.43 mm
- Ύψος προεξοχών : -
- Διάμετρος οπών : 7.5 mm
- Απόσταση οπών μεταξύ τους : 13.9 mm
- Απόσταση οπών από το ανώτερο σημείο του υλικού : 15.8 mm

Η γεωμετρία του μοντέλου του υλικού όπως εισήχθη στον κώδικα, παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα, το οποίο πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού gview:



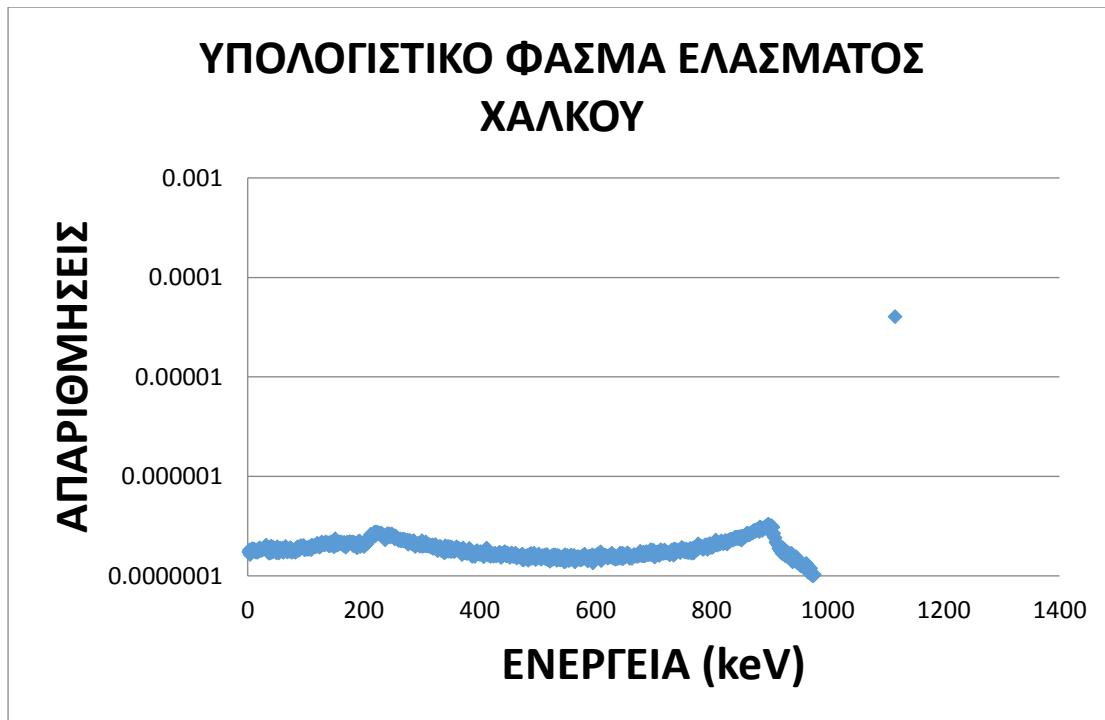
Εικόνα 5.4 Αποτύπωση ανιχνευτικής διάταξης μέτρησης του ελάσματος χαλκού (κόκκινο χρώμα) μέσω του κώδικα PENELOPE.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι το υλικό ήταν συμμετρικό ως προς το κέντρο του. Οι προεξοχές περιγράφηκαν ως επίπεδες επιφάνειες, χωρίς πάχος (ύψος). Ακόμη, θεωρήθηκε ότι η διάμετρος των δύο οπών ήταν ίση.

Με τη χρήση της παραπάνω γεωμετρίας πηγής και των παραμέτρων της ανιχνευτικής διάταξης που προσδιορίστηκαν στο κεφάλαιο 3.1, πραγματοποιήθηκε η εύρεση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης με τη χρήση του κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo. Συγκεκριμένα η υπολογιστική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για το έλασμα χαλκού βρέθηκε :

$$\epsilon_{\text{υπολογιστική}} = 5.24E - 02 \pm 1E - 04(1\sigma)$$

Παρατίθεται το ημιλογαριθμικό φάσμα του ελάσματος χαλκού που προέκυψε από την προσομοίωση Monte-Carlo :



Εικόνα 5.5 Υπολογιστικό φάσμα ελάσματος χαλκού.

Επισημαίνεται ότι στο υπολογιστικό φάσμα του ελάσματος χαλκού δεν παρατηρείται η φωτοκορυφή των 511 keV η οποία είναι ορατή στο πειραματικό φάσμα. Δεδομένου ότι ο κώδικας PENELOPE λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης, αυτή η διαφοροποίηση θα πρέπει κατά κύριο λόγο να αποδοθεί στο γεγονός ότι δε συμπεριλήφθηκαν στην προσομοίωση τα σωματΙΑ-β (ποζιτρόνια) που παράγονται από το Zn-65 κατά τη διάσπασή του. Ακόμη, δεδομένου ότι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε χωρίς τη θωράκιση του ανιχνευτή, δε λήφθηκαν υπόψη οι αλληλεπιδράσεις δίδυμης γένεσης των φωτονίων της πηγής με το στρώμα μολύβδου της θωράκισης.

5.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Εφαρμόστηκε η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης με σκοπό την εύρεση της πειραματικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για το έλασμα χαλκού. Ως γεωμετρία αναφοράς χρησιμοποιήθηκε αυτή του κυαθίου παλαιάς γεωμετρίας, όγκου πλήρωσης 260 mL και πυκνότητας 0.9 g/cc. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη πηγή αναφοράς καθώς δεν υπήρχε πηγή βαθμονόμησης με γεωμετρία που να είναι όμοια με αυτή του προς μελέτη δείγματος ή με παρόμοια σύσταση και πυκνότητα.

Η πειραματική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για τη γεωμετρία αναφοράς και φωτόνια ενέργειας 1115 keV υπολογίστηκε με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης που προσδιορίστηκε κατά την πειραματική βαθμονόμηση που διενεργήθηκε στο κεφάλαιο 2. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η σχέση :

$$\ln(\text{eff}) = -0,08852696\ln(E)^4 + 2,22018368\ln(E)^3 - 20,74820241\ln(E)^2 + 84,92362395\ln(E) - 130,85958692$$

Τελικά, η πειραματική απόδοση της γεωμετρίας αναφοράς για την ενέργεια 1115.75 keV : $\epsilon_{\text{ref_πειρ}} = 1,65E-02$. Όπως έχει αναφερθεί, δεδομένου ότι δεν ήταν διαθέσιμες οι αβεβαιότητες των πειραματικών μετρήσεων απόδοσης που δεν πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η αβεβαιότητά τους θεωρείται αμελητέα, καθώς εντάσσεται στο ποσοστό 3% των αβεβαιοτήτων που προσδίδονται από τις ραδιενεργές πηγές.

Η υπολογιστική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης που αφορά τη γεωμετρία αναφοράς και φωτόνια ενέργειας 1115.75 keV θα μπορούσε επίσης να υπολογιστεί με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης που προσδιορίστηκε στο κεφάλαιο 3.5. Με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ακρίβειας, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση.

Η υπολογιστική απόδοση της γεωμετρίας αναφοράς για την ενέργεια 1115.75 keV προσδιορίστηκε : $\epsilon_{\text{ref_υπολ}} = 1.63E - 02 \pm 4.8E - 05(1\sigma)$

Έχοντας προσδιορίσει την πειραματική και υπολογιστική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για τη γεωμετρία αναφοράς και την αντίστοιχη υπολογιστική απόδοση για τη γεωμετρία δείγματος που μελετάται, εφαρμόζεται η μέθοδος μεταφοράς απόδοσης. Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται όλες οι τιμές των ανωτέρω αποδόσεων, η τιμή του συντελεστή μεταφοράς καθώς και η τιμή της ζητούμενης πειραματικής απόδοσης για τη γεωμετρία του ελάσματος χαλκού. Ακόμη συμπεριλαμβάνεται η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό κάθε μεγέθους καθώς και η απόκλιση της πειραματικής από την υπολογιστική απόδοση για τη γεωμετρία που μελετάται. Χρησιμοποιήθηκε η σχέση 3.6 για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων των τιμών αποδόσεων.

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ			
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	$\epsilon_{\chi_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{υπολ}}}$	$\epsilon_{\text{ref}_{\text{πειρ}}}$
1115.7	0.05242±0.27%	0.01631±0.31%	0.01645
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (keV)	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (TF)	$\epsilon_{\chi_{\text{πειρ}}}$	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
1115.7	3.214±0.01	0.0528±5.2%	0.87%

Πίνακας 5.1 Μέθοδος μεταφοράς απόδοσης με σκοπό την εύρεση απόδοσης για τη γεωμετρία ελάσματος χαλκού.

5.4.3 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Έχοντας προσδιορίσει την πειραματική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για τη γεωμετρία του ελάσματος χαλκού, είναι πλέον δυνατός ο προσδιορισμός της ενεργότητας του ψευδαργύρου Zn-65 στο δείγμα.

Ο υπολογισμός της ενεργότητας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της σχέσης (2.7), λύνοντας ως προς την ενεργότητα του δείγματος :

$$A = \frac{N}{\epsilon \cdot \text{time} \cdot \text{yield}} \quad (5.1)$$

Ο χρόνος μέτρησης του δείγματος (time) καθώς και η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής (Area), λήφθηκαν από την μέτρηση στον ανιχνευτή HPGE. Όπως έχει αναφερθεί ο πραγματικός χρόνος μέτρησης αντιστοιχούσε σε 200 sec και η επιφάνεια φωτοκορυφής σε $1.86 \cdot 10^5$ κρούσεις. Η ανάλυση της μέτρησης παρατίθεται στο Παράρτημα 4. Η τιμή της πιθανότητας εκπομπής φωτονίων-γ ανά διάσπαση λήφθηκε από τη βιβλιογραφία, ως 0.506 (50.6%). (32) Έτσι αντικαθιστώντας και την τιμή της πειραματικής απόδοσης του ανιχνευτή για τη γεωμετρία του δείγματος, προσδιορίστηκε η ενεργότητα του ραδιοϊσοτόπου του ψευδαργύρου ως : $A=34.8 \text{ kBq} \pm 5.2\%$. Η αβεβαιότητα που συνοδεύει τον υπολογισμό της ενεργότητας του ελάσματος υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα της μεθόδου μεταφοράς απόδοσης, καθώς και σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{activity} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\chi\text{πειραματική}}}{\varepsilon_{\chi\text{πειραματική}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{επιφάνεια φωτοκορυφής}}}{\text{Επιφάνεια φωτοκορυφής}}\right)^2} \quad (5.2)$$

Οφείλει να αναφερθεί ότι όλες οι μετρήσεις, πειραματικές και υπολογιστικές που διεξήχθησαν στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου πραγματοποιήθηκαν για επαρκές χρονικό διάστημα (περίπου είκοσι λεπτών) ώστε η αβεβαιότητά τους να είναι μικρότερη από 1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ακόμη, σημειώνεται ότι αντί της παλαιάς γεωμετρίας όγκου πλήρωσης 260mL θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως γεωμετρία αναφοράς η παλαιά γεωμετρία κυαθίου όγκου πλήρωσης 100 mL, η οποία προσεγγίζει περισσότερο τις διαστάσεις του ελάσματος χαλκού. Προτιμήθηκε η πηγή όγκου πλήρωσης 260 mL και πυκνότητας 0.9g/cc, καθώς με τη χρήση της συγκεκριμένης πηγής προσδιορίστηκαν οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων του ανιχνευτή. Ωστόσο, στο πλαίσιο της εργασίας εξετάστηκε και η συγκεκριμένη περίπτωση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ως γεωμετρία αναφοράς το κυάθιο όγκου πλήρωσης 100mL, η τιμή ενεργότητας υπολογίζεται ως: $A=39.1 \text{ kBq} \pm 5.2\%$, η οποία δε διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την τιμή που προσδιορίστηκε παραπάνω. Η τιμή U του σχετικού στατιστικού ελέγχου υπολογίζεται ίση με 1.59. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της τιμής αναφοράς 1.96 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

5.5 ΕΞΑΚΡΙΒΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

Πριν τη διεξαγωγή της μέτρησης του ελάσματος χαλκού στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου, πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρυθμού δόσης του δείγματος με τη χρήση φορητού ανιχνευτή γερμανίου, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ακτινοπροστασίας. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε σε κατ' εκτίμηση απόσταση 8-10 cm από το δείγμα καταγράφοντας ρυθμό ισοδύναμης δόσης ίσο με 58.1 $\mu\text{rem/hr}$ (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.6 Μέτρηση δόσης ελάσματος χαλκού.

Στα πλαίσια της εξακρίβωσης της μεθόδου, ακολούθησε υπολογισμός του ρυθμού δόσεως του δείγματος, με βάση την τιμή της ενεργότητας που υπολογίστηκε παραπάνω.

Η σταθερά Γ του ραδιοϊσοτόπου Zn-65 βρέθηκε στη βιβλιογραφία ίση με $8.98 \cdot 10^{-5}$ mSv/hr ανά MBq πηγής, σε απόσταση 1m από την πηγή. (29) Έτσι, ο αναμενόμενος ρυθμός ισοδύναμης δόσης σε απόσταση ενός μέτρου από το έλασμα χαλκού είναι :

$$\begin{aligned} Dose\ Rate_{1m} &= 8.98 \cdot 10^{-5} \left(\frac{mSv}{hr \cdot MBq} \right) \cdot 0.0348 (MBq) = 3.1041 \cdot 10^{-6} \left(\frac{mSv}{hr} \right) \\ &= 0.31041 \frac{\mu rem}{hr} \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου για την ακτινοβολία, υπολογίζεται η δόση στα 10 cm ως:

$$Dose\ Rate_{10cm} = 0.31041 \cdot \left(\frac{100}{10} \right)^2 = 31.041 \mu rem/hr$$

Και στα 7 cm ως

$$Dose\ Rate_{7cm} = 0.31041 \cdot \left(\frac{100}{8} \right)^2 = 63.349 \mu rem/hr$$

Δεδομένου ότι ο ανιχνευτής ρυθμού ισοδύναμης δόσης κατέγραψε $58.1 \mu\text{rem/hr}$ σε απόσταση 7-10 cm, συμπεραίνεται ότι ο προσδιορισμός της ενεργότητας της ραδιενεργής πηγής έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία.

6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανασκόπηση των αποτελεσμάτων της εργασίας. Ακόμη, διατυπώνονται προτάσεις και ιδέες για μελλοντικές εργασίες.

Βασικό στόχο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης σχετικής απόδοσης 70% του ΤΕΡΠ για τη νέα γεωμετρία κυαθίου στο ενεργειακό φάσμα 46-1900 keV.

Αρχικά περιγράφηκε η πειραματική βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης για την παλαιά γεωμετρία κυαθίου. Εν συνεχεία με τη χρήση του κώδικα PENELOPE προσδιορίστηκαν οι γεωμετρικές παράμετροι του ανιχνευτή για συγκεκριμένη πυκνότητα κυαθίου παλαιάς γεωμετρίας. Χρησιμοποιήθηκε επαναληπτική μέθοδος σύγκρισης πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων της ανιχνευτικής διάταξης για τρεις επιλεγμένες ενέργειες φωτοκορυφής, οι οποίες κάλυπταν όλο το ενεργειακό φάσμα μελέτης. Έγινε προσπάθεια ώστε οι εν λόγω ενέργειες να αντιστοιχούν σε ισότοπα τα οποία δεν έχουν έντονη συμμετοχή στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Η εργασία εστίασε στον προσδιορισμό των νεκρών ζωνών. Η ακρίβεια που τελικά επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 3% και κρίθηκε ικανοποιητική.

