



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΣΧΕΛΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΦΟΡΗΤΟΥ
ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
MONTE-CARLO**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του

ΣΠΑΝΙΔΗ Θ. ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Σπουδαστή της Σχολής

Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Επίβλεψη: Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Ι.Κ. Μήτσιος

ΑΘΗΝΑ 2021

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ στα πλαίσια του μαθήματος «Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα».

Επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου το θέμα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Από την εξαιρετική συνεργασία μας τόσο κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής, όσο και κατά την παρακολούθηση των μαθημάτων του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας, αποκόμισα πλήθος γνώσεων καθώς και μεγάλο ενδιαφέρον για το αντικείμενο.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ι.Κ. Μήτσιο για την καταλυτική και συνεχή συμβολή και βοήθειά του στην πραγματοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η βοήθειά του ήταν πολύτιμη και η συνεργασία μαζί του άψογη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

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

Αντώνιος Θ. Σπανίδης
Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Περίληψη

Ο φορητός ανιχνευτής BEGe της εταιρίας CANBERRA που διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ είναι κατασκευασμένος για μετρήσεις πεδίου (in-situ). Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται κατά την απόθεση ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία εκλύθηκαν έπειτα από τυχόν πυρηνικό ατύχημα.

Όπως καταλαβαίνει κανείς, η χρήση του στο πεδίο είναι σπάνια, καθώς πυρηνικά ατυχήματα δεν συμβαίνουν πολύ συχνά. Επομένως, ένας εξαιρετος ανιχνευτής, πολύ υψηλής απόδοσης τόσο σε χαμηλές, όσο και σε υψηλές ενέργειες παραμένει αναξιοποίητος. Για τον λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποφασίστηκε η κατασκευή θωρακίσεως μολύβδου, ούτως ώστε ο ανιχνευτής αυτός να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις εντός εργαστηρίου, με τρόπο παρόμοιο με τους άλλους ανιχνευτές του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Καθώς ο ανιχνευτής είχε μείνει εκτός λειτουργίας για μεγάλο χρονικό διάστημα, έπρεπε να πιστοποιηθεί η κανονική λειτουργία του και να ακολουθήσουν οι απαραίτητες βαθμονομήσεις – τόσο ενεργειακή βαθμονόμηση, όσο και βαθμονόμηση απόδοσης.

Το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή της θωρακίσεως. Πριν όμως προβούμε σε αυτή, βασιζόμενοι στην ιδιότητα των ανηχοϊκών θαλάμων να εξαλείφουν τις ηχητικές σκεδάσεις, αποφασίστηκε ο έλεγχος με τεχνικές Monte-Carlo σε διάφορες γεωμετρίες θωρακίσεως, ούτως ώστε να διαπιστωθεί αν με παρόμοιο τρόπο εξαλείφονται οι οπισθοσκεδάσεις των φωτονίων. Το πρόγραμμα PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons) ήταν εκείνο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αυτών.

Τέλος, κατασκευάστηκε η θωράκιση μολύβδου που περικλείει τον ανιχνευτή και η όλη διάταξη μελετήθηκε πειραματικά, όσον αφορά στο υπόστρωμά της και τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης.

Abstract

The portable BEGe detector of the NTUA Nuclear Engineering Laboratory (NEL) has been manufactured for field use (in-situ) in cases of surface sources. Such cases are encountered when radioactive isotopes are deposited on a ground, which have been released a nuclear or radiological accident.

As anyone can understand, the detector's use on the field is relatively rare, since nuclear accidents seldom occur. So, a detector with exceptional characteristics, such as high efficiency for both low and high photon energies, remains unused. This is the reason why, in this Thesis has been decided to design and build a lead shielding for the BEGe detector, so that the detector can be used at NEL for in vitro measurements as well.

Since the detector had not been used for quite some time, a series of quality control checks as well as calibrations had to be conducted prior to the detector use.

The next step was the design and building the detector shielding. Before that, based on the concept of anechoic chambers which eliminate the sound scattering, it has been decided to test different shielding geometries in order to determine whether backscattering could be reduced using similar techniques. To this end Monte-Carlo simulation techniques were applied, using code PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons).

Lastly, the lead shielding that encloses the portable BEGe detector was built and the whole system was experimentally tested in terms of background and detection limits.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	10
γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ	10
2.1 Φασματοσκοπική ανάλυση ακτινών-γ.....	10
2.2 Ανιχνευτές ημιαγωγών υλικών.....	11
2.2.1 Ανιχνευτές GeLi (Lithium drifted Germanium detectors)	12
2.2.2 Ανιχνευτές HPGe (High Purity Germanium detectors).....	13
2.2.3 Ο ανιχνευτής γερμανίου διευρυμένης ενεργειακής περιοχής (BEGe).....	16
2.2.4 Θωράκιση Ανιχνευτών Γερμανίου.....	18
2.2.4.1 Συνήθη υλικά θωρακίσεων ανιχνευτών γερμανίου	19
2.2.4.2 Ραδιενέργεια των υλικών μίας ανιχνευτικής διάταξης	20
2.2.4.3 Μέγεθος θωράκισης ανιχνευτή.....	21
2.3 Αλληλεπιδράσεις φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη.....	22
2.3.1 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	22
2.3.2 Η σκέδαση Compton	23
2.3.3 Η δίδυμη γένεση	25
2.3.4 Η ελαστική σκέδαση	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	29
Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO PENELOPE	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Οι μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo	29
3.3 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE 2011	30
3.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές	32
3.5 Το πρόγραμμα PENMAIN	33
3.5.1 Το αρχείο εισόδου (.in).....	34
3.5.2 Το αρχείο γεωμετρίας (.geo)	36
3.5.3 Το αρχείο υλικού (.mat)	41
3.5.4 Τα αρχεία αποτελεσμάτων.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	43
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ	43
4.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή BEGe.....	43

4.2 Διαδικασία πιστοποίησης της διακριτικής ικανότητας	44
4.2.1 Πειράματα με πηγή ⁵⁵ Fe	45
4.4.2 Πειράματα με πηγή ⁶⁰ Co	46
4.4.3 Πειράματα με πηγή ⁵⁷ Co	47
4.4.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	48
4.4.5 Διακριτική ικανότητα συναρτήσεως καναλιού και ενέργειας	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	55
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe ΚΑΙ ΚΑΤΩΤΕΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ	55
5.1 Εισαγωγή στην βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής	55
5.2 Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής	56
5.2.1 Υπολογισμός ραδιενέργειας των ισοτόπων του δείγματος	56
5.2.2 Υπολογισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφών, χωρίς τη χρήση λογισμικού	59
5.2.3 Προσδιορισμός συναρτήσεων υπολογισμού της απόδοσης για διάφορες ενέργειες φωτονίων	60
5.2.4 Υπολογισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφών μέσω πακέτων λογισμικού SPUNAL και GENIE 2000	62
5.3 Υπολογισμός των κατωτέρων ορίων ανίχνευσης της διάταξης	64
5.3.1 Κατώτερο όριο ανίχνευσης (L_D)	64
5.3.2 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (MDA)	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	68
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe	68
6.1 Εισαγωγή στους αηχοϊκούς θαλάμους	68
6.2 Μελέτη του φαινομένου της οπισθοσκεδάσεως με χρήση του κώδικα PENELOPE	71
6.2.1 Κυλινδρική θωράκιση απέναντι από κυλινδρικό ανιχνευτή	72
6.2.2 Τετράγωνη θωράκιση εμπροσθεν κυλινδρικού ανιχνευτή	80
6.2.3 Σχεδίαση θωράκισης για τον φορητό ανιχνευτή BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ	85
6.2.3 Συμπεράσματα για τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	91
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΩΡΑΚΙΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΦΟΡΗΤΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ	91
7.1 Διαδικασία κατασκευής της θωράκισης	91
7.2 Σύγκριση φασμάτων υποστρώματος χωρίς θωράκιση	93

7.3 Σύγκριση φασμάτων υποστρώματος για διάφορες θέσεις του ανιχνευτή	96
7.3.1 Εκτίμηση της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας (MDA) της ανιχνευτικής διατάξεως συναρτήσει του τρόπου τοποθέτησης της θωρακίσεως.....	99
7.4 Μελέτη της επίδρασης στο υπόστρωμα της χρήσης αερίου αζώτου εντός της θωράκιση.....	100
7.5 Μέτρηση πηγής TEL200403 στην ανιχνευτική διάταξη με και χωρίς θωράκιση	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο	106
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	106
8.1 Σύνοψη και συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας.....	106
8.2 Προτάσεις και μελλοντικά βήματα	107
Βιβλιογραφία	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	111
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΦΟΡΗΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	112
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΠΗΓΗΣ ΔΙΑΣΥΓΚΡΙΣΗΣ TEL200403	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	113
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗ	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	115
ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ .IN ΚΑΙ .GEO ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ RENELOPE	115

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο φορητός ανιχνευτής BEGe της εταιρίας CANBERRA που διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ είναι κατασκευασμένος για μετρήσεις πεδίου (in-situ). Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται για παράδειγμα κατά την απόθεση ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία εκλύθηκαν έπειτα από τυχόν πυρηνικό ή ραδιολογικό ατύχημα.

Σε προηγούμενες έρευνες, που διενεργήθηκαν από το Εργαστήριο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ), είχαν διερευνηθεί με λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή BEGe, όπως είναι η διακριτική ικανότητά του (Καρφόπουλος, 2007). Επιπλέον, ο ανιχνευτής αυτός είχε χαρακτηριστεί και σχεδιασθεί με μεγάλη ακρίβεια σε αρχείο γεωμετρίας .geo του προγράμματος PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons) (Αγραφιώτης, 2009).

Στην πλαίσια της Διπλωματικής Εργασία αυτής επιχειρήθηκε, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών, η σχεδίαση και κατασκευή θωρακίσεως μολύβδου για τον ανιχνευτή BEGe με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo. Η παρούσα ΔΕ αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου της εισαγωγής, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνική της γ-φασματοσκοπίας, με έμφαση στις in-situ μετρήσεις και παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών ημιαγωγών υλικών, όπως είναι ο ανιχνευτής BEGe, καθώς και στις θωρακίσεις ανιχνευτών γερμανίου. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, αναλύονται οι κυριότερες αλληλεπιδράσεις των φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη που ενδέχεται να ανιχνευθούν σε μια πειραματική διάταξη γ-φασματοσκοπίας.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κώδικας PENELOPE (Έκδοση του 2011) που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται όλες εκείνες οι πληροφορίες για την κατανόηση της λειτουργίας του, καθώς και τα στοιχεία του κώδικα PENMAIN που χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, αναλύονται τα αρχεία εισόδου, γεωμετρίας, υλικών αλλά και αποτελεσμάτων του προγράμματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή και η πιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας του, όπως εκφράζεται από το εύρος ημίσεως ύψους (FWHM).

Στο 5^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή, καθώς και η εύρεση τόσο του κατώτερου ορίου ανίχνευσης (L_D), όσο και της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας (MDA).

Στο 6^ο κεφάλαιο αρχικά περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι ανηχοϊκοί θάλαμοι τις ηχητικές σκεδάσεις. Εν συνεχεία, μέσω του προγράμματος PENELOPE, μελετάται η δυνατότητα κατασκευής θωρακίσεως η οποία να μειώνει τα την οπισθοσκέδαση των φωτονίων εντός της θωράκισης. Προς την κατεύθυνση αυτή δοκιμάστηκαν διάφορες ιδέες και γεωμετρίες θωράκισης

Στο 7^ο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς η διαδικασία της κατασκευής θωρακίσεως μολύβδου και στην συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση της νέας θωράκισης, καταλήγοντας σε αναφορικά με τη μείωση του υποστρώματος που επιτυγχάνεται με χρήση της θωράκισης.

Τέλος, στο 8^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας ΔΕ και προτείνονται μελλοντικά βήματα και πειράματα για περαιτέρω βελτίωση της ανιχνευτικής διατάξεως.

Η ΔΕ ολοκληρώνεται με τέσσερα Παραρτήματα στα οποία παρατίθενται κατά σειρά: το κατασκευαστικό σχέδιο του ανιχνευτή, το πιστοποιητικό της πηγής διασύγκρισης που χρησιμοποιήθηκε, το πιστοποιητικό της κατασκευάστριας εταιρίας μετά την επισκευή του και τα αρχεία πηγής (.in) και γεωμετρίας (.geo) που χρησιμοποιήθηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ

2.1 Φασματοσκοπική ανάλυση ακτινών-γ

Ως φασματοσκοπική ανάλυση ακτινών-γ ορίζεται η συλλογή και η επεξεργασία του ενεργειακού φάσματος μίας ραδιενεργού πηγής που εκπέμπει ακτινοβολία-γ. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως μια μη καταστροφική μέθοδος ανάλυσης δειγμάτων, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται τόσο ο ποιοτικός, όσο και ο ποσοτικός προσδιορισμός των ραδιενεργών ισοτόπων που εμπεριέχονται σε αυτά. Ποιοτικός προσδιορισμός ονομάζεται η διαδικασία ταυτοποίησης των γ-ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται στο προς μελέτη δείγμα. Ως ποσοτικός προσδιορισμός ορίζεται ο υπολογισμός της ραδιενέργειας των ραδιοϊσοτόπων του δείγματος. Η προαναφερθείσα διαδικασία, βασίζεται στην επεξεργασία του ενεργειακού φάσματος των γ-φωτονιακών ακτινοβολιών, οι οποίες εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των διαφόρων ραδιενεργών πυρήνων και εν συνεχεία ανιχνεύονται και καταγράφονται με τη χρήση κατάλληλου ανιχνευτικού συστήματος, σχηματίζοντας το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα. Στο ενεργειακό φάσμα σχηματίζονται αιχμές, οι οποίες ονομάζονται «φωτοκορυφές πλήρους απόθεσης ενέργειας» και προκύπτουν από την αλληλεπίδραση και την εν συνεχεία πλήρη απόθεση της ενέργειας των φωτονίων εντός του ανιχνευτή. Οι ενέργειες αυτές των φωτονίων, έχουν συγκεκριμένες τιμές, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές των ραδιοϊσοτόπων από τα οποία προέρχονται, και εξαιτίας της ιδιότητας αυτής καθίσταται εφικτός ο ποιοτικός προσδιορισμός τους. Επιπροσθέτως, το εμβαδόν της κάθε φωτοκορυφής εκφράζει το πλήθος των φωτονίων που ανιχνεύθηκαν με αρχική ενέργεια την αντίστοιχη της φωτοκορυφής. Επομένως, γνωρίζοντας το πλήθος των φωτονίων μιας ενέργειας που ανιχνεύθηκαν μπορεί να υπολογιστεί η ραδιενέργειά του στο δείγμα.

Η φασματοσκοπική ανάλυση ακτινών-γ αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων, εξαιτίας του γεγονότος ότι στην πλειονότητα τους τα ισότοπα αυτά εκπέμπουν – πέραν των άλλων ακτινοβολιών – και ακτινοβολία-γ. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η ταυτόχρονη ανάλυση όλων των γ-ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται στο εξεταζόμενο δείγμα. Το κυριότερο όμως πλεονέκτημα της φασματοσκοπικής ανάλυσης ακτινών-γ είναι ότι είναι μη-καταστροφική, καθώς δεν είναι συνήθως απαραίτητη η προετοιμασία του δείγματος πριν την ανάλυση. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι για την συγκεκριμένη τεχνική έναντι άλλων, το είδος των δειγμάτων σπανίως παίζει ρόλο, αφού, είναι δυνατή η ανάλυση πάσης καταστάσεως δειγμάτων (στερεά, υγρά ή αέρια).

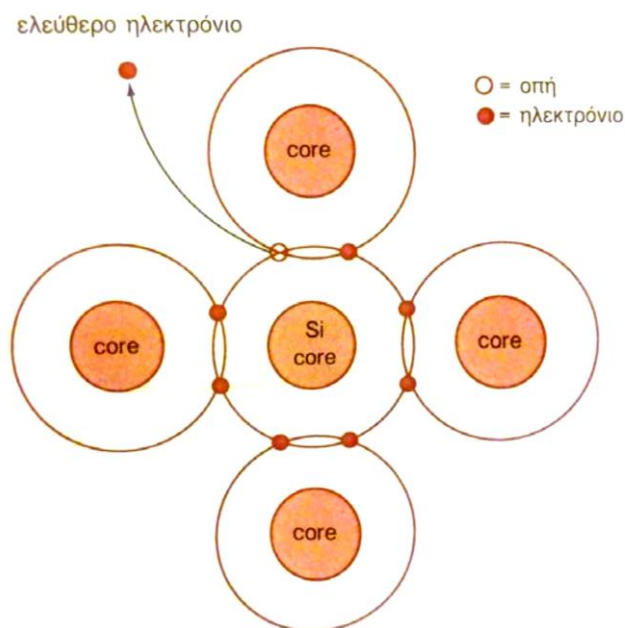
2.2 Ανιχνευτές ημιαγωγών υλικών

Ανιχνευτές ημιαγωγών ορίζονται οι ανιχνευτές που ως μέσο αλληλεπίδρασης με τις πυρηνικές ή ατομικές ακτινοβολίες διαθέτουν ημιαγωγό υλικό. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι γνωστοί σήμερα και ως ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, παρά το γεγονός ότι με τον όρο αυτό θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι συμπεριλαμβάνονται και οι ανιχνευτές σπινθηρισμών, που χρησιμοποιούν ανόργανους ή οργανικούς κρυστάλλους. Η τεχνολογία των ανιχνευτών ημιαγωγών έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και έχει φθάσει σήμερα σε υψηλά επίπεδα αποδόσεως και τελειότητας. Μερικοί από τους κυριότερους ανιχνευτές ημιαγωγών που θα αναλυθούν στην συνέχεια είναι οι ανιχνευτές GeLi και HPGe. (ΛΕΩΝΙΔΟΥ, 1990).

Οι ανιχνευτές ημιαγωγών υλικών είναι ουσιαστικά μία ανάστροφα πολωμένη δίοδος με δομή επαφών p-i-n, στην οποία η εγγενής περιοχή (intrinsic) είναι ευαίσθητη στην ιοντίζουσα ακτινοβολία, όπως ακτίνες-X και ακτίνες-γ ή και σωματίδια, ανάλογα με το είδος του υλικού του ανιχνευτή (συνήθως αποτελείται ημιαγωγό υλικό γερμάνιο). Κατά την είσοδο της ακτινοβολίας στον ανιχνευτή παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών (Σχήμα 2.1) στον κρύσταλλο του γερμανίου, και το παραγόμενο φορτίο συλλέγεται από τα επιφανειακά ηλεκτρόδια του κρυστάλλου. Το ποσό της αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή είναι ανάλογο του δημιουργούμενου ηλεκτρικού σήματος, δηλαδή του αριθμού των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Ο ανιχνευτής πολώνεται αντίστροφα και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της εγγενούς περιοχής, υπό την επίδραση του οποίου οι οπές και τα ηλεκτρόνια κινούνται έως τα ηλεκτρόδια, όπου το συνολικό φορτίο που συλλέγεται προκαλεί παλμό τάσης και μπορεί να μετρηθεί από εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Επειδή όμως, το ποσό ενέργειας που απαιτείται για τη δημιουργία ενός ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου είναι γνωστό και ανεξάρτητο από την ενέργεια εκπομπής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η μέτρηση του πλήθους των ζευγών ηλεκτρικών φορέων και εντέλει το ύψος του παλμού τάσεως που παράγεται, επιτρέπει τον προσδιορισμό της ενέργειας που εναποτίθεται στον ανιχνευτή από την εν λόγω ακτινοβολία.

Η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής στους ανιχνευτές ημιαγωγών είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη που απαιτείται ώστε να παραχθεί ένα ζεύγος ιόντων στους ανιχνευτές αερίου (π.χ. Geiger-Müller). Επομένως, ο αριθμός των παραγόμενων φορέων στους ανιχνευτές ημιαγωγών είναι αρκετά μεγαλύτερος και συνεπώς η στατιστική διακύμανση του ύψους του παλμού είναι μικρότερη. Το παραπάνω γεγονός οδηγεί τελικά σε υψηλότερη διακριτική ικανότητα των ημιαγωγών ανιχνευτών. Επιπροσθέτως, κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων εντός του ημιαγώγιμου υλικού επιτυγχάνεται η γρήγορη συλλογή του πλήθους των φορέων που παράγονται εξαιτίας μίας αλληλεπίδρασης και ο σχηματισμός του αντίστοιχου παλμού τάσεως, γεγονός που προσδίδει πολύ καλή χρονική ανάλυση, η οποία εξαρτάται από το χρόνο απόκρισης του μετρητικού οργάνου. Τέλος, η πυκνότητα του υλικού του ημιαγωγού ανιχνευτή – συγκριτικά με τους ανιχνευτές ιονισμού αερίου – είναι υψηλότερη και επομένως τόσο οι ακτίνες υψηλών

ενεργειών, όσο και τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν να εναποθέσουν πλήρως την ενέργειά τους σε ένα μικρών διαστάσεων ημιαγωγό.



Σχήμα 2.1: Δημιουργία ζεύγους οπής - ελεύθερου ηλεκτρονίου (Malvino A.P., 2006)

2.2.1 Ανιχνευτές GeLi (Lithium drifted Germanium detectors)

Με τον συμβολισμό **GeLi** χαρακτηρίζεται ένας τύπος ημιαγωγού ανιχνευτή, όπου στον κρύσταλλο γερμανίου (Ge) του ανιχνευτή γίνεται αντιστάθμιση των προσμίξεων (ακαθαρσιών) που υπάρχουν με ιόντα λιθίου (Li). Πρόκειται για τους πρώτους ανιχνευτές ακτινοβολιών που κατασκευάστηκαν με χρήση ημιαγωγού υλικού στην δεκαετία του 1960, και σήμερα πλέον δεν κατασκευάζονται, καθώς η νεότερης γενιάς ημιαγωγοί ανιχνευτές που χαρακτηρίζονται με τη γενική ονομασία «ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου» (High Purity Germanium detectors, HPGe) έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες. Ο ανιχνευτής GeLi κατασκευάζονταν με εναπόθεση των ιόντων Li στον κρύσταλλο γερμανίου. Η διαδικασία αυτή προκαλεί τη δημιουργία μίας περιοχής αντιστάθμισης πάχους 5-10mm, η οποία λειτουργεί ως ευαίσθητη περιοχή για την ανίχνευση της ακτινοβολίας. Στη θερμοκρασία περιβάλλοντος τα ιόντα Li μέσα στον κρύσταλλο Ge παρουσιάζουν μεγάλη ευκινησία, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της περιοχής αντισταθμίσεως και την αλλαγή των χαρακτηριστικών του ανιχνευτή. Για την επίτευξη σταθερής περιοχής αντισταθμίσεως, ο ανιχνευτής GeLi, αμέσως μετά την κατασκευή του, ψύχεται με υγρό άζωτο και πρέπει να παραμένει συνεχώς υπό ψύξη με την χρήση κατάλληλου κρυοστάτη. Ένα επιπλέον μειονέκτημα των ανιχνευτών GeLi είναι το σχετικά μεγάλο πάχους ανενεργό στρώμα του ανιχνευτή (dead layer) και το κατασκευασμένο από Al παράθυρο του κρυοστάτη, το οποίο μειώνει σημαντικά την ικανότητα ανίχνευσης φωτονίων χαμηλών ενεργειών.

2.2.2 Ανιχνευτές HPGe (High Purity Germanium detectors)

Οι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου αποτελούν την πιο εξελιγμένη κατηγορία ανιχνευτών ημιαγώγιμων υλικών, καθώς σε αντίθεση με τους ανιχνευτές τύπου GeLi δεν χρειάζονται – θεωρητικά – συνεχή ψύξη με υγρό άζωτο ώστε να μη μεταβληθεί η περιοχή αντιστάθμισης. Πιο συγκεκριμένα, στους ανιχνευτές **HPGe** απαιτείται ψύξη μόνο κατά τη λειτουργία τους και όσο βρίσκονται υπό υψηλή τάση, με σκοπό την μείωση του ηλεκτρονικού θορύβου, γεγονός που καθιστά την χρήση τους αισθητά ευκολότερη. (ΛΕΩΝΙΔΟΥ, 1990, σ. 298). Πάντως, ομοίως και για τους ανιχνευτές αυτούς, μία καλή πρακτική είναι να διατηρούνται κατά το δυνατόν υπό ψύξη συνεχώς. Παρότι οι HPGe ονομάζονται ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου, στην πραγματικότητα περιέχουν μικρά ίχνη προσμίξεων που δεν μπορούν να αφαιρεθούν από τον κρύσταλλο Ge. Για το λόγο αυτό, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τις προσμίξεις τους (ακαθαρσίες – impurities):

- 1) Στους ανιχνευτές τύπου “p” (p-type), οι οποίοι περιέχουν παραμένουσες προσμίξεις από στοιχεία με σθένος 3 (π.χ. ίνδιο, βόριο ή γάλλιο),
- 2) Στους ανιχνευτές τύπου “n” (n-type), οι οποίοι περιέχουν παραμένουσες προσμίξεις από στοιχεία με σθένος 5 (π.χ. αρσενικό, φωσφόρος ή αντιμόνιο).

Κατά την φάση της κατασκευής του ανιχνευτή, για την αντιστάθμιση των προσμίξεων στον αρχικό κρύσταλλο, εναποτίθενται στην επιφάνεια του κρυστάλλου, στοιχεία που σχηματίζουν επαφές τύπου “n” στους p-type κρυστάλλους και αντίστοιχα επαφές τύπου “p” στους n-type κρυστάλλους. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται δύο τύποι ανιχνευτών HPGe: οι ανιχνευτές τύπου n και οι ανιχνευτές τύπου p.

Λόγω του τρόπου κατασκευής των ανιχνευτών αυτών, ο ανιχνευτή γερμανίου χωρίζεται στις ακόλουθες δύο περιοχές:

- 1) Την ενδογενή (intrinsic region) ή ενεργή περιοχή του ανιχνευτή, όπου πραγματοποιείται ολοκληρωμένη αντιστάθμιση των προσμίξεων και δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς φορτίου. Στην περιοχή αυτή παράγεται σήμα, από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας (ακτινών-γ ή ακτινών-X), με αποτέλεσμα την ανίχνευση της συγκεκριμένης ακτινοβολίας.
- 2) Τη νεκρή ή ανενεργή (inactive germanium layer ή dead layer) περιοχή του ανιχνευτή, όπου οι προσμίξεις δεν έχουν αντισταθμιστεί και συνήθως περιβάλλει την ενδογενή περιοχή. Στην περιοχή αυτή, δεν είναι εφικτή η ανίχνευση φωτονίων.

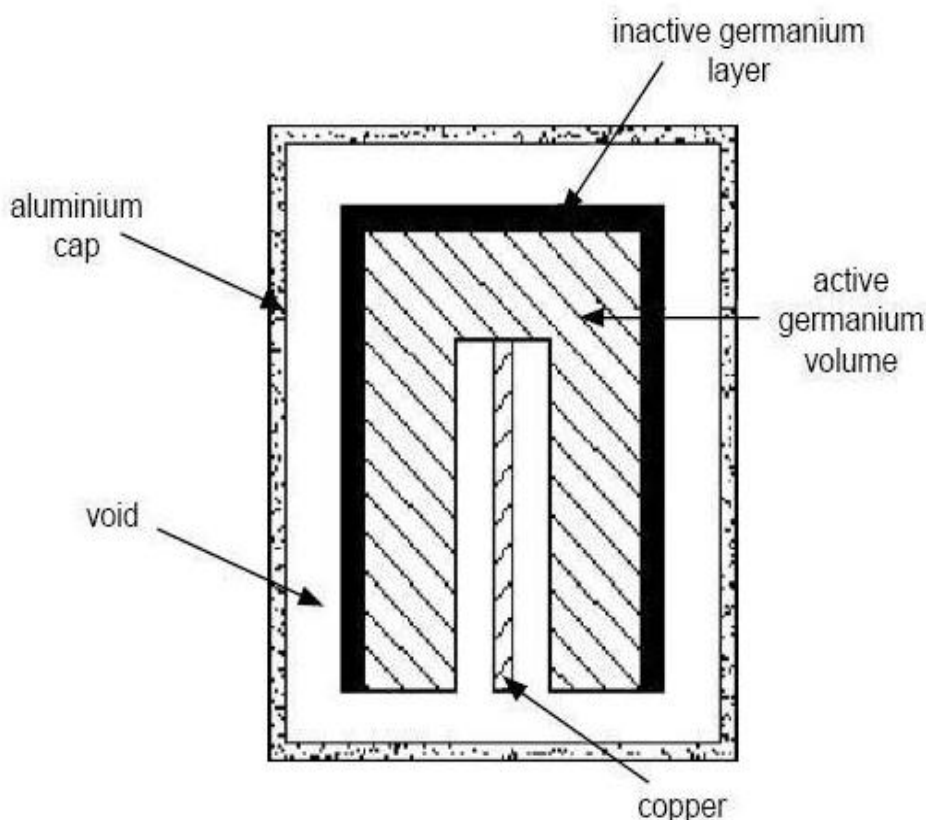
Στο Σχήμα 2.2 που ακολουθεί διακρίνονται οι περιοχές μέσα σε έναν ανιχνευτή Ge.

2.2.2.1 Ανιχνευτές τύπου “p” και τύπου “n”

Οι ανιχνευτές τύπου “p” είναι οικονομικότεροι από τους αντίστοιχους “n”. Εξαιτίας όμως της μεθοδολογίας που ακολουθείται για τη διαμόρφωση του ανιχνευτή, διαθέτουν μεγαλύτερο dead layer (μέχρι 0.5 mm) που περιβάλλει τον κρύσταλλο του γερμανίου. Για αυτό το λόγο οι ανιχνευτές τύπου “p” υστερούν ως προς την ανίχνευση φωτονίων

χαμηλών ενεργειών, καθώς ένα μεγάλο ποσοστό τους αλληλεπιδρούν στο dead layer και επομένως δεν ανιχνεύονται.

Αντιθέτως, το dead layer των ανιχνευτών τύπου “n” είναι μικρότερο, γεγονός που συνεπάγεται την επιτυχή ανίχνευση φωτονίων με ενέργειες ακόμα και μικρότερες των 5 keV. Επομένως, για την επιτυχή ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, όπως αυτά του ^{210}Pb (46.5 keV) και του ^{241}Am (59.5 keV), προκρίνεται η χρήση ανιχνευτή τύπου “n”. (Αγραφιώτης, 2009)



Σχήμα 2.2: Ανιχνευτής HPGe σε τομή (Canberra Industries, 2003)

2.2.2.2 Κυριότεροι τύποι ανιχνευτών υπερκαθαρού γερμανίου

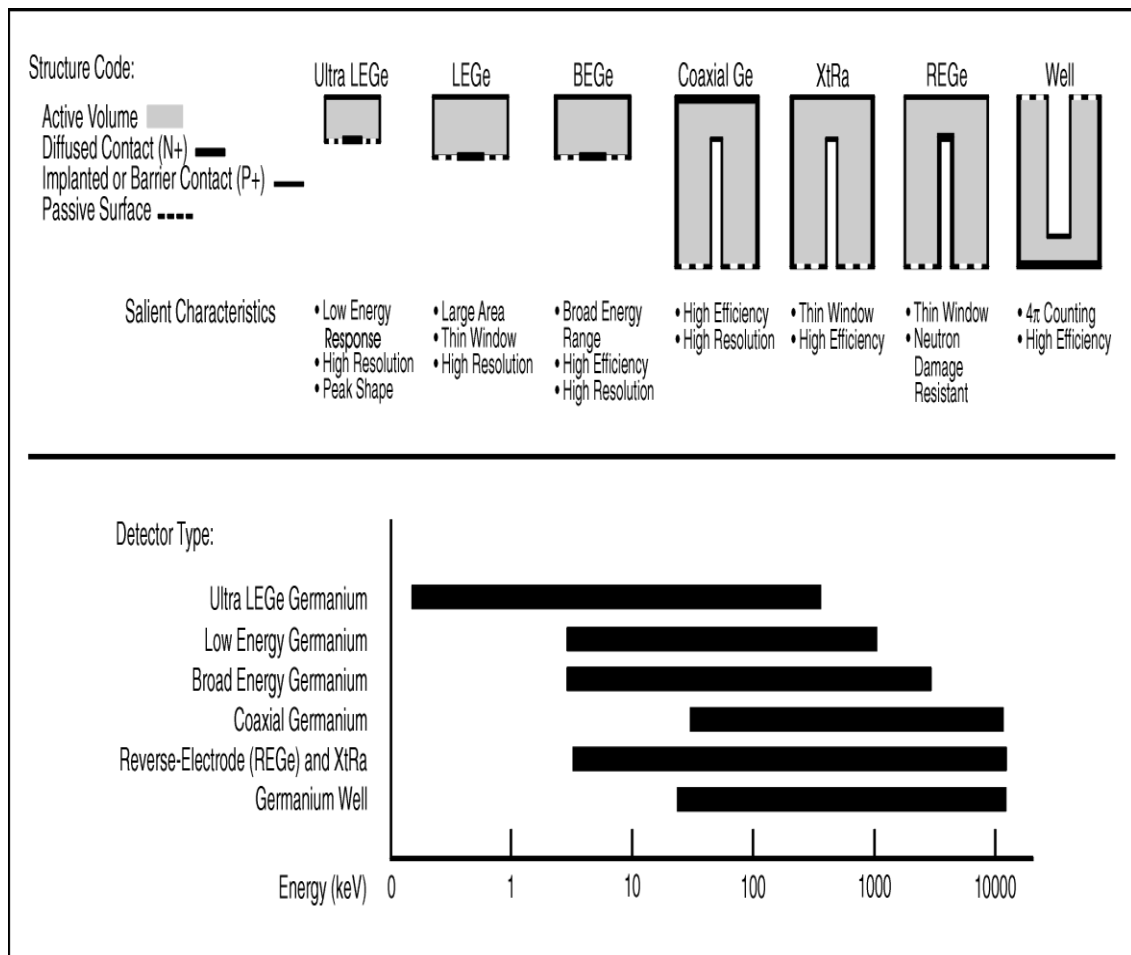
Ανάλογα με τον τύπο του κρυστάλλου του γερμανίου (p ή n), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κρυστάλλου και άλλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ανιχνευτή, όπως το είδος και το πάχος του παραθύρου του κρυστάλλου έχει κατασκευαστεί μία μεγάλη ποικιλία ανιχνευτών, όπως:

- Ανιχνευτής χαμηλών ενεργειών (Low Energy Germanium, LEGe)
- Ανιχνευτής εξαιρετικά χαμηλών ενεργειών (Ultra-LEGe)
- Ομοαξονικός ανιχνευτής (Coaxial¹ Ge)

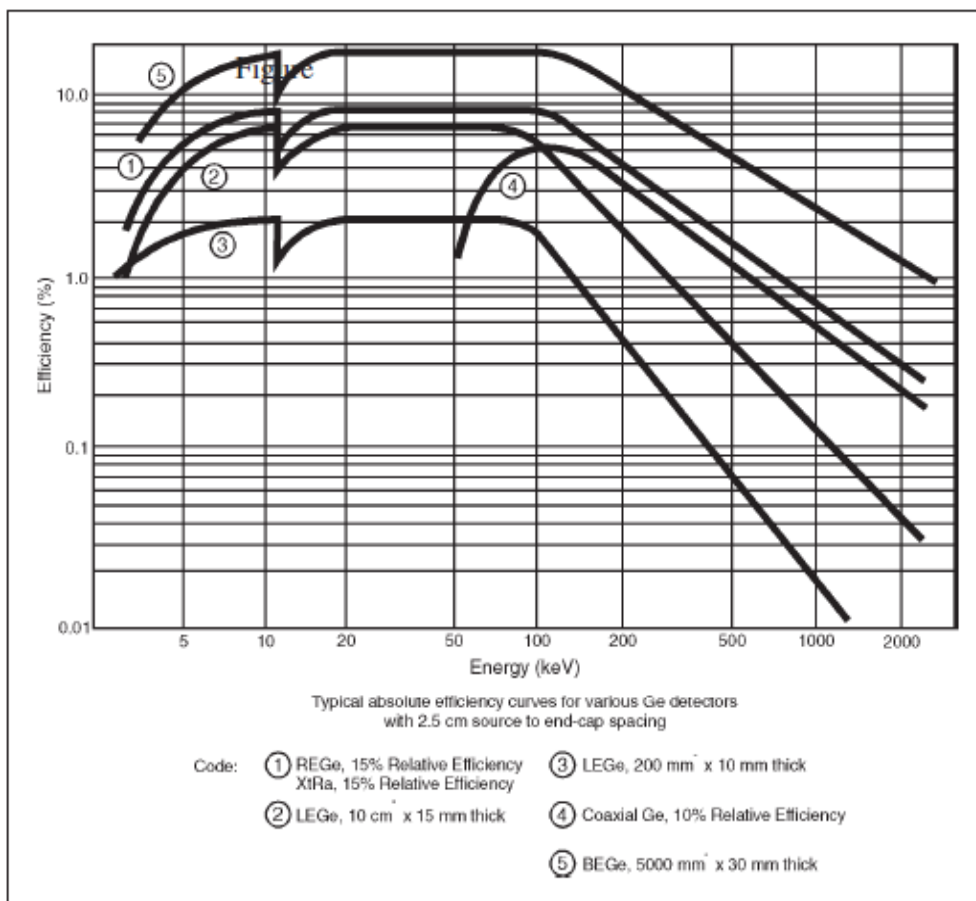
¹ Παρόλο που όλοι οι ανιχνευτές Ge είναι στην πραγματικότητα ομοαξονικοί (Coaxial), έχει επικρατήσει να αποκαλούνται Coaxial-Ge οι ανιχνευτές αυτοί που δεν ανήκουν σε καμία από τις υπόλοιπες «ιδιαίτερες» κατηγορίες

- Ανιχνευτής ανεστραμμένων ηλεκτροδίων (Reverse Electrode Germanium), REGe)
- Ανιχνευτής εκτεταμένου εύρους (Extended Range Germanium, XtRa)
- Ανιχνευτής τύπου φρέατος (Ge Well)
- Ανιχνευτής διευρυμένης ενεργειακής περιοχής (Broad Energy Germanium, BEGe)

Στο Σχήμα 2.3 που ακολουθεί διακρίνονται οι διάφορες γεωμετρίες των προαναφερθέντων ανιχνευτών, καθώς και η ενεργειακή περιοχή που αυτοί καλύπτουν. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.4 παρατίθενται οι τυπικές καμπύλες απόδοσης των ανιχνευτών αυτών για γεωμετρία σημειακής πηγής σε απόσταση 2.5cm από τον ανιχνευτή. Από τα σχήματα αυτά γίνεται φανερό ότι κάθε ανιχνευτής είναι βέλτιστος για την ανίχνευση της ακτινοβολίας σε μία ορισμένη περιοχή ενεργειών. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας μελετάται αποκλειστικά ο ανιχνευτής τύπου **BEGe** και ειδικότερα ο φορητός ανιχνευτής τύπου BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.



Σχήμα 2.3: Γεωμετρίες και εύρος ενεργειών ανιχνευτών Ge (Canberra Industries, 2003)



Σχήμα 2.4: Καμπύλες απόλυτης απόδοσης για διάφορους ανιχνευτές Ge (Canberra Industries, 2003)

2.2.3 Ο ανιχνευτής γερμανίου διευρυμένης ενεργειακής περιοχής (BEGe)

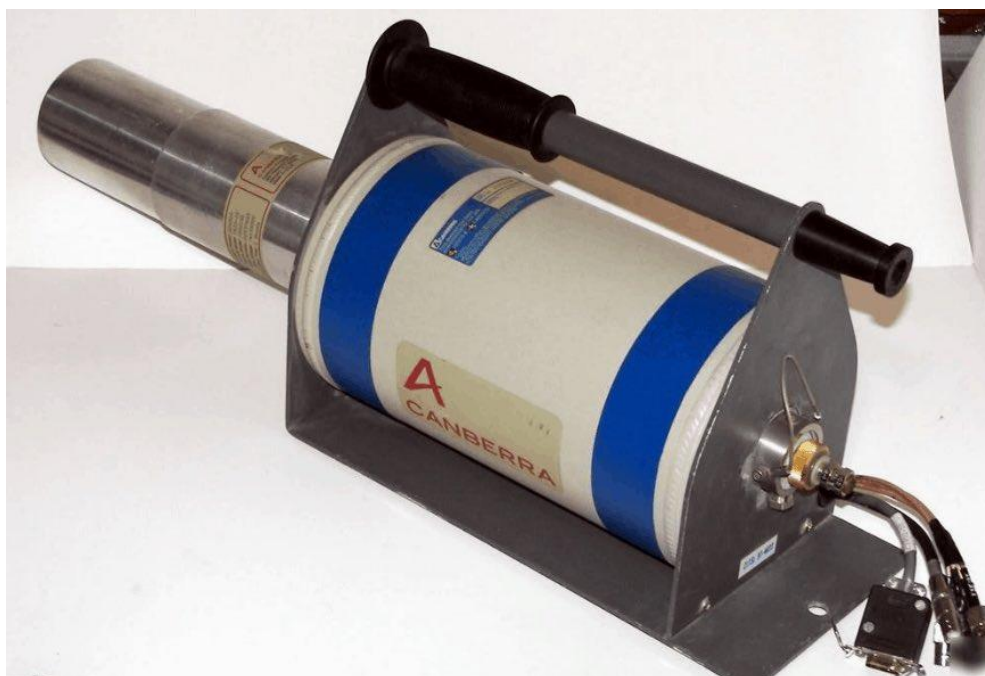
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο ανιχνευτής BEGe αποτελεί μια υποκατηγορία των ανιχνευτών HPGe. Χαρακτηριστικό του γνώρισμα αποτελεί η κάλυψη μεγάλου ενεργειακού εύρους, το οποίο ξεκινάει από τα 3 KeV και φτάνει μέχρι τα 3 MeV. Η διακριτική του ικανότητα στις χαμηλές ενέργειες ομοιάζει με αυτή των ανιχνευτών LEGe, ενώ στις υψηλές με αυτή των ομοαξονικών ανιχνευτών (Coaxial Ge). Κατά την συνδυασμένη χρήση του ανιχνευτή με τον προενισχυτή του, παρατηρείται βέλτιστη λειτουργία για ενεργειακό ρυθμό μικρότερο των 40000 MeV/sec.

Μορφολογικά, ο ανιχνευτής BEGe έχει κυλινδρικό σχήμα μεγάλης ακτίνας και μικρού πάχους. Αυτό οδηγεί σε βέλτιστη απόδοση για τα συνήθους γεωμετρίας δείγματα, στο ενεργειακό εύρος που πραγματοποιούνται οι περισσότερες αναλύσεις γ-φασματοσκοπίας. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής παρουσιάζει χαμηλότερο υπόβαθρο (background) σε σχέση με τους ομοαξονικούς, καθώς – λόγω του σχετικά μικρού του πάχους – διαπερνάται ευκολότερα από το υψηλής ενέργειας υπόβαθρο κοσμικής προέλευσης και τα υψηλής ενέργειας γ-σωματίδια φυσικών ραδιοϊσοτόπων (π.χ. ^{40}K και ^{208}Tl).

Επιπροσθέτως, ο ανιχνευτής BEGe έχει σχεδιαστεί με τρόπο τέτοιο, που να παρουσιάζει υψηλή διακριτική ικανότητα, κυρίως στις χαμηλές ενέργειες. Αυτό επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο με την κατάλληλη σχεδίαση των ηλεκτρικών επαφών, από τις οποίες δημιουργείται η πόλωση του ανιχνευτή.

Τυπικές εφαρμογές στις οποίες πλεονεκτεί ο ανιχνευτής BEGe είναι:

1. Στην εσωτερική δοσιμέτρηση, κατά την οποία παρέχει την απαραίτητη υψηλή διακριτική ικανότητα και το χαμηλό υπόβαθρο, για την εξέταση της πνευμονικής επιβάρυνσης εξαιτίας ακτινίδων (actinide lung burden analysis).
2. Στον υπολογισμό της ολικής δόσης σώματος ασθενούς, λόγω της απόδοσης και της διακριτικής ικανότητας στις υψηλές ενέργειες.
3. Στην ανάλυση αποβλήτων, προερχόμενων κυρίως από πυρηνικές διεργασίες.
4. Στο σχήμα 2.5 διακρίνεται ένας φορητός ανιχνευτής BEGe, κατάλληλος για επιτόπιες (in situ) μετρήσεις.



Σχήμα 2.5: Ανιχνευτής BEGe που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

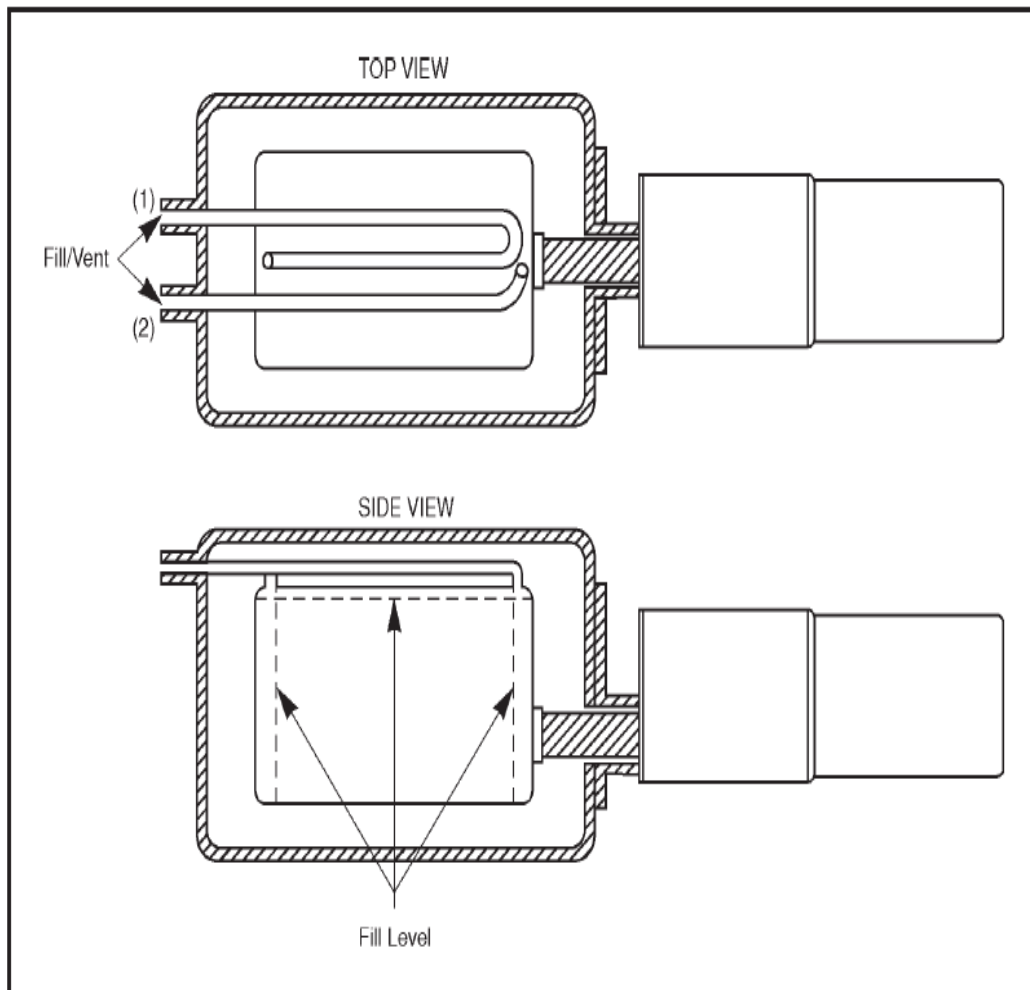
2.2.3.1 Κρυοστάτες πολλαπλών στάσεων (MAC)

Οι κλασικοί φορητοί ανιχνευτές διαθέτουν δύο οπές πλήρωσης υγρού αζώτου και εκτόνωσης αερίου, οι οποίες επιτρέπουν την τοποθέτηση των ανιχνευτών σε οποιοδήποτε προσανατολισμό. Η διάταξη των οπών πλήρωσης και εκτόνωσης φαίνονται στο Σχήμα 2.6. Ανάλογα με την διεύθυνση που έχει στηθεί ο ανιχνευτής, πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετική οπή για την πλήρωσή του.

- Με τον ανιχνευτή σε οριζόντια θέση, οποιαδήποτε οπή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πλήρωση.
- Με τον ανιχνευτή στραμμένο προς τα κάτω, η οπή 2 χρησιμοποιείται για την πλήρωσή του.

- Με τον ανιχνευτή στραμμένο προς τα πάνω η οπή 1 χρησιμοποιείται για την πλήρωσή του.

Οι κρουστάτες είναι διαθέσιμοι σε διάφορα μεγέθη και μπορούν να λειτουργήσουν δίχως με μία πλήρωση αζώτου από μια έως πέντε μέρες. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το διαστασιολογημένο μηχανολογικό σχέδιο της ανιχνευτικής διάταξης που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ.



Σχήμα 2.6: Σκαρίφημα ανιχνευτή BEGe σε τομή (Canberra Industries, 2003)

2.2.4 Θωράκιση Ανιχνευτών Γερμανίου

Εξαιτίας της ακτινοβολίας κοσμικής προέλευσης που διαπερνά την ατμόσφαιρα της γης, αλλά και της φυσικής ραδιενέργειας που βρίσκεται στο περιβάλλον, όπως η ραδιενέργεια του εδάφους, των οικοδομικών υλικών και το ραδόνιο της ατμόσφαιρας, όλοι οι ανιχνευτές καταγράφουν και ακτινοβολία η οποία δεν προέρχεται από την

εξεταζόμενη πηγή². Η ακτινοβολία αυτή, ονομάζεται ακτινοβολία υποβάθρου (background) και διαφέρει ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του ανιχνευτή. Όπως γίνεται κατανοητό, η ακτινοβολία υποβάθρου είναι επιθυμητό να μειώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο, ούτως ώστε να είναι δυνατόν να γίνονται μετρήσεις χαμηλής ενεργότητας (activity). Για το λόγο αυτό η πλειοψηφία των ανιχνευτών (πέραν αυτών του πεδίου), διαθέτει κάποιου είδους θωράκιση, ούτως ώστε να περιορίζει την ανίχνευση της ακτινοβολίας υποβάθρου. Συνήθως, η θωράκιση αυτή έχει εσωτερική επένδυση από μια σειρά στρωμάτων μικρού πάχους, από διάφορα υλικά (όπως Cu, Sb, Al), με σταδιακά μειούμενο ατομικό αριθμό Z, που στόχο έχουν να θωρακίσουν τον ανιχνευτή από τις ακτίνες-X που παράγονται στο υλικό της θωράκισης, κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας της πηγής με αυτήν. Τέλος, πέραν της φυσικής ραδιενέργειας και της κοσμικής ακτινοβολίας η θωράκιση προστατεύει και από την ανίχνευση ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από άλλη πηγή που μπορεί να ευρίσκεται εντός του εργαστηρίου.

2.2.4.1 Συνήθη υλικά θωρακίσεων ανιχνευτών γερμανίου

Για την κατασκευή θωρακίσεων συνήθως χρησιμοποιούνται τα παρακάτω υλικά, ανάλογα με τη διαθεσιμότητά τους:

- **Μόλυβδος:** Υλικό μεγάλου ατομικού βάρους (207.2 g/mol) και υψηλής πυκνότητας (11.34 g/cm³), το οποίο είναι το πιο διαδεδομένο υλικό θωράκισης ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας. Εξαιτίας της πυκνότητάς του, μια θωράκιση λίγων εκατοστών μπορεί να προσφέρει μεγάλη μείωση του υποβάθρου, περιορίζοντας τόσο την κοσμική ακτινοβολία, όσο και την ακτινοβολία λόγω της ραδιενέργειας περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, για μεγάλα πάχη θωράκισης μολύβδου (>10 cm), καταγράφεται υπόστρωμα το οποίο είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του μολύβδου με την κοσμική ακτινοβολία. Ο μολύβδος που είναι διαθέσιμος στο εμπόριο συναντάται συνήθως σε μορφή τούβλων και περιέχει προσμίξεις, όπως ίχνη ραδιενεργών ισοτόπων που προέρχονται από πυρηνικές δοκιμές ή πυρηνικά/ραδιολογικά ατυχήματα. Για το λόγο αυτό, προτιμάται η χρήση μολύβδινης θωράκισης που έχει υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, για την αφαίρεση των προσμίξεων αυτών, ή θωράκισης που έχει κατασκευαστεί από υλικό που είναι διαθέσιμο πριν την πραγματοποίηση των πρώτων πυρηνικών δοκιμών. Ακόμα και μετά την επεξεργασία αυτή, η μολύβδινη θωράκιση ενδέχεται να εμπεριέχει ραδιενεργά ισότοπα του θορίου, όπως επίσης και αξιόλογη ποσότητα του ραδιενεργού ισοτόπου ²¹⁰Pb. Το ραδιενεργό αυτό ισότοπο του μολύβδου εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 46.5 keV και έχει χρόνο ημιζωής T_{1/2} = 22.2 χρόνια. Παρόλα αυτά, οι ποσότητες όλων των παραπάνω μη επιθυμητών ισοτόπων δεν είναι σημαντικές σε καλά επεξεργασμένες θωρακίσεις.

² Εξυπακούεται ότι στους φορητούς ανιχνευτές, όταν αυτοί μετράνε στο πεδίο, η πηγή ακτινοβολίας είναι ακριβώς το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Κατά συνέπεια δεν έχει νόημα η έννοια ακτινοβολία υποβάθρου.

- **Χάλυβας:** Υλικό που χρησιμοποιείται για θωράκιση ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας, σε περιπτώσεις που η αγορά μολύβδου δεν είναι εφικτή. Σε αυτή την περίπτωση συνήθως περιβάλλει μια λεπτότερη στρώση μολύβδινης θωράκισης, ούτως ώστε να μειώνεται το συνολικό κόστος κατασκευής και ταυτόχρονα να αποκόπτεται η κοσμική ακτινοβολία. Όπως και στην περίπτωση του μολύβδου, είναι επιθυμητή η χρήση χάλυβα κατασκευασμένου πριν τις πρώτες πυρηνικές δοκιμές, διότι ο νεότερος χάλυβας ενδέχεται να περιέχει ίχνη τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων (π.χ. ^{60}Co) που επηρεάζουν τις μετρήσεις γ-ακτινοβολίας.
- **Σκυρόδεμα:** Υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή θωρακίσεων για ανιχνευτές μεγάλου μεγέθους, εξαιτίας της προσιτής τιμής του. Λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης ^{40}K που περιέχει, το σκυρόδεμα πάντοτε περιβάλλει εξωτερικά κάποιο άλλο στρώμα θωράκισης (μόλυβδο, χάλυβα κ.α.). Επειδή όμως απαιτούνται υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό Z για την θωράκιση της γ-ακτινοβολίας, συχνά χρησιμοποιείται ειδικού τύπου σκυρόδεμα (barytes concrete).
- **Βολφράμιο:** Υλικό επίσης μεγάλου ατομικού βάρους (183.85 g/mol) και μεγαλύτερης πυκνότητας (19.26 g/cm³) σε σχέση με τον μολύβδο. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή μικρών θωρακίσεων, όταν είναι ζητούμενο το όσο το δυνατό μικρότερο πάχος θωράκισης. Καθώς η επεξεργασία του υλικού είναι δύσκολη, συνήθως χρησιμοποιείται υπό μορφής σκόνης. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται κράματα βολφραμίου με άλλα μέταλλα, όπως Ni, Fe και Cu. Όμως και στην περίπτωση αυτή, η επεξεργασία των παραπάνω κραμάτων αποτελεί πρόκληση. (Χαϊντούτης, 2014). Σε κάθε περίπτωση το κόστος τέτοιων θωρακίσεων είναι πολύ υψηλό.

2.2.4.2 Ραδιενέργεια των υλικών μίας ανιχνευτικής διάταξης

Η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια των ευρέως χρησιμοποιούμενων υλικών μίας ανιχνευτικής διατάξεως οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μικρή συγκέντρωση φυσικών στοιχείων όπως το K, το Th, το U, που έχουν ραδιενεργά ισότοπα, όπως και στοιχείων των ραδιενεργών σειρών του ^{232}Th και του ^{238}U . Πιο συγκεκριμένα, το φυσικό K αποτελείται από 0.012% ^{40}K , με χρόνο ημιζωής 1.26×10^9 χρόνια, το οποίο εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 1460 keV. Το K εντοπίζεται πολύ συχνά στο τσιμέντο, καθώς και σε άλλα οικοδομικά υλικά. Εξαιτίας της εξαιρετικά διαδεδομένης χρήσης τέτοιων υλικών, τα εκπεμπόμενα φωτόνια είναι αναμενόμενο να ανιχνεύονται συχνά στα φάσματα υποστρώματος. Άλλα, συχνώς ανιχνεύσιμα ισότοπα είναι τα ^{234}Th , ^{210}Pb όπως επίσης και τα θυγατρικά των σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th .

Πέραν των ισοτόπων φυσικής προέλευσης είναι δυνατή η ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία είναι κατάλοιπα ατυχημάτων και πυρηνικών δοκιμών, με βασικότερο το ^{137}Cs .

Για τα περισσότερα από τα άλλα υλικά μιας ανιχνευτικής διατάξεως, το ποσοστό συνεισφοράς τους στο υπόστρωμα του φάσματος εξαρτάται από το βαθμό καθαρότητάς τους. Στις ορισμένες περιπτώσεις, το ενεργό υλικό που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση είναι αυτό που δημιουργεί ανεπιθύμητο φασματικό υπόστρωμα. Παρόλα αυτά στους ανιχνευτές γερμανίου, εξαιτίας του γεγονότος ότι το γερμάνιο απαιτείται να είναι πάρα πολύ υψηλής καθαρότητας, δεν παρατηρούνται τέτοια προβλήματα. Συχνά, ο αέρας γύρω από τον ανιχνευτή είναι δυνατόν να συνεισφέρει στο υπόβαθρο. Παραδείγματος χάριν, τα αέρια ^{222}Rn και το ^{220}Rn που προέρχονται από το έδαφος και από τα οικοδομικά υλικά παράγουν γ-ραδιενεργά θυγατρικά ισότοπα τα οποία διεισδύουν εντός της θωράκισης του ανιχνευτή και αποτελούν μια από τις σημαντικότερες πηγές υποστρώματος. Μάλιστα, το παραπάνω πρόβλημα εντείνεται καθώς η συγκέντρωσή των αερίων αυτών παρουσιάζει χρονική κύμανση. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού συχνά μέσα στη θωράκιση της διάταξης διοχετεύεται αέριο χωρίς ραδόνιο (π.χ. η εξάτμιση του υγρού αζώτου του ανιχνευτή).

2.2.4.3 Μέγεθος θωράκισης ανιχνευτή

Ένα εκ των βασικών θεμάτων που τίθενται κατά την κατασκευή ή την αγορά θωρακίσεων για ανιχνευτές γερμανίου, είναι η εύρεση των κατάλληλων διαστάσεων, ούτως ώστε να βελτιστοποιείται η εκτέλεση των επιθυμητών πειραμάτων.

Η επιλογή μικρού μεγέθους θωράκισης προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Απαιτεί λιγότερο υλικό θωράκισης και κατά συνέπεια έχει χαμηλότερο κόστος, αλλά και μικρότερο βάρος που μπορεί να είναι μία σημαντική παράμετρος.
- Δημιουργεί μικρό διαθέσιμο εσωτερικό χώρο, εντός του οποίου εισέρχεται αέρας αλλά και ραδόνιο. Η μικρή αυτή ποσότητα ραδονίου – και κατά συνέπεια και των θυγατρικών του – που υπάρχει εντός της θωράκισης οδηγεί σε χαμηλό υπόστρωμα που οφείλεται στις φωτοκορυφές των θυγατρικών του ραδονίου.

Αντίθετα, η επιλογή θωράκισης μεγάλου μεγέθους, προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Μείωση του φαινομένου της οπισθοσκέδασης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το δείγμα που αναλύεται, καθώς τα τοιχώματα της θωράκισης απέχουν περισσότερο από τον ανιχνευτή αλλά και το δείγμα.
- Δυνατότητα ανάλυσης δειγμάτων διαφόρων μεγεθών και γεωμετριών οι οποίες μπορούν να εισέλθουν με ευκολία εντός του διαθέσιμου χώρου μεταξύ ανιχνευτή και θωράκισης.
- Παρέχει τη δυνατότητα τοποθέτησης εντός της θωράκισης συστημάτων αναβάθμισης της ανιχνευτικής διατάξεως, όπως συστήματα Compton Suppression και για Gamma-Gamma Coincidence.

2.3 Αλληλεπιδράσεις φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη

Ως φωτονιακές³ ακτινοβολίες χαρακτηρίζονται οι ακτίνες-Χ και οι ακτίνες-γ. Οι ακτίνες αυτές είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και διαφέρουν μόνο ως προς την προέλευση. Ακτίνες-Χ ονομάζονται εκείνες που εκπέμπονται κατά την επιβράδυνση ηλεκτρονίων μεγάλης ταχύτητας στο πεδίο πυρήνα, ή κατά την αποδιέγερση διεγερμένων ατόμων. Αντίθετα, ακτίνες-γ ονομάζονται εκείνες που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση διεγερμένων πυρήνων ή κατά το φαινόμενο της εξαύλωσης. (Λεωνίδου, 1984). Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση η ανίχνευση της ακτινοβολίας από το ανιχνευτικό σύστημα γίνεται μετά την αλληλεπίδρασή της με το ανιχνευτικό σύστημα και την παραγωγή σχετικού ηλεκτρικού σήματος. Είναι λοιπόν προφανές ότι δεν είναι δυνατή η μελέτη του φάσματος των ακτινών-γ και φαινομένων όπως, η δημιουργία της ακτινοβολίας υποβάθρου της διάταξης και κατά συνέπεια η σχεδίαση αντίστοιχων θωρακίσεων, χωρίς να είναι απόλυτα κατανοητή η διαδικασία αλληλεπίδρασης των ακτινοβολιών αυτών με την ύλη.

Οι φωτονιακές ακτινοβολίες αλληλεπιδρούν με την ύλη με πολλούς τρόπους, τέσσερις όμως έχουν πραγματική σημασία για την περιοχή ενέργειας των φωτονίων από λίγα keV έως 10 MeV. Τα φαινόμενα αυτά είναι:

- Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- Η σκέδαση Compton
- Η δίδυμη γένεση
- Η ελαστική σκέδαση

Στα συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι αλληλεπιδράσεις αυτές, ενώ δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στο φαινόμενο της οπισθοσκεδάσεως, το οποίο αποτελεί υποκατηγορία της σκεδάσεως Compton.

2.3.1 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Ως φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ορίζεται η αλληλεπίδραση κατά την οποία ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας ενός ατόμου. Το ηλεκτρόνιο αποβάλλεται με κινητική ενέργεια ίση με εκείνη του προσπίπτοντος φωτονίου, μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου (E_b). Για τυπικές ενέργειες φωτονίων το αποβαλλόμενο ηλεκτρόνιο είναι πιθανότερο να αποσπαστεί από την στοιβάδα K, για την οποία οι τυπικές ενέργειες συνδέσεως κυμαίνονται από μερικά keV έως μερικά δεκάδες keV, αναλόγως με τον ατομικό αριθμό (Z) του υλικού. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή το άτομο, βάσει της αρχής διατηρήσεως της ορμής, διατηρεί ένα πολύ μικρό ποσό της ενέργειας, το οποίο όμως θεωρείται αμελητέο. Το άτομο, μετά την αποβολή του ηλεκτρονίου, ευρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση. Η μετάβαση από την διεγερμένη αυτή κατάσταση σε κατάσταση ισορροπίας είναι δυνατόν να επανέλθει με έναν εκ των δύο ακόλουθων τρόπων:

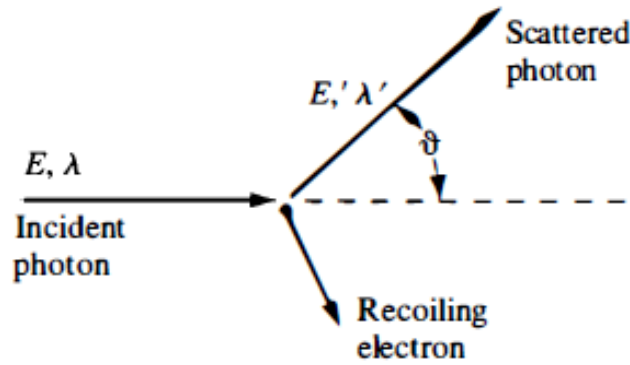
³ Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι οποτεδήποτε γίνεται αναφορά στη συνέχεια σε φωτονιακές ακτινοβολίες εξαιρούνται οι φωτονιακές ακτινοβολίες χαμηλότερων συχνοτήτων, όπως αυτές που αντιστοιχούν στο ορατό φάσμα, στην περιοχή του υπέρυθρου και του υπεριώδους.

- 1) Το δημιουργούμενο κενό στην στοιβάδα καλύπτεται με αναδιάταξη των ηλεκτρονίων. Κατά τη διαδικασία αυτή, η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των ενεργειών σύνδεσης των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στην αναδιάταξη απελευθερώνεται με τη μορφή ακτινών- X χαρακτηριστικής ενέργειας.
- 2) Το δημιουργούμενο κενό στην στοιβάδα καλύπτεται με αναδιάταξη των ηλεκτρονίων, αλλά το τμήμα της ενέργειας που απελευθερώνεται απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου (ηλεκτρόνιο Auger) το οποίο διαφεύγει από το άτομο, με συνέπεια τον περαιτέρω ιονισμό του ατόμου. Τα ηλεκτρόνια Auger έχουν πολύ μικρή εμβέλεια λόγω της χαμηλής τους ενέργειας, αντίθετα με τις χαρακτηριστικές ακτίνες- X που έχουν εμβέλεια η οποία εξαρτάται από το μέσο στο οποίο έγινε η αρχική αλληλεπίδραση και είναι πιθανόν να απορροφηθούν εκ νέου μέσω φωτοηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων με ασθενέστερα δεσμευμένα ηλεκτρόνια του μέσου. Παρόλο που η πιθανότητα διαφυγής των χαρακτηριστικών ακτινών- X μπορεί να είναι σημαντική, συχνά γίνεται η υπόθεση ότι αυτές απορροφώνται στο μέσο πλήρως.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εκπέμπεται ένα φωτοηλεκτρόνιο το οποίο φέρει υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας τμήμα της ενέργειας του αρχικού φωτονίου, καθώς και μία ή περισσότερες χαρακτηριστικές ακτίνες X . Με την προϋπόθεση ότι κανένα φωτόνιο ή σωματίδιο δεν διαφεύγει από το μέσο, η συνολική ενέργεια που αποτίθεται στο μέσο ισούται με την ενέργεια του αρχικού προσπίπτοντος φωτονίου. Για τις αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούνται πολύ κοντά στην επιφάνεια του απορροφητή, υπάρχει αξιόλογη πιθανότητα ορισμένες εκ των ακτινών- X που εκπέμπονται να διαφύγουν από το μέσο. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται το φαινόμενο που είναι γνωστό ως διαφυγή ακτίνας- X , σύμφωνα με το οποίο η αποτιθέμενη ενέργεια στο μέσο θα είναι μειωμένη κατά το ποσό ενέργειας που έφερε η ακτίνα- X . Για την περίπτωση που ο απορροφητής των φωτονίων είναι ένας ανιχνευτής ακτινοβολίας- γ , η διαφυγή ακτίνας- X έχει ως αποτέλεσμα την καταγραφή στο ενεργειακό φάσμα, εκτός της αιχμής πλήρους απόθεσης ενέργειας (full energy peak) και μίας αιχμής χαμηλότερης ενέργειας από αυτήν του αρχικού φωτονίου, κατά την ενέργεια της ακτίνας X , η οποία καλείται αιχμή διαφυγής (escape peak). Η αιχμή πλήρους απόθεσης ενέργειας παρατηρείται στην περίπτωση 1 του Σχήματος 2.10.

2.3.2 Η σκέδαση Compton

Σκέδαση Compton ονομάζεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου με ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο ατόμου (συνήθως ένα εκ των ασθενέστερα συνδεδεμένων με το άτομο), σύμφωνα με το οποίο, το αρχικό φωτόνιο ενέργειας $E_\gamma = h \cdot \nu$ σκεδάζεται ανελαστικά επάνω σε ένα από τα περιφερειακά ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα την απελευθέρωση του ηλεκτρονίου με κινητική ενέργεια $E_\gamma' = h \cdot \nu'$. Συγχρόνως παρατηρείται εκτροπή του φωτονίου από την αρχική διεύθυνση και ταυτόχρονη μείωση της ενέργειάς του κατά την κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο (Σχήμα 2.7). Ο μηχανισμός αυτός αλληλεπίδρασης παρουσιάζει μέγιστη πιθανότητα στην περιοχή περί τα 0.511MeV. (Λεωνίδου, 1984)



Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση σκεδάσεως Compton (Lamarsh & Baratta, 2001)

Η ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου E_{γ}' συναρτήσει της γωνίας σκεδάσεως θ , υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{\gamma}' = h \cdot \nu' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2} \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (2.1)$$

Όπου:

h : η σταθερά του Planck

ν : η συχνότητα του αρχικού φωτονίου

ν' : η συχνότητα του σκεδαζόμενου φωτονίου

$m_0 \cdot c^2$: η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (0.511 MeV)

Όσον αφορά την κινητική ενέργεια του σκεδαζόμενου ηλεκτρονίου, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T = E_{\gamma} - E_{\gamma}' = \frac{\frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2} \cdot (1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2} \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (2.2)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διακρίνονται οι ακόλουθες δύο ακραίες περιπτώσεις σχετικά με την σκεδαζόμενη γωνία θ :

- Για $\theta=0^\circ$: Ισχύει ότι $h \cdot \nu = h \cdot \nu'$ και από την (2.2) προκύπτει ότι $T=0$. Επομένως, το ηλεκτρόνιο διαθέτει μηδενική ενέργεια, ενώ το σκεδαζόμενο φωτόνιο διαθέτει ίση ενέργεια με το προσπίπτον. Στην περίπτωση αυτή ουσιαστικά δεν έχει γίνει σκέδαση!
- Για $\theta=180^\circ$: Παρατηρείται το φαινόμενο της οπισθοσκέδασης, όπου το φωτόνιο σκεδάζεται προς την κατεύθυνση από όπου προήλθε, ενώ αντίθετα το ηλεκτρόνιο κινείται στην αρχική διεύθυνση του φωτονίου. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται η μέγιστη μεταφορά ενέργειας προς το ηλεκτρόνιο.

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση η οποία πραγματοποιείται με δείγμα τοποθετημένο μέσα στη θωράκιση, στις περισσότερες περιπτώσεις, στο φάσμα που συλλέγεται διακρίνεται στο υπόστρωμα μία αιχμή μεγάλου εύρους στην ενεργειακή περιοχή 180-250 keV, η οποία ονομάζεται αιχμή οπισθοσκεδάσεως. Το εύρος της αιχμής οπισθοσκεδάσεως είναι αισθητά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μίας φωτοκορυφής πλήρους απόθεσης ενέργειας, ενώ επίσης δεν παρουσιάζει κάποιου είδους συμμετρία. Η αιχμή αυτή είναι το αποτέλεσμα της οπισθοσκέδασης (σκέδαση υπό μεγάλη γωνία) των φωτονίων της πηγής επάνω στην θωράκιση του ανιχνευτή, τα οποία στη συνέχεια αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή και εναποθέτουν σε αυτόν το υπόλοιπο της ενέργειας που έχουν μετά την πρώτη αλληλεπίδραση.

Επισημαίνεται ότι, ως οπισθοσκέδαση δεν θεωρείται μόνο η περίπτωση σκέδασης των φωτονίων κατά ακριβώς 180° . Η αιχμή οπισθοσκέδασης που σημειώνεται στο Σχήμα 2.10 με (2), οφείλεται σε φωτόνια τα οποία σκεδάζονται με μικρότερες γωνίες. Συγκεκριμένα, από τη σχέση (2.1) για κάθε γωνία σκέδασης μεγαλύτερη από $110-120^\circ$ εκπέμπονται φωτόνια οπισθοσκεδάσεως παραπλήσιας ενέργειας.

Συγκεκριμένα, η ενέργεια της αιχμής οπισθοσκέδασης από τη (2.1) για 180° υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E'_{180} = h \cdot \nu' = \frac{E_\gamma}{1 + 2 \cdot \frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2}} \quad (2.3)$$

Η παραπάνω σχέση για μεγάλη αρχική ενέργεια εκπομπής φωτονίων, δηλαδή

$E_\gamma = h \cdot \nu \gg \frac{m_0 \cdot c^2}{2}$ γίνεται:

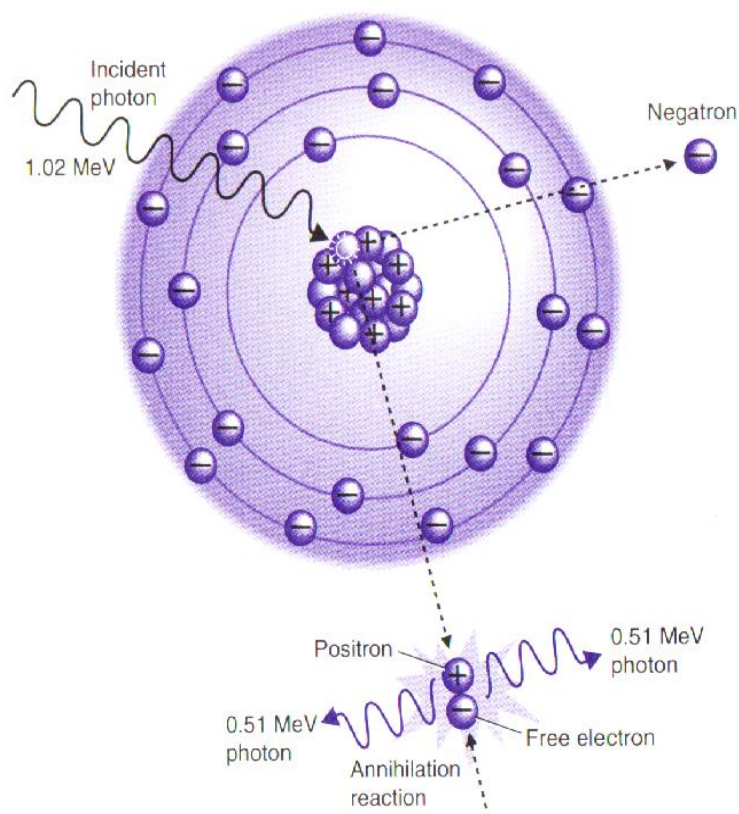
$$E'_{180} = \frac{511}{2} = 255.5 \text{ keV} \quad (2.4)$$

Η σχέση (2.4) δείχνει ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης εμφανίζεται το πολύ για ενέργεια λίγο υψηλότερη από τα 250 keV, κάτι που έχει ήδη αναφερθεί στην θεωρία. Για χαμηλότερη ενέργεια ή γωνία, η ενέργεια θα είναι μικρότερη. Άρα, μια πηγή παράγει οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια εντός της ενεργειακής περιοχής 180-250 keV, ούτως ώστε να δημιουργείται η χαρακτηριστική αιχμή στο φάσμα.

2.3.3 Η δίδυμη γένεση

Για την πραγματοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτής, απαιτείται ύπαρξη ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, όπως εκείνο που σχηματίζεται πλησίον του πυρήνα, λόγω των πρωτονίων του. Η αλληλεπίδραση συνεπάγεται εξαύλωση του φωτονίου και δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Για τη δημιουργία του ζεύγος αυτού απαιτείται ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από 1022 KeV ($2m_0c^2$). Η πλεονάζουσα ενέργεια διαμοιράζεται υπό μορφή κινητικής ενέργειας στο ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου. Καθώς το ποζιτρόνιο δεν είναι σταθερό σωματίδιο, όταν η κινητική του ενέργεια ελαττωθεί σημαντικά σε σχέση με την θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων στο

μέσο, το ποζιτρόνιο εξαϋλώνεται με ένα ηλεκτρόνιο του μέσου (Σχήμα 2.8). Η ενέργεια εξαϋλωσης των δύο σωματιδίων ($2 \cdot 511 \text{ KeV}$) εκπέμπεται υπό μορφή δύο αντιδιαμετρικά εκπεμπόμενων φωτονίων ενέργειας 511 keV . Ο χρόνος που απαιτείται για την εξαϋλωση του ποζιτρονίου είναι εξαιρετικά μικρός, γεγονός που συνεπάγεται ότι τα φωτόνια της εξαϋλωσης εμφανίζονται πρακτικά ταυτόχρονα με την αρχική αλληλεπίδραση. Η αλληλεπίδραση της δίδυμης γένεσεως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10 ως περίπτωση 3.



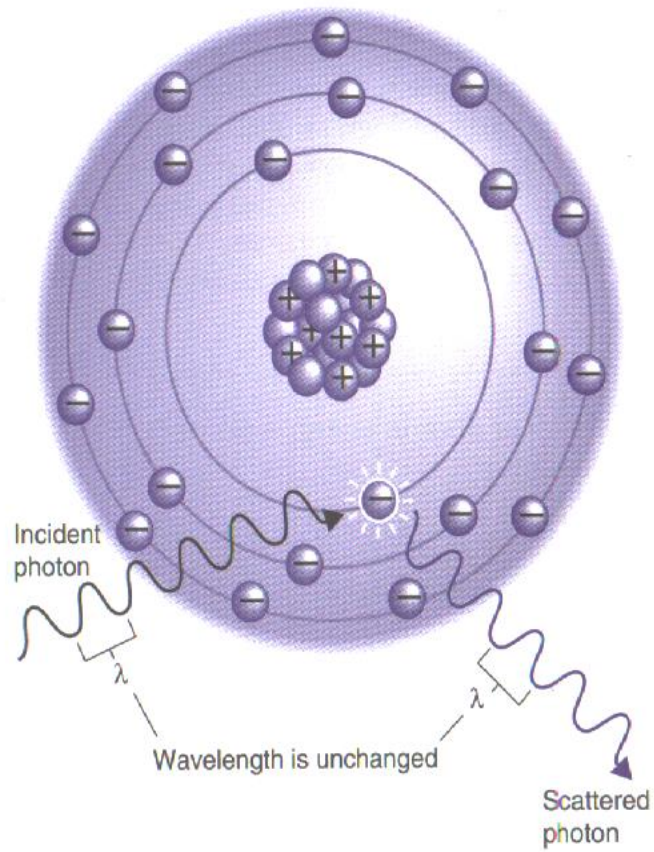
Σχήμα 2.8: Απεικόνιση φαινομένου της δίδυμης γένεσης (Steven B. Dowd, 1994)

Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζονται σχηματικά όλες οι αιχμές που διακρίνονται στο υπόστρωμα εξαιτίας των κάθε είδους αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας που εκπέμπει η πηγή με τη θωράκιση της διάταξης. Γίνεται λοιπόν φανερό πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η θωράκιση στη διαμόρφωση του υποστρώματος που παράγεται εξαιτίας της ακτινοβολίας της πηγής.