Με προσδιορισμένο το μοντέλο του ανιχνευτή και πάλι με χρήση του κώδικα PENELOPE πραγματοποιήθηκε η υπολογιστική βαθμονόμηση του για την παλαιά γεωμετρία κυαθίου. Μελετήθηκαν δύο όγκοι πλήρωσης 260 mL και 100 mL με εννέα και έξι διαφορετικές πυκνότητες αντίστοιχα. Παράχθηκαν συνολικά 17 καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή για την παλαιά γεωμετρία κυαθίου. Η σύγκριση πειραματικών – υπολογιστικών αποδόσεων ανέδειξε μέση απόκλιση για την περίπτωση του όγκου των 260 mL της τάξης του 10% και για την περίπτωση του όγκου των 100 mL της τάξης του 11%. Οι αποκλίσεις αυτές κρίθηκαν ικανοποιητικές δεδομένου ότι αφορούν και ισότοπα τα οποία συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που συνοδεύουν πειραματικές και υπολογιστικές αποδόσεις. Παράλληλα η σύγκριση οδήγησε στον προβληματισμό και την ανάγκη επανελέγχου συγκεκριμένων πειραματικών σημείων, όπως αυτά που αντιστοιχούν στην πηγή των 0.05 g/cc για όγκο πλήρωσης 260 mL. Επίσης ανέδειξε τη σημασία της σύστασης του δείγματος, πέρα από την πυκνότητά του, στη μελέτη του φαινομένου της αυταπορρόφησης.

Για την εκτίμηση της απόδοσης της ζητούμενης καινούριας γεωμετρίας κυαθίου, αξιοποιήθηκε το μοντέλο του ανιχνευτή όπως προσδιορίστηκε προηγουμένα και εφαρμόστηκε η μέθοδος της μεταφοράς απόδοσης. Η μέθοδος επιλέχθηκε καθώς ακόμη και αν το μοντέλο του ανιχνευτή δεν είχε προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια, οι παράμετροι ανακρίβειας συμπιέζονται σημαντικά ή/και εξαλείφονται. Για τη νέα γεωμετρία κυαθίου προσομοιώθηκαν και βαθμονομήθηκαν 2 διαφορετικοί όγκοι πλήρωσης σε διαφορετικές πυκνότητες. Συνολικά, 17 καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης.

Για την επικύρωση της βαθμονόμησης μετρήθηκε δείγμα ούρων από άσκηση διασύγκρισης στην οποία συμμετείχε το ΤΕΡΠ. Πρόκειται για την άσκηση Procorad 2017 και τα ισότοπα που εξετάστηκαν ήταν Cs-137, Cs-134 και K-40. Το δείγμα συσκευάστηκε στην καινούρια γεωμετρία κυαθίου και η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τις καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης που εκτιμήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά από τις τιμές αναφοράς ενώ η απόκλιση τους από αυτές δεν ξεπερνούσε το 3%. Επομένως η βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας κρίνεται αξιόπιστη.

Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας, πραγματοποιήθηκε ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός της ραδιενέργειας ραδιενεργού ελάσματος που βρέθηκε κατά τον έλεγχο φορτίου παλαιών μετάλλων. Για τις ανάγκες της μεθόδου, πραγματοποιήθηκε μέτρηση του δείγματος στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου. Οι συνθήκες διεξαγωγής της μέτρησης προσομοιώθηκαν με τη χρήση του κώδικα PENELOPE. Το ραδιενεργό ισότοπο προσδιορίστηκε με τη βοήθεια της ενεργειακής βαθμονόμησης ως ψευδάργυρος-65. Τελικά, μέσω της πειραματικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για το δείγμα η οποία προσδιορίστηκε με τη μέθοδο μεταφοράς απόδοσης, προσδιορίστηκε η ενεργότητα του ραδιοϊσοτόπου.

Σε ό,τι αφορά στην επέκταση της παρούσας εργασίας σε μελλοντική έρευνα αναφέρονται τα ακόλουθα σημεία:

- Αξιοποίηση του μοντέλου του ανιχνευτή στον υπολογισμό συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είτε άμεσα σύγκριση υπολογιστικών – πειραματικών αποδόσεων είτε έμμεσα σε συνεργασία με άλλα λογισμικά (π.χ. TrueCoinc).
- Αξιοποίηση της υπορουτίνας `pennc` του κώδικα PENELOPE, όπου είναι δυνατή η μελέτη / προσομοίωση ολόκληρου του διαγράμματος διάσπασης ενός

ισοτόπου. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται και η προσομοίωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

- Περαιτέρω μελέτη του φαινομένου της αυταπορρόφησης με εστίαση στη σύσταση του δείγματος.
- Χρήση διαφορετικών λογισμικών μεταφοράς απόδοσης και σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας. Οι πλέον διαδεδομένοι κώδικες μεταφοράς απόδοσης είναι οι κώδικες : ANGLE, EFFTRAN, ETNA, GESPECOR.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 Πιστοποιητικά πηγών

βαθμονόμησης

Πιστοποιητικά πηγών βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL

O_05_260 N

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux
Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

000719

DKD-K-
36901

2008-05

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

Gegenstand Object	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller Manufacturer	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ Type	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. Serial number	1290-47-1
Auftraggeber Customer	Eckert & Ziegler Isotope Products Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer Order No.	121438
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	3
Datum der Kalibrierung Date of calibration	1 May 08

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Stellvertreter Deputy	Bearbeiter Person in charge
	7 Apr 08	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
Burbank, CA 91504

000719
DKD-K-36901
2008-05

• **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 0.05 ± 0.01 g/cc foam matrix
 Active Volume: Approximately 320mL (15.94 ± 0.02 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

• **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

• **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

• **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-12, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Simulated Gas Standards, Densities 0.04 to 0.4g/cm³". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

• **Environmental Conditions:**

Temperature: (23 ± 2) °C
 Relative humidity: (24 ± 5) %

• **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	11.3 kBq (0.305 µCi)	472.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.13 kBq (0.0305 µCi)	406.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	16.4 kBq (0.443 µCi)	595.3	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.565 kBq (0.0153 µCi)	483.6	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.719 kBq (0.0194 µCi)	574.5	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.12 kBq (0.0573 µCi)	1728	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.82 kBq (0.0762 µCi)	1830	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.55 kBq (0.0959 µCi)	3493	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.50 kBq (0.0676 µCi)	2128	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	5.72 kBq (0.155 µCi)	5377	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.12 kBq (0.0843 µCi)	3116	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.12 kBq (0.0843 µCi)	3119	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	5.72 kBq (0.155 µCi)	5686	2.9%
Total:				49.9 kBq (1.35 µCi)		

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.45 µCi
 ACTIVITY: 53.6 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-2



NOT FOR DRUG USE
ISO 2276



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000483
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-2
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
 Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
 The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsen	 Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsen

000483

DKD-K-
36901

07-03

Page 2

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 0.05 ± 0.01 g/cc foam matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (15.88 ± 0.02 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-12, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Simulated Gas Standards, Densities 0.04 To 0.4g/cm^3 ". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.3 kBq ($0.332 \mu\text{Ci}$)	514.1	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.22 kBq ($0.0330 \mu\text{Ci}$)	439.2	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.3 kBq ($0.468 \mu\text{Ci}$)	628.0	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.646 kBq ($0.0175 \mu\text{Ci}$)	553.0	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.805 kBq ($0.0218 \mu\text{Ci}$)	643.2	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.44 kBq ($0.0659 \mu\text{Ci}$)	1989	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.91 kBq ($0.0786 \mu\text{Ci}$)	1889	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.91 kBq ($0.106 \mu\text{Ci}$)	3847	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.59 kBq ($0.0700 \mu\text{Ci}$)	2204	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.22 kBq ($0.168 \mu\text{Ci}$)	5847	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.23 kBq ($0.0873 \mu\text{Ci}$)	3225	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.23 kBq ($0.0873 \mu\text{Ci}$)	3229	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.22 kBq ($0.168 \mu\text{Ci}$)	6183	2.9%
Total:				53.6 kBq ($1.45 \mu\text{Ci}$)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000483

DKD-K-
36901

07-03

N

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

0_5_260 N

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes

Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355



Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000720
DKD-K-36901
2008-05

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **1290-47-2**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler Isotope Products**
Robert-Rossle-Str. 10
Berlin, 13125
Germany

Auftragsnummer
Order No. **121438**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 May 08**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
 Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
 The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	7 Apr 08	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

000720
DKD-K-36901
2008-05

• **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 0.5 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (130.3 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

• **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

• **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355
USA

• **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-10, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Epoxies, Low Density Using Microbubbles". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

• **Environmental Conditions:**

Temperature: (23 ± 2) °C
Relative humidity: (24 ± 5) %

• **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	11.3 kBq (0.305 μ Ci)	472.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.13 kBq (0.0305 μ Ci)	406.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	16.6 kBq (0.449 μ Ci)	602.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.570 kBq (0.0154 μ Ci)	487.9	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.725 kBq (0.0196 μ Ci)	579.3	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.06 kBq (0.0557 μ Ci)	1679	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.84 kBq (0.0768 μ Ci)	1843	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.58 kBq (0.0968 μ Ci)	3523	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.52 kBq (0.0681 μ Ci)	2145	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	5.76 kBq (0.156 μ Ci)	5414	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.15 kBq (0.0851 μ Ci)	3146	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.15 kBq (0.0851 μ Ci)	3149	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	5.76 kBq (0.156 μ Ci)	5725	2.9%

000720

DKD-K-
36901

2008-05

NCS, Calif
61-309-101C

ie

CAUTION
RADIOACTIVE
MATERIAL

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

Jeff Milford 7 Apr 08
Jeff Milford, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI N542/ISO2919 classification: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1290-47.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST (GMT-08:00).
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

End of Certificate

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
 Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.38 µCi
ACTIVITY: 51.0 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-3

NOT FOR DRUG USE
9910-2 Rev. C



Valencia, California 91355
 661-309-1010

de



DKD-K-36901

Kalibrierschein
 Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
 Calibration label

000484
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand Object	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller Manufacturer	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ Type	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. Serial number	1232-29-3
Auftraggeber Customer	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer Order No.	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	3
Datum der Kalibrierung Date of calibration	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel
Seal



Datum
Date

19 Mar 07

Leiter des Kalibrierlaboratoriums
Head of the calibration laboratory

Daniel James Van Dalsem

Dr. Van Dalsem

Stellvertreter
Deputy

Catterson

Bearbeiter
Person in charge

Tiffany Catterson

Catterson / Dey / Millford
Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
Burbank, CA 91504

000484
DKD-K-36901
07-03

ler
 6 μ Ci
 1 kBq
 1r 07
 '28-1

• **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container
 Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 0.5 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (126.8 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

• **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

• **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

• **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-10, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Epoxies, Low Density Using Microbubbles". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

• **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

• **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	11.4 kBq (0.308μ Ci)	476.5	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.17 kBq (0.0316μ Ci)	421.2	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	16.6 kBq (0.449μ Ci)	602.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.620 kBq (0.0168μ Ci)	530.7	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.774 kBq (0.0209μ Ci)	618.4	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.33 kBq (0.0630μ Ci)	1899	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.80 kBq (0.0757μ Ci)	1817	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.75 kBq (0.101μ Ci)	3690	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.49 kBq (0.0673μ Ci)	2119	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	5.98 kBq (0.162μ Ci)	5621	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.11 kBq (0.0841μ Ci)	3106	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.11 kBq (0.0841μ Ci)	3109	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	5.98 kBq (0.162μ Ci)	5944	2.9%
				Total:	51.0 kBq (1.38μ Ci)	

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000484
DKD-K- 36901
07-03

iegler
ucts
Multi nucl
1.46 μ Ci
53.9 kBq
Mar 07
232-29-1
USE

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

Jeff Milford 19 Mar 07
Jeff Milford, Spectroscopist

- **Additional Information:**


- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux


Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

 **Eckert & Ziegler**
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.45 µCi
 ACTIVITY: 53.7 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-4

NOT FOR DRUG USE
2009-2-26

CAUTION

 RADIOACTIVE MATERIALS



Deutscher
 Akkreditierungs-
 Rat
DAK
 DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000485
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-4
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel
Seal



Datum
Date

15 Mar 07

Leiter des Kalibrierlaboratoriums
Head of the calibration laboratory

Daniel James Van Dalsem

Dr. Van Dalsem

Stellvertreter
Deputy

Catterson

Bearbeiter
Person in charge

Tiffany Catterson

Catterson / Dey / Milford
 Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000485

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit:	Multinuclide distributed in 0.9 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
Active Volume:	Approximately 260mL (232.8 ± 0.2 grams)
Backing:	Plastic
Cover:	Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355
USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-10, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Epoxies, Low Density Using Microbubbles". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature:	(22 ± 2) °C
Relative humidity:	(40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.3 kBq ($0.332 \mu\text{Ci}$)	514.1	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.23 kBq ($0.0332 \mu\text{Ci}$)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.3 kBq ($0.468 \mu\text{Ci}$)	628.0	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.648 kBq ($0.0175 \mu\text{Ci}$)	554.7	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.809 kBq ($0.0219 \mu\text{Ci}$)	646.4	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.45 kBq ($0.0662 \mu\text{Ci}$)	1997	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.93 kBq ($0.0792 \mu\text{Ci}$)	1902	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.92 kBq ($0.106 \mu\text{Ci}$)	3857	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.60 kBq ($0.0703 \mu\text{Ci}$)	2213	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.25 kBq ($0.169 \mu\text{Ci}$)	5875	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.25 kBq ($0.0878 \mu\text{Ci}$)	3245	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.25 kBq ($0.0878 \mu\text{Ci}$)	3249	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.25 kBq ($0.169 \mu\text{Ci}$)	6213	2.9%
Total:				53.7 kBq ($1.45 \mu\text{Ci}$)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000485

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**


- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**


Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbits
Valencia, CA 91355

 Eckert & Ziegler
 Isotope Products Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010
 ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.47 µCi
 ACTIVITY: 54.3 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-5

NOT FOR DRUG USE

 CAUTION
 RADIOACTIVE MATERIALS




 Deutscher Akkreditierungs Rat
DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000486
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-5
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000486

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (261.2 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-01, Revision D "Large Volume Gamma Standards - Epoxy". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.5 kBq (0.338 μ Ci)	522.5	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.24 kBq (0.0335 μ Ci)	446.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.5 kBq (0.473 μ Ci)	635.3	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.655 kBq (0.0177 μ Ci)	560.7	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.817 kBq (0.0221 μ Ci)	652.8	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.47 kBq (0.0668 μ Ci)	2013	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.96 kBq (0.0800 μ Ci)	1921	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.97 kBq (0.107 μ Ci)	3906	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.63 kBq (0.0711 μ Ci)	2238	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.32 kBq (0.171 μ Ci)	5941	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.28 kBq (0.0886 μ Ci)	3275	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.28 kBq (0.0886 μ Ci)	3279	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.32 kBq (0.171 μ Ci)	6282	2.9%
Total:				54.3 kBq (1.47 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
 Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux
 Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes

Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355



1_3_260 N

Kalibrierschein Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
 Calibration label

000721
DKD-K-36901
2008-05

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1290-47-3
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	121438
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 May 08

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
 Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
 The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums.
 Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
 This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	7 Apr 08	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

000721
DKD-K-36901
2008-05

• **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.3 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (337.8 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