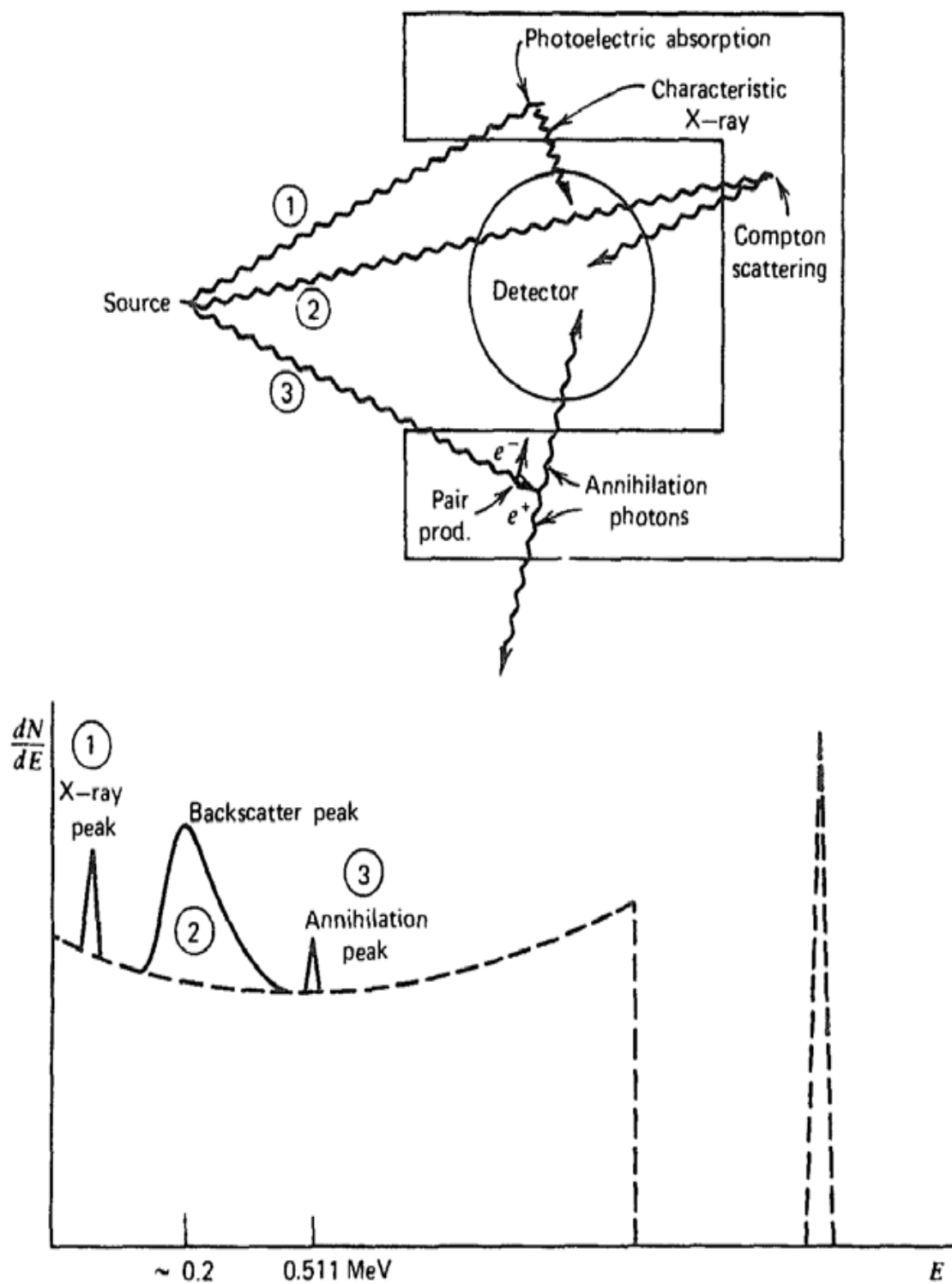
2.3.4 Η ελαστική σκέδαση

Ως ελαστική σκέδαση ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνια σε οποιαδήποτε στιβάδα, χωρίς όμως να μεταφέρεται ενέργεια σε κάποιο από αυτά. Αυτό συμβαίνει όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετά χαμηλή ούτως ώστε να καθίσταται αδύνατη η πρόκληση ιονισμού του ατόμου (Σχήμα 2.9).

Επομένως, η ενέργεια του φωτονίου διατηρείται, αλλά το φωτόνιο αλλάζει ελαφρώς διεύθυνση.



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση φαινομένου ελαστικής σκεδάσεως (Steven B. Dowd, 1994)



Σχήμα 2.10: Απεικόνιση φαινομένων που πραγματοποιούνται σε ένα ανιχνευτή και το φάσμα που λαμβάνεται (Knoll, 2000)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO PENELOPE

3.1 Εισαγωγή

Για το σχεδιασμό και τη μελέτη τόσο ανιχνευτικών διατάξεων όσο και των θωρακίσεών τους, αλλά και για τη βαθμονόμηση των ανιχνευτικών διατάξεων, ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο είναι η προσομοίωση Monte-Carlo. Σήμερα είναι διαθέσιμη μία μεγάλη σειρά σχετικών κωδικών προσομοίωσης, όπως ο MCNP, GEANT, EFTRAN, GATE, PENELOPE κλπ. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για περισσότερα από 15 χρόνια χρησιμοποιείται ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE. Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα παρουσιασθεί συνοπτικά η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo και ο κώδικας PENELOPE. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι βασικές λειτουργίες του κώδικα, με ιδιαίτερη έμφαση στις εντολές και τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ, αλλά και τα αρχεία που προέκυψαν με το πέρας των προσομοιώσεων.

3.2 Οι μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo

Ως μέθοδος Monte Carlo ορίζεται μια στοχαστική διαδικασία, όπου με τη χρήση τυχαίων αριθμών και των μεθόδων της στατιστικής επιχειρείται η επίλυση ενός προβλήματος. Το όνομα Monte Carlo προέρχεται από την ομώνυμη πόλη του Μονακό, η οποία διαθέτει το διάσημο καζίνο. Η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1949 από τους Nicholas Metropolis και Stanislaw Ulam, με την ομώνυμη δημοσίευση τους ("Η μέθοδος Monte Carlo") στο περιοδικό *Journal of the American Statistics Association*. Έκτοτε, η μέθοδος της προσομοίωσης Monte Carlo χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση σύνθετων φυσικών και μαθηματικών προβλημάτων, πολλαπλών ανεξάρτητων μεταβλητών. Ο λόγος που προτιμάται είναι το γεγονός ότι οι κλασικές μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων αυτών είτε αδυνατούν να εφαρμοσθούν είτε θα απαιτούσαν τεράστιο υπολογιστικό χρόνο και μνήμη για να δώσουν αποτελέσματα.

Όσον αφορά την διάδοση της ακτινοβολίας στον χώρο και την αλληλεπίδρασή της με τα διάφορα υλικά σώματα, η μέθοδος Monte Carlo έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει τις διάφορες πιθανές διαδρομές ενός σωματιδίου και τις διάφορες αλληλεπιδράσεις του, με την χρήση μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, και με τον τρόπο αυτό να κατασκευάσει τεχνητά την «ιστορία» ενός σωματιδίου ή φωτονίου. Επειδή ακριβώς η «ιστορία» ενός φωτονίου είναι επίσης τυχαίας φύσεως, η μέθοδος Monte Carlo είναι κατάλληλη αλλά και ιδιαίτερα ακριβής για την περίπτωση αυτή. Πιο

συγκεκριμένα, τα σωματίδια που εκπέμπονται από μια πηγή αλληλεπιδρούν με κάποιο μέσο και:

- Αλλάζουν κατεύθυνση
- Εναποθέτουν ενέργεια
- Ενδεχομένως παράγουν δευτερεύοντα σωματίδια

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, έως ότου, είτε το σωματίδιο αποκτήσει ενέργεια μικρότερη από ένα ενεργειακό κατώφλι (ενέργεια αποκοπής), είτε αυτό εξέλθει από τα επιλεγμένα όρια μελέτης. Αυτό σηματοδοτεί την ολοκλήρωση της «ιστορίας» του. Κατά τη διάρκεια της κάθε ιστορίας, τα διάφορα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοση του σωματιδίου καταγράφονται σε ξεχωριστά αρχεία και ξεκινάει αμέσως η παραγωγή της επόμενης τυχαία ιστορίας.

Η επιτυχής διαδικασία προσομοίωσης μίας ιστορίας ενός σωματιδίου βασίζεται στους νόμους της φυσικής και ειδικότερα στα μοντέλα αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με την ύλη. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, ειδικά για την περίπτωση των φωτονίων οι κυριότερες αλληλεπιδράσεις είναι:

- Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- Η δίδυμη γένεση
- Το φαινόμενο Compton
- Η μη ελαστική σκέδαση

Καθώς, κατά τη διάρκεια των αλληλεπιδράσεων αυτών παράγονται δευτερογενή σωματίδια – συνήθως ηλεκτρόνια – πρέπει να τονισθεί ότι η προσομοίωση και αυτών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να ολοκληρωθεί επιτυχημένα μία «ιστορία». Μολονότι η πληροφορία που παρέχεται από μία ιστορία είναι ανεπαρκής για την επίλυση του προβλήματος, η επανάληψη της προσομοίωσης, δηλαδή η δημιουργία μεγάλου πλήθους ιστοριών μπορεί να παρέχει υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα, τα οποία να επιβεβαιώνονται πειραματικά.

Παρόλη την ισχύ της μεθόδου προσομοίωσης Monte-Carlo, πρέπει να αναφερθεί πως η μέθοδος μπορεί να δώσει εσφαλμένα ή ανακριβή αποτελέσματα σε περίπτωση που, είτε το προς προσομοίωση σύστημα δεν περιγράφει ικανοποιητικά, είτε η φυσική του κώδικα είναι ανεπαρκής ή ακατάλληλη, είτε εκτελεστεί μικρό πλήθος ιστοριών. Για τη μείωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων πρέπει να αυξάνεται το πλήθος των ιστοριών, κάτι που αναπόφευκτα αυξάνει και τη διάρκεια της προσομοίωσης.

3.3 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE 2011

Ο κώδικας PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons) δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης, με σκοπό να προσομοιώνει την πορεία φωτονίων, ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων σε ένα σύστημα υλικών, το οποίο αποτελείται από διάφορα ομογενή σώματα, περιορισμένα από διαχωριστικές επιφάνειες. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του 2011 (J.Baró, 1994).

Ο κώδικας PENELOPE αποτελείται κατά κύριο λόγο από ένα σύνολο υπορουτινών, για την επιτυχή πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Για την εκτέλεση αυτών, απαιτείται να γραφεί ένα κυρίως πρόγραμμα, το οποίο θα παρακολουθεί την πορεία του σωματιδίου που ενδιαφέρει τον χρήστη και θα καταγράφει τα επιθυμητά αποτελέσματα σε μία σειρά από αρχεία. Για την διευκόλυνση του χρήστη, διατίθενται τρία κυρίως προγράμματα, τα οποία καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό την πλειοψηφία των πιθανών του απαιτήσεων. Τα προγράμματα αυτά είναι τα:

- PENCYL
- PENSLAB
- PENMAIN

Τα δύο πρώτα βρίσκουν εφαρμογές σε αρκετά συγκεκριμένες γεωμετρίες (το πρώτο για αυστηρά κυλινδρική γεωμετρία και το δεύτερο για γεωμετρία πλακών), ενώ το τελευταίο προτείνεται για χρήση σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PENMAIN, το οποίο θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενη παράγραφο.

Ο κώδικας PENELOPE διαθέτει πέντε βασικούς υποκαταλόγους (directories), που ο καθένας εξ αυτών εμπεριέχει επιπλέον υποκαταλόγους και αρχεία. Τα directories αυτά είναι τα εξής:

- doc: Αποτελείται από τέσσερα βοηθητικά αρχεία τα οποία σχετίζονται με τον κώδικα και ενημερώνουν τον χρήστη για την λειτουργία του. Τα αρχεία αυτά είναι τα:
 1. tutorial.pdf: Διαθέτει παραδείγματα ορθής χρήσης των κυρίως και των βοηθητικών προγραμμάτων.
 2. manual.txt: Είναι στην πραγματικότητα μια συνοπτική ανάλυση των λειτουργιών και της δομής του κώδικα PENELOPE.
 3. manual.pdf: Ακριβώς όμοιο με το παραπάνω, με την διαφορά ότι τα δύο αυτά αρχεία «διαβάζονται» από ξεχωριστά προγράμματα.
 4. penelope_2011_NEA.pdf: Αποτελεί τον επίσημο εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα PENELOPE 2011 όπως δημιουργήθηκε από την OECD Nuclear Energy Agency Data Bank.
- fsource: Αποτελείται από πέντε βοηθητικά αρχεία της FORTRAN τα οποία είναι:
 1. penelope.f: Διαθέτει τις υπορουτίνες που προσομοιώνουν την κίνηση των σωματιδίων στον χώρο.
 2. penvared.f: Διαθέτει υπορουτίνες που βελτιώνουν τη στατιστική των αποτελεσμάτων όταν κληθούν.
 3. penggeom.f: Διαθέτει υπορουτίνες που επιτυγχάνουν τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών ορίζοντας επιφάνειες,.
 4. material.f: Αρχεία τα οποία ορίζουν τα υλικά της προς προσομοίωσης γεωμετρίας.

5. timer.f: Διαθέτει υπορουτίνες που καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, καταγράφουν τις χρονικές στιγμές και τον αριθμό των ιστοριών που έχουν ολοκληρωθεί μέχρι τότε.

- mains: Αποτελείται από τους εξής τρεις υποκαταλόγους:

1. penslab
2. pencyl
3. penmain

Καθένας εκ των οποίων περιέχει αρχεία εισόδου του απεικονιστικού προγράμματος GNUPLOT, ώστε ο χρήστης να είναι σε θέση να μελετά γραφικά τα αποτελέσματα που λαμβάνει.

- pendbase: Αποτελείται από αρχεία τα οποία εμπεριέχουν τις ιδιότητες των εκάστοτε υλικών και είναι απαραίτητα για την λειτουργία των προγραμμάτων shower.exe και material.exe.

- other: Αποτελείται από τους εξής τέσσερις υποκαταλόγους:

1. gview: Υπάρχουν τα προγράμματα gview2d και gview3d, τα οποία απεικονίζουν δυσδιάστατα και τρισδιάστατα αντιστοίχως, τις προς προσομοίωση γεωμετρίες.
2. shower: Πρόκειται για πρόγραμμα που προσομοιώνει την κίνηση μικρού πλήθους σωματιδίων εντός μιας πλάκας συγκεκριμένου υλικού και εμφανίζει την πορεία τους στην οθόνη του υπολογιστή.
3. tables: Πρόκειται για πρόγραμμα που υπολογίζει τις ιδιότητες των διαφόρων υλικών και τις αποθηκεύει σε αρχεία.
4. emfields: Περιέχει υπορουτίνες οι οποίες προσομοιώνουν την κίνηση των σωματιδίων εντός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

3.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές

Ένα εξαιρετικά σημαντικό στοιχείο για τη λειτουργία του κώδικα είναι οι εικονικοί ανιχνευτές, οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής πληροφορίας σχετικά με την κίνηση και την αλληλεπίδραση των σωματιδίων που προσομοιώνονται σε διάφορα σώματα ή μέσα από διάφορες επιφάνειες. Ο εικονικός ανιχνευτής αποτελεί μια σειρά εντολών εντός του κώδικα, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την καταγραφή και αποθήκευση των παραμέτρων, αναφορικά με την αλληλεπίδραση των σωματιδίων σε έναν ορισμένο χώρο (ανιχνευτής). Οι απαραίτητες πληροφορίες για τον ανιχνευτή ορίζονται από τον χρήστη στα αρχεία εισόδου που θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο. Οι εικονικοί ανιχνευτές που χρησιμοποιεί ο κώδικας PENELOPE είναι τριών ειδών:

- **Οι ανιχνευτές αλληλεπίδρασης ή διέλευσης (impact detectors):** Είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή της ενέργειας που έχουν τα σωματίδια μόλις εισέλθουν στον ανιχνευτή. Ως ανιχνευτής αλληλεπίδρασης ή διέλευσης

ορίζεται από τον χρήστη, ένα ή περισσότερα σώματα στο αρχείο εισόδου .in, ενώ θα πρέπει επίσης να έχει «σχεδιαστεί» και στο αρχείο γεωμετρίας. Με το πέρας των προσομοιώσεων, προκύπτουν αρχεία εξόδου της μορφής (spc-impdet-01.dat), στα οποία αποθηκεύονται τα φάσματα των ενεργειών εισόδου των σωματιδίων που διέρχονται από τον ανιχνευτή. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η δυνατότητα που παρέχεται στον χρήστη να δημιουργήσει περισσότερα αρχεία με πληροφορίες που αφορούν τη θέση, την κατεύθυνση, το είδος ή την ενέργεια των σωματιδίων που διέρχονται στον ανιχνευτή.

- **Οι ανιχνευτές δόσης (dose enclosure):** Είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή της ενέργειας που εναποθέτει ένα σωματίδιο σε μία ορισμένη περιοχή. Ο ανιχνευτής αυτός ορίζεται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο πλέγμα και αποτελείται από ένα ή περισσότερα σώματα, τα οποία περιγράφονται στο αρχείο .in, αλλά όχι στο .geo, καθώς εκείνος δεν αποτελεί τμήμα της διάταξης. Η κατανομή της δόσης καταγράφεται στα αρχεία εξόδου x-dose.dat, y-dose.dat, z-dose.dat, 3d-dose.dat και βρίσκει χρησιμότητα σε εφαρμογές υπολογισμού κατανομής δόσης.
- **Οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detectors):** Είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή της αποτιθέμενης ενέργειας των σωματιδίων σε ένα σώμα (π.χ. την ανιχνευτική διάταξη). Ομοίως με τους ανιχνευτές διέλευσης, τα σώματα που αποτελούν τον ανιχνευτή ορίζονται στο αρχείο .in και «σχεδιάζονται» στο αρχείο .geo. Η μεγάλη διαφορά με το προηγούμενο είδος ανιχνευτή είναι ότι δεν καταγράφεται συνολικά η ενέργεια που αποτίθεται αλλά το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων, το οποίο αποθηκεύεται σε αρχείο εξόδου (spc-enddet-01.dat), όπως και προηγουμένως. Οι ανιχνευτές αυτοί επιτρέπουν τη συλλογή του φάσματος της ακτινοβολίας που αποδίδεται σε ένα σώμα, όπως είναι ένας ανιχνευτής.

3.5 Το πρόγραμμα PENMAIN

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στα πλαίσια της ΔΕ προκρίθηκε η χρήση του κυρίως προγράμματος PENMAIN έναντι των PENCYL και PENSLAB, διότι μπορεί να πραγματοποιήσει προσομοιώσεις πολύπλοκων γεωμετριών. Τα βασικά αρχεία εισόδου-εξόδου του προγράμματος PENMAIN – πέραν αυτών που αντιστοιχούν σε εικονικούς ανιχνευτές – είναι τα εξής:

- Το αρχείο εισόδου (.in)
- Το αρχείο γεωμετρίας (.geo)
- Τα αρχεία υλικών (.mat)
- Τα αρχεία αποτελεσμάτων (.dat ή .rep)

3.5.1 Το αρχείο εισόδου (.in)

Μέσω του αρχείου εισόδου ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει τις παραμέτρους της προσομοίωσης, όπως την ενέργεια και την φύση των σωματιδίων, τη διάρκεια τη προσομοίωσης, τα υλικά της διάταξης, το είδος της πηγής και άλλα. Το αρχείο αυτό είναι τύπου ASCII και γράφεται από τον χρήστη με συγκεκριμένη μορφή. Στην συνέχεια (Σχήμα 3.1) παρατίθεται παράδειγμα αρχείου εισόδου που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις της εργασίας, ούτως ώστε να αναλυθεί κάθε εντολή ξεχωριστά.

```
TITLE Trial
. (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 661620 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0.0,0.0,6.725
SBOX 9.0,9.0,0.1
SBODY 29
SCONE 0.0,0.0,180.0
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME carbon.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME aluminum.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME copper.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME germanium.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME plastic.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME lead.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME water.dat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN shield5.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 0,662000,200 [Energy window and no. of bins]
NBANGL 10,10 [Nos. of bins for the angles THETA and PHI]
.
ENDETC 0,662000,1000
EDBODY 12
.
>>>>>> Job properties.
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]
NSIMSH 300000000 [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME 5000000 [Allotted simulation time, in sec]
RSEED 12345 54321 [Random number generator seeds]
END [Ends the reading of input data]
```

Σχήμα 3.1: Αρχείο πηγής (.in) που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις της παρούσας ΔΕ

Στην πρώτη σειρά του αρχείου δίνεται ο τίτλος της προσομοίωσης με την εντολή:

- TITLE: Η ονομασία του προγράμματος, η οποία είναι αναγκαστικά η πρώτη του εντολή και έχει έκταση μέχρι 65 χαρακτήρες.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία σειρά από ενότητες με τις οποίες δίνονται με οργανωμένο τρόπο οι κάθε είδους πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση:

Πληροφορίες σχετικά με την πηγή:

- SKPAR: Καθορίζει τη φύση του προς μελέτη σωματιδίου και λαμβάνει τιμές 1, 2 ή 3 ανάλογα με αυτή (1 για ηλεκτρόνια, 2 για φωτόνια, 3 για ποζιτρόνια).
- SENERG: Η ενέργεια της μονοενεργειακής πηγής σε eV.
- SPOSIT: Η θέση του κέντρου της πηγής ως προς του άξονες x, y, z του τρισδιάστατου επιπέδου.
- SBOX: Οι διαστάσεις (ως προς x, y, z) ενός ορθογωνίου ελέγχου, το οποίο περιβάλλει πλήρως την πηγή, αφήνοντας όμως σε όλες τις διαστάσεις ένα μικρό περιθώριο.
- SBODY: Ο αριθμός του σώματος που έθεσε ο χρήστης ως πηγή στο αρχείο γεωμετρίας (.geo). Σε περίπτωση που έχουν οριστεί περισσότερα του ενός σώματα ως ανιχνευτές, η εντολή αυτή επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί, απλά αλλάζοντας κάθε φορά τον αριθμό του σώματος.
- SCONE: Η κωνική δέσμη της πηγής, η οποία ορίζεται από τρεις γωνίες. Οι γωνίες αυτές είναι κατά σειρά η πολική, η αζιμουθιακή και το άνοιγμα γωνίας (THETA, PHI, ALPHA).

Πληροφορίες σχετικά με τα υλικά της διάταξης:

- MFNAME: Η ονομασία του αρχείου υλικού (.mat), το οποίο ορίστηκε μέσω του material.f.
- MSIMPA: Οι παράμετροι προσομοίωσης για κάθε υλικό (στην παρούσα εργασία πάρθηκαν ίδιες τιμές για κάθε υλικό που χρησιμοποιήθηκε), όπου:
 - i. EABS(1 : 3) : Οι ενέργειες απορρόφησης φωτονίων
 - ii. C1 και C2 : Οι παράμετροι ελαστικής σκέδασης
 - iii. WCC και WCR : Οι ενέργειες αποκοπής για ανελαστικές κρούσεις και εκπομπές bremsstrahlung.

Πληροφορίες σχετικά με την γεωμετρία και τους τοπικούς παράγοντες προσομοίωσης:

- GEOMFN: Η ονομασία του αρχείου γεωμετρίας (.geo), που αναπαριστά την διάταξη προσομοίωσης.

Πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή και γωνιακή κατανομή των αναδυόμενων σωματιδίων:

- NBE: Ενεργειακό παράθυρο και αριθμός καναλιών (σε αυτή την περίπτωση το ενεργειακό εύρος είναι 0 έως 662000 eV, και 200 το πλήθος των καναλιών της καταγραφής)
- NBANGL: Αριθμός καναλιών καταγραφής για τις γωνίες THETA και PHI

Πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή απόθεση ανιχνευτών:

- ENDETC: Παρόμοια μορφή με NBE
- EDBODY: Ο αριθμός του σώματος που ορίζεται ως ανιχνευτής στο αρχείο γεωμετρίας (.geo).

Πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία της προσομοίωσης:

- DUMPPTO: Δημιουργεί ένα αρχείο dump, με ονομασία dump.dump με το πέρας της προσομοίωσης, με σκοπό την επίτευξη καλύτερης στατιστικής.
- DUMPP: Χρόνος σε sec. Μετά την ενεργοποίηση του DUMPPTO, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καταγράφονται στα αρχεία εξόδου κάθε DUMPP δευτερόλεπτα. Η εντολή αυτή παρουσιάζει μεγάλη χρησιμότητα, καθώς επιτρέπει στον χρήστη την δυνατότητα του ελέγχου προόδου μιας μεγάλης προσομοίωσης. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας ορίστηκε χρονική περίοδος DUMPP τα 3600 δευτερόλεπτα.
- NSIMSH: Το πλήθος των επιθυμητών ιστοριών που πραγματοποιούνται έως ότου λάβει τέλος η προσομοίωση. Λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας της γεωμετρίας που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική, επιλέχθηκε μεγάλος αριθμός ιστοριών ($3 \cdot 10^8$), ούτως ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή στατιστική.
- TIME: Η μέγιστη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, επιλέχθηκε τυχαία χρονική διάρκεια, πολύ μεγάλης τιμής, προκειμένου να επιτευχθεί το πλήθος ιστοριών της προηγούμενης εντολής.
- END: Η εντολή τερματισμού του διαβάσματος του αρχείου εισόδου (.in)

3.5.2 Το αρχείο γεωμετρίας (.geo)

Μέσω του αρχείου γεωμετρίας, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει την διάταξη, μέσα στην οποία πραγματοποιούνται οι διάφορες αλληλεπιδράσεις των φωτονίων. Στην πραγματικότητα, η σχεδίαση γίνεται μέσω εντολών που αρχικά ορίζουν επιφάνειες και στην συνέχεια με κατάλληλο συνδυασμό τους ορίζονται τα διάφορα σώματα που αποτελούν την διάταξη. Για την ορθή λειτουργία της προσομοίωσης, αλλά και για τον διαχωρισμό των εντολών, αναγράφεται πριν και μετά από κάθε εντολή, μια γραμμή αποτελούμενη αποκλειστικά από καθορισμένο αριθμό μηδενικών. Έπειτα από την διαχωριστική αυτή γραμμή ακολουθεί μια από τις παρακάτω εντολές, οι οποίες λαμβάνουν χώρο 8 χαρακτήρων:

- SURFACE_
- BODY_____
- MODULE___

- END_____
- CLONE____
- INCLUDE_

Από το παραπάνω μενού των εντολών στη ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν μονάχα οι τέσσερις πρώτες. Πριν τη χρήση της εναρκτήριας εντολής είθισται να γράφονται σχόλια, με σκοπό την περιγραφή της διάταξης. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η καταγραφή σχολίων μεταξύ δύο εντολών, ορίζεται νέα γραμμή που ξεκινάει με “C_” και έπειτα, αναγράφεται το σχόλιο. Μετά την χρήση κάποιας εκ των προαναφερθέντων εντολών, ακολουθεί παρένθεση, εντός της οποίας ορίζεται ο αριθμός του στοιχείου που περιγράφεται. Οι τιμές αυτές καλύπτουν το εύρος (-999) έως (9999), με εξαίρεση την εντολή BODY η οποία, όπως διαπιστώθηκε, λαμβάνει τιμές από (1) έως (249), διότι τα προγράμματα gview2d (διδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση) και gview3d (τριδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση) αδυνατούν να αναπαραστήσουν την περιγραφόμενη γεωμετρία με περισσότερα από 250 σώματα. Οι μονάδες μέτρησης των διαστάσεων και των γωνιών είναι προκαθορισμένες σε εκατοστά και μοίρες αντίστοιχα, με τις τελευταίες να μπορούν να ορισθούν και σε ακτίνια.

Εν συνεχεία, αναλύεται η δομή και η λειτουργία των εντολών που αναφέρθηκαν επιγραμματικά προηγουμένως.

3.5.2.1 Ορισμός επιφάνειας (SURFACE)

Ο ορισμός επιφανειών αποτελεί το πρώτο βήμα για την κατασκευή του προγράμματος γεωμετρίας. Αρχικά, ορίζονται όλες τις επιφάνειες που στην συνέχεια του προγράμματος θα απαρτίζουν τα διάφορα σώματα της διάταξης. Συνολικά μπορούν να οριστούν έως και 10,000 επιφάνειες. Κάθε επιφάνεια περιγράφεται από τους 5 δείκτες (INDICES)=(I2, I2, I2, I2, I2) οι οποίοι καθορίζουν το είδος της επιφάνειας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Πέρα από τους δείκτες, οι επιφάνειες καθορίζονται ακόμα από τους παράγοντες κλίμακας (X-SCALE, Y-SCALE, Z-SCALE), τα διανύσματα μετατόπισης (X-SHIFT, Y-SHIFT, Z-SHIFT) και τις γωνίες Euler (OMEGA, THETA, PHI). Οι παράγοντες κλίμακας καθορίζουν τις θέσεις των επιφανειών πάνω στους άξονες, ενώ τα διανύσματα μετατόπισης και οι γωνίες Euler ορίζουν τις θέσεις των επιφανειών έπειτα από μετατόπιση ή περιστροφή αντιστοίχως. Όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι προαιρετικές και μπορούν να γραφούν ανεξαρτήτως σειράς στο αρχείο γεωμετρίας. Σε περίπτωση που ορισμένες εξ αυτών παραλειφθούν, το πρόγραμμα λαμβάνει τις προκαθορισμένες τιμές (DEFAULT). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν απαιτήθηκε η χρήση των γωνιών Euler για την περιγραφή των επιφανειών.

Στο Σχήμα 3.3 παρατίθεται τμήμα αρχείου γεωμετρίας όπου περιγράφεται επιφάνεια κυλινδρικού σχήματος.

3.5.2.3 Ορισμός δομής (MODULE)

Ο ορισμός δομών (MODULE) ομοιάζει αρκετά με τον αντίστοιχο των σωμάτων, με τη διαφορά ότι οι δομές παρουσιάζουν επιπλέον πλεονεκτήματα, όπως την ικανότητα να ορίζουν κενούς χώρους εντός συμπαγών σωμάτων. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στην παρούσα εργασία για την μελέτη του φαινομένου της οπισθοσκέδασης. Μια επιπλέον ιδιότητα του MODULE είναι το ότι μπορεί να μετατοπιστεί κατά μέτρο ή γωνία με ταυτόχρονη μετατόπιση όλων των σωμάτων που εμπεριέχει. Στην συνέχεια, στο Σχήμα 3.6 περιγράφεται MODULE που χρησιμοποιήθηκε για τον ορισμό μίας πλάκας μολύβδου αποτελούμενης από διαμπερείς κυλινδρικές οπές.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
BODY    ( 26)  Pb cylinder.
MATERIAL(  1)
SURFACE (  1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (  3), SIDE POINTER=(+1)
BODY    (  1)
BODY    (  2)
BODY    (  3)
BODY    (  4)
BODY    (  5)
BODY    (  6)
BODY    (  7)
BODY    (  8)
BODY    (  9)
BODY    ( 10)
BODY    ( 11)
BODY    ( 12)
BODY    ( 13)
BODY    ( 14)
BODY    ( 15)
BODY    ( 16)
BODY    ( 17)
BODY    ( 18)
BODY    ( 19)
BODY    ( 20)
BODY    ( 21)
BODY    ( 22)
BODY    ( 23)
BODY    ( 24)
BODY    ( 25)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Σχήμα 3.6: Ορισμός μολύβδινης πλάκας αποτελούμενης από 25 κυλινδρικές τρύπες.

3.5.2.4 Ορισμός κλώνου (CLONE)

Ο ορισμός κλώνων (CLONE) γίνεται αφού πρώτα έχει οριστεί κάποια δομή. Ουσιαστικά, δημιουργείται ένα αντίγραφο του MODULE και χρησιμοποιείται αυτούσιο σε κάποιο άλλο μεταγενέστερο σημείο του αρχείου γεωμετρίας, έχοντας ή μη υποστεί περιστροφή. Οι κλώνοι βρίσκουν μεγάλη χρησιμότητα σε συμμετρικές

γεωμετρίες, όπου παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα γρηγορότερης κατασκευής μία πολύπλοκης γεωμετρίας.

3.5.2.5 Ορισμός ενσωμάτωσης (INCLUDE)

Με την εντολή ενσωμάτωσης (INCLUDE) παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα χρήσης διάταξης, η οποία περιγράφεται σε διαφορετικό αρχείο γεωμετρίας της μορφής .ext . Το αρχείο αυτό απαιτείται να έχει όνομα έως 12 χαρακτήρων και σε περίπτωση που είναι μικρότερο, οι εναπομείναντες χαρακτήρες συμπληρώνονται από κενές θέσεις. Για τη χρήση της εντολής ενσωμάτωσης, απαιτείται οι ετικέτες των στοιχείων να διαφέρουν από εκείνες που χρησιμοποιούνται στο κυρίως αρχείο. Με τον τρόπο αυτό, το αρχείο γίνεται μέρος του δευτερεύοντος αρχείου γεωμετρίας. Ένα βασικό και αποκλειστικό πλεονέκτημα της εντολής INCLUDE είναι η δυνατότητα της, να ορίσει νέες δομές (MODULES) και σώματα (BODIES), τα οποία διαθέτουν τα στοιχεία του εισερχόμενου αρχείου.

3.5.3 Το αρχείο υλικού (.mat)

Μέσω των αρχείων υλικού (.mat) παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα, είτε της επιλογής των υλικών διάταξης από την υπάρχουσα βάση δεδομένων που συνοδεύει τον κώδικα, είτε του ορισμού νέου υλικού με ιδιότητες που θα ορίσει ο ίδιος. Τα αρχεία της μορφής .mat περιέχουν τα απαραίτητα δεδομένα του υλικού (π.χ. μικροσκοπικές ενεργές διατομές, πίνακες φυσικών ιδιοτήτων), ώστε να εκτελεστεί ορθά η προσομοίωση. Κάθε αρχείο τύπου .mat αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο ή ένωση και επιλέγεται από σχετική λίστα. Για την κατασκευή των αρχείων της μορφής .mat χρησιμοποιείται το πρόγραμμα MATERIAL.

3.5.4 Τα αρχεία αποτελεσμάτων

Μετά το πέρας των προσομοιώσεων, το πρόγραμμα PENMAIN δίνει ένα πλήθος αρχείων αποτελεσμάτων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν και μέσω των υπολογιστικών φύλλων Excel. Τα αρχεία αυτά είναι τύπου .rep και .dat και μορφής ASCII. Τα κυριότερα αρχεία αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

- geometry.rep: Αρχείο που προκύπτει από την υπορουτίνα GEOMIN και αναγράφεται σε αυτό, αυτούσιο το αρχείο .geo με μερικές επιπλέον πληροφορίες. Το geometry.rep, αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο αρχείο, το οποίο σε περίπτωση λάθους στο αρχείο γεωμετρίας, δείχνει στον χρήστη σε ποια ποιο σημείο βρίσκεται αυτό.
- material.dat: Αρχείο που περιέχει δεδομένα, σχετικά με τα υλικά της διάταξης, όπως ο ατομικός αριθμός και η πυκνότητα του στοιχείου. Επιπλέον, διαθέτει παραμέτρους που λήφθηκαν από το αρχείο .in, όπως η ενέργεια πηγής.
- dump.dmp.dat: Αρχείο στο οποίο κατά τακτά χρονικά διαστήματα καταγράφονται όλα εκείνα τα αριθμητικά δεδομένα, τα οποία είναι απαραίτητα,

προκειμένου – σε περίπτωση διακοπής της προσομοίωσης – να μπορεί αυτή να εκκινήσει πάλι από το σημείο της διακοπής.

- penmain.dat: Αρχείο αποτελούμενο από δεδομένα της προσομοίωσης, τα οποία εισήχθησαν από τα αρχεία .in, .geo, .mat.
- penmain-res.dat: Αρχείο που περιέχει πληροφορίες όπως: τη χρονική διάρκεια και την ταχύτητα προσομοίωσης, το πλήθος των σωματιδίων που προσομοιώθηκαν και στην συνέχεια οπισθοσκεδάστηκαν, απορρίφθηκαν, ή εξήλθαν από την διάταξη. Στο αρχείο αυτό, αναγράφεται ακόμα η μέση ενέργεια καταγραφής του ανιχνευτή, καθώς και η ενέργεια που αποτέθηκε σε κάθε σώμα.
- sprc-enddet-01.dat: Αρχείο που παραθέτει το φάσμα της αποτιθέμενης ενέργειας στον αντίστοιχο ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, καθώς και τη στατιστική αβεβαιότητα.

Πέρα από τα παραπάνω αρχεία αποτελεσμάτων, ο κώδικας PENMAIN παρέχει και ορισμένα επιπλέον, τα οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Τα αρχεία αυτά είναι επιγραμματικά τα εξής:

- angle-el.dat
- angle-ph.dat
- angle-po.dat
- energy-el-down.dat
- energy-el-up.dat
- energy-ph-down.dat
- energy-ph-up.dat
- energy-po-down.dat
- energy-po-up.dat

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ

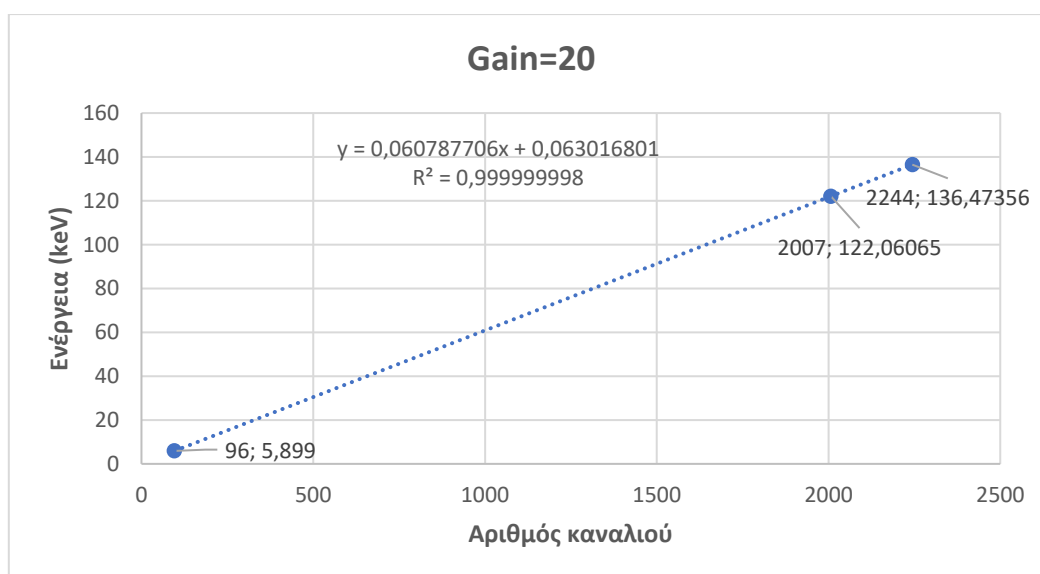
Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει έναν φορητό ανιχνευτή τύπου BEGe, ο οποίος χρησιμοποιείται για επιτόπιες μετρήσεις (in-situ) σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη μετρήσεων στο πεδίο. Καθώς ο ανιχνευτής αυτός δεν χρησιμοποιείται συχνά για μετρήσεις πεδίου και υπάρχουν μεγάλες περίοδοι που παραμένει ανενεργός αποφασίστηκε να κατασκευαστεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μία θωράκιση, έτσι ώστε ο ανιχνευτής BEGe να χρησιμοποιείται για in-vitro μετρήσεις σε περίπτωση ανάγκης. Για τον λόγο αυτό, και πριν από οτιδήποτε άλλο, αφού ο ανιχνευτής ψύχθηκε με υγρό άζωτο, ο ανιχνευτής βαθμονομήθηκε ενεργειακά και εν συνεχεία ελέγχθηκε η διακριτική ικανότητά του, προκειμένου να πιστοποιηθεί ότι δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά μετά από τη μακρόχρονη φύλαξή του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

4.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή BEGe

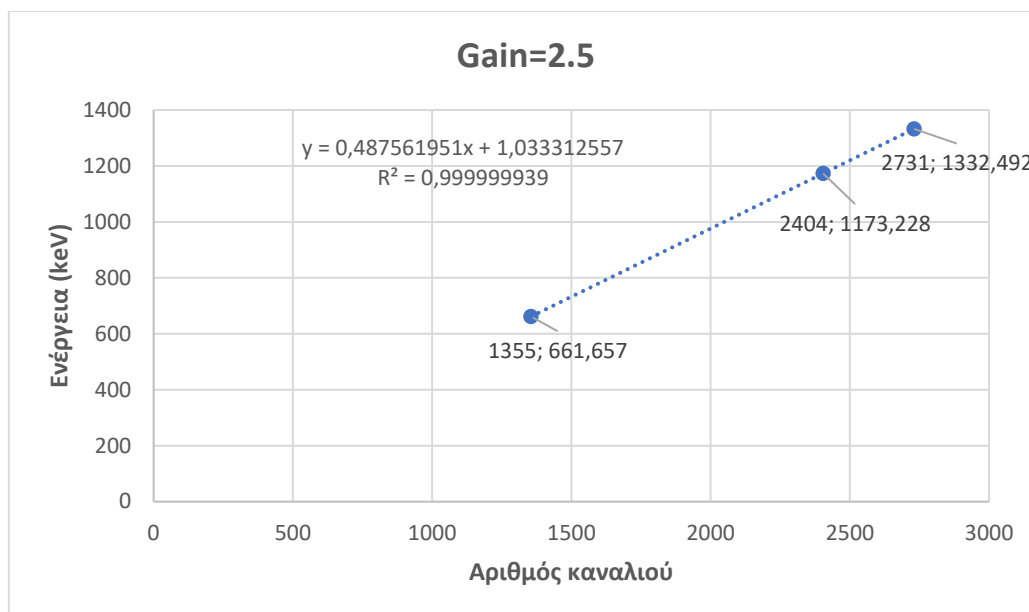
Ο ανιχνευτής BEGe χρησιμοποιείται για μετρήσεις σε δύο ενεργειακές περιοχές:

- 0-200keV (Gain 20) και
- 0-2000keV (Gain 2.5)

Με χρήση καταλλήλων πηγών βαθμονόμησης και συγκεκριμένα ⁵⁵Fe, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs εκτιμήθηκαν οι συναρτήσεις ενεργειακής βαθμονόμησης για τις δύο περιπτώσεις. Οι αντίστοιχες συναρτήσεις αναδρομής παρατίθενται στα Σχήματα 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ενέργειας – Αριθμού καναλιού



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ενέργειας – Αριθμού καναλιού

Από τα παραπάνω διαγράμματα, προκύπτουν οι εξής συναρτήσεις ενεργειακής βαθμονόμησης:

α) Ενεργειακή περιοχή 0-200 keV (Gain 20)

$$\text{Energy (keV)} = 0.060787706 \cdot x + 0.063016801 \quad (4.1)$$

β) Ενεργειακή περιοχή 0-2000 keV (Gain 2.5)

$$\text{Energy (keV)} = 0.487561951 \cdot x + 1.033312557 \quad (4.2)$$

Όπου x ο αριθμός καναλιού.

4.2 Διαδικασία πιστοποίησης της διακριτικής ικανότητας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία πιστοποίησης της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή BEGe. Η πιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας θα γίνει έναντι του πιστοποιητικού της κατασκευάστριας εταιρία **CANBERRA** με ημερομηνία 27/3/2007. Το πλήρες Πιστοποιητικό παρατίθεται στο Παράρτημα Γ, ενώ συνοπτικά το πιστοποιητικό παρατίθεται στον Πίνακα 4.1.

Isotope	⁵⁵ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Energy (keV)	5.9	122	1332.5
FWHM (eV)	440	658	1780
FWTM (eV)		1204	3295

Πίνακας 4.1: Συνοπτικό πιστοποιητικό της κατασκευάστριας εταιρίας

Μετά την παραλαβή του ανιχνευτή, είχε γίνει πιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας του στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, με χρήση πηγής ^{55}Fe και ^{60}Co . Τα αποτελέσματα αυτής της πιστοποίησης παρατίθεται στον Πίνακα 4.2.

Isotope	^{55}Fe	^{57}Co	^{60}Co
Energy (keV)	5.9	122	1332.5
FWHM (eV)	413	-	1629
FWTM (eV)	-	-	-
FWTM (eV)		1204	3295

Πίνακας 4.2: Μετρήσεις διακριτικής ικανότητας του 2007 στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στα πλαίσια της ΔΕ εργασίας έγινε επανάληψη των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στις 3/4/2007. Τα πειράματα έγιναν τον Οκτώβριο του 2020 (6/10/2020) και πέραν των πηγών ^{55}Fe και ^{60}Co χρησιμοποιήθηκε και πηγή ^{57}Co .

4.2.1 Πειράματα με πηγή ^{55}Fe

Για την ανίχνευση των φωτονίων ενέργειας 5.899 keV της πηγής ^{55}Fe , αφού αφαιρέθηκε το κάλυμμα του ανιχνευτή, ελήφθη το σχετικό φάσμα, τμήμα του οποίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.

Κανάλι	Κρούσεις
84	50
85	74
86	116
87	232
88	424
89	782
90	1356
91	2396
92	3552
93	5013
94	6356
95	7272
96	7714
97	7312
98	6350
99	5133
100	3962
101	3024
102	2378

103	2130
104	2208
105	2196
106	2089
107	1894

Πίνακας 4.3: Κρούσεις ανά κανάλι για πηγή ^{55}Fe

Η φωτοκορυφή εντοπίστηκε στο κανάλι 96, όπου μετρήθηκαν 7714 κρούσεις. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το κανάλι για το οποίο οι κρούσεις θα είναι ίσες με $7714/2=3857$. Με γραμμική παρεμβολή, υπολογίζεται το ζητούμενο κανάλι **92.209**. Η γραμμική παρεμβολή έγινε σε κανάλια τα οποία βρίσκονται αριστερά του κεντροειδούς, καθώς δεξιά αυτού υπάρχει η φωτοκορυφή των 6.4 keV. Επομένως, το εύρος ημίσειας ύψους βρέθηκε ίσο με:

$$FWHM = 2 \cdot \frac{5.899 \text{ keV}}{96} \frac{ch}{ch} \cdot (96 - 92.209)ch = 0.4659 \text{ keV} \quad (4.5)$$

4.4.2 Πειράματα με πηγή ^{60}Co

Ομοίως με προηγουμένως, τοποθετήθηκε εμπρός του BEGe σημειακή πηγή ^{60}Co και προέκυψαν οι ακόλουθες μετρήσεις (Πίνακα 4.4).

Κανάλι	Κρούσεις
2724	1
2725	0
2726	1
2727	12
2728	64
2729	177
2730	291
2731	378
2732	283
2733	122
2734	49
2735	11

Πίνακας 4.4: Κρούσεις ανά κανάλι για πηγή ^{60}Co

Διαπιστώθηκε ότι η φωτοκορυφή των 1332.49 keV εντοπίζεται στο κανάλι 2731, στο οποίο οι καταγραφόμενες κρούσεις βρέθηκαν ίσες με 378, από τις οποίες ομοίως με προηγουμένως δεν αφαιρούνται οι κρούσεις υποστρώματος. Εν συνεχεία, αναζητήθηκε το κανάλι για το οποίο οι κρούσεις θα είναι $378/2=189$. Με γραμμική παρεμβολή στον παραπάνω πίνακα, προέκυψε ότι το ζητούμενο κανάλι ήταν το **2729.105**. Αφού η φωτοκορυφή των 1332 keV εντοπίζεται στο κανάλι 2731, το εύρος ημίσειας ύψους υπολογίστηκε από την σχέση:

$$FWHM = 2 \cdot \frac{1332 \text{ keV}}{2731 \text{ ch}} \cdot (2731 - 2729.105) \text{ ch} = 1.8489 \text{ keV} \quad (4.6)$$

4.4.3 Πειράματα με πηγή ^{57}Co

Σε αντίθεση με τα πειράματα που είχαν πραγματοποιηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ κατά την πιστοποίηση του 2007, κατά την πιστοποίηση που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ υπήρξε η δυνατότητα χρήσης και πηγής ^{57}Co . Για την φωτοκορυφή 122.061 keV της πηγής ^{57}Co μετρήθηκαν οι παρακάτω τιμές (Πίνακας 4.5).

Κανάλι	Κρούσεις
1993	1022
1994	1124
1995	1468
1996	1950
1997	2737
1998	3754
1999	5150
2000	7312
2001	9752
2002	12625
2003	15568
2004	18385
2005	20838
2006	22236
2007	22579
2008	21767
2009	20150
2010	17716
2011	14820

2012	11712
2013	9074
2014	6554
2015	4793
2016	3372

Πίνακας 4.5: Κρούσεις ανά κανάλι για πηγή ^{57}Co

Διαπιστώθηκε ότι η φωτοκορυφή των 122.061 keV εντοπίζεται στο κανάλι 2007, στο οποίο οι κρούσεις βρέθηκαν ίσες με 22579. Επιπλέον, για την πηγή ^{57}Co παρατηρείται υπολογίσιμος αριθμός κρούσεων υποστρώματος, ο οποίος αφαιρείται από την φωτοκορυφή. Συγκεκριμένα, ο μέσος όρος κρούσεων πέντε καναλιών πριν και μετά την φωτοκορυφή ισούται με **1021**. Έπειτα, αναζητήθηκε το κανάλι για το οποίο οι κρούσεις αυτές θα ισούνται με $(22579-1021)/2=10779$. Με γραμμική παρεμβολή στον παραπάνω πίνακα, προέκυψε ότι το ζητούμενο κανάλι ήταν το **2001.357**. Επομένως, το εύρος ημίσεως ύψους υπολογίστηκε από την σχέση:

$$FWHM = 2 \cdot \frac{122.061 \text{ keV}}{2007} \frac{ch}{ch} \cdot (2007 - 2001.357)ch$$

$$= 0.6864 \text{ keV} \quad (4.7)$$

4.4.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Από τον παρακάτω Πίνακα 4.6 διαπιστώνεται ότι οι τιμές του εύρους ημίσεως ύψους για κάθε μια εκ των τριών ενεργειών που εξετάζονται δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά με το χρόνο, παρόλο που παρέμεινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για μεγάλο χρονικό διάστημα.

	Isotope	^{55}Fe	^{57}Co	^{60}Co
	Energy (keV)	5.899	122.061	1332.49
Πιστοποιητικό CANBERRA	FWHM (keV)	0.44	0.66	1.78
Πιστοποίηση του 2007	FWHM (keV)	0.41		1.63
Πιστοποίηση του 2020	FWHM (keV)	0.47	0.69	1.85

Πίνακας 4.6: Συγκεντρωτικός πίνακας εύρους ημίσεως ύψους τριών ισotόπων

4.4.5 Διακριτική ικανότητα συναρτήσεων καναλιού και ενέργειας

Αφού στις προηγούμενες παραγράφους διαπιστώθηκε πως το εύρος ημίσεως ύψους του ανιχνευτή BEGe, δεν μεταβλήθηκε σημαντικά από τις αρχικές τιμές, αποφασίστηκε η εύρεση των συναρτήσεων:

- $FWHM = f(\text{κανάλι})$
- $FWHM = f(\text{ενέργεια})$

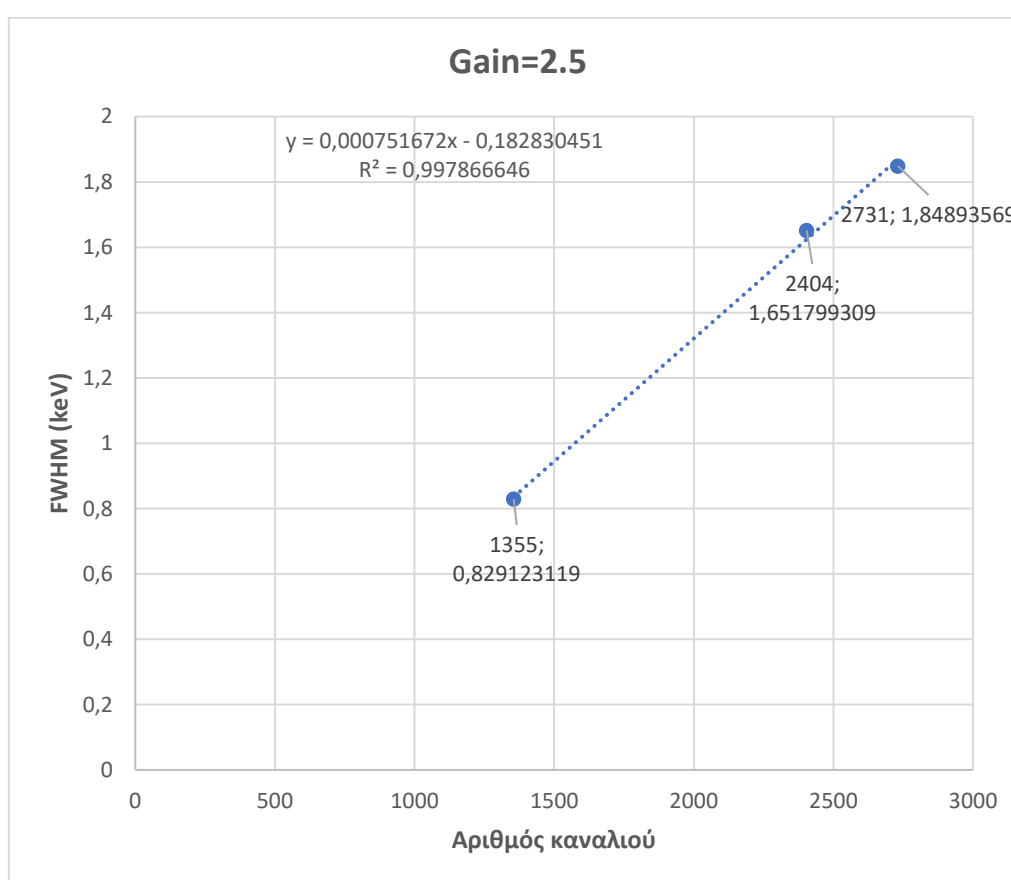
για ρυθμίσεις στις ενεργειακές περιοχές 0-2000keV (gain 2.5) και 0-200keV (gain 20).

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η ίδια πειραματική διαδικασία με προηγουμένως με σημειακή πηγή ^{137}Cs και ^{60}Co και προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 4.7) για τις μεσαίες και υψηλές ενέργειες φωτονίων (0-2000keV).

Ισότοπο	^{137}Cs	^{60}Co	^{60}Co
Ενέργεια (keV)	661.657	1173.228	1332.492
FWHM (keV)	0.829	1.652	1.849
Αριθμός καναλιού	1355	2404	2731

Πίνακας 4.7: Ισότοπα μεσαίων και υψηλών ενεργειών για gain=2.5

Από τα παραπάνω αποτελέσματα ελήφθησαν οι εξής καμπύλες:

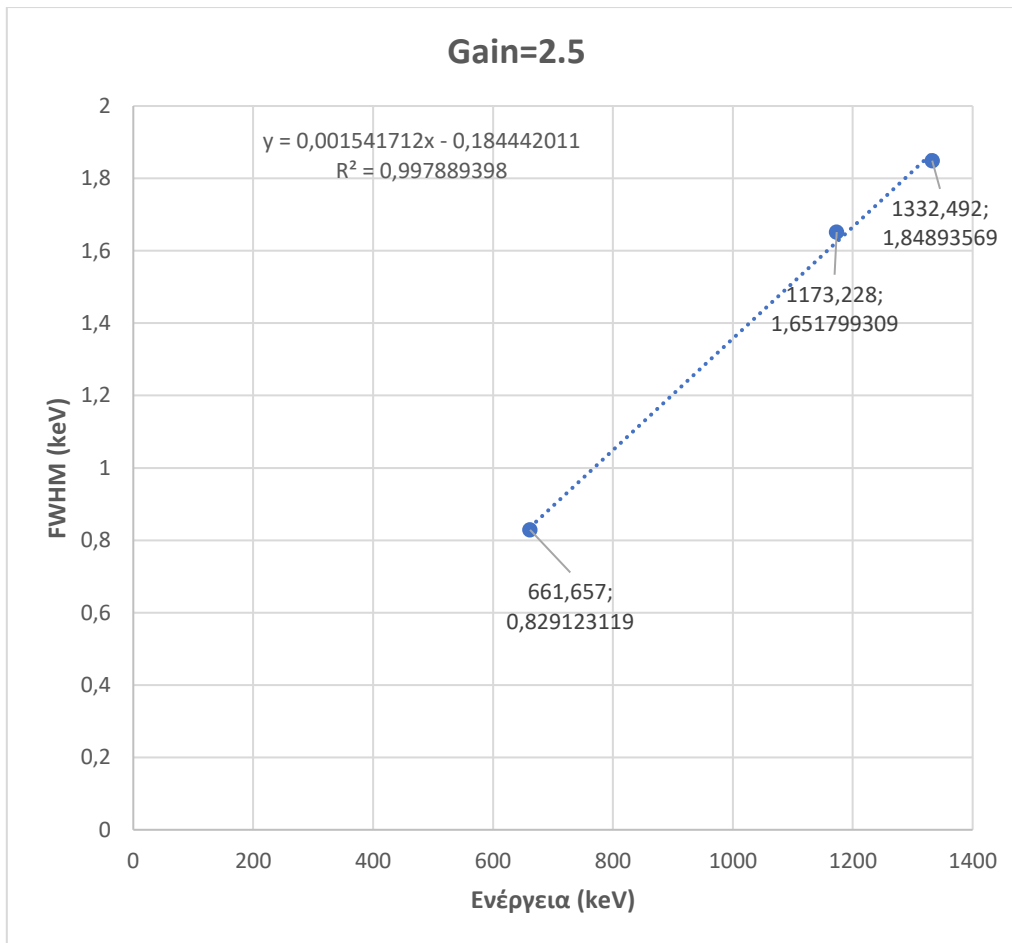


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ύψους συναρτήσει του καναλιού

Η συνάρτηση $FWHM=f(\text{κανάλι})$ είναι η:

$$FWHM = 0.000751672 \cdot x - 0.182830451 \quad (4.8)$$

Όπου x ο αριθμός του καναλιού.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ύψους συναρτήσει της ενέργειας

Η συνάρτηση $FWHM=f(\text{ενέργειας})$ είναι η:

$$FWHM = 0.001541712 \cdot x - 0.184442011 \quad (4.9)$$

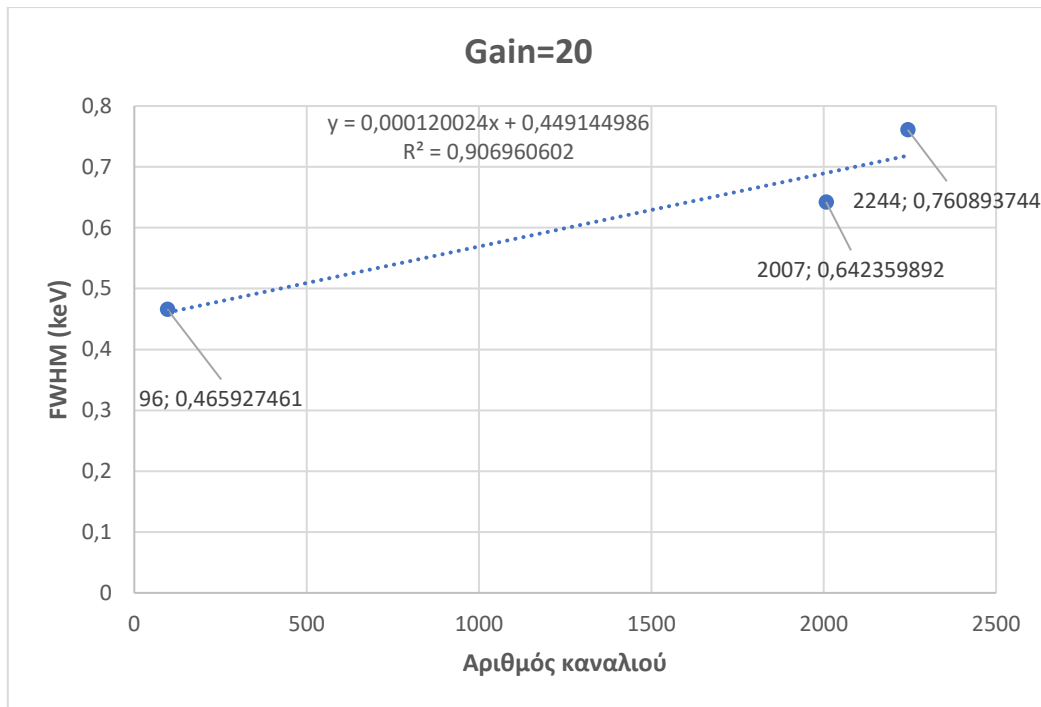
Όπου x η επιθυμητή ενέργεια.

Ομοίως έγιναν πειράματα για την περιοχή χαμηλών ενεργειών με πηγές ^{55}Fe και ^{57}Co και βρέθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 4.8).

Ισότοπο	^{55}Fe	^{57}Co	^{57}Co
Ενέργεια (keV)	5.899	122.06	136.47
FWHM (keV)	0.466	0.642	0.761
Αριθμός καναλιού	96	2007	2244

Πίνακας 4.8: Ισότοπα χαμηλών ενεργειών για gain=20

Από τα παραπάνω αποτελέσματα ελήφθησαν οι εξής καμπύλες:

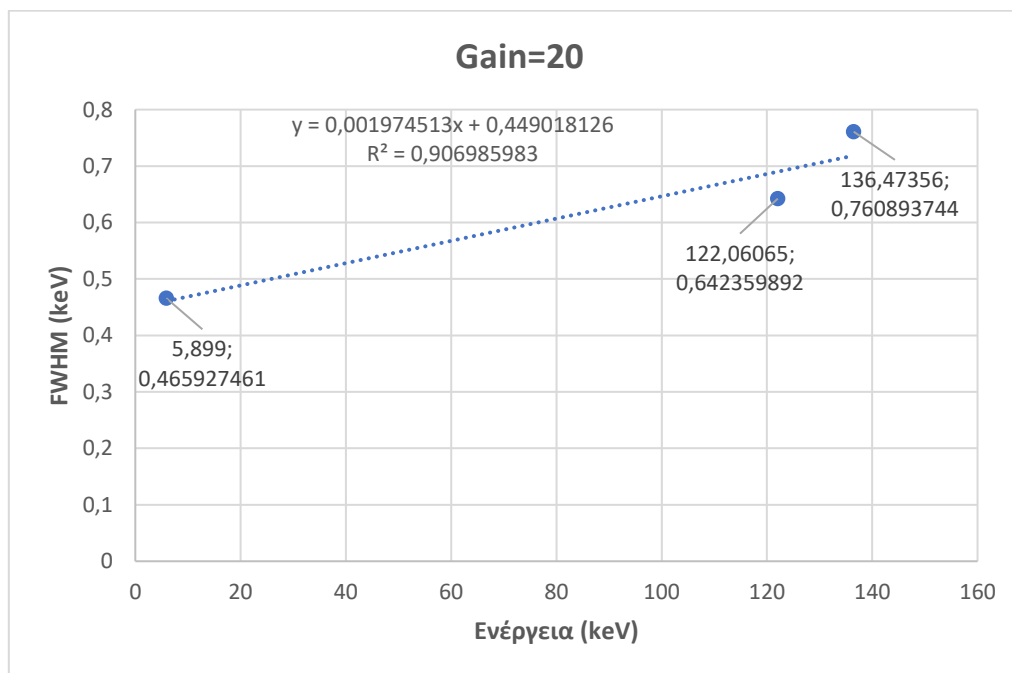


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα εύρους ημίσεως ύψους συναρτήσει του καναλιού

Η συνάρτηση $FWHM=f(\text{κανάλι})$ είναι η:

$$FWHM = 0.000120024 \cdot x + 0.449144986 \quad (4.10)$$

Όπου x ο αριθμός του καναλιού.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα εύρους ημίσεως ύψους συναρτήσει της ενέργειας

Η συνάρτηση $FWHM=f(\text{ενέργειας})$ είναι η:

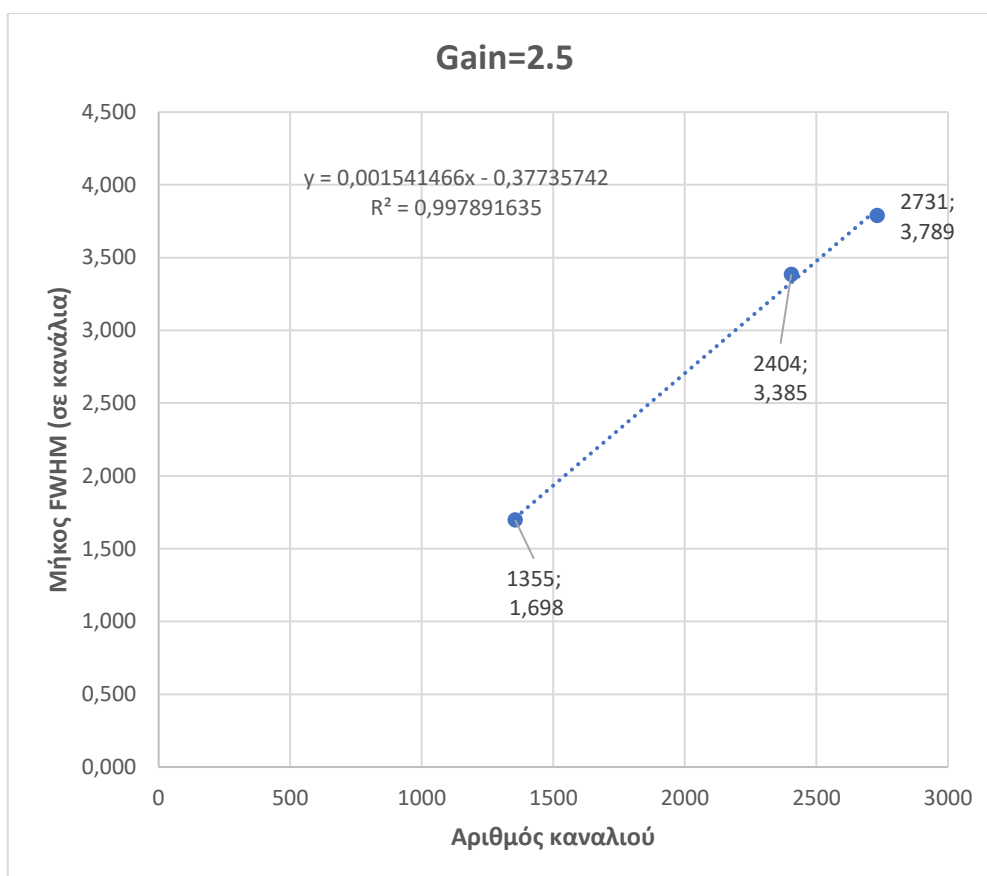
$$FWHM = 0.001974513 \cdot x + 0.449018126 \quad (4.11)$$

Όπου x η επιθυμητή ενέργεια.

Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται ο υπολογισμός του $FWHM$ σε κανάλια. Για την μετατροπή των μονάδων από keV σε κανάλια χρησιμοποιείται η σχέση:

$$FWHM (\text{channels}) = 2 \cdot \left| X_{\text{for } \gamma_{\text{max}}} - X_{\text{for } \frac{\gamma_{\text{max}}}{2}} \right| \quad (4.12)$$

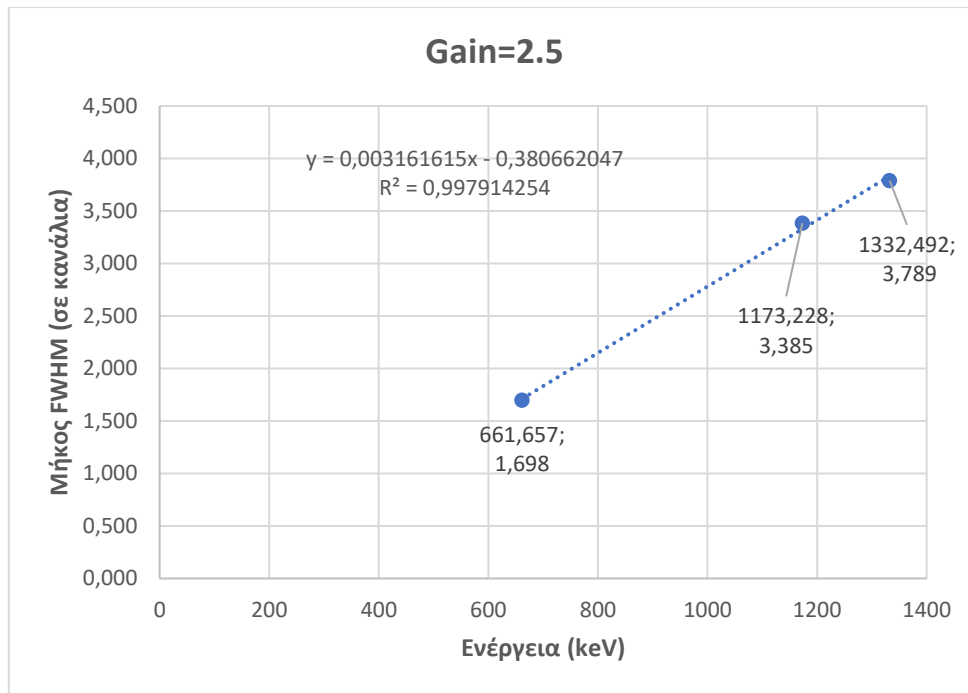
Α. Για μεσαίες και υψηλές ενέργειες φωτονίων ($\text{gain}=2.5$) προκύπτουν οι εξής καμπύλες και σχέσεις υπολογισμού του $FWHM$:



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα εύρους συναρτήσεως του καναλιού

$$FWHM = 0.001541466 \cdot x - 0.37735742 \quad (4.13)$$

Όπου x ο αριθμός του καναλιού.

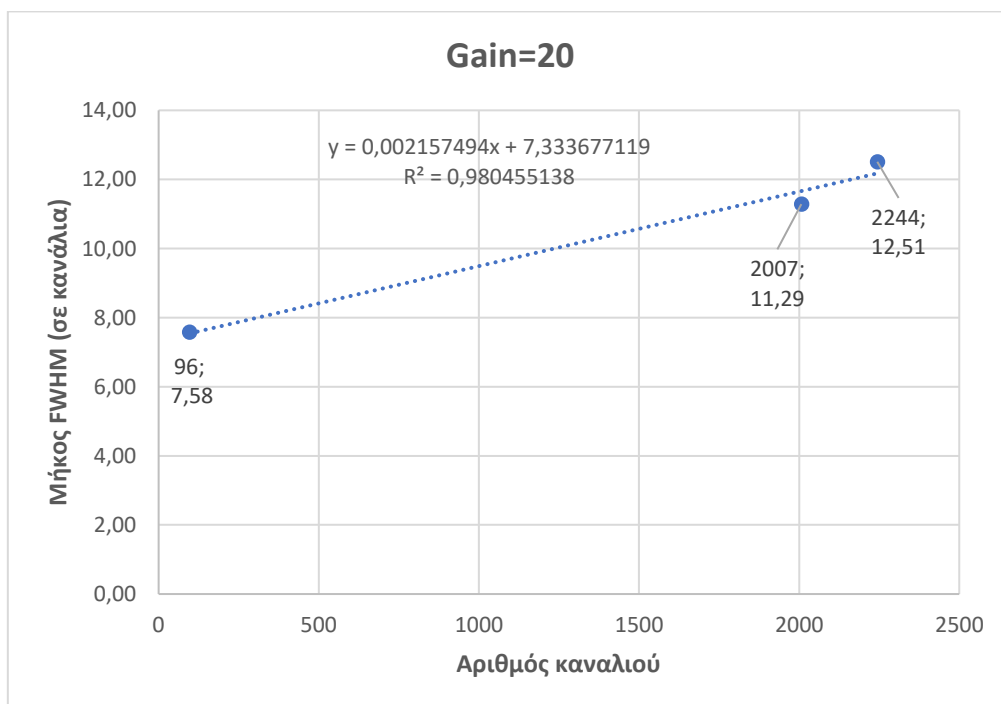


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα εύρους ημίσεως ύψους – Ενέργειας

$$FWHM = 0.00316615 \cdot x - 0.380662047 \quad (4.14)$$

Όπου x η ενέργεια.

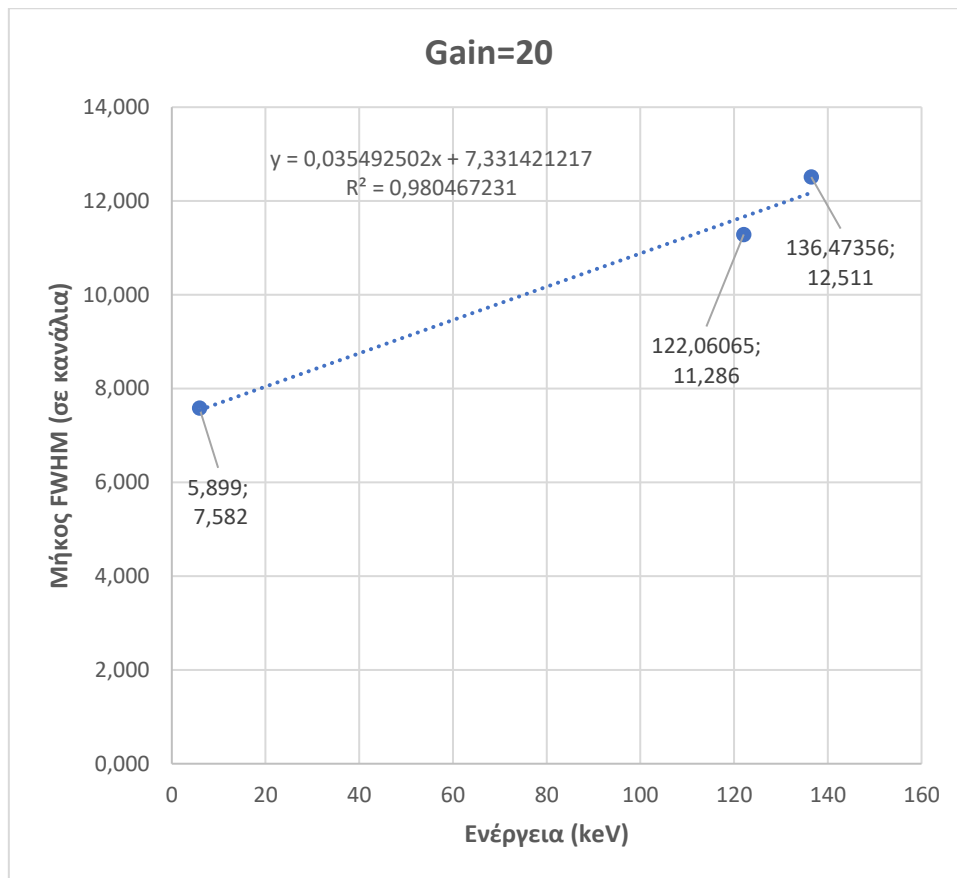
Β. Για χαμηλές ενέργειες φωτονίων (gain=20) προκύπτουν οι εξής καμπύλες και σχέσεις υπολογισμού του FWHM:



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα εύρους ημίσεως ύψους συναρτήσει του καναλιού

$$FWHM = 0.002157494 \cdot x + 7.686293492 \quad (4.15)$$

Όπου x ο αριθμός του καναλιού.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα εύρους ημίσεως ύψους συναρτήσει της ενέργειας

$$FWHM = 0.035492502 \cdot x + 7.331421217 \quad (4.16)$$

Όπου x η ενέργεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΒΕGe ΚΑΙ ΚΑΤΩΤΕΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή στην βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής

Ως γ -φασματοσκοπική ανάλυση ορίζεται μια μη καταστροφική αναλυτική τεχνική για τον ποσοτικό και ποιοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων, από την ανίχνευση των εκπεμπόμενων ακτινών- γ . Για την μελέτη απλών φασμάτων στα οποία δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια, η ανάλυση πραγματοποιείται συνήθως με χρήση ενός πολυκαναλικού αναλυτή και δίχως κάποιο πρόγραμμα. Στην πλειονότητα τους όμως τα φάσματα είναι πολύπλοκα, με πλήθος παραπλήσιων φωτοκορυφών, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση πακέτων λογισμικού από τους χρήστες. Για αυτό τον λόγο γίνεται χρήση εξειδικευμένου λογισμικού ανάλυσης. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. είναι οι κώδικες **SPUNAL** και **GENIE 2000** οι οποίοι θα αναλυθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην παράγραφο 5.2.4.