• **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

• **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

• **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

• **Environmental Conditions:**

Temperature: (23 ± 2) °C
 Relative humidity: (24 ± 5) %

• **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	11.3 kBq (0.305 μ Ci)	472.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.14 kBq (0.0308 μ Ci)	410.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	16.6 kBq (0.449 μ Ci)	602.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.572 kBq (0.0155 μ Ci)	489.6	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.727 kBq (0.0196 μ Ci)	580.9	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.07 kBq (0.0559 μ Ci)	1687	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.85 kBq (0.0770 μ Ci)	1850	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.60 kBq (0.0973 μ Ci)	3542	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.53 kBq (0.0684 μ Ci)	2153	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	5.79 kBq (0.156 μ Ci)	5443	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.16 kBq (0.0854 μ Ci)	3156	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.16 kBq (0.0854 μ Ci)	3159	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	5.79 kBq (0.156 μ Ci)	5755	2.9%
Total:				50.3 kBq (1.36 μ Ci)		

000721

DKD-K-
36901

2008-05

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

Jeff Milford 7 Apr 08
Jeff Milford, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI N542/ISO2919 classification: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1290-47.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST (GMT-08:00).
- This document uses the numerical convention where 1.000 = 1 and 1,000 = 10^3 .
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

End of Certificate

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität

Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the

Akkreditierungsstelle des DKD bei der

PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbits
Valencia, CA 91355

 Eckert & Ziegler
Isotope Products

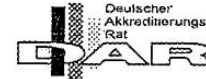
Valencia, California 91355
Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.46 µCi
ACTIVITY: 54.0 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-6

CAUTION



NOT FOR DRUG USE
5000-2 Rev. C



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000487
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **1232-29-6**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe**
Robert-Rossle-Str. 10
Berlin, 13125
Germany

Auftragsnummer
Order No. **110788**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 Mar 07**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbits
Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
Burbank, CA 91504

000487
DKD-K-36901
07-03

Object Calibrated:

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.3 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (339.2 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

Calibration Procedure:

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

Place of Calibration:

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

Measurement Conditions:

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

Environmental Conditions:

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

Measurement Results:

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.4 kBq (0.335 μ Ci)	518.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.23 kBq (0.0332 μ Ci)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.4 kBq (0.470 μ Ci)	631.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.651 kBq (0.0176 μ Ci)	557.3	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.812 kBq (0.0219 μ Ci)	648.8	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.46 kBq (0.0665 μ Ci)	2005	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.94 kBq (0.0795 μ Ci)	1908	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.94 kBq (0.106 μ Ci)	3877	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.62 kBq (0.0708 μ Ci)	2230	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.28 kBq (0.170 μ Ci)	5903	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.26 kBq (0.0881 μ Ci)	3255	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.26 kBq (0.0881 μ Ci)	3259	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.28 kBq (0.170 μ Ci)	6242	2.9%
Total:				54.0 kBq (1.46 μ Ci)		

Additional Information section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

er
ir
r-
n

ti-
an
ler
on
en

ten
ist

the
hich
ding

teral
ation
the
lation
mutual
object

edürfen
briums.

ditation

ge

thm

y / Milford

ne Street
4

000487

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux


Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

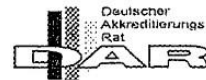
Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.48 µCi
 ACTIVITY: 54.9 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-7

NOT FOR DRUG USE
ANSI-Z39.5

CAUTION

RADIOACTIVE MATERIALS



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000488

DKD-K-
36901

07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-7
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000488

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.5 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (392.6 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.6 kBq (0.341 μ Ci)	526.7	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.26 kBq (0.0341 μ Ci)	453.6	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.7 kBq (0.478 μ Ci)	642.5	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.662 kBq (0.0179 μ Ci)	566.7	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.826 kBq (0.0223 μ Ci)	660.0	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.50 kBq (0.0676 μ Ci)	2038	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.99 kBq (0.0808 μ Ci)	1941	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	4.01 kBq (0.108 μ Ci)	3946	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.66 kBq (0.0719 μ Ci)	2264	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.38 kBq (0.172 μ Ci)	5997	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.32 kBq (0.0897 μ Ci)	3315	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.32 kBq (0.0897 μ Ci)	3319	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.38 kBq (0.172 μ Ci)	6342	2.9%
Total:				54.9 kBq (1.48 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000488
DKD-K- 36901
07-03

913:

Page 3

N

TVI
LS

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**


- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbits
Valencia, CA 91355

 Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010
ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.46 µCi
ACTIVITY: 54.0 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-19

NOT FOR DRUG USE
2002 Rev. C



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000496
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-19
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000496

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.7 ± 0.1 g/cc sand matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (443.6 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-05, Revision C "Large Volume Gamma Standards - Sand". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.4 kBq (0.335 μ Ci)	518.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.24 kBq (0.0335 μ Ci)	446.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.4 kBq (0.470 μ Ci)	631.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.652 kBq (0.0176 μ Ci)	558.1	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.813 kBq (0.0220 μ Ci)	649.6	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.46 kBq (0.0665 μ Ci)	2005	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.94 kBq (0.0795 μ Ci)	1908	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.95 kBq (0.107 μ Ci)	3887	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.62 kBq (0.0708 μ Ci)	2230	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.28 kBq (0.170 μ Ci)	5903	2.9%

000496

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1,000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

2-0-260 N

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes

Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355



000722
DKD-K-36901
2008-05

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **1290-47-4**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler Isotope Products**
Robert-Rossle-Str. 10
Berlin, 13125
Germany

Auftragsnummer
Order No. **121438**




Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 May 08**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
 Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
 The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Stellvertreter Deputy	Bearbeiter Person in charge
	7 Apr 08	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000722
DKD-K-36901
2008-05

Object Calibrated:

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 2.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (520.1 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

Calibration Procedure:

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

Source of Calibration:

Eckert & Ziegler Isotope Products
 3A Isotope Products Laboratories
 1937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 3A

Measurement Conditions:

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

Environmental Conditions:

Temperature: (23 ± 2) °C
 Relative humidity: (24 ± 5) %

Measurement Results:

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	11.4 kBq (0.308 μ Ci)	476.5	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.14 kBq (0.0308 μ Ci)	410.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	16.7 kBq (0.451 μ Ci)	606.2	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.574 kBq (0.0155 μ Ci)	491.3	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.730 kBq (0.0197 μ Ci)	583.3	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.08 kBq (0.0562 μ Ci)	1695	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.86 kBq (0.0773 μ Ci)	1856	2.9%

000722

DKD-K-
36901

2008-05

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

Jeff Milford 7 Apr 08
Jeff Milford, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI N542/ISO2919 classification: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1290-47.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST (GMT-08:00).
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

End of Certificate

20-260 N

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

 Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.46 µCi
 ACTIVITY: 54.0 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-9



NOT FOR DRUG USE
EN 61891-2



DKD-K-36901

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000489
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-9
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterton	Catterton / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000489

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 2.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (523.1 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.4 kBq (0.335 μ Ci)	518.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.24 kBq (0.0335 μ Ci)	446.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.4 kBq (0.470 μ Ci)	631.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.652 kBq (0.0176 μ Ci)	558.1	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.813 kBq (0.0220 μ Ci)	649.6	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.46 kBq (0.0665 μ Ci)	2005	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.94 kBq (0.0795 μ Ci)	1908	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.94 kBq (0.106 μ Ci)	3877	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.62 kBq (0.0708 μ Ci)	2230	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.28 kBq (0.170 μ Ci)	5903	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.26 kBq (0.0881 μ Ci)	3255	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.26 kBq (0.0881 μ Ci)	3259	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.28 kBq (0.170 μ Ci)	6242	2.9%
	Total:			54.0 kBq (1.46 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

Πιστοποιητικά πηγών βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des DKD bei der
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
Isotope Products
Valencia, California 91355
Tel 661-309-1010
ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.44 µCi
ACTIVITY: 53.3 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-10
NOT FOR DRUG USE
RADIOACTIVE MATERIALS



Deutscher
Akkreditierungs
Rat
DAR
DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000490
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand
Object: **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer: **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type: **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number: **1232-29-10**

Auftraggeber
Customer: **Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe
Robert-Rossle-Str. 10
Berlin, 13125
Germany**

Auftragsnummer
Order No.: **110788**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate: **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration: **1 Mar 07**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Stellvertreter Deputy	Bearbeiter Person in charge
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsen	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsen
24937 Avenue Tibbitts Valencia, CA 91355	Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303 www.isotopeproducts.com		1800 North Keystone Street Burbank, CA 91504	

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

 15 Mar 07

Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

Akkreditiert durch die / accredited by the
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)



DKD-K-36901

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

000491
DKD-K-36901
07-03

Kalibrierschein
 Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
 Calibration label

Gegenstand
 Object: **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
 Manufacturer: **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
 Type: **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
 Serial number: **1232-29-11**

Auftraggeber
 Customer: **Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe
 Robert-Rossle-Str. 10
 Berlin, 13125
 Germany**

Auftragsnummer
 Order No. **110788**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
 Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
 Date of calibration: **1 Mar 07**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI).
 Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
 The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Stellvertreter Deputy	Bearbeiter Person in charge
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000491

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit:	Multinuclide distributed in 1.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
Active Volume:	Approximately 100mL (100.3 ± 0.2 grams)
Backing:	Plastic
Cover:	Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355
USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-01, Revision D "Large Volume Gamma Standards - Epoxy". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature:	(22 ± 2) °C
Relative humidity:	(40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.4 kBq (0.335 μ Ci)	518.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.24 kBq (0.0335 μ Ci)	446.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.4 kBq (0.470 μ Ci)	631.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.653 kBq (0.0176 μ Ci)	559.0	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.814 kBq (0.0220 μ Ci)	650.4	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.46 kBq (0.0665 μ Ci)	2005	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.95 kBq (0.0797 μ Ci)	1915	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.95 kBq (0.107 μ Ci)	3887	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.62 kBq (0.0708 μ Ci)	2230	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.29 kBq (0.170 μ Ci)	5913	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.27 kBq (0.0884 μ Ci)	3265	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.27 kBq (0.0884 μ Ci)	3269	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.29 kBq (0.170 μ Ci)	6252	2.9%
Total:				54.0 kBq (1.46 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000491

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux


Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.45 µCi
 ACTIVITY: 53.6 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-12

NOT FOR DRUG USE
ISO 9002 cert. G

CAUTION

 RADIOACTIVE MATERIALS



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000492
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial-number **1232-29-12**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe
 Robert-Rossle-Str. 10
 Berlin, 13125
 Germany**

Auftragsnummer
Order No. **110788**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 Mar 07**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

000492
DKD-K-36901
07-03

• **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.3 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 100mL (131.7 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

• **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

• **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

• **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

• **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

• **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.3 kBq ($0.332 \mu\text{Ci}$)	514.1	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.23 kBq ($0.0332 \mu\text{Ci}$)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.3 kBq ($0.468 \mu\text{Ci}$)	628.0	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.647 kBq ($0.0175 \mu\text{Ci}$)	553.8	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.807 kBq ($0.0218 \mu\text{Ci}$)	644.8	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.44 kBq ($0.0659 \mu\text{Ci}$)	1989	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.92 kBq ($0.0789 \mu\text{Ci}$)	1895	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.91 kBq ($0.106 \mu\text{Ci}$)	3847	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.60 kBq ($0.0703 \mu\text{Ci}$)	2213	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.24 kBq ($0.169 \mu\text{Ci}$)	5866	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.24 kBq ($0.0876 \mu\text{Ci}$)	3235	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.24 kBq ($0.0876 \mu\text{Ci}$)	3239	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.24 kBq ($0.169 \mu\text{Ci}$)	6203	2.9%
				Total:	53.6 kBq ($1.45 \mu\text{Ci}$)	

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value

000492

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.48 µCi
 ACTIVITY: 54.6 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-20



NOT FOR DRUG USE
2002.3m.c



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000497
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **1232-29-20**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe
 Robert-Rossle-Str. 10
 Berlin, 13125
 Germany**

Auftragsnummer
Order No. **110788**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 Mar 07**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsen	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsen

24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.7 ± 0.1 g/cc sand matrix
 Active Volume: Approximately 100mL (171.6 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-05, Revision C "Large Volume Gamma Standards - Sand". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.5 kBq (0.338 μ Ci)	522.5	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.25 kBq (0.0338 μ Ci)	450.0	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.6 kBq (0.476 μ Ci)	638.9	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.659 kBq (0.0178 μ Ci)	564.1	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.822 kBq (0.0222 μ Ci)	656.8	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.49 kBq (0.0673 μ Ci)	2029	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.97 kBq (0.0803 μ Ci)	1928	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.99 kBq (0.108 μ Ci)	3926	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.65 kBq (0.0716 μ Ci)	2255	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.35 kBq (0.172 μ Ci)	5969	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.30 kBq (0.0892 μ Ci)	3295	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.30 kBq (0.0892 μ Ci)	3299	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.35 kBq (0.172 μ Ci)	6312	2.9%
Total:				54.6 kBq (1.48 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000497

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

2_0_100 N

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux
Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes



Eckert & Ziegler Isotope Products
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

000723
DKD-K-36901
2008-05

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **1290-47-5**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler Isotope Products**
Robert-Rossle-Str. 10
Berlin, 13125
Germany

Auftragsnummer
Order No. **121438**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 May 08**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration-certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	7 Apr 08	<i>Daniel James Van Dalsem</i> Dr. Van Dalsem	<i>Tithy Catterson</i> Catterson	<i>Tithy Catterson</i> Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

000723

DKD-K-
36901

2008-05

Page 2

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 2.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 100mL (199.7 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-7, Revision A "Large Volume Gamma Standards - Mixed Density Epoxies Densities 1.1 to 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (23 ± 2) °C
 Relative humidity: (24 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	11.2 kBq (0.303 μ Ci)	468.2	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.12 kBq (0.0303 μ Ci)	403.2	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	16.4 kBq (0.443 μ Ci)	595.3	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.565 kBq (0.0153 μ Ci)	483.6	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.718 kBq (0.0194 μ Ci)	573.7	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.04 kBq (0.0551 μ Ci)	1663	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.82 kBq (0.0762 μ Ci)	1830	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.55 kBq (0.0959 μ Ci)	3493	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.50 kBq (0.0676 μ Ci)	2128	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	5.71 kBq (0.154 μ Ci)	5367	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.12 kBq (0.0843 μ Ci)	3116	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.12 kBq (0.0843 μ Ci)	3119	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	5.71 kBq (0.154 μ Ci)	5676	2.9%
Total:				49.7 kBq (1.34 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000723
DKD-K-36901
2008-05

• **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

• **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

• **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

Jeff Milford 7 Apr 08
Jeff Milford, Spectroscopist

• **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI N542/ISO2919 classification: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1290-47.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST (GMT-08:00).
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

End of Certificate

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
Akkreditierungsstelle des DKD bei der
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
Isotope Products
Valencia, California 91355
Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.45 µCi
ACTIVITY: 53.7 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-15

NOT FOR DRUG USE
600-246-C



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000499

DKD-K-
36901

07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-15
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	19 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
Burbank, CA 91504

000499

DKD-K-
36901

07-03

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 3.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 100mL (311.4 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-11, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Epoxies, Densities Higher than 2.0". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.3 kBq ($0.332 \mu\text{Ci}$)	514.1	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.23 kBq ($0.0332 \mu\text{Ci}$)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.3 kBq ($0.468 \mu\text{Ci}$)	628.0	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.649 kBq ($0.0175 \mu\text{Ci}$)	555.5	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.810 kBq ($0.0219 \mu\text{Ci}$)	647.2	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.45 kBq ($0.0662 \mu\text{Ci}$)	1997	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.93 kBq ($0.0792 \mu\text{Ci}$)	1902	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.93 kBq ($0.106 \mu\text{Ci}$)	3867	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.61 kBq ($0.0705 \mu\text{Ci}$)	2221	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.26 kBq ($0.169 \mu\text{Ci}$)	5884	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.25 kBq ($0.0878 \mu\text{Ci}$)	3245	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.25 kBq ($0.0878 \mu\text{Ci}$)	3249	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.26 kBq ($0.169 \mu\text{Ci}$)	6222	2.9%
Total:				53.7 kBq ($1.45 \mu\text{Ci}$)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000499

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

Jeff Milford 19 Mar 07
Jeff Milford, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Due to fluorescence x-rays from the source's matrix, Am-241's 60 keV gamma ray is not suitable for calibration purposes in this source because of spectral overlap. Am-241's contained activity value in this source is included for information purposes only and is not intended to be used for efficiency calibration.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux


Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

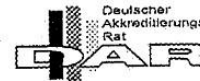
Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbits
Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.47 µCi
 ACTIVITY: 54.4 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-16

NOT FOR DRUG USE
MSD-2 Jan 06

CAUTION

 RADIOACTIVE MATERIALS



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000494
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand
Object **Multiple gamma ray emitting large volume source**

Hersteller
Manufacturer **Eckert & Ziegler Isotope Products**

Typ
Type **EG-ML**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **1232-29-16**

Auftraggeber
Customer **Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe
 Robert-Rossle-Str, 10
 Berlin, 13125
 Germany**

Auftragsnummer
Order No. **110788**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **1 Mar 07**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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.