Κατά τη βαθμονόμηση απόδοσης μίας ανιχνευτικής διάταξης προσδιορίζεται η απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων. Ως απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) ορίζεται ο λόγος των γεγονότων που καταγράφονται από την ανιχνευτική διάταξη και τα οποία οφείλονται σε πλήρη απορρόφηση φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας, προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων της ίδιας ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή. Η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται από τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, τον τύπο του ανιχνευτή, καθώς και την ενέργεια των φωτονίων. Η απόδοση αυτή παρουσιάζει μεγάλη χρησιμότητα για την διαδικασία του ποσοτικού προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων και γίνεται είτε πειραματικά είτε με χρήση κωδικών προσομοίωσης Monte Carlo. (Σάββα, 2009)

Η διαδικασία πειραματικής βαθμονόμησης της απόδοσης μιας διάταξης είναι η εξής:

1. Αρχικά, κατασκευάζεται πρότυπη πηγή, συγκεκριμένης γεωμετρίας, με την χρήση πιστοποιημένων πηγών (certified reference sources). Οι πιστοποιημένες αυτές πηγές, είναι επιθυμητό να εκπέμπουν φωτόνια τα οποία καλύπτουν το σύνολο του ενδιαφερόμενου φάσματος.
2. Στη συνέχεια, οι πρότυπες αυτές πηγές τοποθετούνται στην προκαθορισμένη θέση-γεωμετρία και συλλέγεται το φάσμα για επαρκές χρονικό διάστημα, ούτως ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική.

3. Το φάσμα που λαμβάνεται, υπόκειται σε γ-φασματοσκοπική ανάλυση και προσδιορίζονται οι επιθυμητές των επιθυμητών φωτοκορυφών.
4. Τέλος, για κάθε μία ενέργεια φωτονίων υπολογίζεται η απόδοση φωτοκορυφής από τη σχέση:

$$eff = \frac{area}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (5.1)$$

όπου

eff : Η απόδοση φωτοκορυφής για την επιθυμητή ενέργεια.

area : Η επιφάνεια της επιθυμητής φωτοκορυφής του φάσματος.

time : Το χρονικό διάστημα συλλογής του φάσματος σε sec.

yield : Το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή.

activity: Η ραδιενέργεια του εξεταζόμενου ισοτόπου σε Bq.

5. Οι αποδόσεις για τις διάφορες ενέργειες που έχουν υπολογισθεί προηγουμένως τοποθετούνται σε λογαριθμικό διάγραμμα ούτως ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή τους σε μία ή περισσότερες κατάλληλες συναρτήσεις αναδρομής, ανάλογα με τον τύπο του ανιχνευτή και την περιοχή ενεργειών. Οι συναρτήσεις αναδρομής είναι συνήθως δύο για να κλύπτουν ικανοποιητικά δύο ενεργειακές περιοχές:
 - Μία για χαμηλές και μεσαίες ενέργειες (< 279.19 keV)
 - Μία για υψηλές ενέργειες (> 279.19 keV)

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν δύο οι περισσότερες πηγές, τα προαναφερθέντα βήματα πρέπει να επαναληφθούν για κάθε πηγή ξεχωριστά και η καμπύλη αναδρομής να απαρτίζεται από το σύνολο των ευρισκόμενων σημείων.

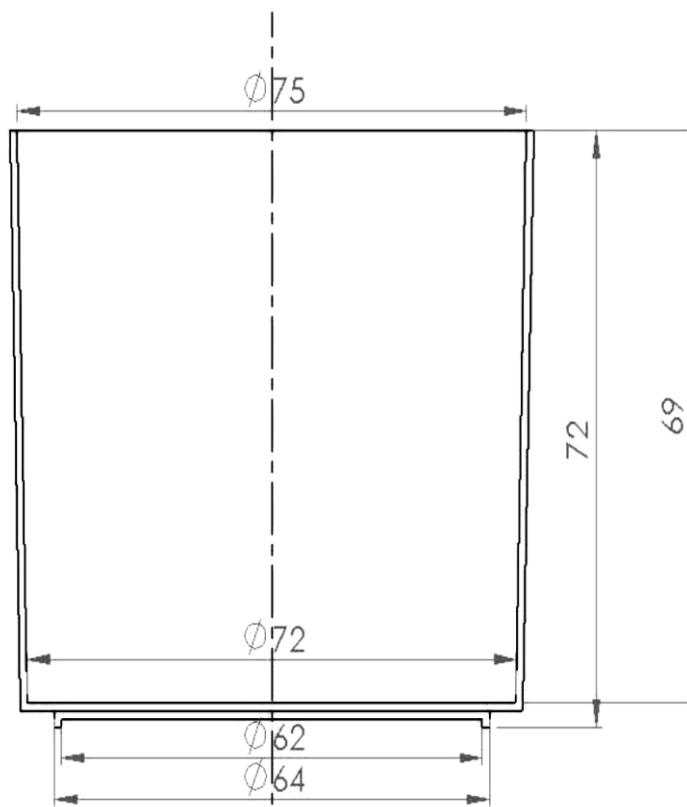
Σε περίπτωση που έχει γίνει η βαθμονόμηση απόδοσης και είναι γνωστή η απόδοση φωτοκορυφής για το συγκεκριμένο ισότοπο, με χρήση της σχέσης (5.1), λύνοντας ως προς activity υπολογίζεται η ραδιενέργεια του ισοτόπου στο δείγμα.

5.2 Πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής

5.2.1 Υπολογισμός ραδιενέργειας των ισοτόπων του δείγματος

Για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή BEGe, στα πλαίσια της ΔΕ χρησιμοποιήθηκε πηγή αναφοράς «γεωμετρίας 2», Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά του δοχείου που χρησιμοποιείται για τη γεωμετρίας 2.

Η πηγή βαθμονόμησης κατασκευάστηκε από μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα το σε μορφή υδατικού διαλύματος, οποίο διατέθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στα πλαίσια Άσκησης Διασύγκρισης του δικτύου εργαστηρίων ALMERA. Το Πιστοποιητικό της πηγής παρατίθεται στο Παράρτημα Β, ενώ στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα ισότοπα και η ραδιενέργεια της πηγής με ημερομηνία αναφοράς 01/01/2020. Η πηγή βαθμονόμησης που κατασκευάστηκε είχε μάζα m=281.5 g και την κωδική ονομασία TEL200403.



Σχήμα 5.1: Σκαρίφημα τυποποιημένου δοχείου πηγής όγκου γεωμετρίας 2

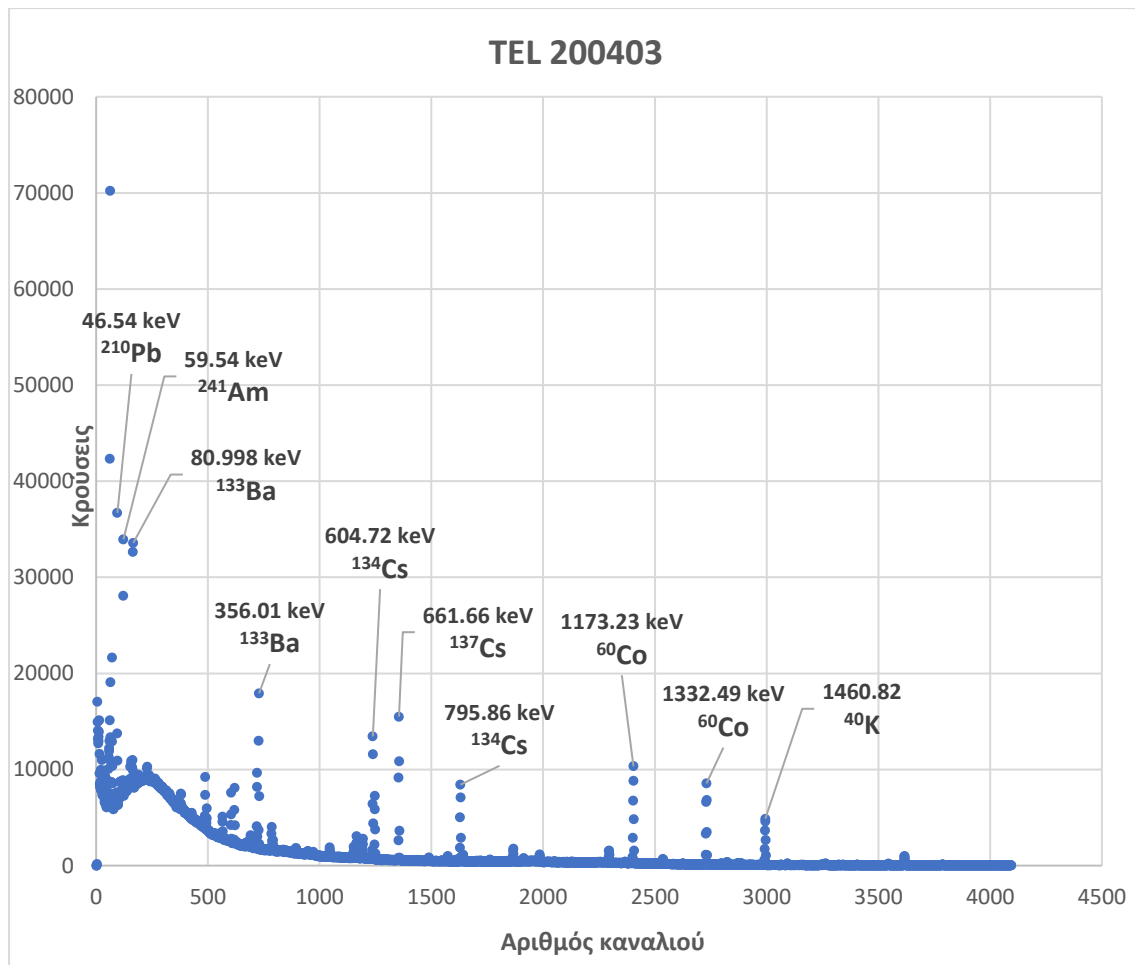
Isotope	Activity concentration (Bq/kg)	Uncertainty (Bq/kg)
^{60}Co	307	3
^{133}Ba	171	2
^{134}Cs	210	2
^{137}Cs	210	2
^{210}Pb	905	17
^{210}Po	921	20
^{241}Am	117	1

Πίνακας 5.1: Συνοπτικό πιστοποιητικό πηγής που παραλήφθηκε σε Άσκηση Διασύγκρισης

Η πειραματική διαδικασία βαθμονόμησης της απόδοσης, ξεκινά με την τοποθέτηση του ανιχνευτή BEGe σε όρθια θέση και την τοποθέτηση της πηγής βαθμονόμησης επί του ανιχνευτή, εντός πλαστικής σακούλας (για προφύλαξη από διαρροές), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Το φάσμα, το οποίο λαμβάνεται για χρονική διάρκεια 82140 sec ούτως ώστε να έχει επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Ανιχνευτική διάταξη BEGe – πηγής γεωμετρίας 2 TEL 200403



Σχήμα 5.2: Φάσμα της πηγής TEL200403

Για τον υπολογισμό της απόδοσης των διαφόρων φωτοκορυφών του φάσματος, αρχικά βρέθηκε η ραδιενέργεια κάθε ισοτόπου την ημέρα που πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Αρχικά, από τον Πίνακα 5.1 ευρίσκεται η ραδιενέργεια των ισοτόπων σε Bq μέσω της σχέσης:

$$R_{old} = \text{Activity concentration} \cdot \text{mass} \quad (5.2)$$

όπου

R_{old} : Η ραδιενέργεια του ισοτόπου σε Bq στις 01/01/2020

Activity concentration: Η τιμή της ραδιενέργειας από τη 2^η στήλη του πίνακα 5.1 σε Bq/kg

mass: Η μάζα του δείγματος (εδώ 281.5 g)

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος που έχει παρέλθει από την ημερομηνία του πιστοποιητικού, έως αυτή της πραγματοποίησης του πειράματος σε δευτερόλεπτα. Η πειραματική διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε στις 09/10/2020, δηλαδή 282 ημέρες αργότερα ($t=24,364,800$ sec). Επομένως, η ραδιενέργεια κάθε ισοτόπου την ημέρα του πειράματος υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{new} = R_{old} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (5.3)$$

όπου

R_{new} : Η ραδιενέργεια του ισοτόπου σε Bq στις 09/10/2020

λ : Η σταθερό διασπάσεως που υπολογίζεται σε sec από το χρόνο υποδιπλασιασμού του κάθε ισοτόπου της πηγής $T_{1/2}$ από τη σχέση: $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$

t : Ο χρόνος που παρήλθε από την μέρα που αναγράφεται στο πιστοποιητικό έως την ημέρα του πειράματος.

5.2.2 Υπολογισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφών, χωρίς τη χρήση λογισμικού

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά στο συνεχές υπόστρωμα (background) μίας ανιχνευτικής διάταξης, ούτως ώστε να επεξηγηθεί ο ρόλος του στον πειραματικό προσδιορισμό της επιφάνειας μίας φωτοκορυφής και κατά συνέπεια της καμπύλης βαθμονόμησης. Ως υπόστρωμα ορίζεται το σύνολο των φωτονίων που καταγράφονται στο φάσμα, τα οποία δεν προέρχονται αποκλειστικά από την εξεταζόμενη πηγή. Πέραν αυτής, το λαμβανόμενο φάσμα διαμορφώνεται από φωτόνια κοσμικής προελεύσεως, από φυσική ακτινοβολία υποβάθρου (ισότοπα θωρακίσεως και φυσικά περιβαλλοντικά ισότοπα) και από σκεδάσεις Compton που πραγματοποιούνται εντός του ανιχνευτή, της θωρακίσεως και της πηγής.

Στα πλαίσια της παρούσας πειραματικής εργασίας απαιτείται ο υπολογισμός της καθαρής επιφάνειας των φωτοκορυφών, η οποία ισούται με την διαφορά της

επιφάνειας του συνεχούς υποστρώματος από την συνολική επιφάνεια κάθε φωτοκορυφής.

$$Net\ Area = Counts_{spectrum} - Counts_{background} \quad (5.4)$$

Όπου

Net Area: Το πλήθος των κρούσεων που οφείλονται μόνο στην πηγή

Counts_{spectrum}: Το συνολικό πλήθος των κρούσεων που καταγράφεται κάτω από την φωτοκορυφή

Counts_{background}: Το πλήθος των κρούσεων του συνεχούς υποστρώματος κάτω από τη φωτοκορυφή

Παρατηρώντας κανείς το Σχήμα 5.3, διαπιστώνει εύκολα ότι το συνεχές υπόστρωμα επηρεάζει κυρίως τις φωτοκορυφές στις χαμηλές ενέργειες. Σημειώνεται ότι το φάσμα υποβάθρου είναι διαφορετικό για κάθε ανιχνευτή, όμως σε παρεμφερείς ανιχνευτές, με παρόμοιες θωρακίσεις, οι οποίοι λειτουργούν σε κοντινές ενεργειακές περιοχές, τα φάσματα παρουσιάζουν δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. (Παπαδιονυσίου, 2015)

5.2.3 Προσδιορισμός συναρτήσεων υπολογισμού της απόδοσης για διάφορες ενέργειες φωτονίων

Έχοντας βρει όλα τα παραπάνω μεγέθη, είναι εφικτός πλέον ο υπολογισμός της απόδοσης κάθε φωτοκορυφής μέσω της σχέσης (5.1). Στον ακόλουθο συγκεντρωτικό Πίνακα 5.2 αναγράφονται όλες οι αποδόσεις για τις διάφορες φωτοκορυφές των ισοτόπων της πηγής, καθώς και τα υπόλοιπα μεγέθη που χρειάστηκαν στους υπολογισμούς.

Isotope	Energy (keV)	R _{new} (Bq)	Yield (%)	Net Area	efficiency
²¹⁰ Pb	46.539	248.686	4.25	47009	0.0541
²⁴¹ Am	59.5409	32.895	35.9	46658	0.0481
¹³³ Ba	80.9979	45.745	32.9	55619	0.0450
¹³³ Ba	356.0129	45.745	62.05	35333	0.0156
¹³⁴ Cs	604.721	45.612	97.62	34338	0.00939
¹³⁷ Cs	661.657	58.072	85.10	39212	0.00966
¹³⁴ Cs	795.864	45.612	85.46	23891	0.00746
⁶⁰ Co	1173.228	78.077	99.85	34593	0.00540
⁶⁰ Co	1332.492	78.077	99.98	30558	0.00477

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικός πίνακας διαφόρων μεγεθών για τα ισότοπα της πηγής TEL200403

Με βάση τον παραπάνω πίνακα κατασκευάζονται τα λογαριθμικά διαγράμματα ενέργειας – απόδοσης (Σχήμα 5.4 και Σχήμα 5.5) από όπου προκύπτουν οι ακόλουθες δύο συναρτήσεις υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής.

- Για $0 < E < 279.19$ keV,

$$\ln(\text{eff}) = -0.37773554 \cdot [\ln(E)]^2 + 2.51357455 \cdot [\ln(E)] - 6.99810618$$

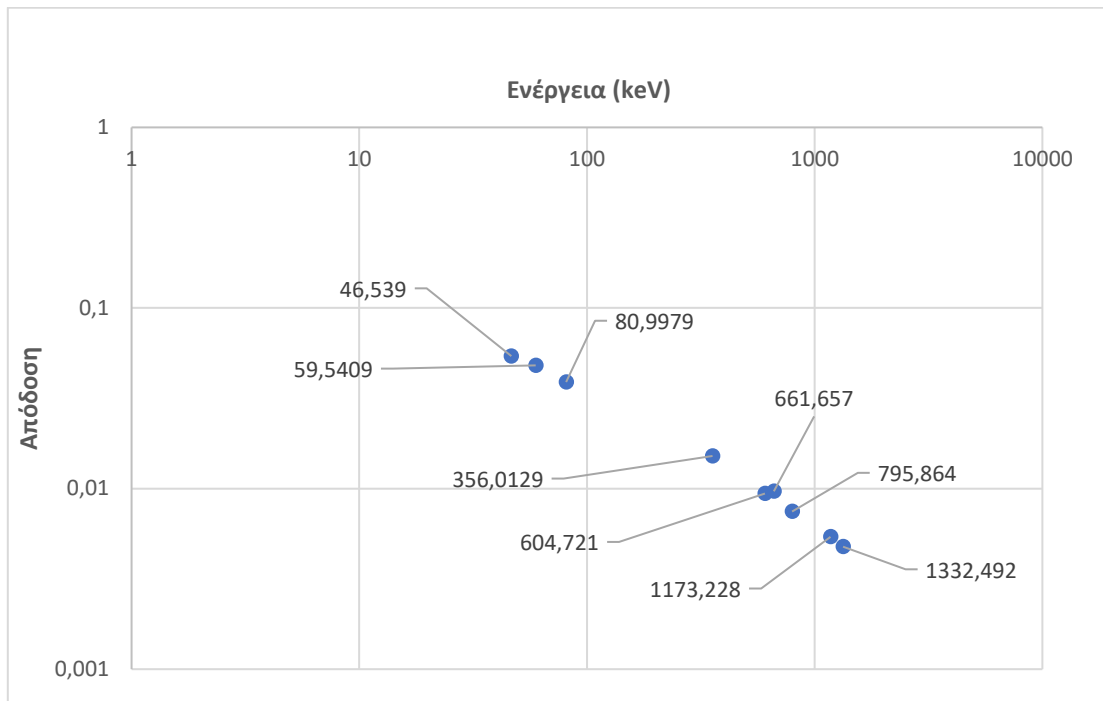
(5.5)

- Για $E > 279.19$ keV,

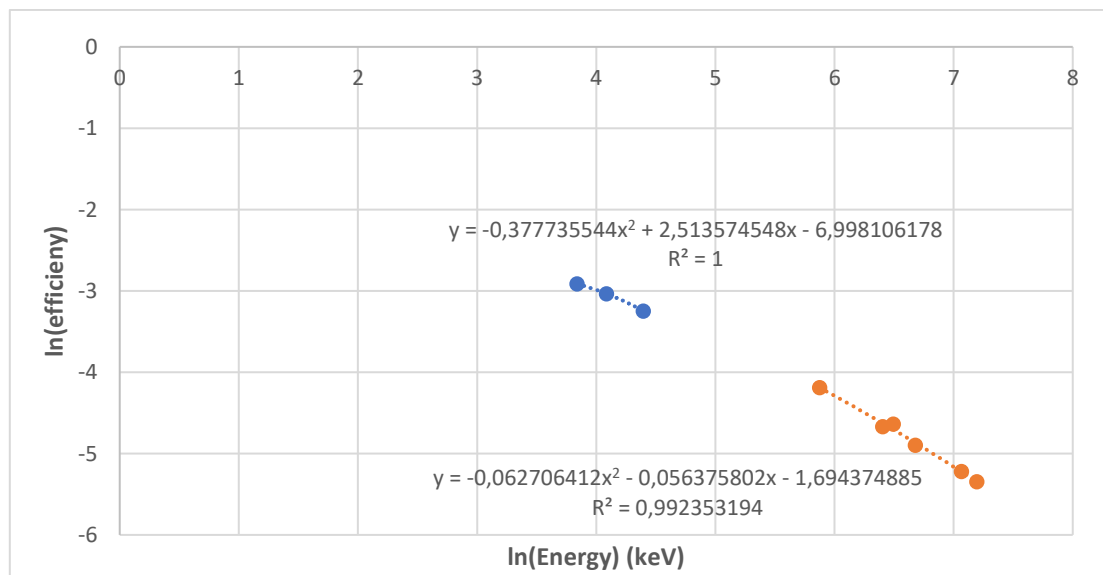
$$\ln(\text{eff}) = -0.062706412 \cdot [\ln(E)]^2 - 0.0563758 \cdot [\ln(E)] - 1.694374885$$

(5.6)

όπου E, η ενέργεια της φωτοκορυφής σε keV.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα απόδοσης φωτοκορυφής – ενέργειας για την πηγή TEL200403

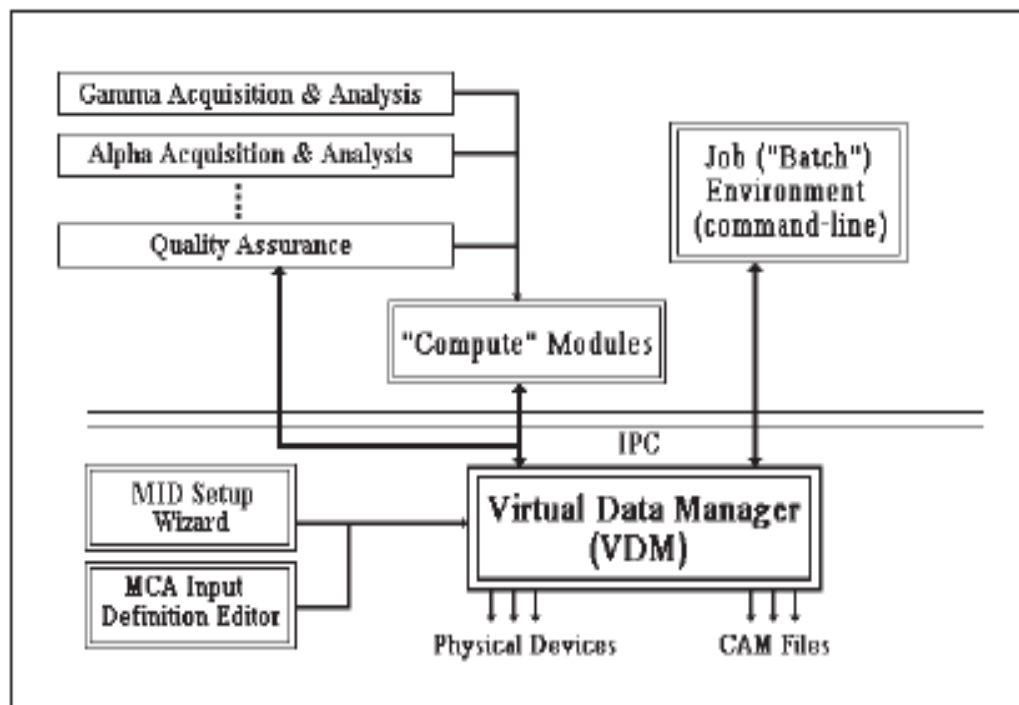


Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ln(απόδοσης φωτοκορυφής) – ln(ενέργειας) για την πηγή TEL200403

5.2.4 Υπολογισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφών μέσω πακέτων λογισμικού SPUNAL και GENIE 2000

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, για την ευκολότερη και ακριβέστερη ανάλυση πολύπλοκων φασμάτων γίνεται χρήση εξειδικευμένων πακέτων λογισμικού όπως το SPUNAL, αλλά και το GENIE 2000.

Το GENIE 2000 παρέχει ένα ευρύ σύνολο δυνατοτήτων, για τη λήψη και την ανάλυση φασμάτων από πολυκαναλικούς αναλυτές. Οι λειτουργίες του περιλαμβάνουν τον χειρισμό του πολυκαναλικού αναλυτή, την απεικόνιση του φάσματος, καθώς και την βασική φασματική ανάλυση. Επιπλέον δυνατότητες περιλαμβάνουν τη συνολική ανάλυση γ-φάσματος τη διασφάλιση ποιότητας, καθώς και ολοκληρωμένα πακέτα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Στο Σχήμα 5.6 παρατίθεται δομικό διάγραμμα για τον κώδικα GENIE 2000.



Σχήμα 5.6: Δομικό διάγραμμα κώδικα GENIE 2000

Ο πυρήνας του λογισμικού GENIE 2000 είναι ένα τμήμα γνωστό ως Virtual Data Manager ή VDM. Το VDM διαχειρίζεται όλη την ροή πληροφοριών εντός του συστήματος και είναι υπεύθυνο για τις επικοινωνίες με τα αρχεία δεδομένων και τις συσκευές πολυκαναλικών αναλυτών, αλλά και για την παρουσίαση πληροφοριών από αυτά σε επακόλουθα στρώματα λογισμικού. Επιπλέον το VDM παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να χειρίζεται όλα τα είδη φασμάτων, είτε από ένα αρχείο δεδομένων, είτε από ένα εκ των υποστηριζόμενων προϊόντων εξοπλισμού του πολυκαναλικού αναλυτή. Τα επόμενα στρώματα είναι τα υπολογιστικά τμήματα. Αυτά είναι μικρά προγράμματα τα οποία εκτελούν βασικές λειτουργίες όπως η μεταφορά φασμάτων από τον πολυκαναλικό αναλυτή σε δίσκους, η αναζήτηση φωτοκορυφών και άλλα. Αυτή η

τμηματική τους φύση, καθιστά δυνατή την εκτενή ευελιξία του λογισμικού GENIE 2000.

Το διαδραστικό περιβάλλον που παρέχεται στο παράθυρο λήψης και ανάλυσης φασμάτων προορίζεται για την ευκολότερη αξιοποίηση όλων των λειτουργιών από τον χρήστη. Από ένα ενσωματωμένο παράθυρο που διαθέτει μενού, γραμμή εργαλείων, παράθυρο αναφοράς και απεικόνιση του φάσματος, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει με εύκολο και διαδραστικό τρόπο οποιαδήποτε εργασία επιθυμεί με το σύστημα. Λόγω αυτών, το πρόγραμμα GENIE 2000 θεωρείται ένα εξαιρετικό εργαλείο για τον χρήστη που έχει εντυπώσει σε αυτό, καθώς του παρέχεται η δυνατότητα της μελέτης δύσκολων φασμάτων, ο έλεγχος της λειτουργίας του συστήματος σε ειδικά δείγματα, η βελτιστοποίηση ρουτινών ανάλυσης και άλλα. ([Genie 2000 Spectroscopy Software, 2006](#))

Εκτός του GENIE 2000, στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται για την ανάλυση φασμάτων και ο κώδικας SPUNAL (**S**pectrum **U**Nix **A**na**L**ysis). Ο κώδικας αυτός έχει αναπτυχθεί εξ' ολοκλήρου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και είναι δομημένος σε FORTRAN 77. Βασική του λειτουργία είναι η αξιοποίηση των φασμάτων που συλλέγονται από τον πολυκαναλικό αναλυτή και η λήψη πληροφοριών για τις φωτοκορυφές. Οι κυριότερες διαδικασίες που παρέχονται στους χρήστες από τον SPUNAL είναι:

- Ο έλεγχος για την ύπαρξη απλών και πολλαπλών φωτοκορυφών.
- Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας (σε 1.65σ) και της επιφάνειας (area).
- Η αντιστοίχιση κάθε φωτοκορυφής σε συγκεκριμένο ισότοπο.
- Ο ποσοτικός προσδιορισμός της ραδιενέργειας του δείγματος (αφού πρώτα γίνει βαθμονόμηση απόδοσης).
- Η διάθεση κατάλληλων προγραμμάτων για κάθε είδος βαθμονόμησης, η οποία είναι απαραίτητη σε διατάξεις με ανιχνευτές υψηλής διακριτικής ικανότητας.
- Η δυνατότητα επικοινωνίας πολυκαναλικών αναλυτών με Η/Υ και αμφίδρομη μεταφορά αρχείων δεδομένων μεταξύ τους.
- Η αυτόματη ενημέρωση των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων. ([Simopoulos, 1989](#))

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκε αναλυτικά η μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής για τα διάφορα ισότοπα της πηγής TEL200403 χωρίς τη χρήση κάποιου είδους λογισμικού. Για λόγους επαλήθευσης της ορθότητας των αποτελεσμάτων αυτών, αποφασίστηκε να γίνει σύγκριση των τιμών των επιφανειών ορισμένων ισωτόπων, με τις τρεις αυτές μεθόδους (χειροκίνητη, SPUNAL, GENIE 2000).

Στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα για μία σειρά φωτοκορυφών.

Isotope	Area (manually)	Area (SPUNAL)	Area (GENIE 2000)
²⁴¹ Am	46658	47807	51750
¹³⁷ Cs	39212	39477	38951
⁶⁰ Co	34593	34889	34194
⁶⁰ Co	30558	30676	30709

Πίνακας 5.3: Συγκριτικός πίνακας τριών μεθόδων υπολογισμούς της επιφάνειας φωτοκορυφής

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε πως οι αποκλίσεις στην τιμή της επιφάνειας (area) μεταξύ όλων των μεθόδων είναι αμελητέες για όλες τις ενέργειες με εξαίρεση τα 59.54 keV του ²⁴¹Am. Η απόκλιση του GENIE 2000 για την φωτοκορυφή του ²⁴¹Am σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάλυση φωτοκορυφών στην περιοχή αυτή του υποστρώματος είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επηρεάζεται σημαντικά από την επιλογή του πλήθους των καναλιών εκατέρωθεν της αιχμής.

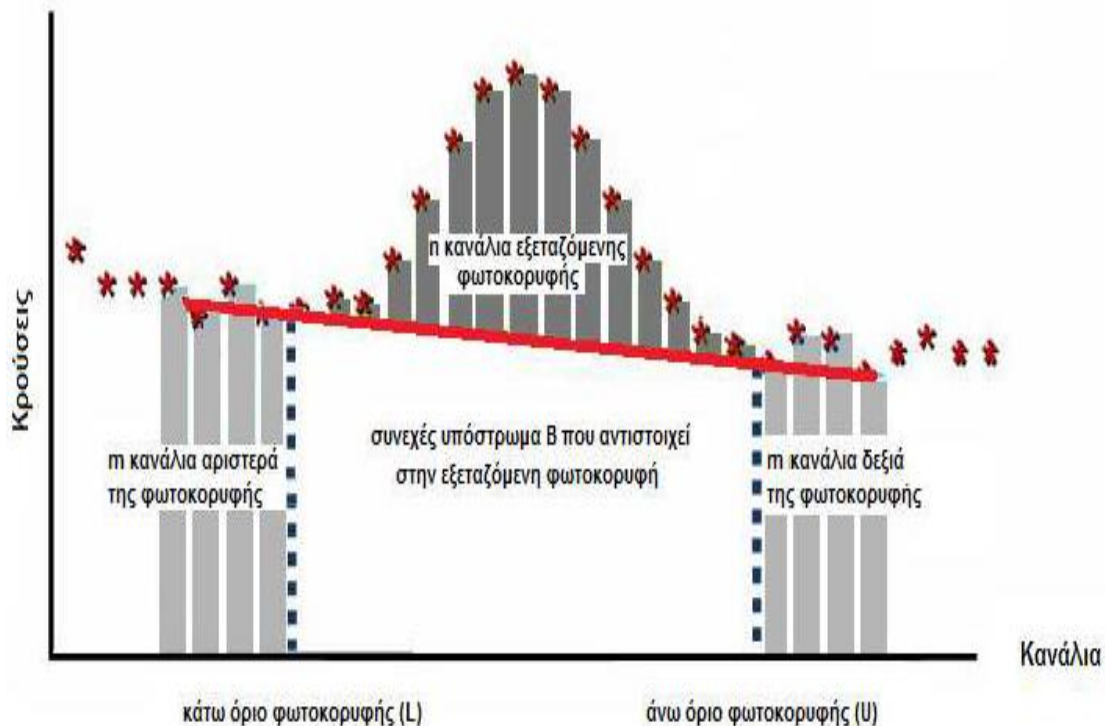
5.3 Υπολογισμός των κατωτέρων ορίων ανίχνευσης της διάταξης

Καθώς το επίπεδο ανίχνευσης μίας φωτοκορυφής επηρεάζεται σημαντικά από το συνεχές υπόστρωμα του φάσματος στην περιοχή της αιχμής, και εφόσον ο σχεδιασμός της θωράκισης του ανιχνευτή BEGe γίνεται με γνώμονα τη μείωση του υποστρώματος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την εργασία να μελετηθούν τα μεγέθη εκείνα που χρησιμοποιούνται για να υπολογισθούν τα κατώτερα όρια ανίχνευσης της διάταξης πριν και μετά τη χρήση της θωράκισης.

5.3.1 Κατώτερο όριο ανίχνευσης (L_D)

Ως κατώτερο όριο ανίχνευσης L_D , ορίζεται το όριο επιφάνειας (area) της φωτοκορυφής, το οποίο ανιχνεύεται με βεβαιότητα για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Για μέτρηση δείγματος, το κατώτερο όριο ανίχνευσης ορίζεται ως η ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια φωτοκορυφής ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευσή της, σε προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Με σκοπό την ευκολότερη επεξήγηση της μεθοδολογίας υπολογισμού του L_D , παρατίθεται το Σχήμα 5.7 στο οποίο σημειώνονται:

1. Τα κανάλια m εκατέρωθεν της φωτοκορυφής που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του υποστρώματος
2. Τα κανάλια n που απαρτίζουν την φωτοκορυφή
3. Το συνεχές υπόστρωμα B της εξεταζόμενης φωτοκορυφής



Σχήμα 5.7: Σκαρίφημα φωτοκορυφής σε άξονες κανάλια - κρούσεις (Σάββα, 2009)

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και σε όρους επιφάνειας, το κατώτερο όριο ανίχνευσης L_D υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Gilmore & Hemingway, 1995):

$$L_D = 2.71 + 3.29 \cdot [B \cdot \left(1 + \frac{n}{2 \cdot m}\right)]^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

όπου

B: το συνεχές υπόστρωμα της εξεταζόμενης φωτοκορυφής, το οποίο υπολογίζεται από την μέθοδο του τραπεζίου.

n: το πλήθος των καναλιών που εμπεριέχουν τη φωτοκορυφή, εκείνων δηλαδή που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επιφάνειας (area).

m: το πλήθος των καναλιών εκατέρωθεν της φωτοκορυφής, τα οποία χρησιμοποιούνται και για την εύρεση του συνεχούς υποστρώματος B.

5.3.2 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (MDA)

Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια MDA (Minimum Detectable Activity) θεωρείται μέγεθος ανάλογο του ορίου ανίχνευσης, με την διαφορά ότι μετράται σε Bq αντί για πλήθος γεγονότων (επιφάνεια). Στην πραγματικότητα και τα δύο μεγέθη δεν υπολογίζουν την πραγματική ελάχιστη ποσότητα ραδιενέργειας που ανιχνεύεται. Αντίθετα, παρέχουν μια εκτίμηση της ραδιενέργειας που απαιτείται να διαθέτει το δείγμα, ούτως ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευσή του για δεδομένη βεβαιότητα από το επίπεδο εμπιστοσύνης. (Παπαδιονυσίου, 2015).

Για τον υπολογισμό του κατωτέρου επιπέδου ανίχνευσης, στα πλαίσια της ΔΕ, λήφθηκε φάσμα φυσικού υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης – εννοείται χωρίς θωράκιση – για τις εξής δύο περιπτώσεις:

1. Ανιχνευτής με το κάλυμμα πολυστυρενίου τοποθετημένο στο παράθυρο του και για χρονική διάρκεια 420712 sec.
2. Ανιχνευτής χωρίς το κάλυμμα πολυστυρενίου για χρονικό διάστημα 430445 sec.

Η τιμή του MDA αποφασίστηκε να ελεγχθεί για μεσαίες ενέργειες φωτονίων και ειδικότερα για τα τρία βασικότερα ισότοπα που ανιχνεύονται σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος. Τα ισότοπα αυτά είναι τα: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs . Στην συνέχεια παρατίθεται η Σχέση (5.8) υπολογισμού του MDA καθώς και ο Πίνακας 5.4 με όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας.

$$MDA = \frac{L_D}{time \cdot yield \cdot eff} \quad (5.8)$$

Ισότοπο	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
Ενέργεια σε keV	364.489	604.721	661.657
Yield (%)	81.5	97.62	85.1
efficiency	0.012456	0.008462	0.007742
Αριθμός καναλιού	747	1238	1355
FWHM σε κανάλια Σχέση (4.14)	0.7735	1.5316	1.7113
Αριθμός καναλιού - 1.5 · FWHM	745.84	1235.7016	1352.433
Αριθμός καναλιού + 1.5 · FWHM	748.1603	1240.2974	1357.567
3 · FWHM	2.32	4.595	5.134
Πλήθος καναλιών εντός φωτοκορυφής m	3	5	7
Πλήθος καναλιών δεξιά και αριστερά της φωτοκορυφής n	6	4	6
Υπόστρωμα B σε κρούσεις (με το κάλυμμα)	16904	11053	13031
Υπόστρωμα B σε κρούσεις (χωρίς το κάλυμμα)	17289	11498	13328
L_d σε κρούσεις (με το κάλυμμα) Σχέση (5.7)	607.6	412	451.6
L_d σε κρούσεις (χωρίς το κάλυμμα) Σχέση (5.7)	614.5	420.1	456.7
MDA σε Bq (με το κάλυμμα)	0.001444	0.000979	0.001073
MDA σε Bq (χωρίς το κάλυμμα)	0.001427	0.000976	0.001061
MDA (χωρίς κάλυμμα) / MDA (με το κάλυμμα)	0.9884	0.9967	0.9884

Πίνακας 5.4: Πίνακας μεγεθών που απαιτούνται για την εύρεση της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας

Από την τελευταία σειρά του Πίνακα 5.4 διαπιστώνεται ότι ο λόγος του MDA χωρίς κάλυμμα προς τον αντίστοιχο με κάλυμμα προσεγγίζει την μονάδα για όλα τα ισότοπα. Επομένως, συμπεραίνεται ότι το καπάκι πολυστυρενίου που τοποθετείται στο παράθυρο του ανιχνευτή BEGe δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια για τις φωτοκορυφές των επιλεγμένων ραδιενεργών ισοτόπων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

BEGe

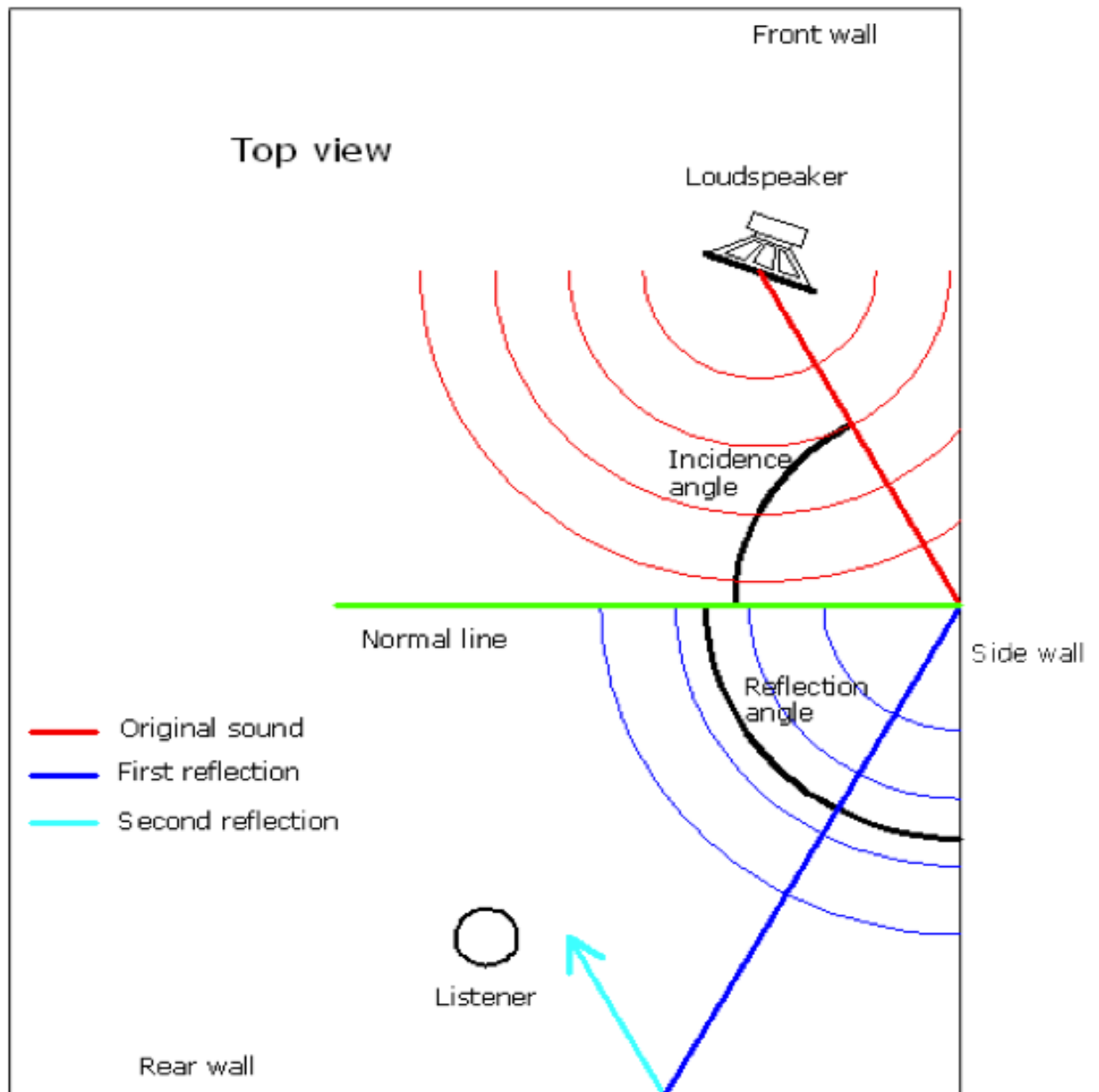
Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής θωράκισης για τον ανιχνευτή BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ, έτσι ώστε ο ανιχνευτής αυτός να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για in-vitro αναλύσεις δειγμάτων. Η θωράκιση αυτή θα αποτελείται από μεμονωμένα τούβλα από μολύβι και κατά συνέπεια θα υπάρχει μία σχετική ευελιξία στο σχήμα και το μέγεθος της. Όπως έχει περιγραφεί στο 2^ο Κεφάλαιο η θωράκιση, πέραν του ότι μειώνει το υπόστρωμα λόγω του περιβάλλοντος, εξαιτίας των σκεδάσεων της ακτινοβολίας που εκπέμπει το δείγμα που αναλύεται, δημιουργεί επιπλέον υπόστρωμα. Ειδικότερα, οι οπισθοσκεδάσεις των φωτονίων της πηγής δημιουργούν στο φάσμα μία αιχμή μεγάλου εύρους στην περιοχή περί τα 200keV, με συνέπεια η ανίχνευση φωτονίων στην περιοχή αυτή να γίνεται δυσχερέστερη. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ με στόχο τη μείωση κατά το δυνατόν του υποστρώματος που δημιουργείται λόγω σκεδάσεων της ακτινοβολίας της πηγής. Σε μεγάλο βαθμό η μελέτη αυτή βασίστηκε στη λογική και στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ανάκλασης του ήχου στις ηχητικές εφαρμογές.

6.1 Εισαγωγή στους ανηχοϊκούς θαλάμους

Στις εφαρμογές ήχου, το ποσοστό και οι γωνίες ανάκλασης του ήχου εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων όπως:

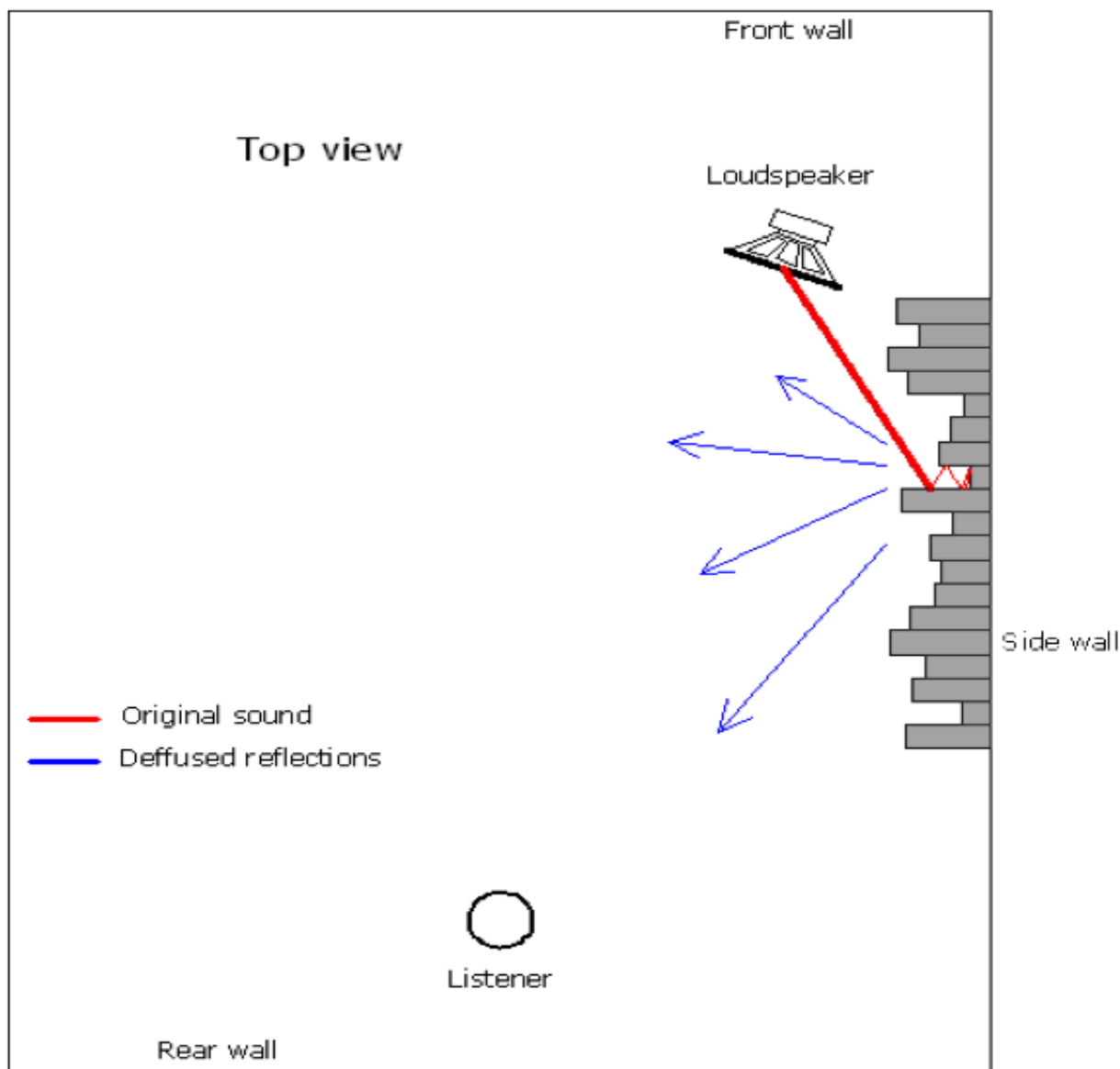
- Οι φυσικές ιδιότητες των επιφανειών πρόσκρουσης (σχήμα, ελαστικότητα, μέγεθος, θερμοκρασία, πυκνότητα).
- Η συχνότητα του ήχου κάθε χρονική στιγμή.

Για παράδειγμα, όταν ένα ηχητικό κύμα προσκρούει σε επίπεδη επιφάνεια, η γωνία ανάκλασης ισούται με την αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης. Η περίπτωση αυτή αποτελεί την απλούστερη μορφή του φαινομένου και ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Κατοπτρική ανάκλαση ήχου (Athens Pro Audio, n.d.)

Αντίθετα, όταν η επιφάνεια ανάκλασης είναι μη επίπεδη, παρατηρούνται ακανόνιστες ανακλάσεις προς πάσα κατεύθυνση, καθώς και απορρόφηση τμήματος του ήχου εξαιτίας γεωμετριών όπως εκείνων στο Σχήμα 6.2. Η ηχητική ανάκλαση της παραπάνω μορφής ονομάζεται διάχυση.



Σχήμα 6.2: Διάχυση ήχου (Athens Pro Audio, n.d.)

Ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται, αλλά και με τη γεωμετρική διαμόρφωσή τους επιτυγχάνεται η απορρόφηση ενός μέρους του ακουστικού φάσματος, η οποία είναι ιδιαίτερα υψηλή σε **ανηχοϊκούς θαλάμους**. Αυτή η ιδιότητα των ανηχοϊκών θαλάμων να μειώνουν σε μεγάλο βαθμό την επιστροφή του ανακλώμενου ήχου στον ακροατή, αποτέλεσε το έναυσμα για μελέτη του κατά πόσον είναι δυνατή η πραγματοποίηση παρόμοιου φαινομένου για τα φωτόνια εντός μίας θωράκισης ανιχνευτή γερμανίου.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία – εκτός των άλλων – μελετήθηκε με χρήση του κώδικα προσομοίωσης Monte-Carlo PENELOPE το κατά πόσον μια θωράκιση μολύβδου κατάλληλης γεωμετρίας και διαστάσεων η οποία περιβάλλει έναν ανιχνευτή γερμανίου, μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό την αιχμή οπισθοσκέδασης – κυρίως – που ανιχνεύεται στο φάσμα.

Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται ο τελειότερος ανηχοϊκός θάλαμος που έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα και βρίσκεται στο Microsoft Audio Lab στην Washington των ΗΠΑ.



Σχήμα 6.3: Ανηχοϊκός θάλαμος του Microsoft Audio Lab στην Washington

Όπως εύκολα διαπιστώνει κανείς, όλες του οι επιφάνειες αποτελούνται από την ίδια γεωμετρία πλέγματος πυραμίδων, τοποθετημένων κάθετα και παράλληλα σε επαναλαμβανόμενο μοτίβο. Επειδή όμως η παραπάνω πολύπλοκη γεωμετρία είναι πολύ δύσκολο, τόσο να σχεδιαστεί προκειμένου να προσομοιωθεί σε κώδικα Monte-Carlo, όσο και κυρίως να κατασκευαστεί με τα διαθέσιμα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ υλικά, αποφασίστηκε η μελέτη απλούστερων γεωμετριών θωράκισης οι οποίες όμως βασίζονται στην προαναφερθείσα ιδέα.

6.2 Μελέτη του φαινομένου της οπισθοσκέδασης με χρήση του κώδικα PENELOPE

Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθεί κατά πόσο επηρεάζει η γεωμετρία της ανιχνευτικής θωράκισης το φαινόμενο της οπισθοσκέδασης των φωτονίων που εκπέμπονται από πηγή φωτονίων. Το βέλτιστο δυνατό σενάριο θα ήταν η εύρεση εύκολα κατασκευάσιμης γεωμετρίας θωράκισης, η οποία θα μείωνε την αιχμή οπισθοσκέδασης όσο το δυνατόν περισσότερο. Προς την κατεύθυνση αυτή, έγινε διερεύνηση μίας σειράς γεωμετριών θωράκισης.

6.2.1 Κυλινδρική θωράκιση απέναντι από κυλινδρικό ανιχνευτή

Σε πρώτη φάση αποφασίστηκε η μελέτη της αιχμής οπισθοσκέδασης σε μία αρκετά απλουστευμένη διάταξη, η οποία αποτελείται από τρία μέρη:

1. Έναν συμπαγή κύλινδρο γερμανίου διαμέτρου 6 cm, που ορίζεται ως ανιχνευτής. Στην πραγματικότητα κανένας ανιχνευτής του εμπορίου δεν αποτελείται μονάχα από έναν συμπαγή κύλινδρο γερμανίου, αλλά για λόγους απλούστευσης της προσομοίωσης (και εξοικονόμησης χρόνου) σε αυτό το στάδιο έγινε η παραδοχή ότι είναι συμπαγής κύλινδρος γερμανίου.
2. Μια κυλινδρική πλάκα μολύβδου η οποία προσομοιώνει την θωράκιση του ανιχνευτή και είναι είτε συμπαγής, είτε διαθέτει διαμπερείς οπές διαφόρων διαμέτρων.
3. Μία σημειακή πηγή ^{137}Cs που βρίσκεται ανάμεσα στον ανιχνευτή και την θωράκιση και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 661.657 keV, με κατεύθυνση προς την θωράκιση, ώστε να μειωθεί το υπόστρωμα που παράγεται λόγω της μερικής απορρόφησης των πρωτογενών φωτονίων στον ανιχνευτή και να εμφανισθεί καλύτερα η αιχμή οπισθοσκέδασης και οι ακτίνες-X των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η πηγή ^{137}Cs βρίσκεται 2 cm από τον ανιχνευτή και 15 cm από τη θωράκιση.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις επιμέρους γεωμετρίες που προσομοιώθηκαν.

6.2.1.1 Κυλινδρική θωράκιση διαμέτρου 15 cm με διαμπερείς οπές διαμέτρου 2 cm

Στην περίπτωση αυτή μελετήθηκαν τρία σενάρια τα οποία διαφέρουν μονάχα όσον αφορά στη θωράκιση πάχους 10 cm και διαμέτρου 15 cm.

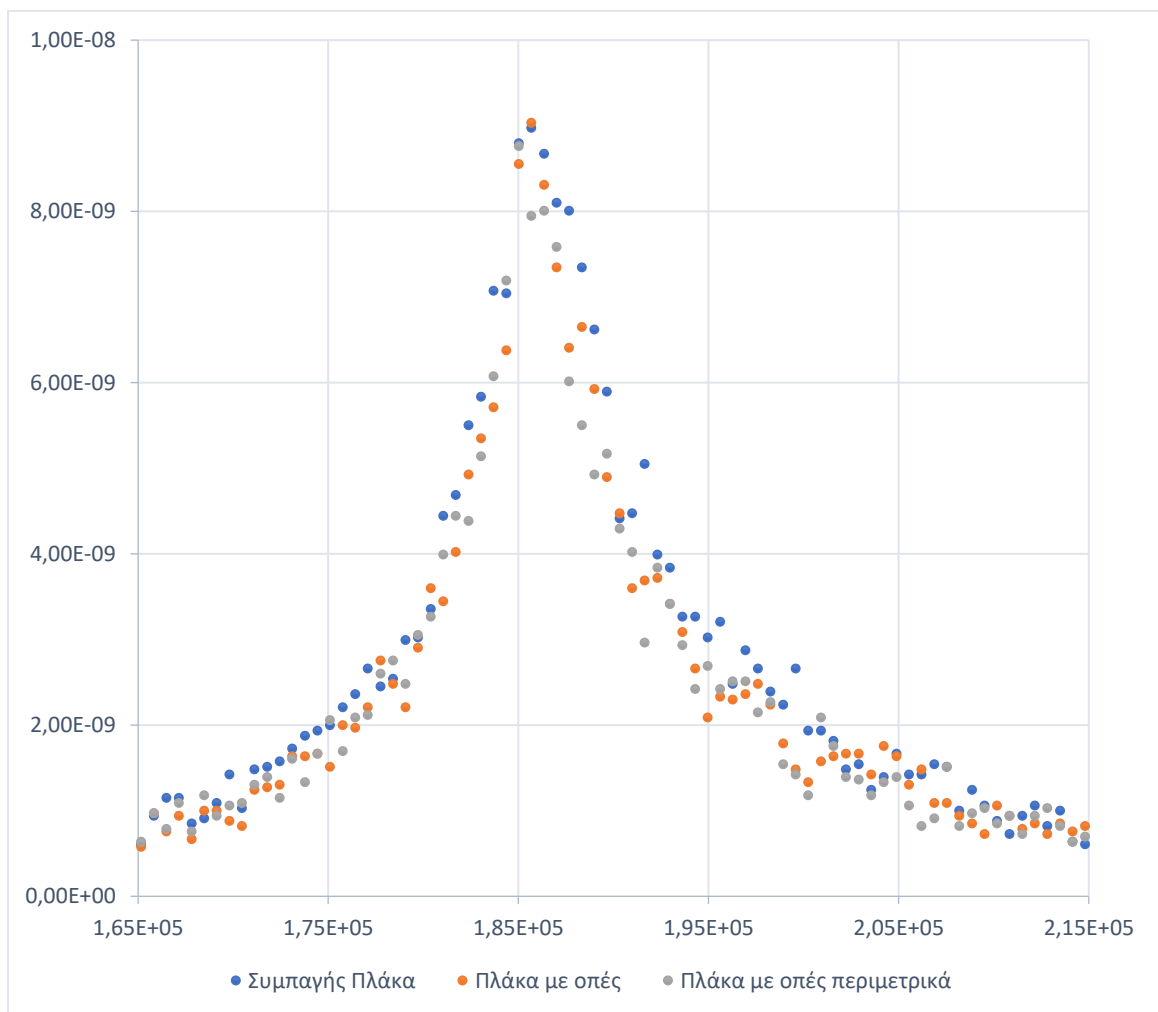
- Στο 1^ο σενάριο η θωράκιση είναι συμπαγής,
- Στο 2^ο σενάριο η θωράκιση διαθέτει 14 διαμπερείς οπές διαμέτρου 2cm,
- Στο 3^ο σενάριο η θωράκιση είναι ίδια με αυτή του 2^ο με την διαφορά ότι απουσιάζει η κεντρική οπή.

Σε όλα τα σενάρια, ως ανιχνευτής ορίζεται ένας κύλινδρος γερμανίου διαμέτρου 6 cm και πάχους 3 cm.

Στο Σχήμα 6.4 διακρίνονται οι τρεις γεωμετρίες που προσομοιώθηκαν, ενώ στο Σχήμα 6.5 η αντίστοιχες αιχμές οπισθοσκέδασης, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 6.5, δεν φαίνεται να υπάρχει μεγάλη επίδραση των οπών στην αιχμή οπισθοσκέδασης, αν και η παρουσία των οπών φαίνεται να μειώνει ελαφρά τις οπισθοσκέδασεις..



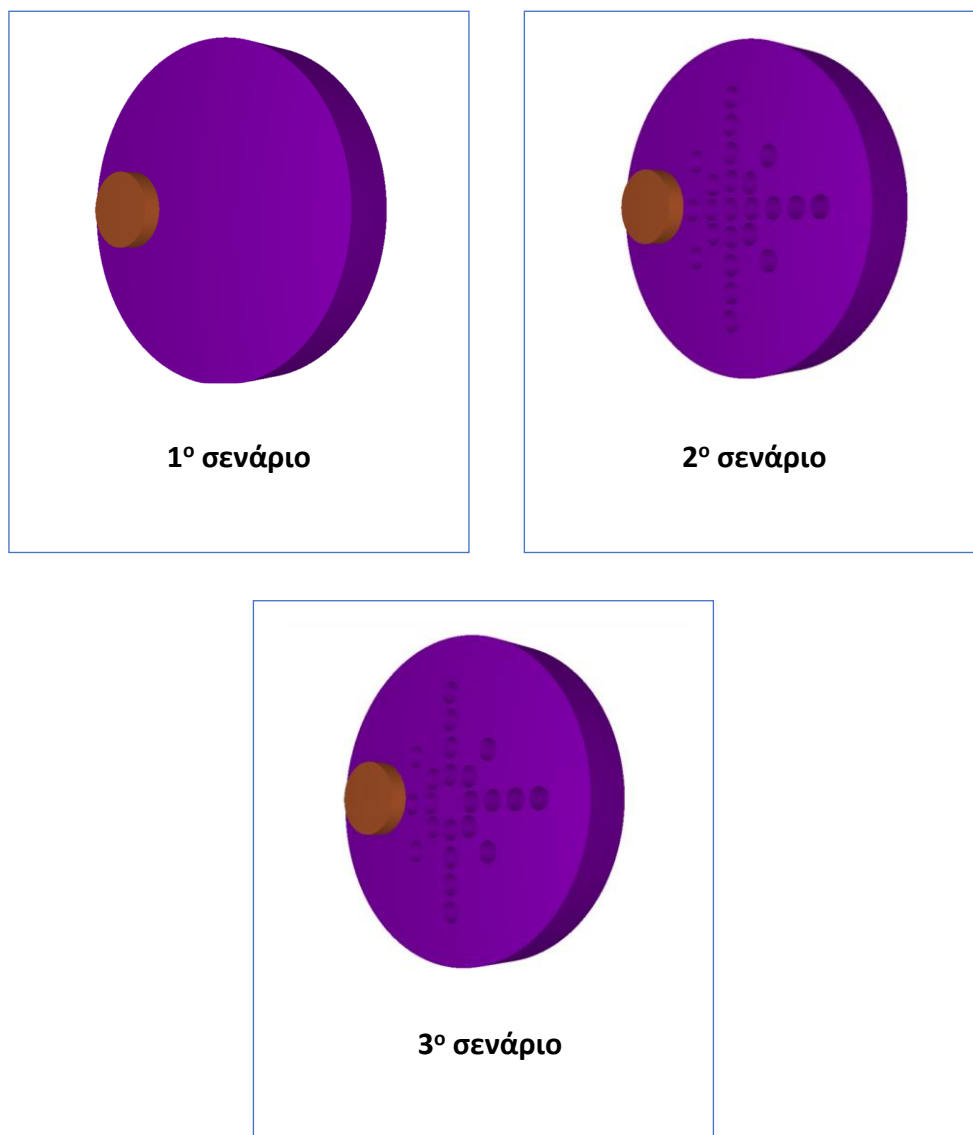
Σχήμα 6.4: Τα 3 σενάρια κυλινδρικής θωρακίσεως διαμέτρου 15 εκατοστών



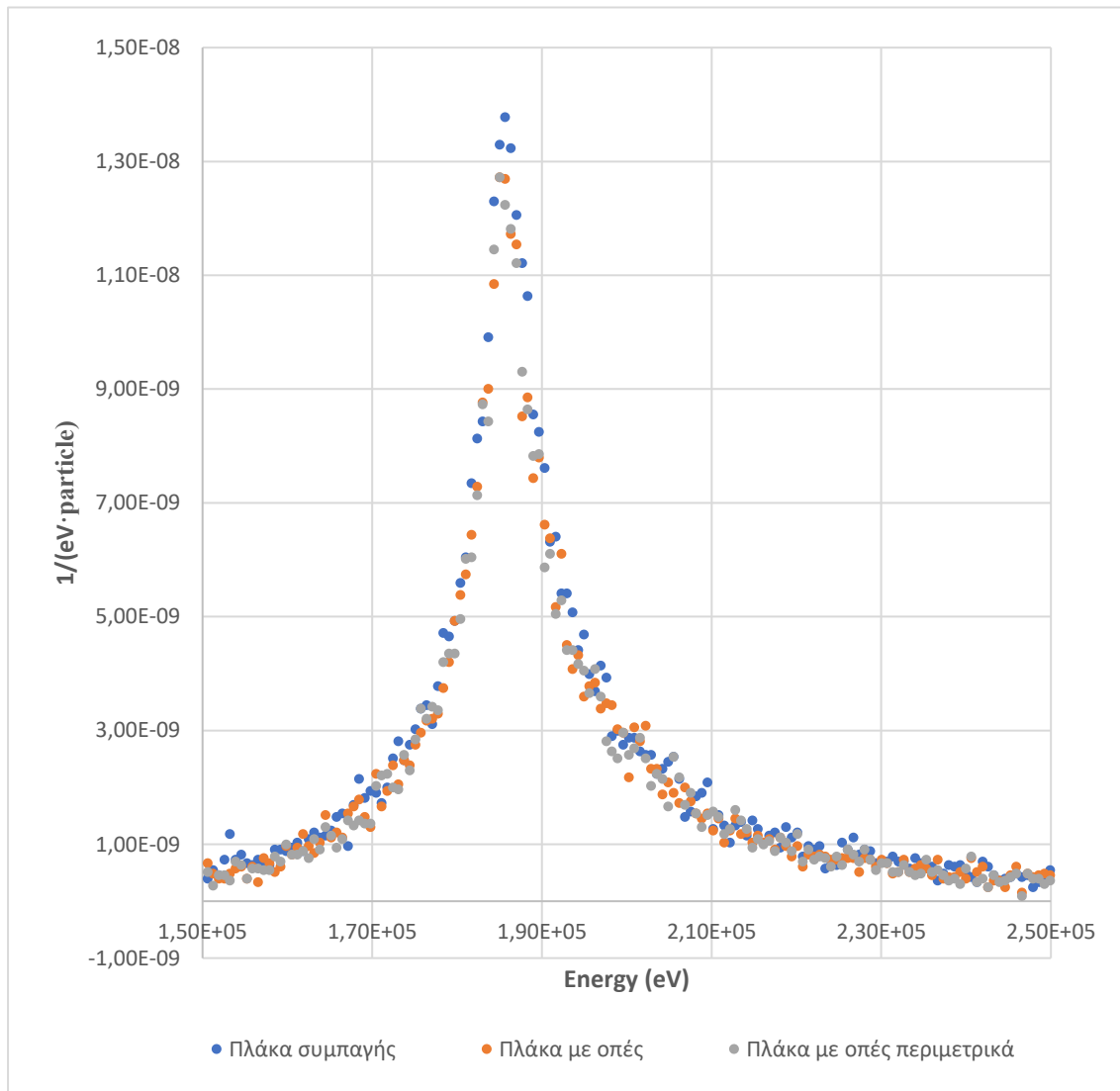
Σχήμα 6.5: Αιχμή οπισθοσκέδασης για τρία σενάρια κυλινδρικής θωρακίσεως διαμέτρου 15 cm

6.2.1.2 Κυλινδρική θωράκιση διαμέτρου 30 cm με διαμπερείς οπές διαμέτρου 2cm

Στην περίπτωση αυτή αποφασίστηκε η επανάληψη της προηγούμενης προσομοίωσης με κυριότερη διαφορά την διάμετρο της κυλινδρικής θωράκισης που διπλασιάζεται στα 30cm. Η επιλογή αυτή έγινε για να αποκλειστεί το ενδεχόμενο της μη πραγματοποίησης αρκετών οπισθοσκεδάσεων, εξαιτίας της μικρής επιφάνειας θωρακίσεως, άλλωστε η διάμετρος των 30cm είναι πιο κοντά στις distâncias μίας πραγματικής θωράκισης. Οι διάμετροι των οπών για το 2^ο και το 3^ο σενάριο παραμένουν σταθερές, με μόνη διαφορά την πρόσθεση τεσσάρων επιπλέον οπών περιμετρικά και στα δύο σενάρια. Όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι αποστάσεις παραμένουν τα ίδια με την ενότητα 6.2.1.1. Η γεωμετρία των τριών νέων σεναρίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.6 και το αντίστοιχο συγκριτικό φάσμα στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.6: Τα τρία σενάρια κυλινδρικής θωρακίσεως διαμέτρου 30 εκατοστών



Σχήμα 6.7: Αιχμή οπισθοσκέδασης για τρία σενάρια κυλινδρικής θωρακίσεως διαμέτρου 30 cm

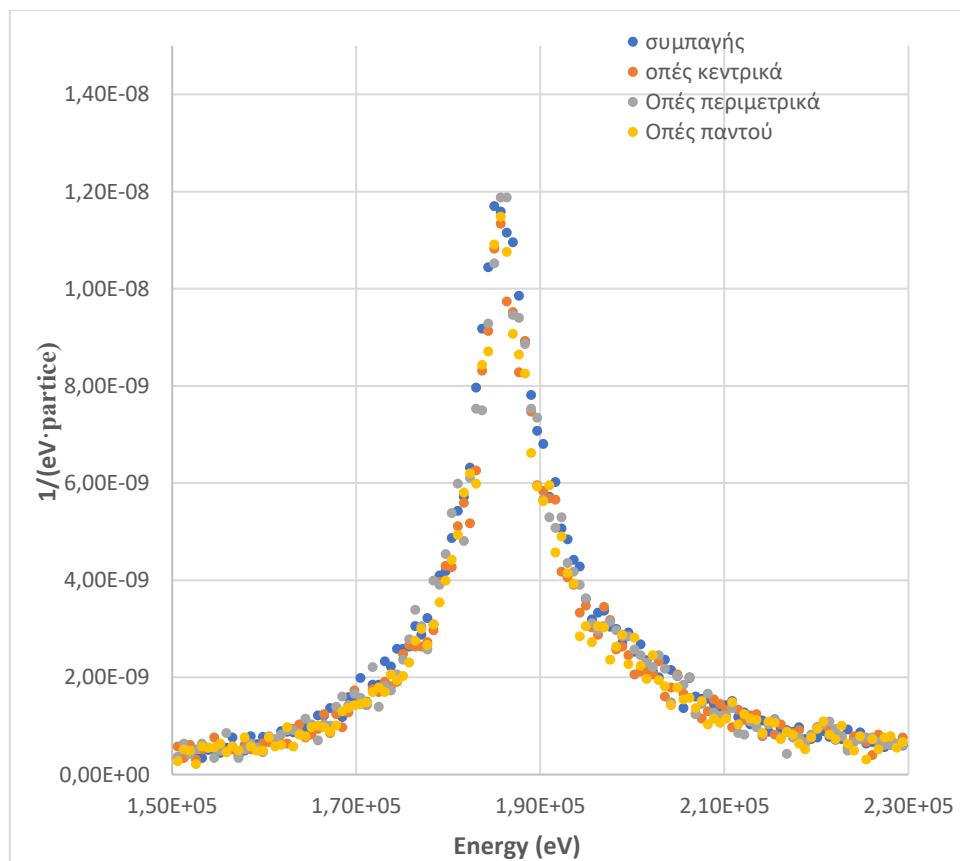
Από το Σχήμα 6.7 διαπιστώνεται ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης μειώνεται κατά περίπου 12% και 8% για τα σενάρια 2 και 3 αντίστοιχα, σε σχέση με το 1^ο σενάριο. Επομένως, προκύπτει ότι αυξάνοντας την επιφάνεια της θωρακίσεως και κατά συνέπεια τις γωνίες προσβολής της από τα φωτόνια παρατηρείται εντονότερη μείωση της οπισθοσκέδασης για τα σενάρια με τις οπές σε σχέση με την ενότητα 6.2.1.1. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σίγουρα υπολογίσιμο, αλλά μάλλον όχι τόσο σημαντικό ώστε να δικαιολογεί την κατασκευή θωράκισης με οπές διαμέτρου 2 cm.

6.2.1.3 Κυλινδρική θωράκιση διαμέτρου 20 cm με οπές διαμέτρου 1 cm, κατανεμημένες σε διάφορες θέσεις

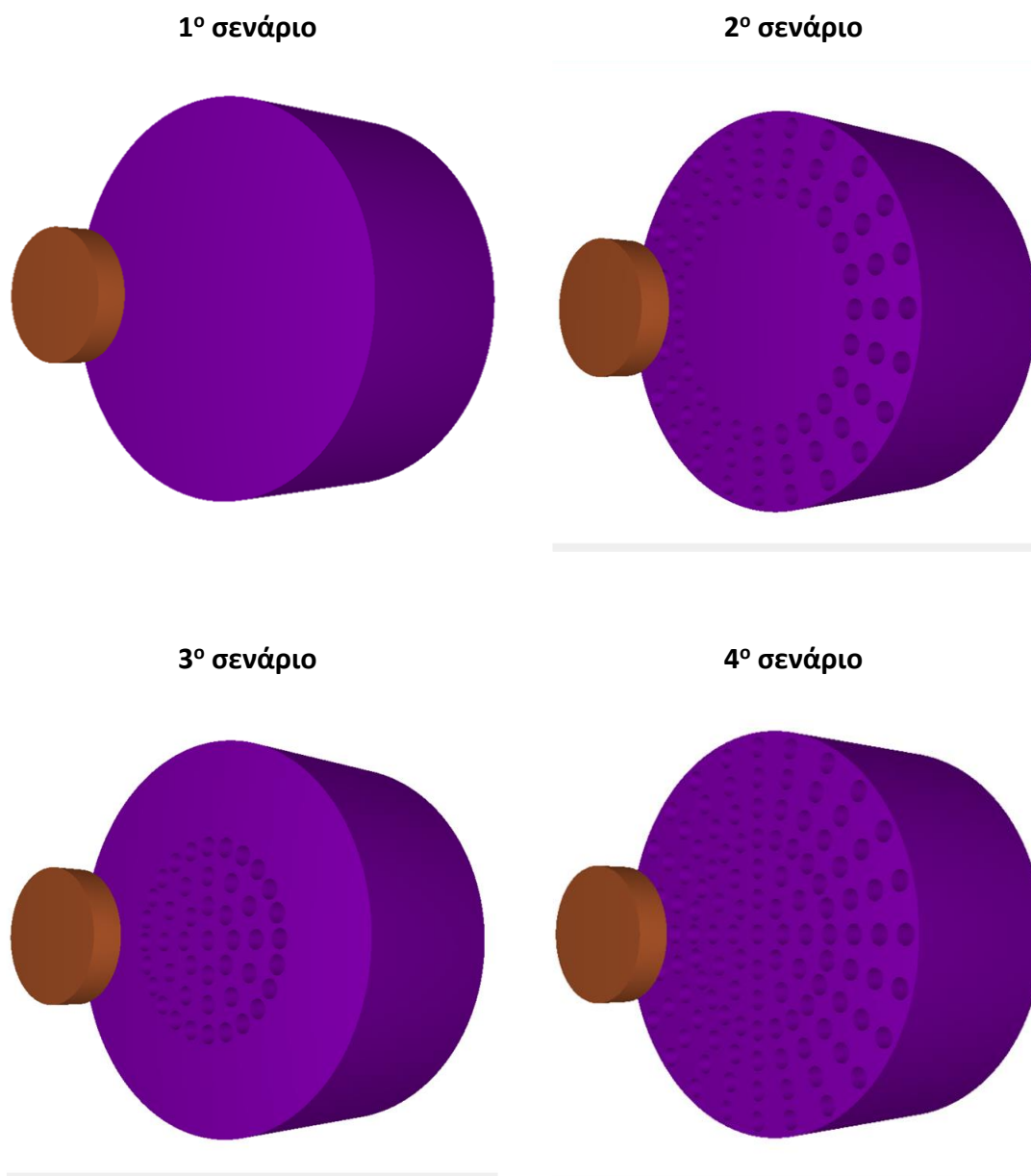
Στην περίπτωση αυτή αποφασίστηκε να μελετηθεί κατά πόσο επηρεάζεται η οπισθοσκέδαση από την θέση των διαφόρων οπών. Η διάμετρος της κυλινδρικής θωράκισης ορίστηκε στα 20 cm, όσο και το πάχος της. Οι οπές έχουν διάμετρο 1 cm και βάθος 10 cm, μέχρι δηλαδή το μέσο της θωράκισης. Επιπλέον, επιλέχθηκε να μην είναι διαμπερείς, ώστε να αποφευχθεί τυχόν διαφυγή φωτονίων μέσω αυτών. Όσον αφορά τις αποστάσεις μεταξύ ανιχνευτή, πηγής και θωράκισης, παραμένουν ίδιες με τις προηγούμενες προσομοιώσεις.

Στο Σχήμα 6.9 αποτυπώνονται τα τέσσερα σενάρια που μελετήθηκαν σε αυτή την ενότητα, ενώ στο σχήμα 6.8, αποτυπώνεται το συγκεντρωτικό φάσμα στην ενεργειακή περιοχή της αιχμής οπισθοσκέδασης. Συγκεκριμένα:

- 1^ο σενάριο: Συμπαγής θωράκιση γερμανίου με διάμετρο και πάχος ίσα με 20 cm,
- 2^ο σενάριο: Ίδια γεωμετρία, με 72 οπές βάθους 10 cm κατανεμημένες περιφερειακά της θωράκισης,
- 3^ο σενάριο: Ίδια γεωμετρία, με 45 οπές οι οποίες κατανέμονται κεντρικά της θωράκισης.
- 4^ο σενάριο: Προκύπτει ουσιαστικά με την άθροιση των οπών των δύο προηγούμενων σεναρίων.