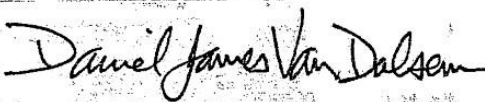


This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

- **Object Calibrated:**

Customer supplied Marinelli beaker (538-G)

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 700mL (700.9 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-01, Revision D "Large Volume Gamma Standards - Epoxy". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.5 kBq (0.338 μ Ci)	522.5	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.24 kBq (0.0335 μ Ci)	446.4	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.5 kBq (0.473 μ Ci)	635.3	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.656 kBq (0.0177 μ Ci)	561.5	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.818 kBq (0.0221 μ Ci)	653.6	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.48 kBq (0.0670 μ Ci)	2021	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.96 kBq (0.0800 μ Ci)	1921	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.97 kBq (0.107 μ Ci)	3906	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.63 kBq (0.0711 μ Ci)	2238	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.32 kBq (0.171 μ Ci)	5941	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.28 kBq (0.0886 μ Ci)	3275	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.28 kBq (0.0886 μ Ci)	3279	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.32 kBq (0.171 μ Ci)	6282	2.9%
Total:				54.4 kBq (1.47 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

- **Uncertainty of Measurement:**

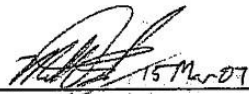
The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.



Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

-This is an original calibration certificate.

-This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).

-Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.

-Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.

-The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.

-This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.

-The source has a recommended working life of 1 year.

-Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).

-The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / *accredited by the*
 Akkreditierungsstelle des DKD bei der
 PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
 Isotope Products
 Valencia, California 91355
 Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
 ACTIVITY: 1.46 µCi
 ACTIVITY: 54.0 kBq
 REF DATE: 1 Mar 07
 SOURCE #: 1232-29-17



NOT FOR DRUG USE
ISO 2916



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000495
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand <i>Object</i>	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ <i>Type</i>	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1232-29-17
Auftraggeber <i>Customer</i>	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	3
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD 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 traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD 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 sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Stellvertreter <i>Deputy</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbits
 Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
 Burbank, CA 91504

- **Object Calibrated:**

Customer supplied Marinelli beaker (138-G)

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 1.0 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 1700mL (1701.7 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM08-01, Revision D "Large Volume Gamma Standards - Epoxy". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.4 kBq ($0.335 \mu\text{Ci}$)	518.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.23 kBq ($0.0332 \mu\text{Ci}$)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.4 kBq ($0.470 \mu\text{Ci}$)	631.6	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.651 kBq ($0.0176 \mu\text{Ci}$)	557.3	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.812 kBq ($0.0219 \mu\text{Ci}$)	648.8	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.46 kBq ($0.0665 \mu\text{Ci}$)	2005	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.94 kBq ($0.0795 \mu\text{Ci}$)	1908	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.94 kBq ($0.106 \mu\text{Ci}$)	3877	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.62 kBq ($0.0708 \mu\text{Ci}$)	2230	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.28 kBq ($0.170 \mu\text{Ci}$)	5903	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.26 kBq ($0.0881 \mu\text{Ci}$)	3255	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.26 kBq ($0.0881 \mu\text{Ci}$)	3259	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.28 kBq ($0.170 \mu\text{Ci}$)	6242	2.9%
Total:				54.0 kBq ($1.46 \mu\text{Ci}$)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000495

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.



15 Mar 07

Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 Πιστοποιητικό ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου σχετικής απόδοσης 70%

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

Specifications

Detector Model GC7020 Serial number b 99113
 Cryostat Model 7500SL
 Preamplifier Model 2002CSL

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows :

Nominal volume cc Relative efficiency 70 %
 Resolution 2.0 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 keV (FWHM) at 1.33 MeV
1.05 keV (FWHM) at 122 keV
 keV (FWHM) at keV
 Peak/Compton 70:1 Cryostat well diameter mm Well depth mm
 Cryostat description or Drawing Number if special Vertical Dinastick, type 7500SL

Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window
 Diameter 72 mm Active volume cc
 Length 72.5 mm Crystal well depth mm
 Distance from window (outside) 5 mm Crystal well diameter mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+3000) Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+4000) Vdc
 Leakage current at recommended bias 0.01 nA
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.5 Vdc

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4 μ s

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co		
Energy (keV)	122	1332		
FWHM (keV)	.992	1.96		
FWTM (keV)		3.66		
Peak/Compton		79.4:1		
Rel. Efficiency		71.6%		

- Test are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1986

- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by :

Date : October 8, 1998

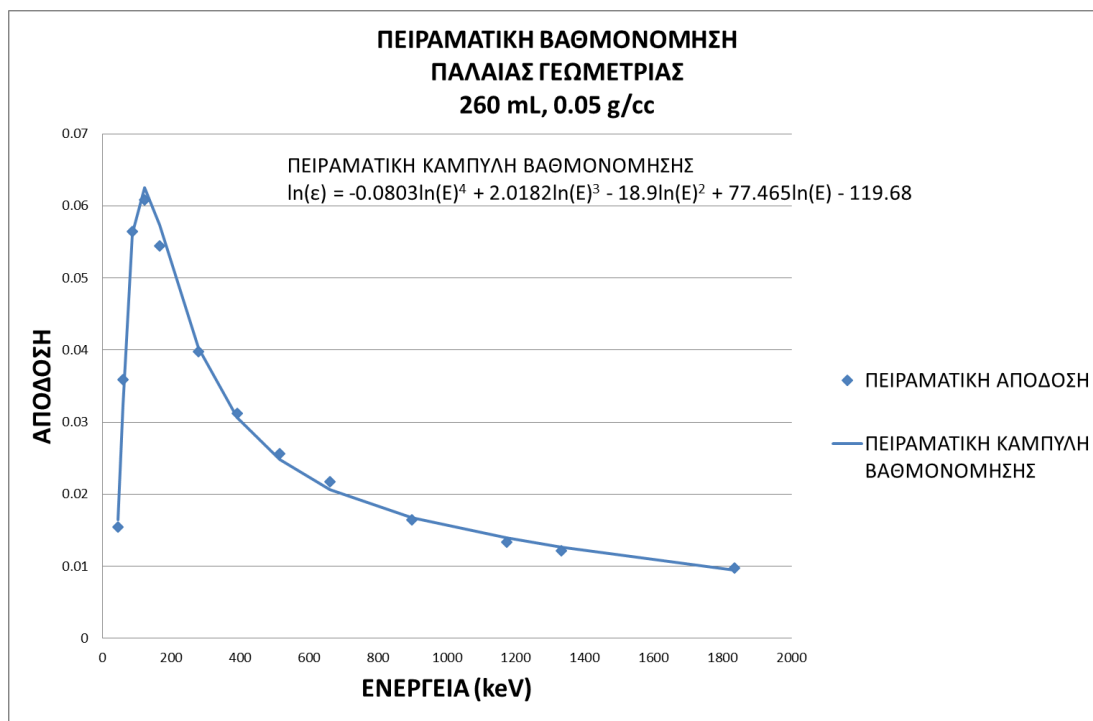
Approved by :

Date : October 8, 1998

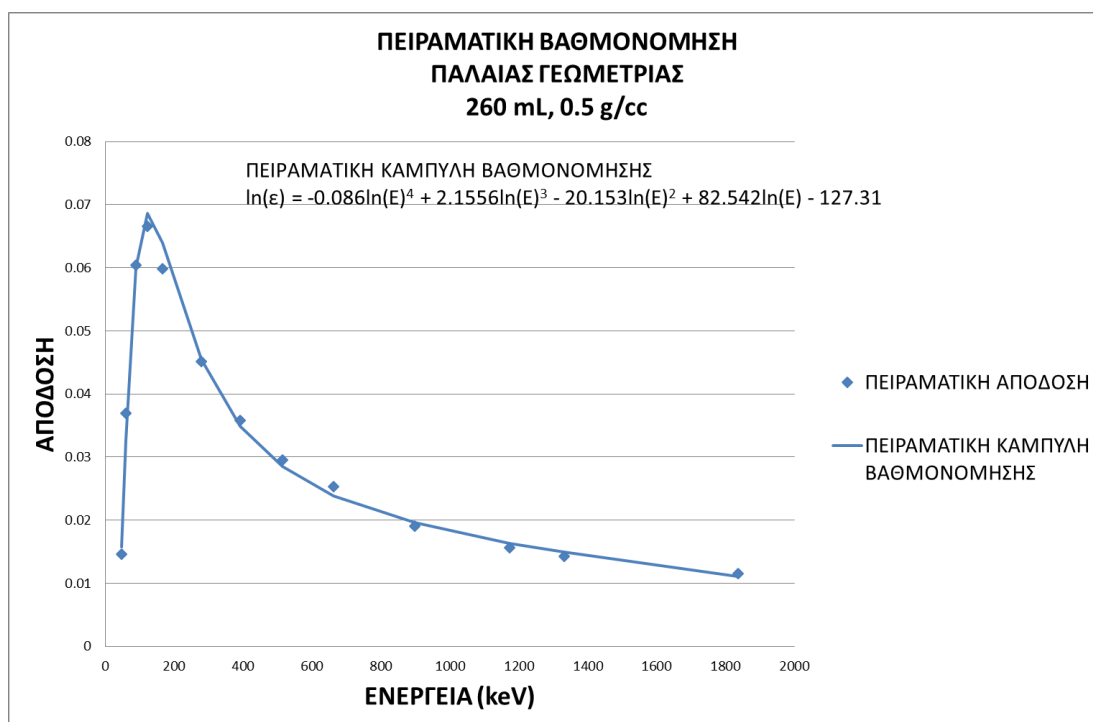
Docum : <u>GDMAE001</u>	Date : <u>05/12/96</u>
Issued : <u>Spec. Sheet GC</u>	Name : <u>PVE</u>
Revis : <u>C</u>	Page : <u>1/1</u>
Reviz : <u>0.W001PVE.15</u>	Appr :

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 Καμπύλες πειραματικής βαθμονόμησης παλαιάς γεωμετρίας κυαθίου

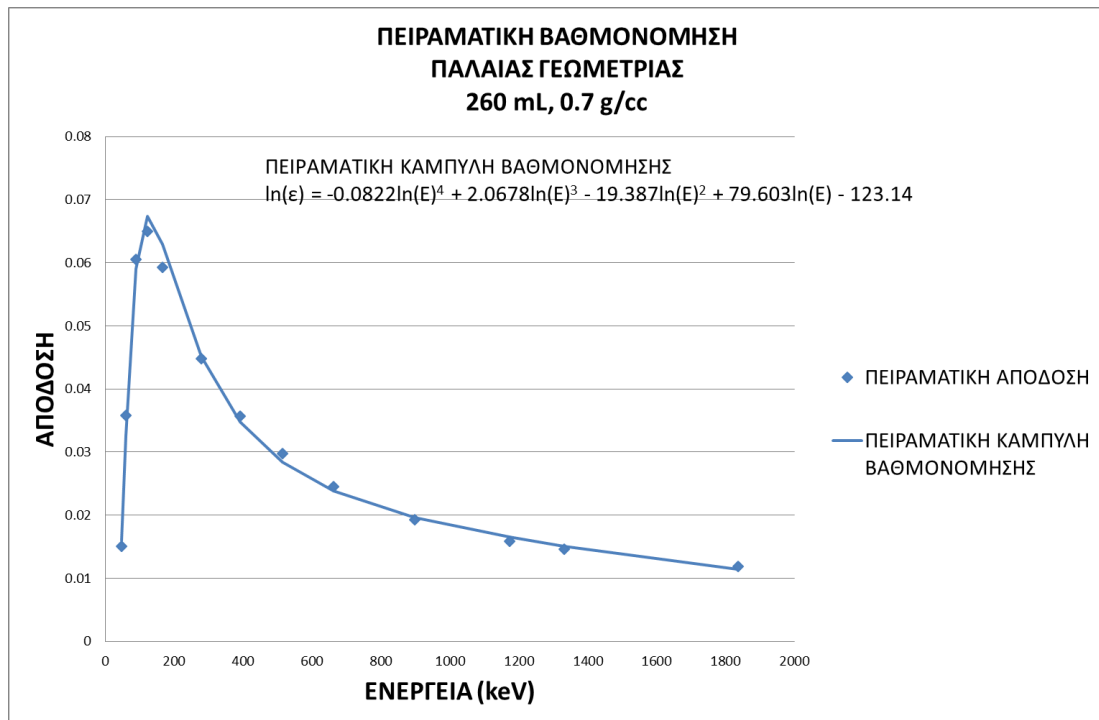
Καμπύλες βαθμονόμησης κυαθίου όγκου πλήρωσης 260 mL



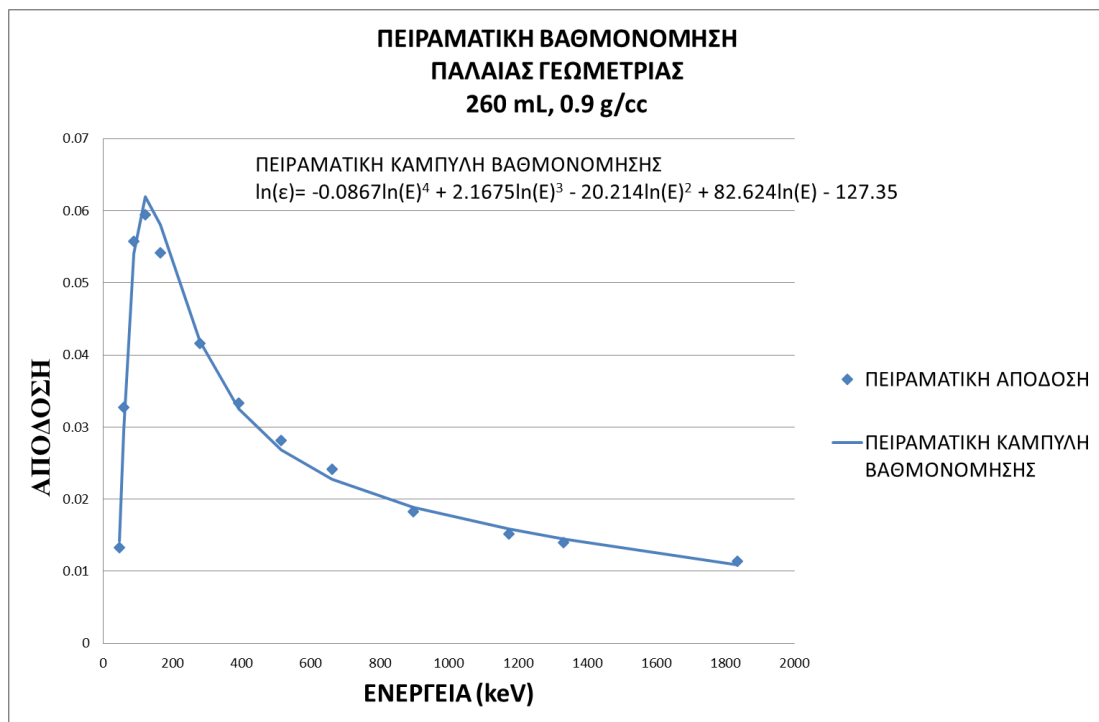
Διάγραμμα Α.1 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 0.05 g/cc.