Σχήμα 6.8: Αιχμή οπισθοσκέδασης για όμοιες οπές τοποθετημένες σε διάφορες θέσεις της θωράκισης



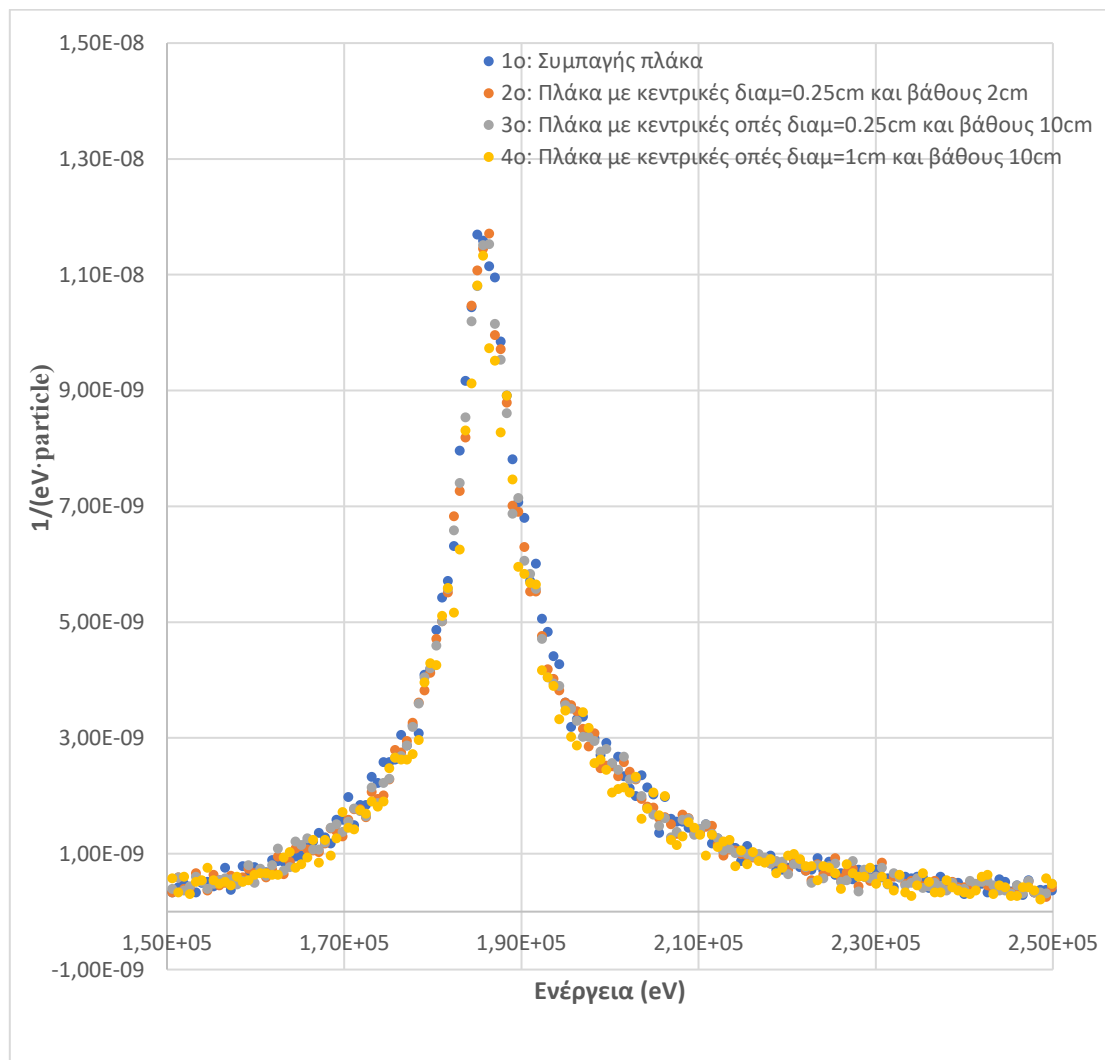
Σχήμα 6.9: Τα τέσσερα σενάρια κυλινδρικής θωρακίσεως διαμέτρου 20 εκατοστών

Από φάσμα του Σχήματος 6.8 παρατηρείται ότι οι διαφορές για τα τέσσερα σενάρια που δοκιμάστηκαν είναι μικρές, καθώς οι τέσσερις καμπύλες οπισθοσκεδάσεως, σχεδόν επικαλύπτονται. Πάντως, σε κάθε περίπτωση η λύση με τις οπές σε όλη την πλάκα οδηγούν σε ελαφρά μειωμένη αιχμή οπισθοσκεδάσεως.

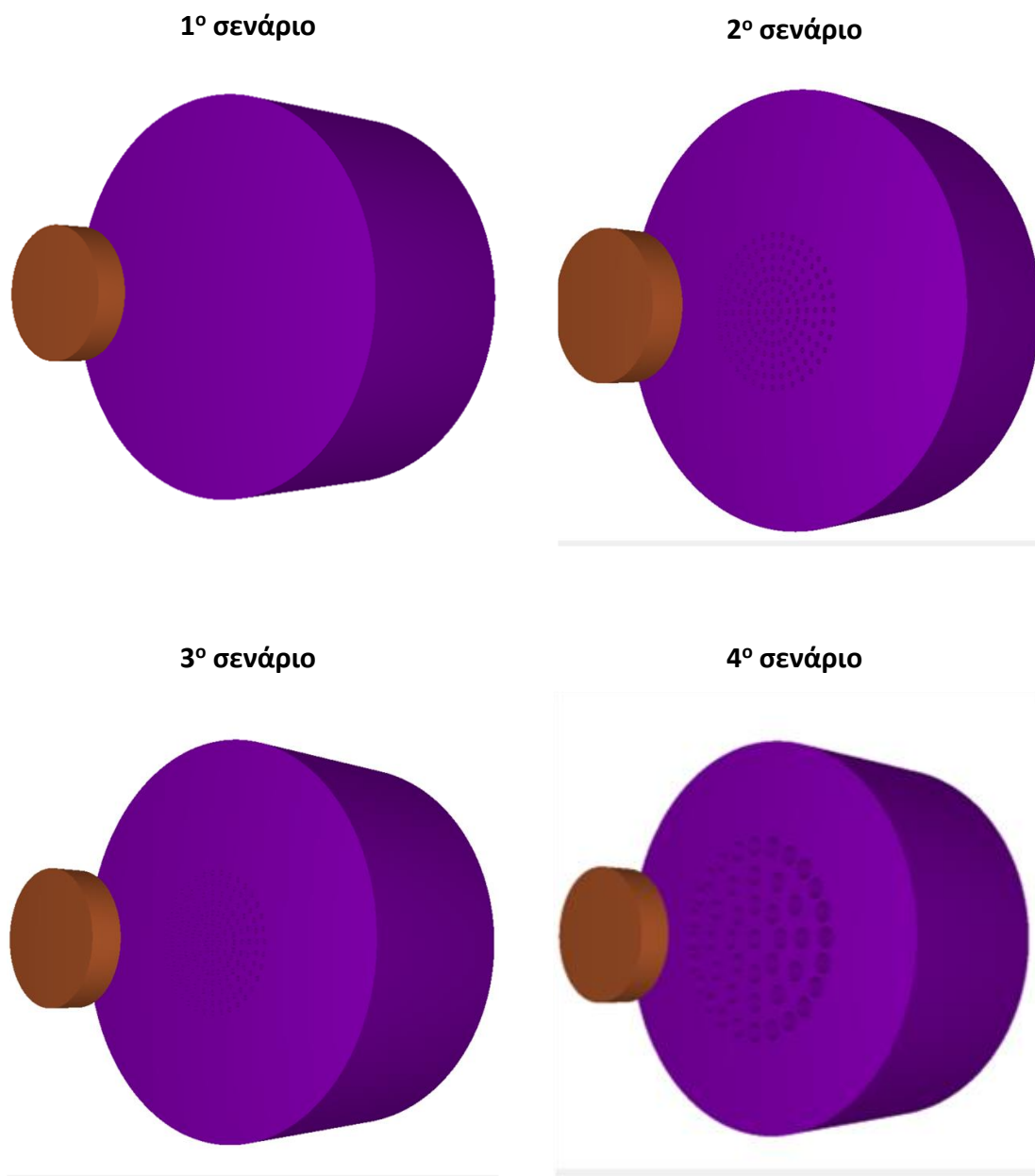
6.2.1.4 Κυλινδρική θωράκιση διαμέτρου 20 cm με οπές διαφόρων διαμέτρων, καταναμημένες σε κεντρικές θέσεις

Στην περίπτωση αυτή μελετήθηκε κατά πόσο επηρεάζεται το φαινόμενο της οπισθοσκεδάσεως τόσο από την διάμετρο, όσο και από το βάθος των οπών. Επιλέχθηκε η μελέτη κεντρικών οπών διότι αυτές εμφανίζουν την μικρότερη οπισθοσκέδαση σύμφωνα με το Σχήμα 6.9. Όπως και προηγουμένως, μελετήθηκαν τέσσερα σενάρια, δύο εκ των οποίων είναι κοινά με την ενότητα 6.2.1.3.

- Το 1^ο σενάριο είναι όμοιο με αυτό της προηγούμενης παραγράφου.
- Το ίδιο ισχύει και για το 4^ο σενάριο της παρούσης με το 3^ο της προηγούμενης.
- Στο 2^ο σενάριο απεικονίζεται ανιχνευτής πάχους 10 cm με 165 οπές διαμέτρου 0.25 cm και βάθους 2 cm.
- Στο 3^ο σενάριο μελετάται ανιχνευτής πάχους 20 cm με 165 οπές διαμέτρου 0.25 cm και βάθους 10 cm.



Σχήμα 6.10: Αιχμή οπισθοσκεδάσεως για διάφορες οπές τοποθετημένες κεντρικά της θωράκισεως



Σχήμα 6.11: Τα τέσσερα σενάρια κυλινδρικής θωράκισης διαμέτρου 20 εκατοστών για διάφορες οπές

Από το παραπάνω φάσμα, διαπιστώνεται ότι και στην περίπτωση αυτή οι αποκλίσεις της αιχμής οπισθοσκέδασης είναι αμελητέες.

6.2.2 Τετράγωνη θωράκιση έμπροσθεν κυλινδρικού ανιχνευτή

Σε δεύτερη φάση των προσομοιώσεων αποφασίστηκε να γίνει η μελέτη της αιχμής οπισθοσκεδάσεως για ορθογωνικές θωρακίσεις και για επιφανειακή πηγή. Η διάταξη η οποία προσομοιώθηκε αποτελείται από τα εξής τρία μέρη:

1. Έναν συμπαγή κύλινδρο γερμανίου διαμέτρου 6 cm και πάχους 3 cm, που ορίζεται ως ανιχνευτής, όπως αυτός που μελετήθηκε στην παράγραφο 6.2.1.
2. Μια ορθογωνική πλάκα μολύβδου η οποία προσομοιώνει τη θωράκιση του ανιχνευτή και είναι είτε συμπαγής, είτε διαθέτει επιπλέον λεπτές μολύβδινες πλάκες τοποθετημένες σε δύο επίπεδα ώστε να δημιουργείται πλέγμα.
3. Μία επιφανειακή πηγή ^{137}Cs η οποία βρίσκεται ανάμεσα στον ανιχνευτή και τη θωράκιση και συγκεκριμένα 2 cm από την πηγή και 14 cm από την θωράκιση. Η πηγή αυτή έχει διάμετρο 6 cm και πολύ μικρό πάχος 0.05 cm ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της αυταπορόφησης ή σκέδασης μέσα στην πηγή. Επιπλέον, τα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή έχουν κατεύθυνση μονάχα προς την θωράκιση, όπως και στην παράγραφο 6.2.1.

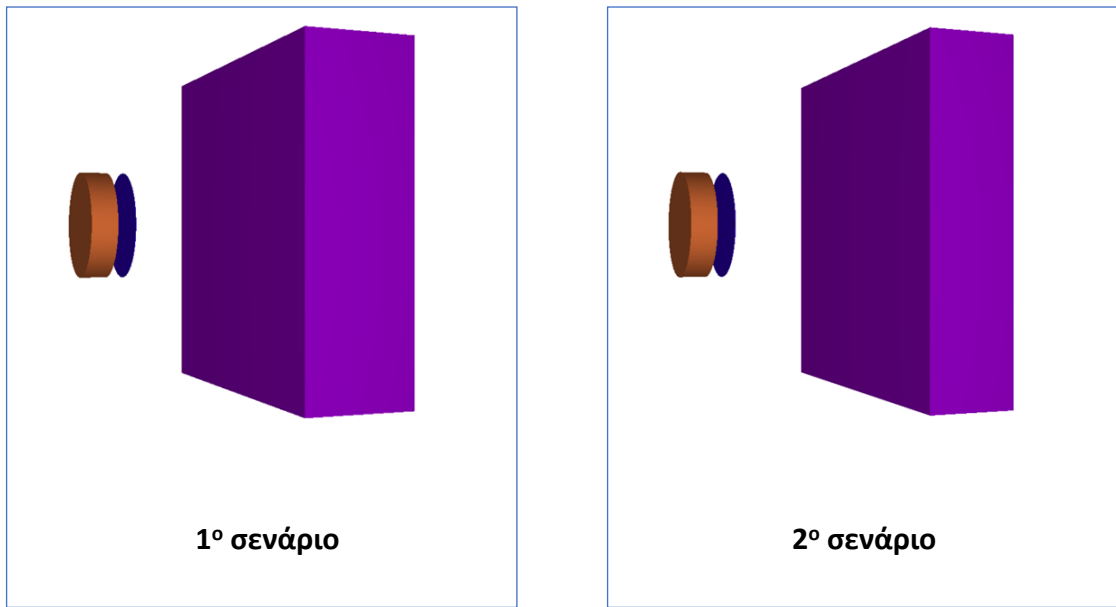
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις επιμέρους γεωμετρίες που προσομοιώθηκαν.

6.2.2.1 Τετράγωνη συμπαγής θωράκιση 20x20 cm με διάφορα πάχη

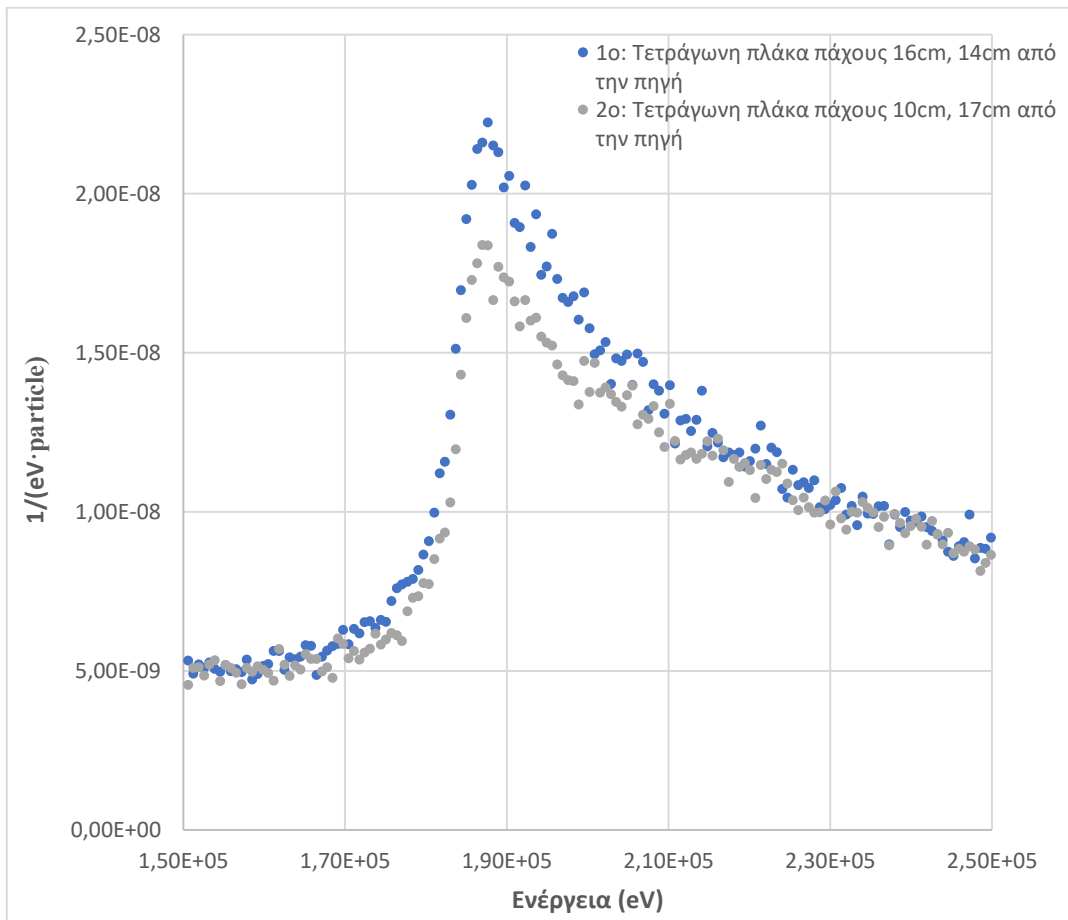
Στην περίπτωση αυτή μελετήθηκαν δύο σενάρια τα οποία διαφέρουν μόνον στο πάχος της θωρακίσεως και τις αποστάσεις αυτής από την πηγή.

- Στο 1^ο σενάριο η θωράκιση είναι συμπαγής ορθογωνική, πάχους 16cm.
- Στο 2^ο σενάριο η θωράκιση έχει πάχος 10 cm και επιπλέον απέχει 17 cm από την πηγή.

Τα δύο αυτά σενάρια απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.12. Στο Σχήμα 6.13 όπου απεικονίζονται οι αιχμές οπισθοσκεδάσεως για κάθε σενάριο παρατηρείται ότι όπως αναμενόταν η αιχμή οπισθοσκεδάσεως του 2^{ου} σεναρίου είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με το 1^ο, αφού η μολύβδινη θωράκιση βρίσκεται μακρύτερα από την πηγή. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο, κάτι που επιβεβαιώνεται και από την εμπειρία.



Σχήμα 6.12: Τα δύο σενάρια συμπαγούς ορθογωνικής θωρακίσεως 20x20 cm

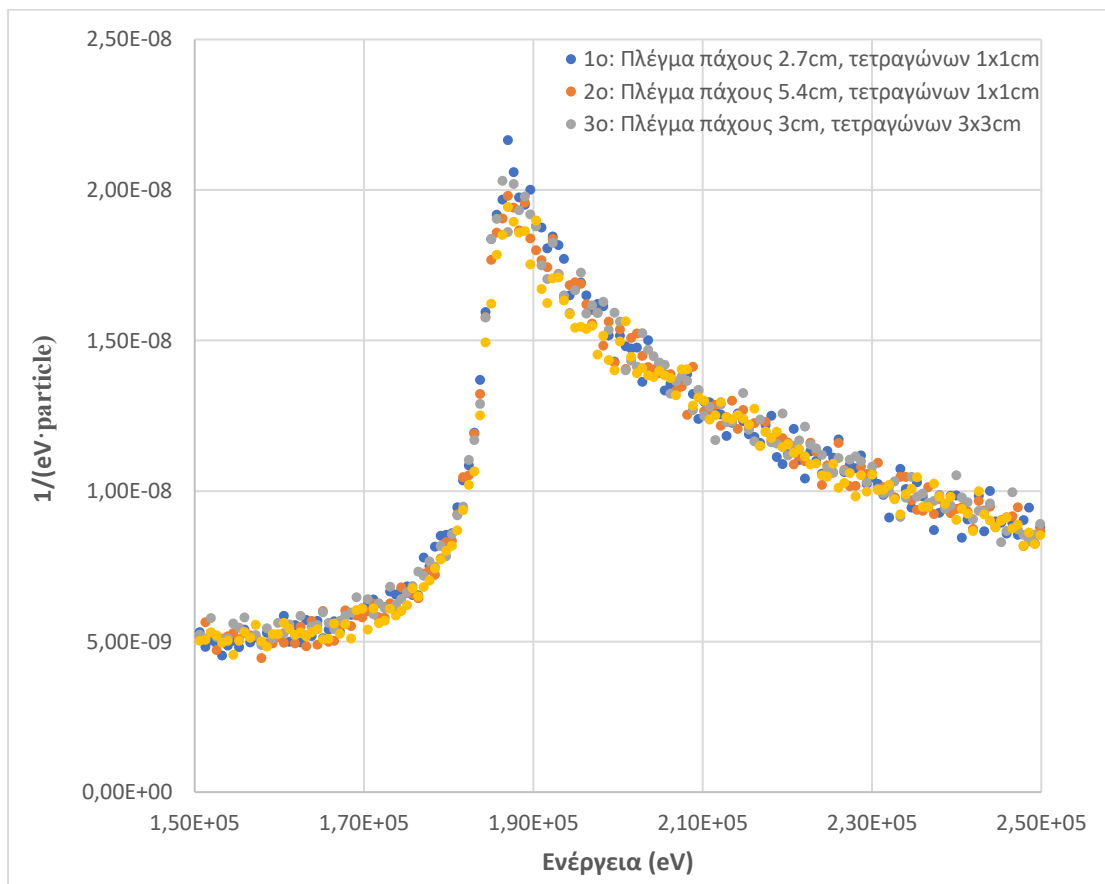


Σχήμα 6.13: Αιχμή οπισθοσκεδάσεως για τρία σενάρια συμπαγούς ορθογωνικής θωρακίσεως 20x20 cm

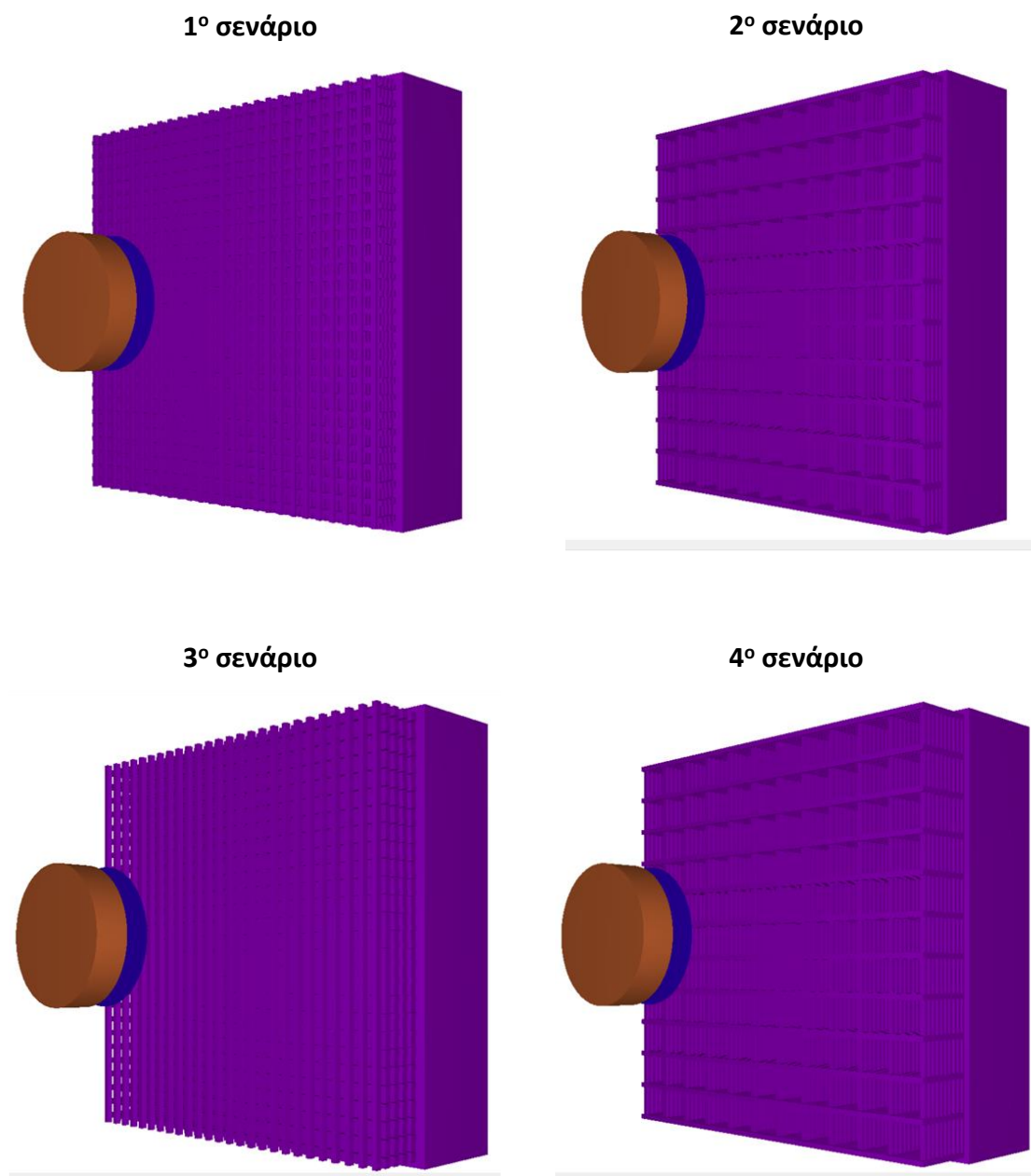
6.2.2.2 Τετράγωνη συμπαγής θωράκιση 20x20 cm με μολύβδινο πλέγμα

Στην ενότητα αυτή αποφασίστηκε ο σχεδιασμός μολύβδινων πλεγμάτων αντί των οπών. Στόχος είναι να διερευνηθεί κατά πόσον τα φωτόνια που εισέρχονται εντός αυτών πραγματοποιούν πολλαπλές σκεδάσεις με αποτέλεσμα να μειώνεται η οπισθοσκέδαση. Τα πλέγματα αυτά δημιουργήθηκαν από την τοποθέτηση μιας σειράς λεπτών ορθογωνίων ράβδων μολύβδου παράλληλα μεταξύ τους και την συνέχεια μιας νέας σειράς κάθετα στην προηγούμενη. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε σε αρκετά επίπεδα. Στο Σχήμα 6.14 αποτυπώνονται αναλυτικά τα τέσσερα σενάρια που μελετήθηκαν. Σε όλα τα σενάρια, η πηγή απέχει 14 cm από το άκρο του πλέγματος και το πλέγμα τοποθετείται σε επαφή με συμπαγή ορθογώνια πλάκα 20x20, πάχους 10 cm.

- Στο 1^ο σενάριο, το πλέγμα συνολικού πάχους 2.7 cm αποτελείται από ράβδους πάχους 0.3 cm. Οι τετράγωνες οπές που δημιουργούνται είναι διαστάσεων 1x1 cm.
- Στο 2^ο σενάριο το πάχος του πλέγματος είναι 3 cm, ενώ οι τετράγωνες οπές έχουν διαστάσεις 3x3 cm.
- Στο 3^ο σενάριο οι ράβδοι του πλέγματος έχουν πάχος 0.6 cm, το πλέγμα έχει ύψος 5.4 cm και οι τετράγωνες οπές διαστάσεις 1x1 cm.
- Στο 4^ο σενάριο το πλέγμα απαρτίζεται από ράβδους πάχους 0.6 cm, που σχηματίζουν πλέγμα ύψους 6 cm και τετράγωνες οπές διαστάσεων 3x3 cm.



Σχήμα 6.14: Αιχμή οπισθοσκέδασης για τρία σενάρια συμπαγούς ορθογωνικής θωρακίσεως 20x20 cm

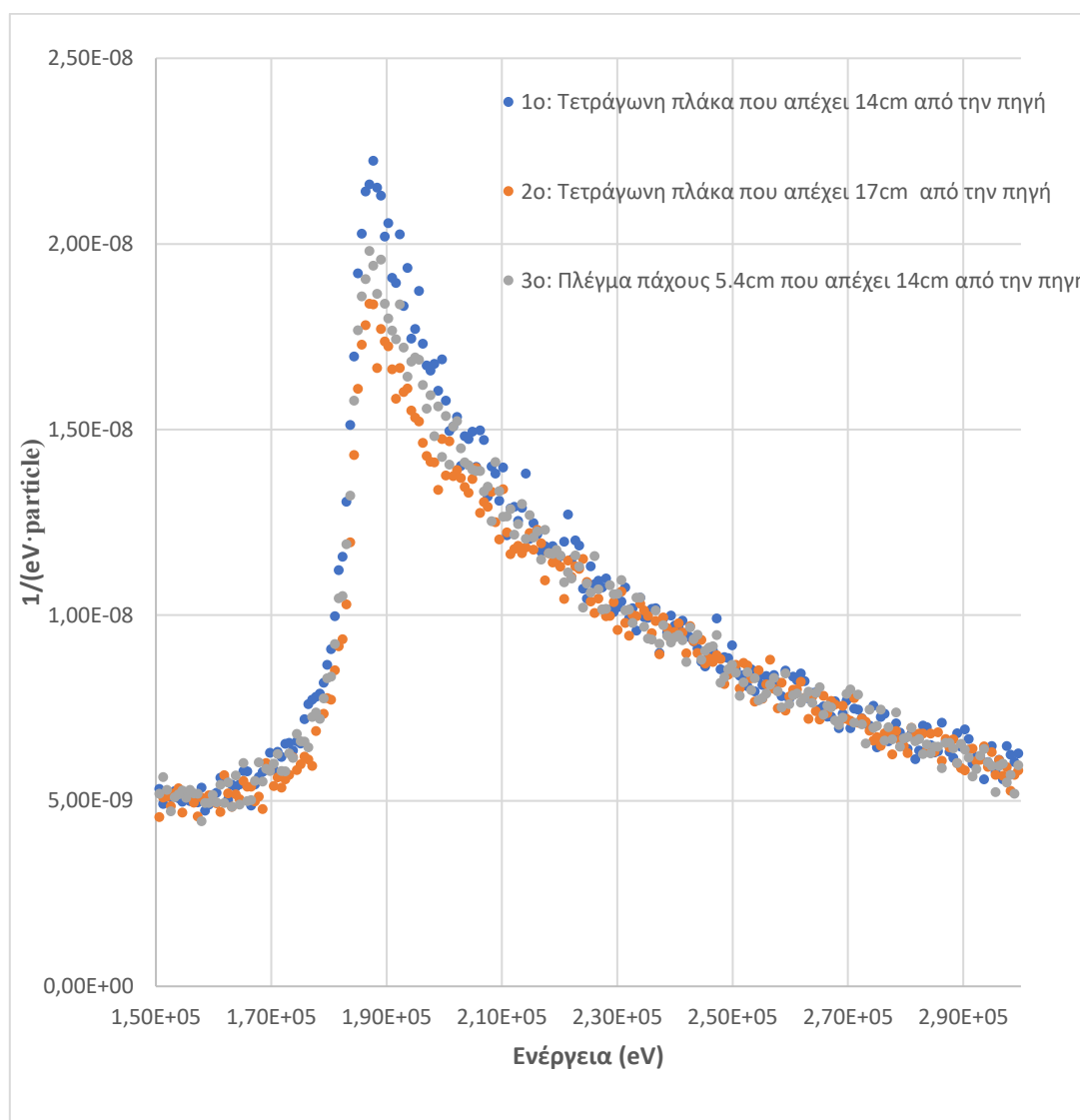


Σχήμα 6.15: Τα τέσσερα σενάρια μολύβδινου πλέγματος που προσομοιώθηκαν

Από το Σχήμα 6.14 διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλώνει το πάχος του πλέγματος, τόσο φαίνεται να μικραίνει η αιχμή οπισθοσκέδασης. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το πάχος του πλέγματος, τόσο μεγαλώνει η απόσταση του συμπαγούς τμήματος της θωρακίσεως από την πηγή, αλλά και τόσο πιο πιθανό είναι να αποκοπεί η σκεδαζόμενη ακτινοβολία από το πλέγμα. Πάντως, σε κάθε περίπτωση η επίδραση του πλέγματος είναι μικρή.

6.2.2.3 Σύγκριση συμπαγούς θωρακίσεως με θωράκιση πλέγματος

Σε αυτό το σημείο αποφασίστηκε να συγκριθούν ως προς τα φάσματα τρία σενάρια από τις προηγούμενες δύο παραγράφους, ώστε να διαπιστωθεί αν η προσθήκη πλέγματος προκαλεί εντέλει αισθητή μείωση του φαινομένου της οπισθοσκεδάσεως. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το 1^ο και το 2^ο σενάριο της ενότητας 6.2.2.1 και το 3^ο σενάριο της 6.2.2.2. Στο 1^ο σενάριο της 6.2.2.1 και στο 3^ο της 6.2.2.2 η πηγή απέχει 14 cm από την άκρη της θωρακίσεως. Αντίθετα, στο 2^ο της 6.2.2.1 η πηγή απέχει 17 cm από το συμπαγές μέρος της θωρακίσεως. Το συγκεντρωτικό φάσμα των δύο αυτών σεναρίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.16.



Σχήμα 6.16: Αιχμή οπισθοσκεδάσεως για δύο σενάρια συμπαγούς θωρακίσεως και ένα σενάριο πλέγματος

Από το παραπάνω συγκεντρωτικό γράφημα διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη του πλέγματος δεν είναι τόσο αποτελεσματική ως προς τη μείωση της οπισθοσκέδασης, όσο είναι η μικρή απομάκρυνση της θωράκισης από τον ανιχνευτή.

6.2.3 Σχεδίαση θωράκισης για τον φορητό ανιχνευτή BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Μετά τη μελέτη της επίδρασης που έχει στην οπισθοσκέδαση των φωτονίων μία πλάκα, το επόμενο βήμα ήταν η μελέτη της επίδρασης που έχει στο φάσμα ενός πραγματικού ανιχνευτή μίας ολοκληρωμένης θωράκισης. Σε αυτή τη φάση αποφασίστηκε να γίνει μελέτη της επίδρασης που έχει στην αιχμή οπισθοσκέδασης αλλά και στο υπόλοιπο φάσμα, μία ολοκληρωμένη θωράκιση που περιβάλλει τον φορητό ανιχνευτή BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ο χαρακτηρισμός και η σχεδίαση του ανιχνευτή BEGe σε αρχείο της μορφής .geo, κατάλληλο για προσομοίωση με τον κώδικα PENELOPE, έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, στα πλαίσια ΔΕ (Αγραφιώτης, 2009).

Η διάταξη που προσομοιώθηκε και μελετήθηκε αποτελείται από τα εξής τρία τμήματα:

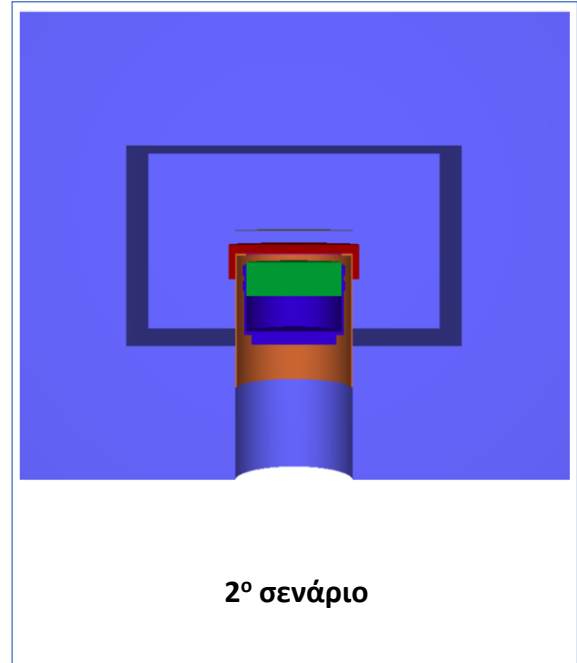
1. Τον ανιχνευτή BEGe, στο παράθυρο του οποίου υπάρχει κάλυμμα από πολυστυρένιο.
2. Μία επιφανειακή πηγή ^{137}Cs η οποία βρίσκεται σε απόσταση 2 cm από τον ανιχνευτή. Η πηγή αυτή έχει διάμετρο 6 cm και πολύ μικρό πάχος 0.05 cm όπως και προηγουμένως. Επιπλέον, τα φωτόνια της πηγής εκπέμπονται υπό γωνία 0° έως 180° με ανοδική κατεύθυνση, όπως ακριβώς και στην παράγραφο 6.2.1.
3. Μια θωράκιση εσωτερικού χώρου 25x25x15 cm κατασκευασμένη από τούβλα μολύβδου η οποία περικλείει τον ανιχνευτή BEGe

6.2.3.1 Ανιχνευτής BEGe εντός συμπαγούς θωράκισης μολύβδου 25x25x15 cm

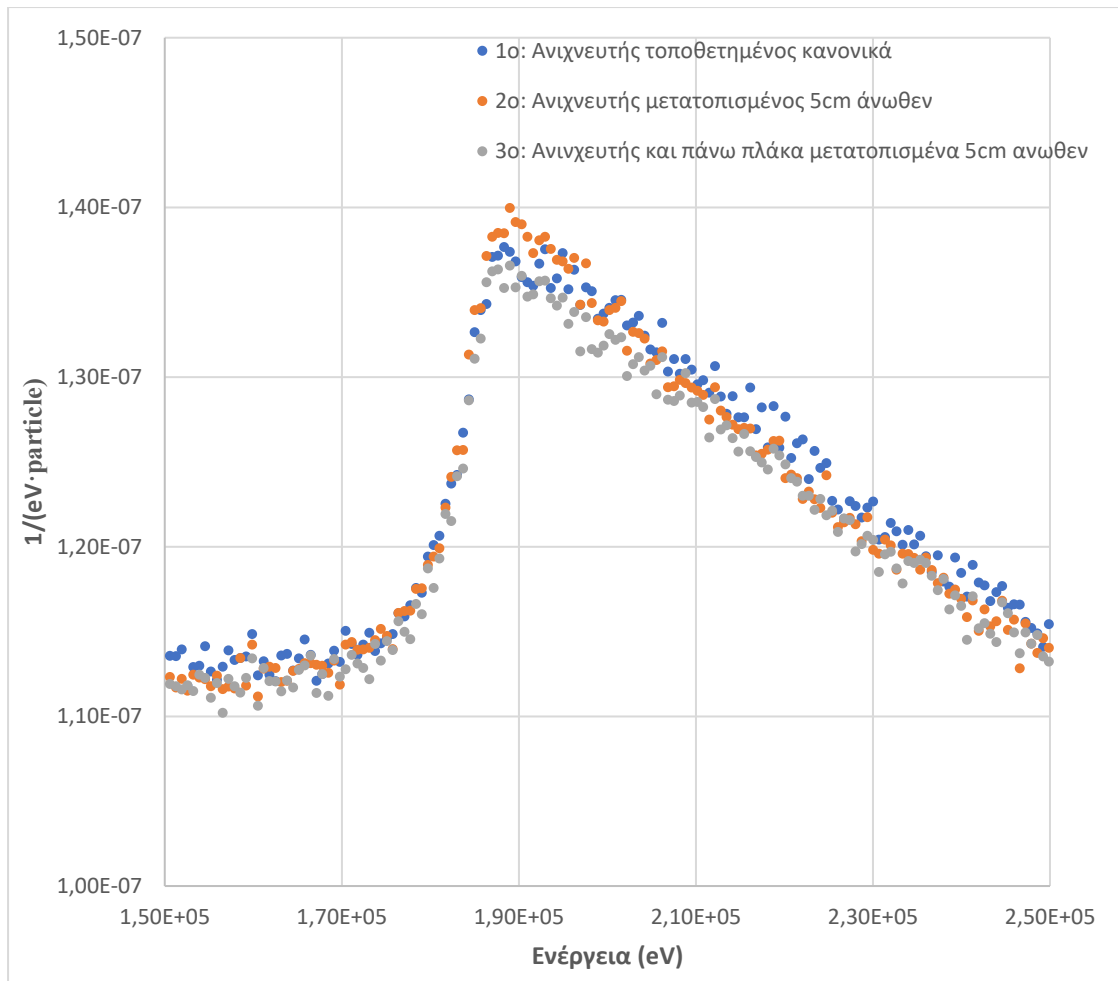
Στην ενότητα αυτή όπου ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος εντός συμπαγούς θωράκισης μελετήθηκαν τρία σενάρια.

- 1^ο σενάριο: ο ανιχνευτής οριακά εντός θωράκισης εσωτερικών διαστάσεων 25x25x15 cm
- 2^ο σενάριο: ο ανιχνευτής είναι μετατοπισμένος κατά 5 cm εντός της θωράκισης 25x25x15 cm
- 3^ο σενάριο: ο ανιχνευτής είναι μετατοπισμένος κατά 5 cm εντός της θωράκισης, και το ύψος της θωρακίσεως είναι αυξημένο κατά 5 cm (25x25x20 cm).

Τα τρία αυτά σενάρια απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.17 και οι αντίστοιχες αιχμές οπισθοσκέδασης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.18.