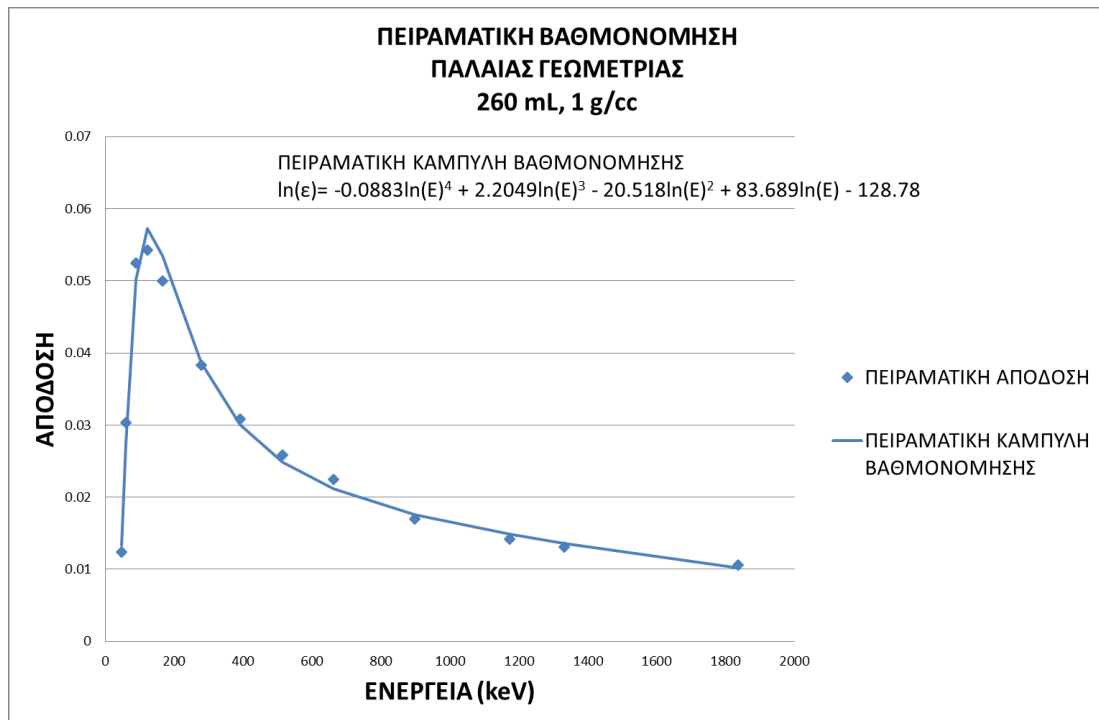
Διάγραμμα Α.2 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 0.5 g/cc.



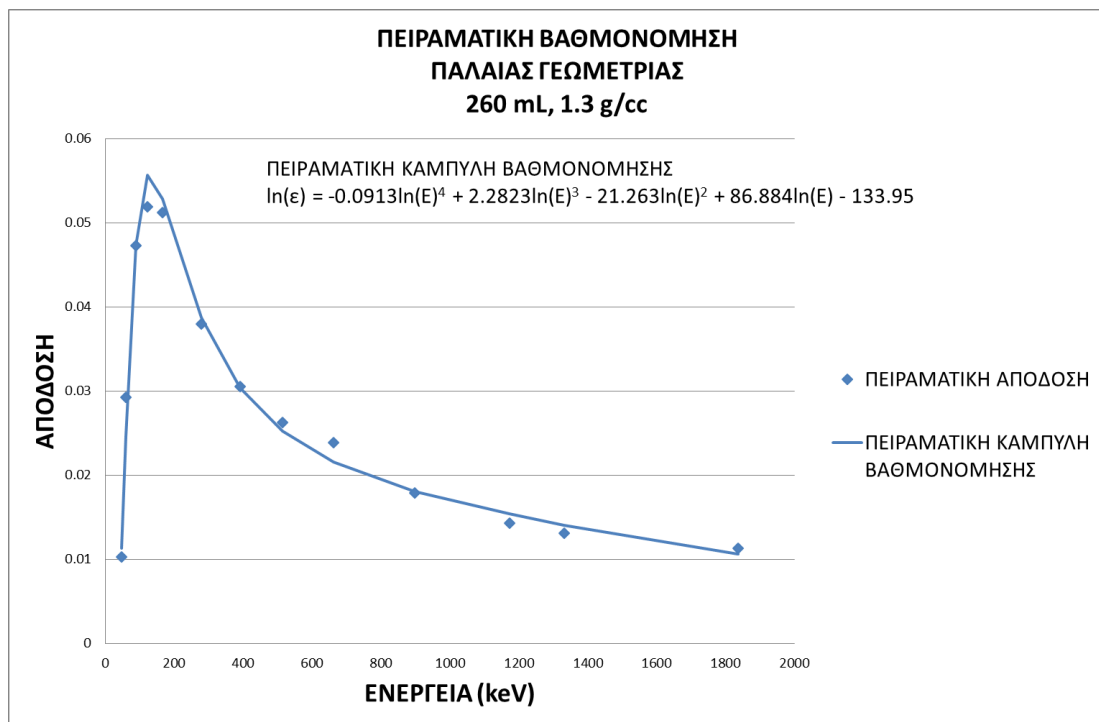
Διάγραμμα Α.3 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 0.7 g/cc.



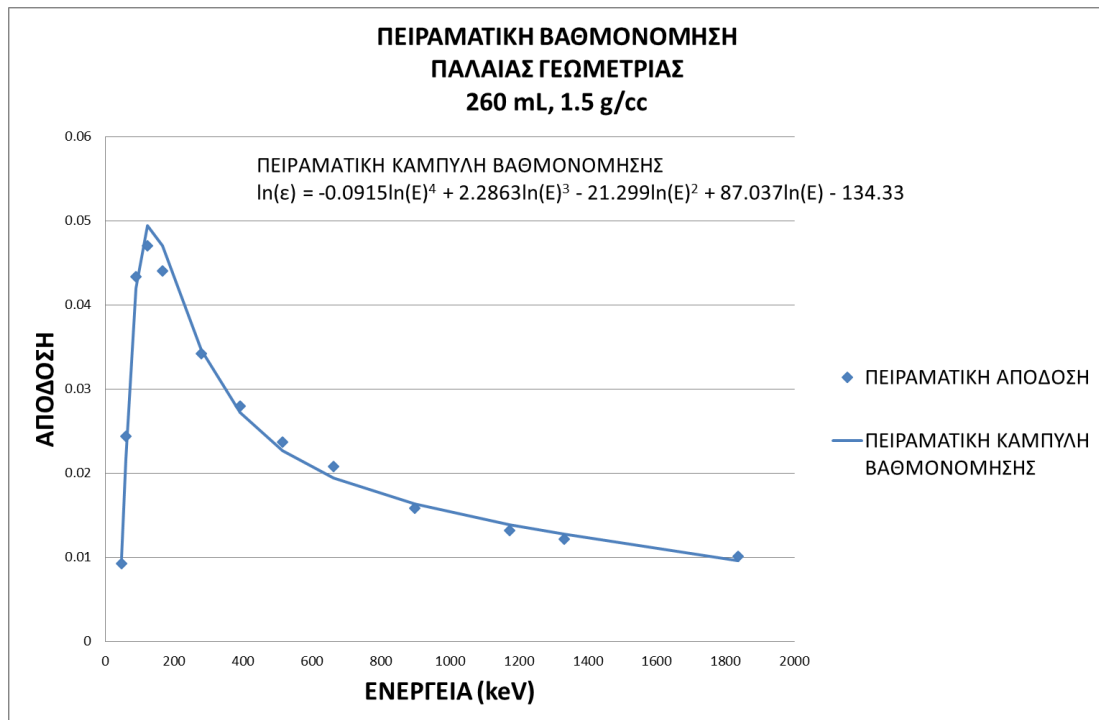
Διάγραμμα Α.4 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 0.9 g/cc.



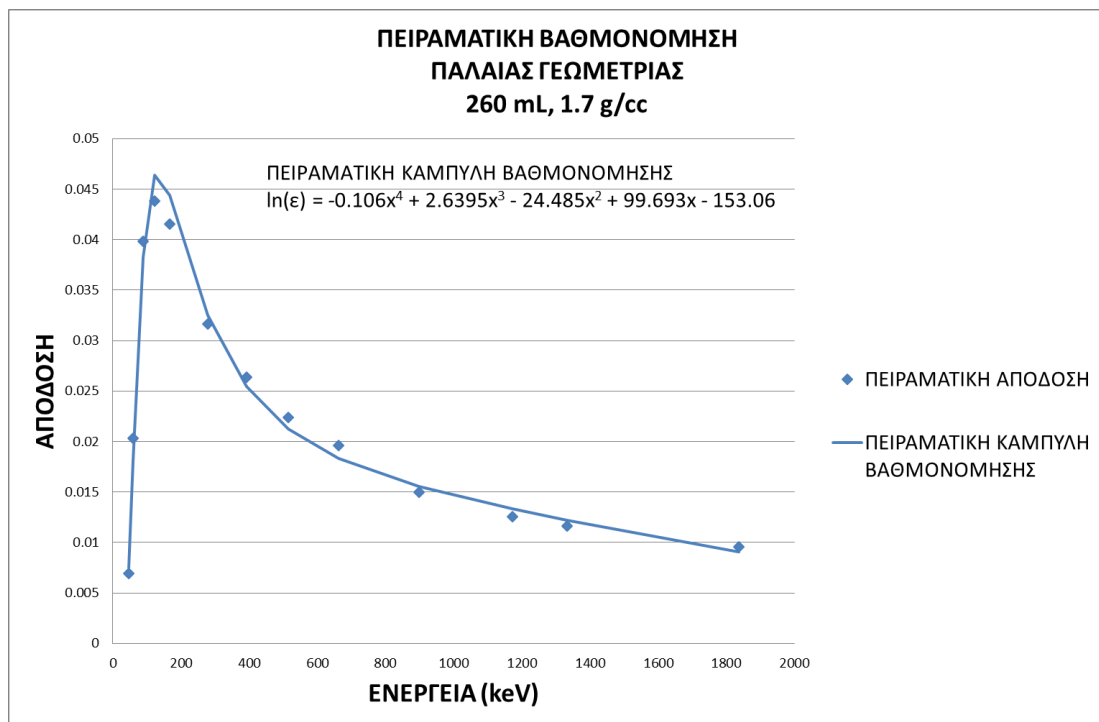
Διάγραμμα Α.5 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 1.0 g/cc.



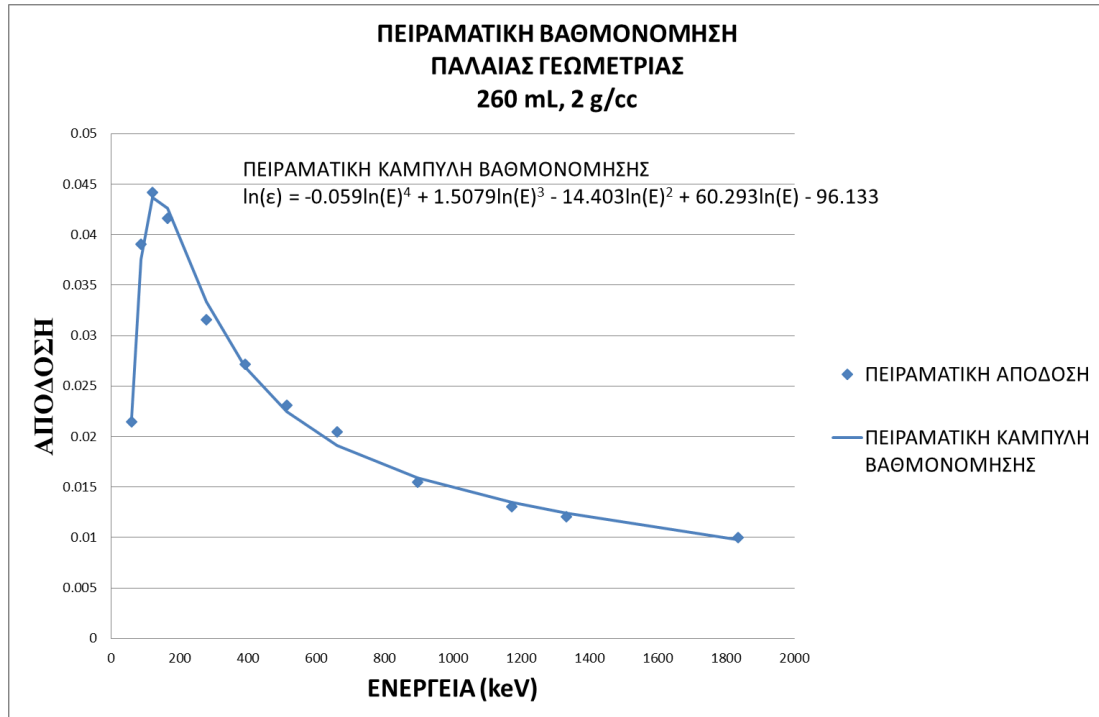
Διάγραμμα Α.6 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 1.3 g/cc.



Διάγραμμα Α.7 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 1.5 g/cc.

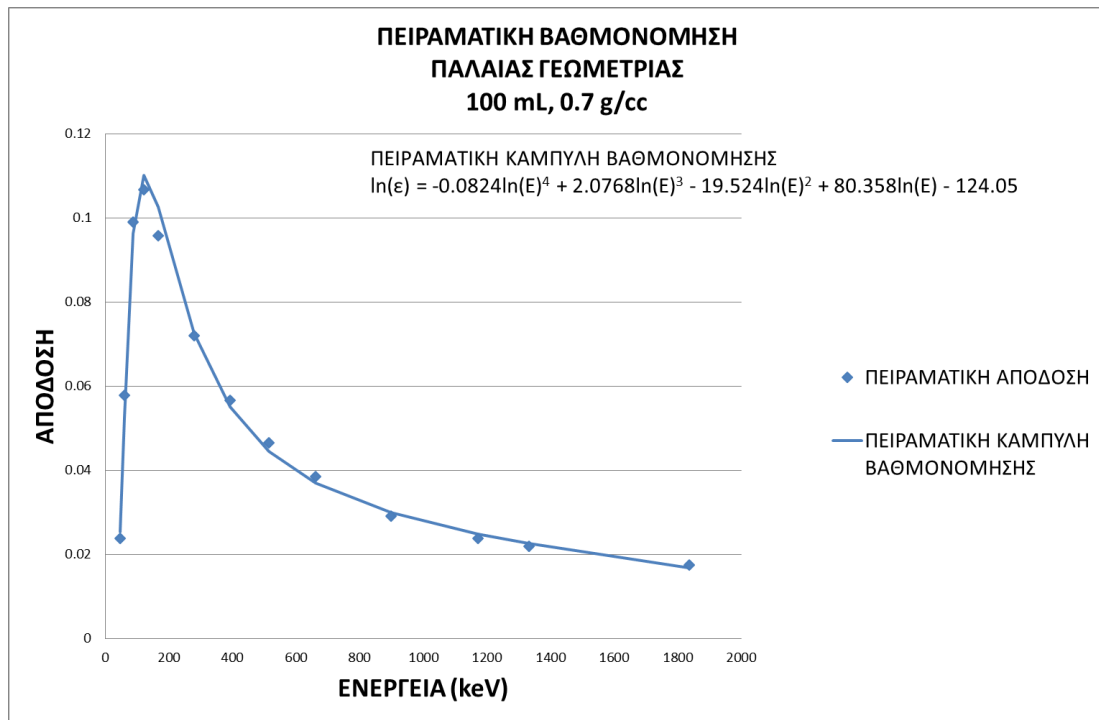


Διάγραμμα Α.8 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 1.7 g/cc.

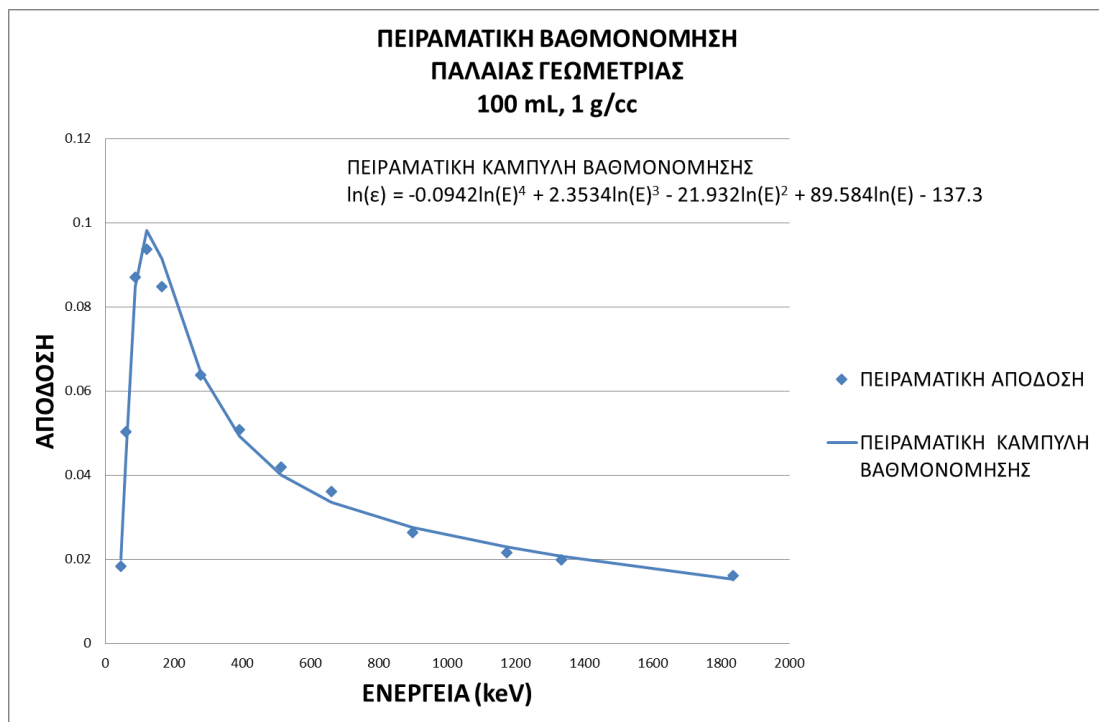


Διάγραμμα Α.9 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 260 mL, πυκνότητας 2.0 g/cc.

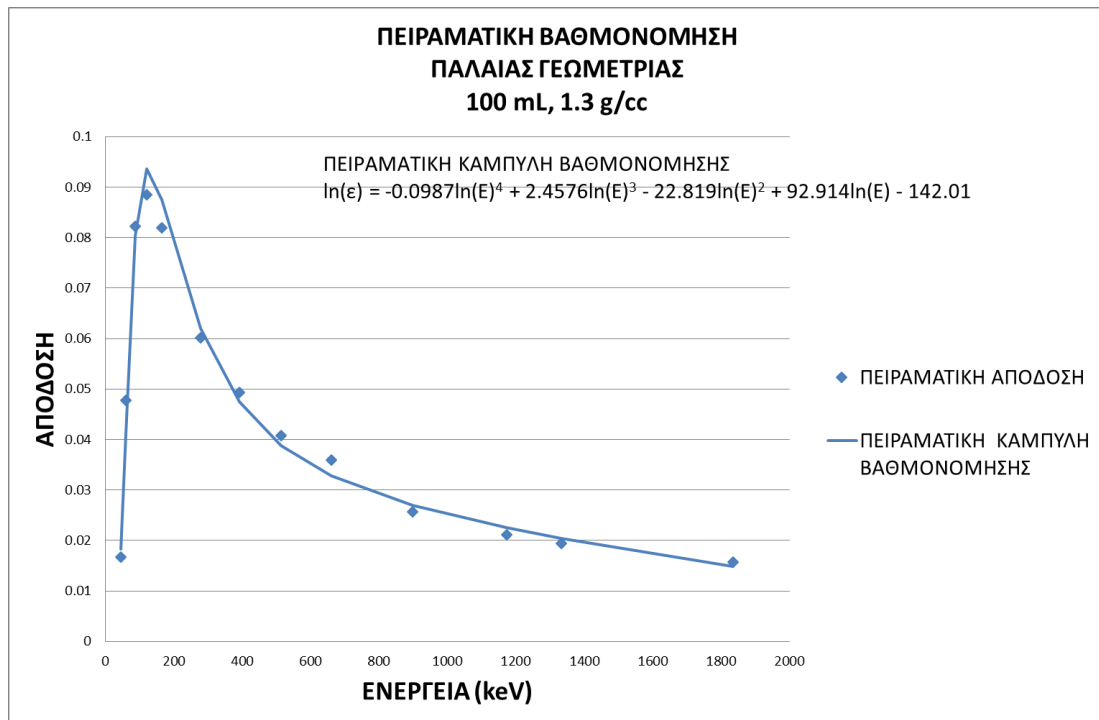
Καμπύλες βαθμονόμησης κυαθίου όγκου πλήρωσης 100 mL



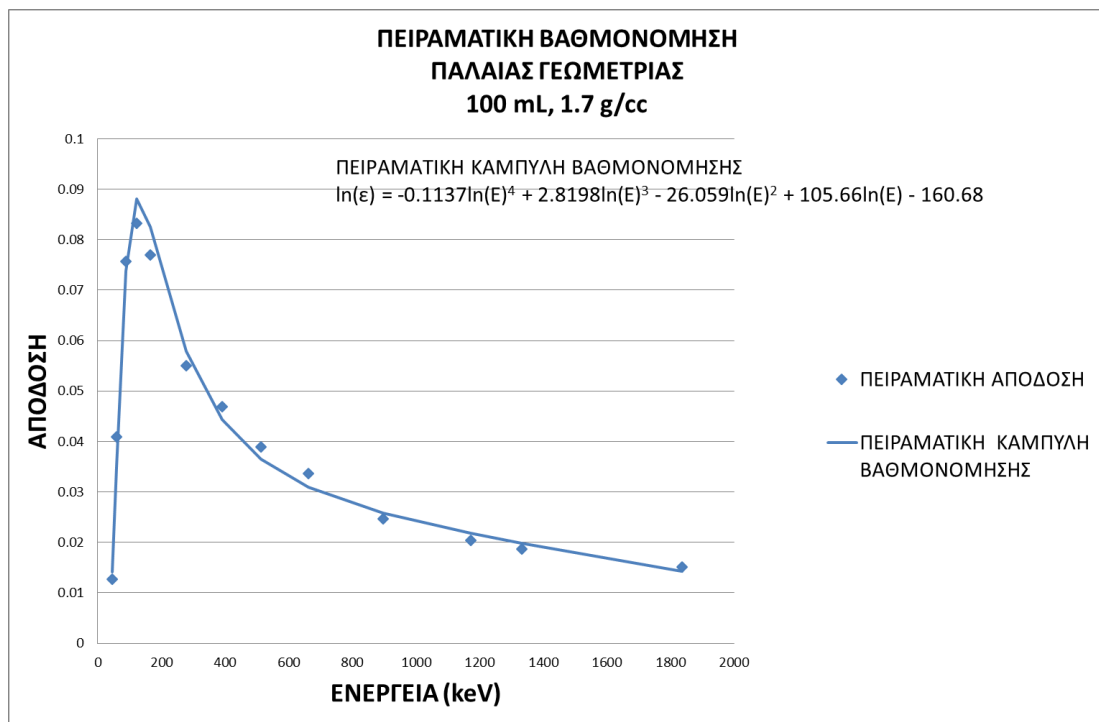
Διάγραμμα Α.10 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 0.7 g/cc.



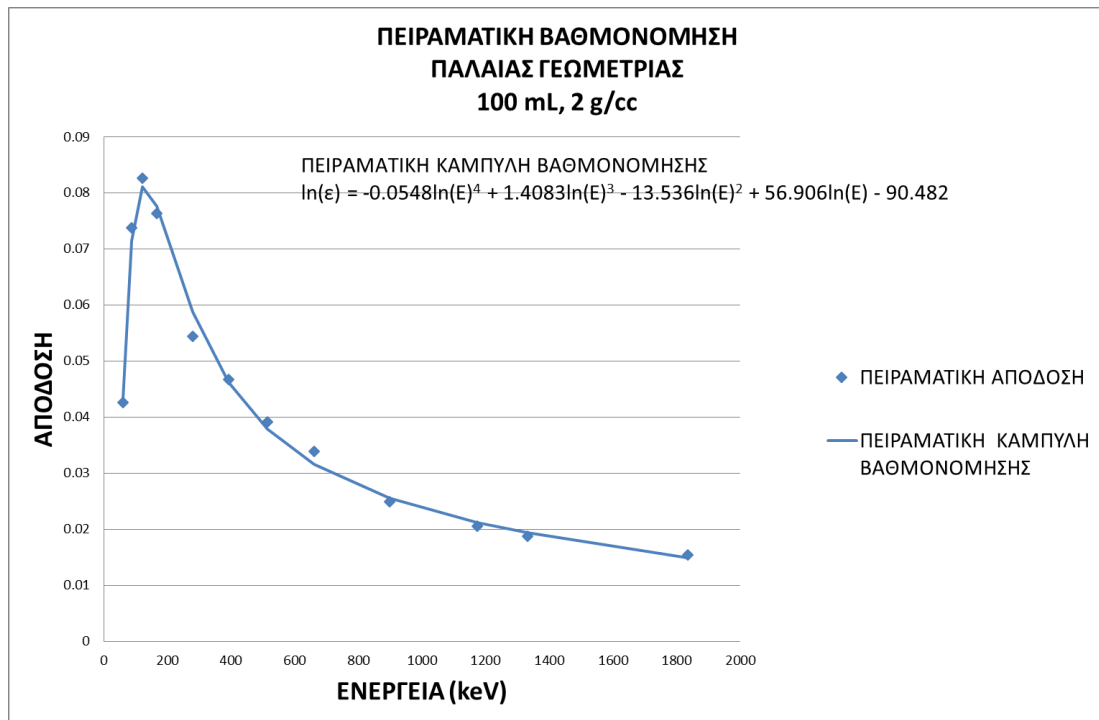
Διάγραμμα Α.11 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 1.0 g/cc.



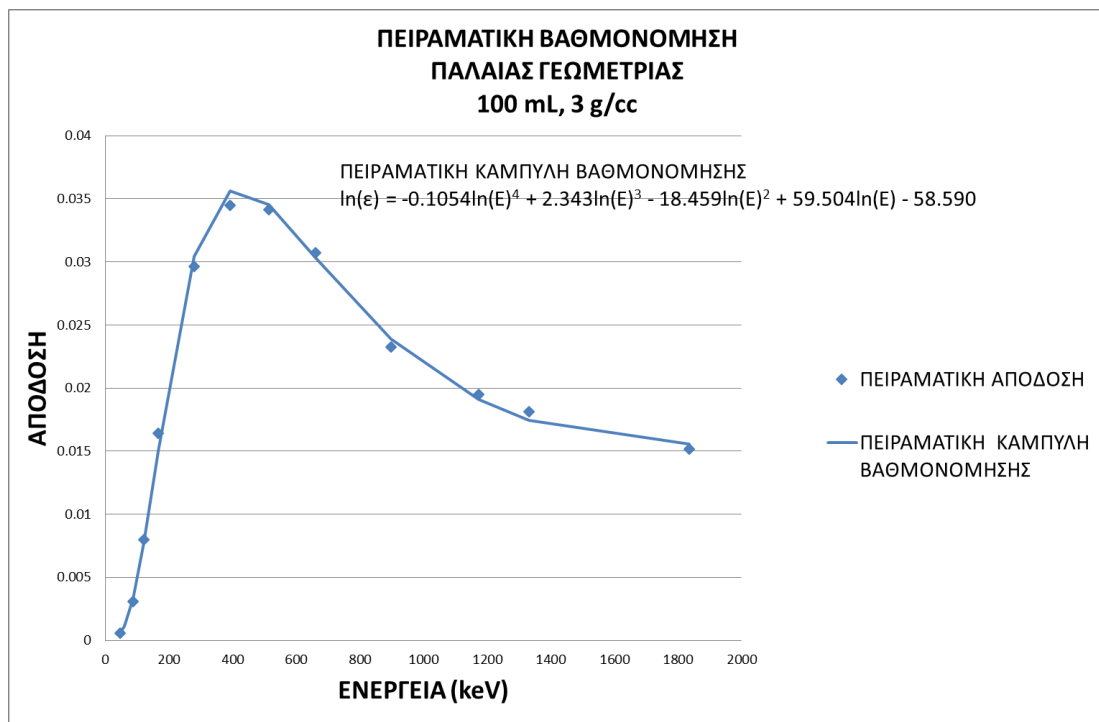
Διάγραμμα Α.12 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 1.3 g/cc.



Διάγραμμα Α.13 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 1.7 g/cc.



Διάγραμμα Α.14 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 2 g/cc.



Διάγραμμα Α.15 Πειραματική βαθμονόμηση πηγής βαθμονόμησης όγκου πλήρωσης 100 mL, πυκνότητας 3.0 g/cc.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 Αναλύσεις μετρήσεων δείγματος Procorad 2017-C και ελάσματος χαλκού

Ανάλυση μέτρησης δείγματος αναφοράς Procorad 2017-C.

RADIOTOXICOLOGICAL INTERCOMPARISONS
SYNTHESIS OF RESULTS

PROCORAD

2017 Enter your results at the reference date: **2017** **March 15th** Your lab number:

YOUR OWN RESULTS

SAMPLES Unit	Number of LABS ⁽¹⁾	ASSIGNED VALUE (Bq.L ⁻¹)	EXPANDED UNCERTAINTY (Bq.L ⁻¹)	ROBUST MEAN VALUE (Bq.L ⁻¹)	ROBUST STANDARD DEVIATION (Bq.L ⁻¹)	ACTIVITY (Bq.L ⁻¹)	Z-SCORE	BIAS	E _N
Sample C									
134Cs	42	1,05E+01	2,62E-01						
137Cs	42	1,03E+01	1,83E-01						
60Co	42	1,14E+01	1,89E-01						
Sample ABC									
⁴⁰ K	42	robust mean	robust SD	5,83E+01	5,05E+00				
YOUR COMMENTS									

1 : Number of laboratories taken into account for the calculation of the means

Ανάλυση μέτρησης ελάσματος χαλκού.

**** G A M M A S P E C T R U M A N A L Y S I S ****

Filename: GEA_03

Report Generated On : 25-02-2020 12:22:16

Sample Title : XX
Spectrum Description :
Sample Identification : XX
Sample Type : XX
Sample Geometry : XX

Peak Locate Threshold : 4.00
Peak Locate Range (in channels) : 50 - 8190
Peak Area Range (in channels) : 50 - 8190
Identification Energy Tolerance : 1.500 keV

Sample Size : 1.000E+000

Sample Taken On : 01-04-2009 12:00:00
Acquisition Started : 25-02-2020 12:14:21

Live Time : 200.0 seconds
Real Time : 216.3 seconds

Dead Time : 7.54 %

Energy Calibration Used Done On : 22-02-2018
Efficiency Calibration Used Done On : 27-05-2008
Efficiency ID : BOX1_3_N

Background Subtract Report 25-02-2020 12:22:16

**** B A C K G R O U N D S U B T R A C T R E P O R T ****

Detector Name: GEA_03
Sample Title: XX
Peak Analysis Performed on: 25-02-2020 12:22:16

Env. Background File: C:\GENIE2K\CAMFILES\YEAR 2020\02_FEBRUA

Peak No.	Energy (keV)	Original Area	Orig. Area Uncert.	Ambient Background	Backgr. Uncert.	Subtracted Area	Subtracted Uncert.
1	510.87	1.47E+004	198.44	5.76E+000	7.05E-002	1.47E+004	1.98E+002
2	1115.75	1.86E+005	439.91			1.86E+005	4.40E+002

M = First peak in a multiplet region
m = Other peak in a multiplet region
F = Fitted singlet

Errors quoted at 1.000 sigma

Interference Corrected Activity Report 25-02-2020 12:22:16

**** N U C L I D E I D E N T I F I C A T I O N R E P O R T ****

Sample Title: XX
Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\Stdlib_30_03_2009.nl

..... IDENTIFIED NUCLIDES

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (kBq/)	Activity Uncertainty
--------------	---------------	--------------	-----------	------------------	----------------------

* = Energy line found in the spectrum.
@ = Energy line not used for Weighted Mean Activity
Energy Tolerance : 1.500 keV
Nuclide confidence index threshold = 0.30
Errors quoted at 1.000 sigma

Interference Corrected Activity Report 25-02-2020 12:22:16

 ***** I N T E R F E R E N C E C O R R E C T E D R E P O R T *****

Nuclide Name	Nuclide Id	Wt mean Activity (kBq/)	Wt mean Activity Uncertainty
--------------	------------	--------------------------	------------------------------

? = nuclide is part of an undetermined solution
 X = nuclide rejected by the interference analysis
 @ = nuclide contains energy lines not used in Weighted Mean Activity

Errors quoted at 1.000 sigma

***** U N I D E N T I F I E D P E A K S *****

Peak Locate Performed on: 25-02-2020 12:22:16
 Peak Locate From Channel: 50
 Peak Locate To Channel: 8190

Peak No.	Energy (keV)	Peak Size in Counts per Second	Peak CPS % Uncertainty
1	510.87	7.3317E+001	1.35
2	1115.75	9.2817E+002	0.24

M = First peak in a multiplet region
 m = Other peak in a multiplet region
 F = Fitted singlet

Errors quoted at 1.000 sigma

Nuclide MDA Report 25-02-2020 12:22:16

 ***** N U C L I D E M D A R E P O R T *****

Detector Name: GEA_03
 Sample Geometry: XX
 Sample Title: XX
 Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\Stdlib_30_03_2009.nl

Nuclide Name	Energy (keV)	Yield (%)	Line MDA (kBq/)	Nuclide MDA (kBq/)	Activity (kBq/)
@ BE-7	477.59	10.44	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
NA-22	1274.54	99.94	5.2157E-001	5.22E-001	-5.4554E-001
K-40	1460.81	10.67	1.8358E-001	1.84E-001	-1.5805E-001
SC-46	889.25	99.98	3.2084E+013	3.21E+013	-3.8966E+013
	1120.51	99.99	1.3393E+014		-1.0350E+013
MN-54	834.84	99.97	9.2065E+002	9.21E+002	5.0025E+001
CO-57	122.06	85.51	1.1224E+003	1.12E+003	2.5003E+002
	136.48	10.71	9.1852E+003		1.0780E+003
@ FE-59	142.65	0.97	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	192.34	2.92	3.7000E+021		3.7000E+021
@	1099.22	56.59	3.7000E+021		3.7000E+021
@	1291.56	43.21	3.7000E+021		3.7000E+021
CO-60	1173.22	99.85	1.4460E-001	1.13E-001	-1.1565E-001
	1332.49	99.98	1.1330E-001		-2.1848E-002
ZN-65	1115.54	50.60	1.0679E+005	1.07E+005	9.8602E+006
SE-75	96.73	3.42	1.0673E+010	6.46E+008	-1.2360E+009
	121.11	17.20	2.1267E+009		8.0602E+008
	136.00	58.20	6.4619E+008		1.2867E+008
	198.60	1.48	3.1484E+010		-1.1920E+010
	264.65	58.90	9.4101E+008		1.5210E+008
	279.53	24.99	2.2453E+009		1.0502E+009
	303.91	1.32	4.4001E+010		-1.5798E+010
	400.65	11.47	5.6333E+009		2.9043E+009
KR-85	513.99	0.44	6.1573E+001	6.16E+001	-1.6331E+002
@ KR-85M	151.18	75.00	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	304.87	14.00	3.7000E+021		3.7000E+021
SR-85	513.99	98.50	4.1249E+017	4.12E+017	-1.0941E+018
@ KR-87	402.58	49.50	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	673.87	1.91	3.7000E+021		3.7000E+021
@	845.43	7.30	3.7000E+021		3.7000E+021
@	1175.40	1.12	3.7000E+021		3.7000E+021
@	1740.52	2.05	3.7000E+021		3.7000E+021
@	2011.88	2.90	3.7000E+021		3.7000E+021
@ KR-88	165.98	3.10	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	196.32	26.00	3.7000E+021		3.7000E+021
@	362.23	2.25	3.7000E+021		3.7000E+021
@	834.83	13.00	3.7000E+021		3.7000E+021
@	985.78	1.31	3.7000E+021		3.7000E+021
@	1141.33	1.28	3.7000E+021		3.7000E+021
@	1179.51	1.00	3.7000E+021		3.7000E+021

@		1250.67	1.12	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1369.50	1.48	3.7000E+021		3.7000E+021
@	KR-88	1518.39	2.15	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		1529.77	10.90	3.7000E+021		3.7000E+021
@		2029.84	4.53	3.7000E+021		3.7000E+021
@		2035.41	3.74	3.7000E+021		3.7000E+021
> @		2195.84	13.20	0.0000E+000		0.0000E+000
	Y-88	898.02	93.90	3.1092E+010	1.63E+009	1.1572E+010
		1836.01	99.38	1.6317E+009		7.2167E+008
@	MO-90	122.37	64.10	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		257.34	77.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@	SR-91	274.70	1.00	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		620.10	1.72	3.7000E+021		3.7000E+021
@		652.30	2.89	3.7000E+021		3.7000E+021
@		652.91	7.80	3.7000E+021		3.7000E+021
@		749.80	23.00	3.7000E+021		3.7000E+021
@		925.80	3.74	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1024.30	32.50	3.7000E+021		3.7000E+021
@	Y-91M	557.57	95.08	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	NB-95	765.79	99.81	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
	ZR-95	724.18	44.27	1.2058E+018	1.06E+018	3.5128E+017
		756.72	54.38	1.0623E+018		-4.1946E+017
@	MO-99	140.51	89.60	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		181.06	6.01	3.7000E+021		3.7000E+021
@		366.43	1.19	3.7000E+021		3.7000E+021
@		739.58	12.12	3.7000E+021		3.7000E+021
@		778.00	4.28	3.7000E+021		3.7000E+021
@	TC-99M	140.51	88.50	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	RU-103	497.08	91.31	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		610.33	5.78	3.7000E+021		3.7000E+021
	RU-106	621.84	9.86	1.5700E+003	1.57E+003	-1.1055E+003
		1050.47	1.49	8.1892E+003		-1.7562E+003
	CD-109	88.03	3.63	3.9438E+002	3.94E+002	2.6440E+001
	AG-110M	446.80	3.65	1.1575E+005	5.94E+003	5.5639E+004
		620.35	2.72	1.9809E+005		6.3866E+004
		657.75	94.38	5.9811E+003		4.3962E+003
		677.61	10.56	5.4922E+004		-2.3568E+004
		686.99	6.45	9.2357E+004		-3.7032E+004
		706.67	16.48	3.7651E+004		-9.1533E+003
		744.26	4.71	1.4241E+005		3.0297E+002
		763.93	22.31	3.1287E+004		2.3793E+004
		818.02	7.33	1.1221E+005		7.9294E+004
		884.67	74.00	1.3555E+004		3.9954E+003
		937.48	34.51	2.2764E+004		6.2019E+003
		1384.27	24.70	5.9425E+003		-2.3903E+003
		1475.76	4.03	3.0390E+004		3.2825E+003
		1505.00	13.16	9.5532E+003		1.4769E+003
		1562.27	1.21	8.0599E+004		4.4134E+004
@	In-111	171.20	90.66	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		245.40	94.09	3.7000E+021		3.7000E+021
	SN-113	255.12	2.11	6.6244E+010	2.50E+009	-1.1340E+010
		391.69	64.94	2.5019E+009		-4.2083E+008
	Te-123m	158.97	83.99	4.9136E+008	4.91E+008	5.4893E+007
@	I-125	27.47	73.90	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		31.00	21.20	3.7000E+021		3.7000E+021
@		35.49	6.67	3.7000E+021		3.7000E+021
	SB-125	176.33	6.82	9.7143E+000	3.37E+000	8.0027E+000
		380.43	1.52	6.2907E+001		-4.2814E+000
		427.89	29.55	3.3674E+000		-8.0238E-002
		463.38	10.48	1.0048E+001		3.7457E+000
		600.56	17.76	7.2095E+000		-5.3260E+000
		606.64	5.02	2.5540E+001		-8.4505E+000
		635.90	11.32	1.1703E+001		-4.6196E+000
		671.41	1.78	7.8699E+001		1.5689E+001
	I-129	39.57	7.42	4.4040E+000	4.40E+000	2.9581E+000
@	I-131	80.18	2.61	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		284.30	6.06	3.7000E+021		3.7000E+021
@		364.48	81.20	3.7000E+021		3.7000E+021
@		636.97	7.26	3.7000E+021		3.7000E+021
@		722.89	1.80	3.7000E+021		3.7000E+021
@	TE-132	111.76	1.85	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		116.30	1.94	3.7000E+021		3.7000E+021
@		228.16	88.00	3.7000E+021		3.7000E+021
	BA-133	79.62	2.65	3.1388E+000	2.03E-001	-2.4267E+000
		81.00	32.90	2.4809E-001		-6.2178E-002
		276.40	7.16	1.5776E+000		-1.8527E-002
		302.84	18.34	6.3708E-001		1.7678E-001
		356.01	62.05	2.0342E-001		-3.5462E-003
		383.85	8.94	1.4409E+000		1.2329E+000
@	I-133	529.87	86.30	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		875.33	4.47	3.7000E+021		3.7000E+021
@	XE-133	81.00	38.00	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	CS-134	475.35	1.49	1.8309E+002	3.33E+000	1.8863E+001
		563.23	8.37	3.5836E+001		-2.3776E+001
		569.32	15.38	1.9817E+001		8.2578E+000
		604.70	97.65	3.3285E+000		-2.6541E+000
		795.84	85.50	5.5830E+000		2.2743E-001
		801.93	8.70	5.5711E+001		-9.3453E+000

		1038.57	0.99	2.7358E+002		-1.1057E+000
		1167.94	1.79	7.9414E+001		1.4736E+001
		1365.15	3.02	2.9989E+001		-7.8678E+000
@	I-134	135.40	3.76	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		405.45	7.30	3.7000E+021		3.7000E+021
@		433.35	4.19	3.7000E+021		3.7000E+021
@		540.83	7.80	3.7000E+021		3.7000E+021
@		595.36	11.40	3.7000E+021		3.7000E+021
@		621.79	10.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@		677.34	8.50	3.7000E+021		3.7000E+021
@		766.68	4.10	3.7000E+021		3.7000E+021
@		847.03	95.41	3.7000E+021		3.7000E+021
@		857.29	6.96	3.7000E+021		3.7000E+021
@		884.09	65.30	3.7000E+021		3.7000E+021
@		947.86	4.04	3.7000E+021		3.7000E+021
@		974.67	4.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@	I-134	1072.55	15.30	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		1136.16	9.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1806.84	5.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@	I-135	220.50	1.75	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		288.45	3.09	3.7000E+021		3.7000E+021
@		417.63	3.52	3.7000E+021		3.7000E+021
@		546.56	7.12	3.7000E+021		3.7000E+021
@		836.80	6.67	3.7000E+021		3.7000E+021
@		972.60	1.20	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1038.76	7.90	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1101.58	1.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1124.00	3.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1131.51	22.50	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1260.41	28.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1457.56	8.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1502.79	1.07	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1566.41	1.29	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1678.03	9.50	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1706.46	4.09	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1791.20	7.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@	XE-135	249.79	89.90	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		608.18	2.89	3.7000E+021		3.7000E+021
@	CS-136	66.91	12.50	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		86.29	6.30	3.7000E+021		3.7000E+021
@		153.22	7.46	3.7000E+021		3.7000E+021
@		163.89	4.61	3.7000E+021		3.7000E+021
@		176.55	13.56	3.7000E+021		3.7000E+021
@		273.65	12.66	3.7000E+021		3.7000E+021
@		340.57	48.50	3.7000E+021		3.7000E+021
@		818.50	99.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1048.07	79.60	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1235.34	19.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@	CS-137	661.65	84.99	1.3690E-001	1.37E-001	-3.3480E-002
@	CS-138	138.10	1.49	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		227.76	1.51	3.7000E+021		3.7000E+021
@		408.98	4.66	3.7000E+021		3.7000E+021
@		462.79	30.70	3.7000E+021		3.7000E+021
@		546.94	10.80	3.7000E+021		3.7000E+021
@		871.80	5.11	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1009.78	29.80	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1147.22	1.24	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1343.59	1.14	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1435.86	76.30	3.7000E+021		3.7000E+021
@	CE-139	165.85	79.90	2.6515E+007	2.65E+007	-1.1004E+007
@	BA-140	162.64	6.26	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		304.87	4.30	3.7000E+021		3.7000E+021
@		423.70	3.11	3.7000E+021		3.7000E+021
@		437.57	1.93	3.7000E+021		3.7000E+021
@		537.30	24.39	3.7000E+021		3.7000E+021
@	LA-140	328.77	20.80	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		432.51	2.99	3.7000E+021		3.7000E+021
@	LA-140	487.03	46.10	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@		751.65	4.39	3.7000E+021		3.7000E+021
@		815.78	23.72	3.7000E+021		3.7000E+021
@		867.84	5.58	3.7000E+021		3.7000E+021
@		919.53	2.73	3.7000E+021		3.7000E+021
@		925.20	7.04	3.7000E+021		3.7000E+021
@		1596.20	95.40	3.7000E+021		3.7000E+021
>	@	2521.39	3.41	0.0000E+000		0.0000E+000
@	CE-141	145.44	48.29	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
@	CE-144	80.11	1.52	4.3450E+004	5.45E+003	-3.1042E+004
		133.54	11.09	5.4470E+003		3.0659E+003
	EU-152	121.78	28.41	2.2136E-001	2.05E-001	1.7349E-001
		244.69	7.55	1.2193E+000		-5.1724E-001
		344.27	26.58	4.0653E-001		1.2039E-001
		411.11	2.24	4.9332E+000		1.6569E+000
		443.98	3.13	3.7378E+000		1.4507E+000
		778.89	12.96	1.5524E+000		-8.0811E-001
		867.32	4.24	6.1968E+000		5.1036E-001
		964.01	14.62	1.3640E+000		7.8838E-001
		1085.78	10.13	1.1715E+000		-3.4574E-001
		1112.02	13.40	8.7370E+000		-8.3825E+000

		1408.01	20.85	2.0453E-001		2.4482E-001
	EU-154	123.07	40.40	2.1581E-001	1.97E-001	1.0173E-001
		247.93	6.89	1.8587E+000		4.8813E-001
		591.76	4.95	4.0551E+000		4.5871E+000
		692.42	1.79	1.2915E+001		2.4198E+000
		723.30	20.05	1.2085E+000		-3.8618E-002
		756.80	4.53	5.8035E+000		-2.2916E+000
		873.18	12.17	3.0444E+000		-9.4811E-001
		996.26	10.50	2.0700E+000		7.2559E-001
		1004.72	17.85	1.1388E+000		3.3101E-001
		1246.12	0.86	8.9878E+000		-4.0115E+000
		1274.43	34.90	1.9718E-001		-2.0624E-001
		1596.48	1.78	1.9908E+000		-7.3994E-001
	IR-192	295.96	28.72	3.4000E+015	1.21E+015	2.8448E+014
		308.46	29.68	3.3207E+015		2.2234E+015
		316.50	82.75	1.2110E+015		8.0843E+014
		468.07	47.81	2.4994E+015		-6.0979E+013
	@ Tl-201	135.34	2.60	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
	@	165.88	0.16	3.7000E+021		3.7000E+021
	@	167.43	10.00	3.7000E+021		3.7000E+021
	@ Tl-202	439.56	91.40	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
	@ HG-203	279.19	81.48	3.7000E+021	3.70E+021	3.7000E+021
	TL-208	583.19	30.60	2.6487E-001	2.65E-001	-1.3082E-002
		860.56	4.50	3.2569E+000		3.5496E+000
>		2614.51	35.92	0.0000E+000		0.0000E+000
	Pb-210	46.54	4.25	4.6611E+000	4.66E+000	-2.7684E-001
	BI-214	609.31	45.16	1.8751E-001	6.56E-002	3.6541E-002
		768.36	4.85	2.3261E+000		4.7064E-001
		806.17	1.25	1.0020E+001		-6.7678E+000
		934.06	3.07	4.1179E+000		-3.8694E-001
	BI-214	1120.29	14.78	4.5748E+000	6.56E-002	-3.8487E-001
		1155.19	1.62	2.3941E+000		-1.8192E+000
		1238.11	5.78	5.5645E-001		2.6536E-001
		1280.96	1.42	2.0773E+000		-6.4755E-001
		1377.67	3.95	6.0906E-001		-1.3628E-001
		1385.31	0.78	3.0049E+000		-2.4104E+000
		1401.50	1.32	1.8346E+000		-2.1171E+000
		1407.98	2.37	1.0377E+000		1.2421E+000
		1509.19	2.11	9.6089E-001		7.8495E-001
		1661.28	1.04	1.3325E+000		-2.0654E-001
		1729.60	2.82	3.8421E-001		1.3598E-001
		1764.49	15.17	6.5643E-002		-2.6036E-002
		1847.44	2.00	5.3780E-001		-3.4773E-001
>		2118.54	1.15	0.0000E+000		0.0000E+000
>		2204.07	4.89	0.0000E+000		0.0000E+000
>		2447.67	1.54	0.0000E+000		0.0000E+000
	PB-214	74.81	6.33	6.7930E-001	1.75E-001	3.3652E-001
		77.11	10.70	3.8642E-001		-6.5785E-002
		87.20	3.70	1.0142E+000		-7.1127E-001
		89.80	1.03	3.6097E+000		1.2455E+000
		241.98	7.19	7.3496E-001		-1.5512E-001
		295.21	18.28	3.1155E-001		-9.8244E-002
		351.92	35.34	1.7454E-001		-3.5084E-002
		785.91	1.10	1.0972E+001		8.4386E+000
	Ra-224	240.99	4.12	1.2777E+000	1.28E+000	4.2426E-001
	Ra-226	186.21	3.53	1.2527E+000	1.25E+000	-6.5026E-001
	AC-228	89.95	1.90	1.9457E+000	4.61E-001	6.7133E-001
		93.35	3.10	1.1756E+000		-2.4084E-002
		129.08	2.42	1.5044E+000		8.4675E-002
		209.28	3.89	1.3312E+000		2.2207E+000
		270.23	3.46	1.5841E+000		-9.8273E-002
		327.64	3.07	2.0155E+000		2.5732E-001
		338.32	11.27	5.5384E-001		1.7239E-001
		409.51	1.92	3.3013E+000		-5.5089E-001
		463.00	4.40	1.5639E+000		4.2210E-001
		794.70	4.25	2.8764E+000		1.7256E+000
		835.71	1.61	8.4267E+000		6.7784E+000
		911.60	25.80	5.6952E-001		-1.7396E-001
		964.60	4.99	2.2870E+000		9.4239E-001
		969.11	15.80	6.9913E-001		1.8290E-001
		1459.14	0.83	2.3929E+000		1.2551E+000
		1587.90	3.22	4.6066E-001		-4.5319E-002
	PA-234M	766.36	0.32	3.5165E+001	1.04E+001	-3.3146E+000
		1001.03	0.83	1.0419E+001		-2.6463E+000
	TH-234	63.29	3.73	1.5066E+000	7.02E-001	-5.9186E-001
		92.60	5.21	7.0188E-001		9.9815E-002
	U-235	89.96	1.50	2.4644E+000	7.69E-002	8.5030E-001
		93.35	2.50	1.4578E+000		-2.9864E-002
		105.00	1.00	3.5354E+000		3.2646E+000
		109.16	1.54	2.2949E+000		5.7831E-001
		143.76	10.96	3.5169E-001		2.9320E-002
	U-235	163.35	5.08	7.9685E-001	7.69E-002	9.6832E-001
		185.71	57.20	7.6855E-002		-7.6267E-002
		202.12	1.08	4.3662E+000		-1.1208E-001
		205.31	5.01	9.7374E-001		-1.5018E+000
	AM-241	59.54	35.78	1.7749E-001	1.77E-001	-3.5277E-002

+ = Nuclide identified during the nuclide identification

* = Energy line found in the spectrum
> = MDA value not calculated
@ = Half-life too short to be able to perform the decay correction

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aaltonen H. Et al., 1994, Validation of a method for computer calculation of germanium detector efficiencies
2. Aguayo E. Et al., 2013, Characteristics of signals originating near the lithium-diffused N⁺ contact of high purity germanium p-type point contact detectors
3. Aksoy A., 1993, Efficiency calibration of HPGe detector in far and close Geometries
4. Anagnostakis M.J., 2006, The Penelope Computer Code
5. Anderson D.L., 2004, Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis
6. Andreotti E. Et al., 2014, Determination of dead-layer variation in HPGe detectors
7. Ashrafi S. Et al., 1999, Precise modeling of a coaxial HPGe Detector
8. Bochud F. Et al., 2006, Simple Monte-Carlo method to calibrate well-type HPGe detectors 29
9. Bochud F. Et al., 2006, Simple Monte-Carlo method to calibrate well-type HPGe detectors
10. Boson J. Et al., 2008, A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations
11. Cabal F.P. Et al., 2000, Monte Carlo based geometrical model for efficiency calculation of an n-type HPGe detector
12. Coincidence – Summing Corrections in Gamma Spectrometry
13. Cunnighman J., 1969, The Physics of Radiology
14. De Felice P. Et al., 2000, Fast procedures for coincidence-summing correction in γ -ray spectrometry
15. Décombaz M. Et al., 1992, Coincidence-summing corrections for extended sources in gamma-ray spectrometry using Monte Carlo simulation
16. EAEE.gr, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας
17. Elanique A. Et al., 2012, Dead layer thickness characterization of an HPGe detector by measurements and Monte Carlo simulations
18. Epa.gov, U.S. Environmental Protection Agency

19. Ewa I.O.B. Et al., 2001, Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector
20. F. Salvat, 2014, PENELOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport
21. Friedman R.J., 2001, Evaluation of scatter contribution from shielding materials used in scatter measurements for calibration range characterization
22. García-Toraño Et al., 2005, Monte Carlo calculations of coincidence-summing corrections for sources in gamma-ray spectrometry with Ge detectors
23. Gilmore G., 1995, Practical Gamma-Ray Spectrometry
24. H.Q. Ngo., 2010, The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for a coaxial HPGe p-type detector
25. Harb S. Et al., 2008, Study of Efficiency Calibrations of HPGe Detectors for Radioactivity Measurements of Environmental Samples
26. Hardy J.C.Et al., 2002, Precise efficiency calibration of an HPGe detector: source measurements and Monte Carlo calculations with subpercent Precision
27. Helmer R.G., Et al., 2003, The use of Monte Carlo calculations in the determination of aGe detector efficiency curve
28. Hernandez F. and El-Daoushy F., 2003, Accounting for incomplete charge collection in Monte Carlo simulations of the efficiency of well-type Ge detectors
29. hpschapters.org, Health Physics Society, (Nuclide Safety Data Sheet Zinc-65)
30. Huy N.Q. , 2010, The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for a coaxial HPGe p-type detector
31. Huy N.Q. Et al., 2007, Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code
32. Java-based Nuclear Data Information System (JANIS 4), Nuclear Energy Agency
33. Karamanis D., 2002, Experimental and simulated efficiency of a HPGe detector with point-like and extended sources
34. Karfopoulos K.L. and Anagnostakis M.J., 2009, Parameters affecting full energy
35. Khatib A.M.El Et al., 2016, Empirical formulae for calculating γ -ray detectors effective solid angle ratio

36. Ki sab Z. Et al., 1998, Comparison of efficiency functions for Ge gamma-ray detectors in a wide energy range
37. Kiziah R.R. and Lowell J.R., 1991, Experimental response functions spanning the gamma-ray energy range of 123.6 keV to 11.67 MeV and response matrix generation for bismuth germanate scintillation detectors
38. Knoll G.F., 2000, Radiation detection and measurement 4th edition
39. Laborie J.-M. Et al., 2000, Monte Carlo calculation of the efficiency calibration curve and coincidence-summing corrections in low level gamma-ray spectrometry using well-type HPGe detectors
40. Laborie J.M. Et al., 2002, Monte Carlo calculation of a low background well-type HPGe detector
41. Lepy M.C. Et al., 2001, Intercomparison of efficiency transfer software for gamma-ray spectrometry
42. Lepy M.C., 2018, Penelope and Results
43. Luca A. Et al., 2012, Calibration of the high and low resolution gamma-ray spectrometers
44. Luís R. Et al., 2010, Parameter optimization of a planar BEGe detector using Monte Carlo simulations
45. Maidana L.N. Et al., 2016, Experimental HPGe coaxial detector response and efficiency compared to Monte Carlo simulations
46. Moens L. Et al., 1981, Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries
47. Montgomery D.M. and Montgomery G.A., 1995, A method for assessing and correcting coincidence summing effects for Germanium detector efficiency calibrations
48. Mrdja D., Et al., 2007, Contribution of ^{210}Pb bremsstrahlung to the background of lead shielded gamma spectrometers
49. Oma School on Monte Carlo Simulations, 2017, Structure and operation of PENELOPE / penmain
50. Osvath I., Basic hands-on gamma calibration for low activity environmental levels, (IAEA)
51. Park, T.S. and Jeon, W.J., 1995. Measurement of radioactivity samples in Marinelli beakers by gamma- ray spectrometry
52. periodictable.com/isotopes

53. Physics.nist.gov, National Institute of Standards and Technology
54. Piton F. Et al., 2000, Efficiency transfer and coincidence summing corrections for gamma-ray spectrometry
55. Prekeges J., 2010, Nuclear Medicine Instrumentation
56. Quintana B. and Fernandez F., 1995, An Empirical Method to Determine Coincidence – Summing Corrections in Gamma Spectrometry
57. Reguigui N., 2006, Gamma ray spectrometry
58. Ródenas J. Et al., 2003, Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method
59. Rowshanfarzad P. Et al., 2005, Production and quality control of ^{65}Zn radionuclide
60. Sima O. and Arlond D., 2009, On the Monte Carlo simulation of HPGe gamma-spectrometry systems.
61. Sima O., 2000, Accurate calculation of total efficiency of Ge well-type detectors suitable for efficiency calibration using common standard sources
62. Stancu E. and GIOVANI C., 2009, Gamma-ray self-attenuation corrections in environmental samples
63. Talavera G.-M. Et al., 2000, Towards a proper modeling of detector and source characteristics in Monte Carlo simulations
64. Tavakoli-Anbaran H. Et al., 2008, The Effect of Detector Dimensions on the NaI (Tl) Detector Response Function
65. Vargas J.M. and Guerra A.L., 2006, Application of PENELOPE code to the efficiency calibration of coaxial germanium detectors
66. Vargas M.J. Et al., 2003, Efficiency transfer in the calibration of a coaxial p-type HpGe detector using the Monte Carlo method
67. Vidmar T. and Likar A., 2004 , On the invariability of the total-to-peak ratio in gamma-ray spectrometry
68. Vidmar T. Et al., 1999, Precise modeling of a coaxial HPGe detector
69. Vidmar T. Et al., 2010, Testing efficiency transfer codes for equivalence
70. Vranicar A. Et al., 2019, exisUse of EFFTRAN and Angle software for better estimation of activities in low-energy gamma spectra
71. Βορβολάκος Άγγελος, 2014, Φασματοσκοπία ακτινών γ & Ανιχνευτές σπινθηρισμών , (Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων)

72. Δόξα Ο., 2018, Βαθμονόμηση Απόδοσης Ανιχνευτή Υπερκαθαρού Γερμανίου με χρήση πειραματικών και υπολογιστικών μεθόδων
73. Καρφόπουλος Κ.Λ., 2012, Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και της τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα
74. Μ.Ν. Παπαδιονυσίου, 2015, Μελέτη της απόκρισης ανιχνευτή γερμανίου πειραματικά και με τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo
75. Χαρίδημος Χ., 2014, Παραμετρική Μελέτη Υποστρώματος Ανιχνευτικών Διατάξεων Γερμανίου Με Χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης Monte-Carlo