Σχήμα 6.17: Τα τρία σενάρια ανιχνευτή BEGe εντός συμπαγούς θωράκισης μολύβδου



Σχήμα 6.18: Αιχμές οπισθοσκεδάσεως για τον ανιχνευτή BEGe εντός συμπαγούς θωράκισης μολύβδου

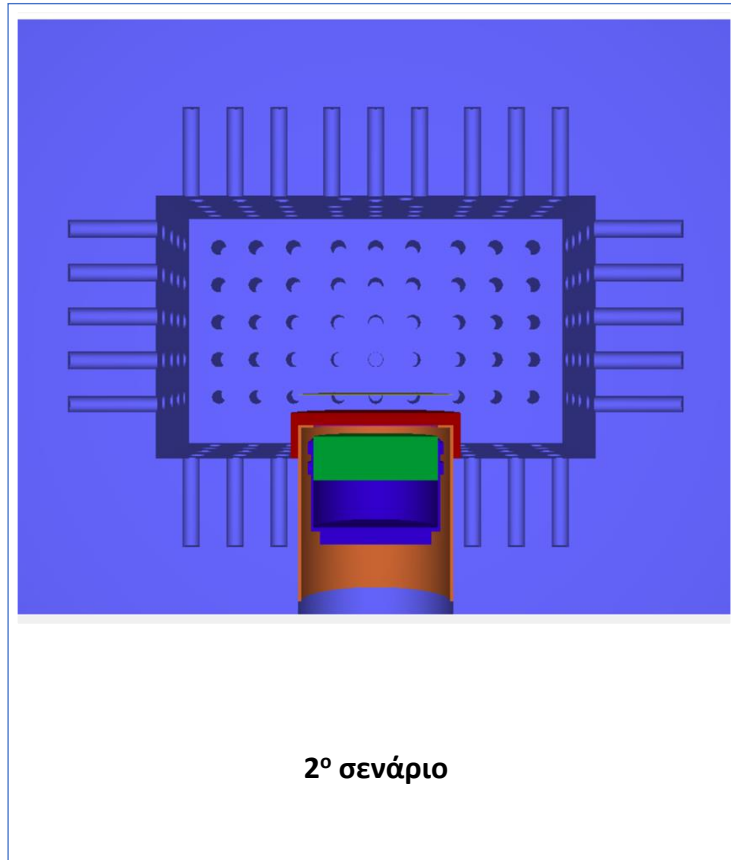
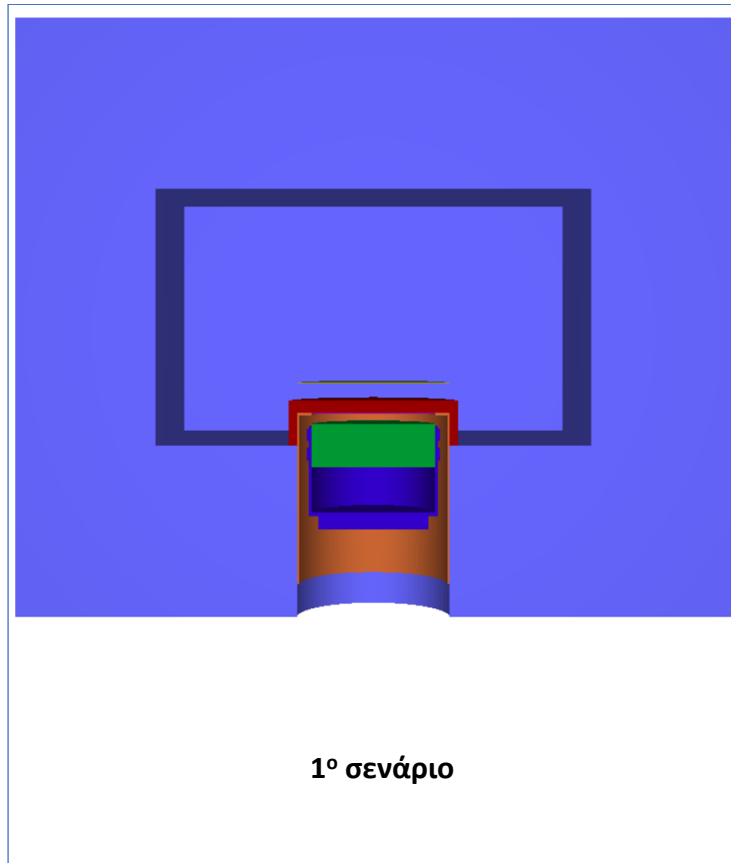
Από το Σχήμα 6.18 δεν διαπιστώνεται αξιόλογη διαφορά στο ύψος της αιχμής οπισθοσκεδάσεως, οπότε επιλέγεται το 1^ο σενάριο ως προς μελέτη για την συνέχεια.

6.2.3.2 Ανιχνευτής BEGe εντός συμπαγούς θωράκισης μολύβδου 25x25x15 cm και εντός θωράκισης με οπές

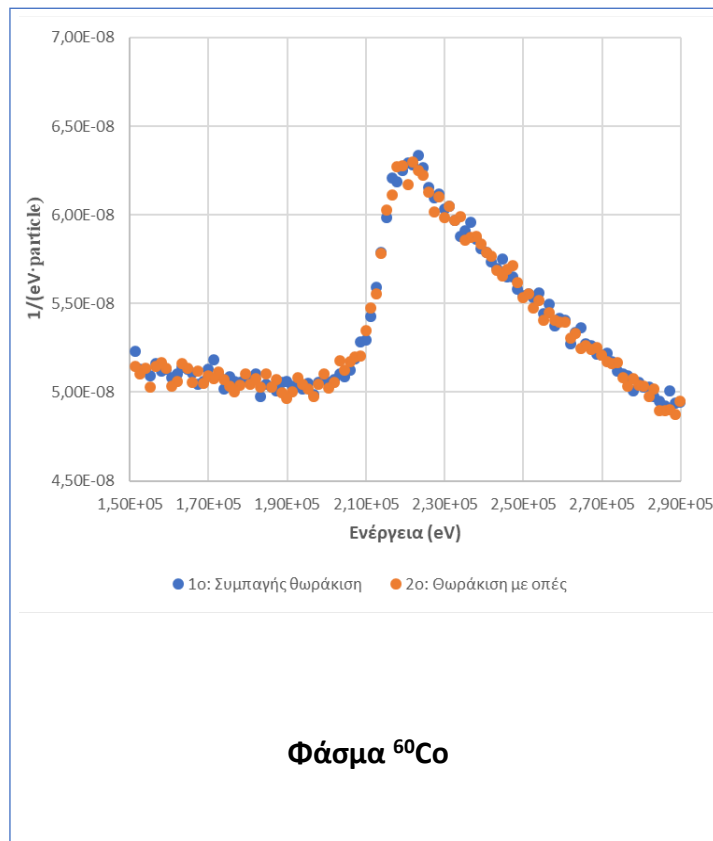
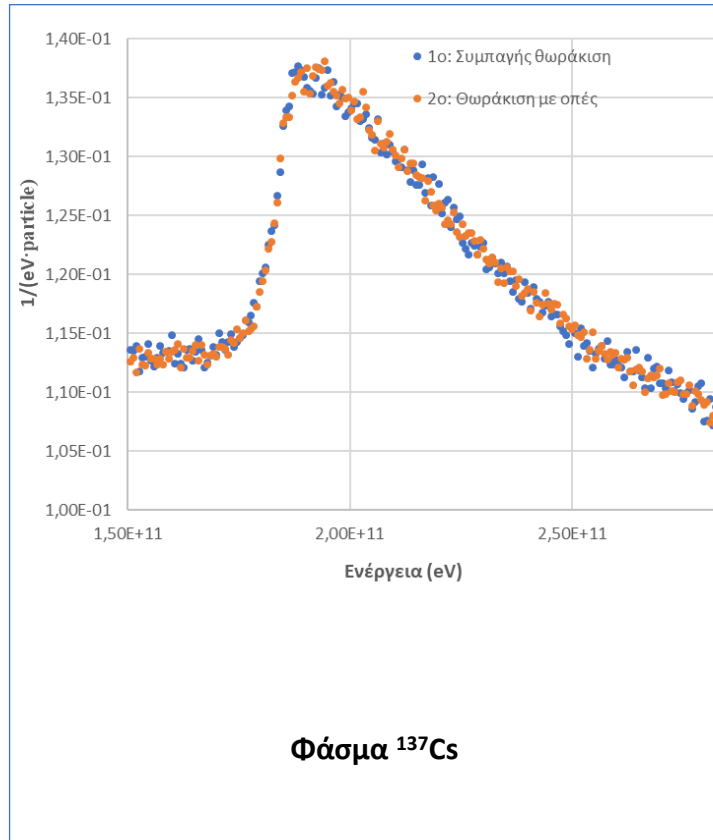
Στην τελευταία αυτή ενότητα προσομοιώσεων, αποφασίστηκε να επανεξεταστεί το κατά πόσο επηρεάζεται το φαινόμενο της οπισθοσκεδάσεως από οπές πάνω στην θωράκιση. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις της παραγράφου 6.2.1, στην ενότητα αυτή ο προς προσομοίωση ανιχνευτής είναι πραγματικός και οι οπές πάνω στην θωράκιση βρίσκονται σε όλες τις πλευρές της θωράκισης.

- Στο 1^ο σενάριο, ο ανιχνευτής διαθέτει συμπαγή θωράκιση (ίδιο με το 1^ο σενάριο της 6.2.3.1).
- Στο 2^ο σενάριο ο ανιχνευτής διαθέτει οπές διαμέτρου 0.5 cm και βάθους 5 cm.

Και στο δύο σενάρια (Σχήμα 6.19) προσομοιώνονται πηγές ^{137}Cs και ^{60}Co . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται παρακάτω στο Σχήμα 6.20.



Σχήμα 6.19: Τα δύο σενάρια ανιχνευτή BEGe για συμπαγή θωράκιση μολύβδου και θωράκιση με οπές



Σχήμα 6.20: Αιχμές οπισθοσκεδάσεως φωτονίων ^{137}Cs και ^{60}Co για τον ανιχνευτή BEGe που περικλείεται από θωράκιση

Από το Σχήμα 6.20 διαπιστώνεται ότι, τόσο για πηγή μέσης ενέργειας (^{137}Cs), όσο και για πηγή υψηλών ενεργειών (^{60}Co), η αιχμή οπισθοσκεδάσεως για θωράκιση με οπές δεν παρουσιάζει μείωση σε σχέση με την αντίστοιχη συμπαγή. Επομένως, το 2^ο σενάριο απορρίπτεται εντελώς ως κατασκευαστική ιδέα.

6.2.3 Συμπεράσματα για τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν

Από τις προσομοιώσεις Monte-Carlo που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ με χρήση του κώδικα PENELOPE, δεν διαπιστώθηκε αξιόλογη βελτίωση του φαινομένου της οπισθοσκεδάσεως με χρήση συστήματος οπών ή πλέγματος εντός της θωράκισης για τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν. Για το λόγο αυτό, και λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα της κατασκευής, τόσο οι γεωμετρίες με οπές όσο και αυτές των πλεγμάτων απορρίπτονται ως ιδέες μελλοντικής κατασκευής θωρακίσεων. Η περαιτέρω όμως μελέτη πιο πολύπλοκων γεωμετρικά λύσεων, δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην ταχύτητα της προσομοίωσης, η οποία γίνεται όλο και πιο αργή, όσο η γεωμετρία γίνεται πιο πολύπλοκη. Παρόλα αυτά, δεν αποκλείεται να υπάρχει κάποια γεωμετρία θωράκισης, η οποία πραγματικά να προκαλεί αξιόλογη μείωση της οπισθοσκέδασης. Πάντως αυτό που φαίνεται ότι πραγματικά παίζει κάποιο ρόλο είναι η απόσταση του ανιχνευτή από τη θωράκιση, με την οπισθοσκέδαση να μειώνεται όσο η απόσταση αυξάνεται. Σε κάθε περίπτωση πάντως ο σχεδιασμός μίας θωράκισης εξαρτάται καθοριστικά και από τα διαθέσιμα υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΩΡΑΚΙΣΕΩΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΦΟΡΗΤΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΒΕGe ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ

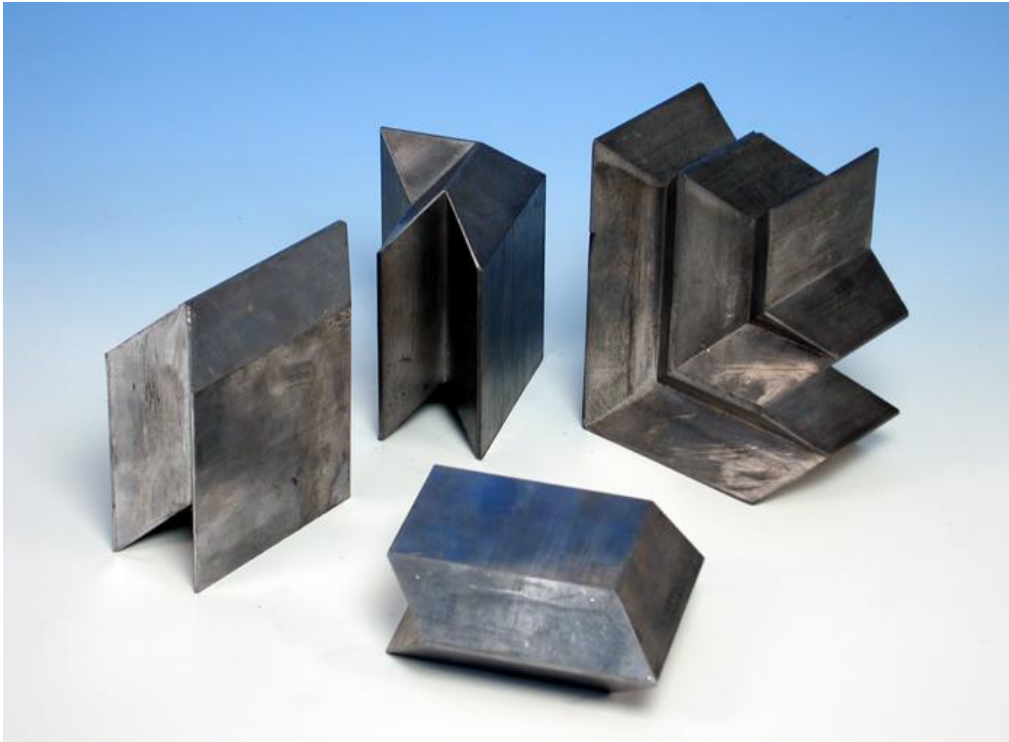
Όπως αναφέρθηκε εκτενώς στα παραπάνω κεφάλαια, αποφασίστηκε η κατασκευή θωρακίσεως μολύβδου, η οποία θα περιβάλλει τον ανιχνευτή ΒΕGe με σκοπό την μείωση του υποστρώματος στο φάσμα που συλλέγεται. Μάλιστα, κρίθηκε ότι δεν έχει νόημα η ιδιαίτερη διαμόρφωση της θωράκισης για τη μείωση του φαινομένου της οπισθοσκέδασης. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής της θωράκισης, αλλά και η πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς της η οποία ακολούθησε.

7.1 Διαδικασία κατασκευής της θωράκισης

Για την κατασκευή της θωράκισης χρησιμοποιήθηκαν τούβλα μολύβδου με τριγωνικές εσοχές, δύο γεωμετριών (τούβλα-γωνίες και τούβλα-ευθύγραμμα) τα οποία ήταν διαθέσιμα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, όμοια με αυτά που απεικονίζονται στο **Σχήμα 7.1**. Τα τούβλα αυτά φέρουν τα εξής χαρακτηριστικά κατά μέσο όρο:

Τούβλα γωνίες	Μήκος πλευράς δίχως εσοχές (mm)	100
	Μήκος πλευράς με εσοχές (mm)	125
	Πάχος (mm)	50
	Βάρος (kg)	8.5
Τούβλα ευθείες	Μήκος πλευράς δίχως εσοχές (mm)	100
	Μήκος πλευράς με εσοχές (mm)	125
	Πάχος (mm)	50
	Βάρος (kg)	5.5

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά των μολύβδινων τούβλων



Σχήμα 7.1: Τούβλα μολύβδου που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή θωράκισης

Τα τούβλα μολύβδου συλλέχθηκαν από διάταξη νετρονικής ενεργοποίησης και παρέμειναν για 30 ημέρες μακριά από την διάταξη από όπου αφαιρέθηκαν. Στην συνέχεια, συναρμολογήθηκαν επάνω σε συμπαγές και ανθεκτικό για μεγάλα βάρη, ξύλινο τραπέζι το οποίο προϋπήρχε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ με τρόπο τέτοιο όπως απεικονίζεται κατά στάδια στο Σχήμα 7.2. Η παραπάνω διαδικασία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ορθογωνικής θωρακίσεως εξωτερικών διαστάσεων 525x425x279 mm και εσωτερικών 425x325x175 mm, με την χρήση συνολικά 46 τούβλων μολύβδου (2 τούβλα γωνίες και 44 τούβλα κανονικά). Για τη στήριξη των μολύβδινων τούβλων της οροφής, τοποθετήθηκε πλάκα αλουμινίου πάχους 4mm, η οποία διαθέτει οπές διαμέτρου 15mm. Επάνω σε αυτήν εναποτέθηκαν τα 20 εκ των χρησιμοποιούμενων τούβλων, τοποθετημένα σε 5 τετράδες. Επιπλέον, εντός της θωράκισης προστέθηκε αποσπώμενη ξύλινη βάση στηρίξεως δοχείων πηγής όγκου γεωμετρίας 2, με τρόπο τέτοιο ώστε όταν ο ανιχνευτής εισέλθει πλήρως εντός της θωρακίσεως, το παράθυρό του να ακουμπάει στην άκρη του προς μελέτη δοχείου. Τέλος, ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε πάνω σε ένα κομμάτι ξύλο ούτως ώστε να κλείνει το διάκενο που δημιουργείται μεταξύ του πάνω μέρους του ανιχνευτή και της θωρακίσεως. Επιπλέον με την χρήση της ξύλινης αυτής βάσεως, επιτυγχάνεται η ευκολότερη και με μεγαλύτερη ακρίβεια, τοποθέτηση ή αντίστοιχα αφαίρεση του ανιχνευτή από την θωράκιση, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο πρόκλησης βλάβης στο παράθυρό του.



Σχήμα 7.2: Στάδια κατασκευής της θωράκισης του ανιχνευτή BEGe

7.2 Σύγκριση φασμάτων υποστρώματος χωρίς θωράκιση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μελέτη του υποβάθρου της ανιχνευτικής διάταξης λόγω της φυσικής ραδιενέργειας του περιβάλλοντος σε δύο θέσεις εντός του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Σχήμα 7.3) και το πώς επηρεάζεται αυτή, με την αλλαγή διαφόρων παραγόντων (Σχήμα 7.4).

- Κατά την 1^η πειραματική μέτρηση ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση, σε ύψος ~ 1 m στη μέση του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας, το οποίο βρίσκεται στο υπόγειο του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- Κατά τη 2^η πειραματική μέτρηση ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε εκ νέου σε οριζόντια θέση στο διάδρομο του υπογείου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Κατά τη μέτρηση αυτή ο ανιχνευτής ήταν τοποθετημένος εκτός της θωράκισης, σε απόσταση μερικών εκατοστών από αυτή.

Στο Σχήμα 7.4 φαίνονται τα φάσματα τα οποία ελήφθησαν κατά τις δύο πειραματικές μετρήσεις υποστρώματος.

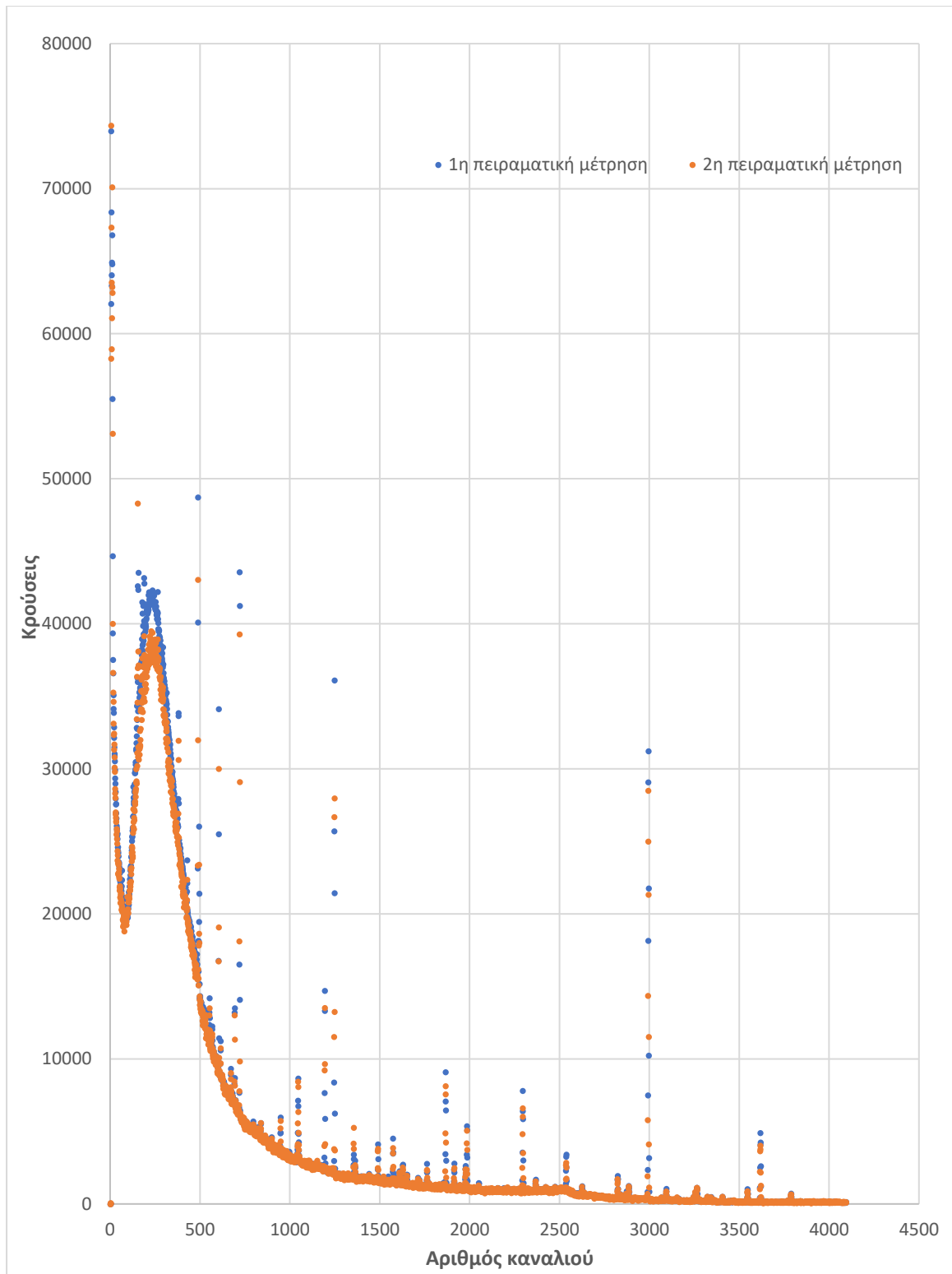


1^η πειραματική μέτρηση



2^η πειραματική μέτρηση

Σχήμα 7.3: Οι δύο πειραματικές μετρήσεις φάσματος υποστρώματος



Σχήμα 7.4: Φάσμα υποστρώματος για τις δύο πειραματικές μετρήσεις

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.4, διαπιστώνει κανείς εκ πρώτης όψεως ότι η αιχμή η οποία παρατηρείται περίπου μεταξύ των καναλιών 150 και 350 (~ 80-180 keV) είναι υψηλότερη στην μέτρηση η οποία έγινε στο εργαστήριο της γ-φασματοσκοπίας. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.2 η αιχμή οπισθοσκέδασης παρατηρείται μεταξύ

ενεργειών 180-250 keV, επομένως, η αιχμή που ανιχνεύεται θα πρέπει να αποδίδεται στην ακτινοβολία του φυσικού υποστρώματος – άλλωστε δεν υπήρχε συγκεκριμένη πηγή κατά τη διάρκεια των δύο πειραμάτων. Μια λογική εξήγηση για τη διαφορά στο ύψος της αιχμής που διαπιστώνεται μεταξύ των δύο φασμάτων είναι ότι στην 2^η πειραματική μέτρηση, η θωράκιση που βρίσκεται εμπροσθεν του ανιχνευτή εμποδίζει ένα μέρος των φωτονίων υποβάθρου να φτάσουν στο παράθυρο του ανιχνευτή. Μια επιπλέον εξήγηση θα μπορούσε να είναι ότι στη 2^η πειραματική μέτρηση η ακτινοβολία λόγω των οικοδομικών υλικών στον περιβάλλοντα χώρο που ευρίσκεται ο ανιχνευτής είναι μικρότερη καθώς η οροφή στο σημείο αυτό είναι κατασκευασμένη από πλάκα σιδήρου, σε αντίθεση με την 1^η μέτρηση όπου η οροφή στο χώρο είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όσον αφορά τις φωτοκορυφές που ανιχνεύονται στα δύο φάσματα, παρατηρείται και στα δύο φάσματα ανιχνεύονται οι ίδιες φωτοκορυφές. Επιπλέον, οι φωτοκορυφές για το φάσμα της 1^η πειραματικής μετρήσεως παρουσιάζουν εν γένει ελαφρά μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με τις αντίστοιχες της 2^η, κάτι που μπορεί ερμηνευθεί λόγω της προαναφερθείσας διαφοράς στο υλικό της οροφής στους δύο χώρους. Σε δύο περιπτώσεις φωτοκορυφές παρουσιάζουν μεγαλύτερο ύψος κατά τη 2^η πειραματική μέτρηση:

- η φωτοκορυφή στο κανάλι 153 που οφείλεται στις ακτίνες-X του ²¹⁰Pb (E=74.8 keV) είναι υψηλότερη στην 2^η μέτρηση σε σχέση με την 1^η, κάτι που πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη πολύ κοντά στον ανιχνευτή μεγάλης ποσότητας μολύβδου της θωράκισης.
- η φωτοκορυφή στο κανάλι 1355 που οφείλεται στο ¹³⁷Cs (E=661.659keV, T_{1/2}=30.05 y). Όπως θα αναλυθεί στην παράγραφο 7.3 το ισότοπο αυτό δεν ανιχνεύεται όταν η θωράκιση περιβάλλει τον ανιχνευτή, επομένως δεν πρέπει να προέρχεται από τη θωράκιση. Η μόνη λογική εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι η ύπαρξη κάποιας πηγής Cs-137 εντός του χώρου της 2^η πειραματικής μετρήσεως.

7.3 Σύγκριση φασμάτων υποστρώματος για διάφορες θέσεις του ανιχνευτή

Στην ενότητα αυτή μελετήθηκε το πως επηρεάζεται το φάσμα υποστρώματος του ανιχνευτή BEGe με την προσθήκη της θωρακίσεως. Τα τρία σενάρια που μελετήθηκαν απεικονίζονται στο Σχήμα 7.5 και είναι τα εξής:

- 1^ο σενάριο: Η θωράκιση βρίσκεται μπροστά στον ανιχνευτή.
- 2^ο σενάριο: Η θωράκιση περικλείει το μισό του μήκος (ο ανιχνευτής έχει εισχωρήσει κατά 13 cm εντός της θωρακίσεως).
- 3^ο σενάριο: Η θωράκιση περικλείει εξ' ολοκλήρου τον ανιχνευτή (ο ανιχνευτής έχει εισχωρήσει κατά 26 cm εντός της θωρακίσεως).



1^ο σενάριο



2^ο σενάριο

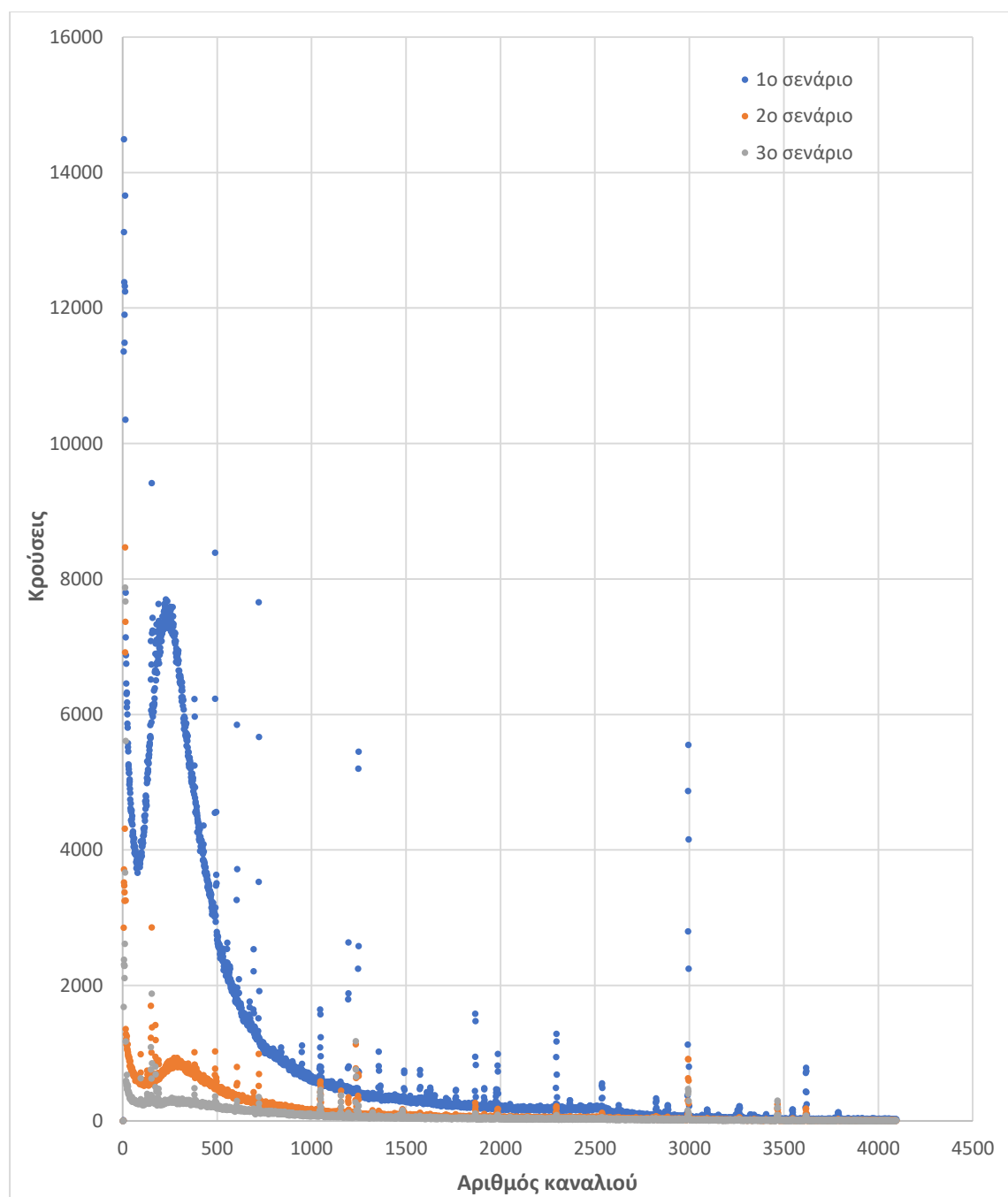


3^ο σενάριο

Σχήμα 7.5: Τα τρία σενάρια τοποθέτησης του ανιχνευτή BEGe στη θωράκιση

Τα φάσματα που συλλέχθηκαν από τα τρία σενάρια, απεικονίζονται στο συγκεντρωτικό Σχήμα 7.6. Όπως είναι εμφανές εκ πρώτης όψεως, το φάσμα υποστρώματος μειώθηκε λόγω της θωράκισης σε βαθμό τέτοιο ώστε στο 3^ο σενάριο να

μην ανιχνεύεται η μεγάλη αιχμή του 1^{ου} σεναρίου μεταξύ των καναλιών 90-2000, ενώ αντίστοιχα και στο 2^ο σενάριο έχει μειωθεί αισθητά.



Σχήμα 7.6: Φάσμα υποστρώματος για τα τρία σενάρια τοποθέτησης της θωρακίσεως

Για να ποσοτικοποιηθεί η βελτίωση του υποστρώματος της ανιχνευτικής διατάξεως του 3^{ου} σεναρίου σε σχέση με το 2^ο και το 1^ο, αποφασίστηκε ο υπολογισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής για τα ισότοπα ^{214}Bi , ^{212}Pb , ^{214}Pb και στη συνέχεια η εύρεση του ποσοστού μεταβολής της επιφάνειας αυτής. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών παρουσιάζονται στον ακόλουθο **Πίνακα 7.2**.

Ενέργεια (keV)		1 ^ο σενάριο	2 ^ο σενάριο	3 ^ο σενάριο
238.632 (²¹² Pb)	Net Area Βελτίωση (%)	10028 -	934 91%	222 98%
295.224 (²¹⁴ Pb)	Net Area Βελτίωση (%)	7292 -	821 89%	217 97%
351.932 (²¹⁴ Pb)	Net Area Βελτίωση (%)	13705 -	1448 89%	420 97%
609.312 (²¹⁴ Bi)	Net Area Βελτίωση (%)	14295 -	1674 88%	513 96%
1120.287 (²¹⁴ Bi)	Net Area Βελτίωση (%)	3396 -	599 82%	203 94%
1764.494 (²¹⁴ Bi)	Net Area Βελτίωση (%)	2853 -	541 81%	231 92%

Πίνακας 7.2: Ποσοστά μείωσης αιχμών υποστρώματος για κάθε σενάριο

Από τον Πίνακα 7.2 διαπιστώνεται ότι το ποσοστό βελτίωσης της ανιχνευτικής διατάξεως είναι σε κάθε περίπτωση πολύ υψηλό – άνω το 80-90% – τόσο για τις χαμηλές, όσο και για τις υψηλές ενέργειες φωτονίων, μάλιστα, η βελτίωση είναι μεγαλύτερη όσο χαμηλότερη είναι η ενέργεια των φωτονίων.

7.3.1 Εκτίμηση της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας (MDA) της ανιχνευτικής διατάξεως συναρτήσει του τρόπου τοποθέτησης της θωρακίσεως

Στην παράγραφο αυτή εκτιμήθηκε και μελετήθηκε η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια για μία σειρά ισοτόπων για τα δύο σενάρια που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- 1^η μέτρηση φυσικού υποστρώματος, με τον ανιχνευτή εκτός της θωράκισης και το κάλυμμα του ανιχνευτή τοποθετημένο.
- 2^η μέτρηση φυσικού υποστρώματος, με τον ανιχνευτή εντός της θωράκισης και το κάλυμμα του ανιχνευτή τοποθετημένο.

Για την περίπτωση του ανιχνευτή εντός της θωράκισης έγινε υπολογισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας. Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στον συγκεντρωτικό Πίνακα 7.3.

Ισότοπο	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Ενέργεια σε keV	364.489	604.721	661.657
Yield (%)	81.5	97.62	85.1
efficiency	0.012456	0.008462	0.007742
Αριθμός καναλιού κεντροειδούς	747	1238	1355
FWHM σε κανάλια Σχέση (4.14)	0.774	1.53	1.711
Αριθμός καναλιού - 1.5 · FWHM	745.8	1235.7	1352.4
Αριθμός καναλιού + 1.5 · FWHM	748.2	1240.3	1357.6
3 · FWHM	2.322	4.593	5.134
Πλήθος καναλιών φωτοκορυφής m	3	5	7

Πλήθος καναλιών δεξιά και αριστερά της φωτοκορυφής n	6	4	6
B σε κρούσεις (1 ^η μέτρηση)	16904	11053	13031
B σε κρούσεις (2 ^η μέτρηση)	363	560	332.5
L _d σε κρούσεις (1 ^η μέτρηση), σχέση (5.7)	607.632	411.961	451.587
L _d σε κρούσεις (2 ^η μέτρηση), σχέση (5.7)	91.357	94.83	74.414
MDA σε Bq (1 ^η μέτρηση)	0.001427	0.000976	0.001061
MDA σε Bq (2 ^η μέτρηση)	0.001114	0.001156	0.000907
MDA (2 ^η μέτρηση) / MDA (1 ^η μέτρηση)	0.7714	1.181	0.8454

Πίνακας 7.3: Υπολογισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι για τα ισότοπα ^{131}I και ^{137}Cs το MDA είναι χαμηλότερο στην περίπτωση που ο ανιχνευτής περιβάλλεται από θωράκιση μολύβδου, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Όσον αφορά όμως το ισότοπο ^{134}Cs , παρατηρείται ότι το MDA αυξάνεται στην 2^η μέτρηση, κάτι που είναι μη αναμενόμενο. Μετά από προσεκτική ανάλυση του φάσματος στην περιοχή της ισχυρότερης φωτοκορυφής του ^{134}Cs , διαπιστώθηκε η ύπαρξη στο φάσμα μίας φωτοκορυφής που κανονικά δεν πρέπει να υπάρχει σε φάσμα υποστρώματος. Συγκεκριμένα, κοντά στη φωτοκορυφή των 604.721 keV του ^{134}Cs ανιχνεύεται μικρή αιχμή στην ενέργεια των στα 602.726 keV, η οποία, όπως διαπιστώθηκε, οφείλεται στο ^{124}Sb . Η ανίχνευση του ^{124}Sb επιβεβαιώθηκε και από τις άλλες φωτοκορυφές στις οποίες εκπέμπει φωτόνια. Τα φωτόνια ενέργειας 602.726 keV που ανιχνεύονται κοντά στην ενέργεια 604.721 keV του ^{134}Cs , δημιουργούν πρόβλημα κατά τον υπολογισμό του υποστρώματος και κατά συνέπεια του L_D και του MDA.

Όσον αφορά την παρουσία του ^{124}Sb – ενός προϊόντος νετρονικής ενεργοποίησης – στη θωράκιση, αυτή ερμηνεύεται από το γεγονός ότι τα τούβλα μολύβδου, πριν χρησιμοποιηθούν ήταν φυλαγμένα σε ειδικό χώρο στον οποίο υπάρχουν πηγές νετρονίων. Επισημαίνεται ότι το ^{124}Sb έχει σχετικά μικρό χρόνο ημιζωής ($T_{1/2}=60.208$ μέρες) και σχετικά σύντομα θα έχει κάνει πλήρως decay, ώστε να μην είναι ανιχνεύσιμο.

7.4 Μελέτη της επίδρασης στο υπόστρωμα της χρήσης αερίου αζώτου εντός της θωράκιση

Μετά την εγκατάσταση του ανιχνευτή μέσα στη θωράκιση και τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς της, έγινε μία τελευταία προσπάθεια για τη μείωση του υποστρώματος της διάταξης. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε το κατά πόσον επηρεάζεται το φάσμα υποστρώματος που λαμβάνεται εντός θωράκισης, σε περίπτωση που γίνουν κάποιες μεταβολές στην πειραματική διάταξη. Η σύγκριση έγινε με την περίπτωση που ο ανιχνευτής είναι πλήρως τοποθετημένος μέσα στη θωράκιση (1^ο σενάριο).

Οι δύο μεταβολές που έγιναν (2^ο σενάριο) ήταν:

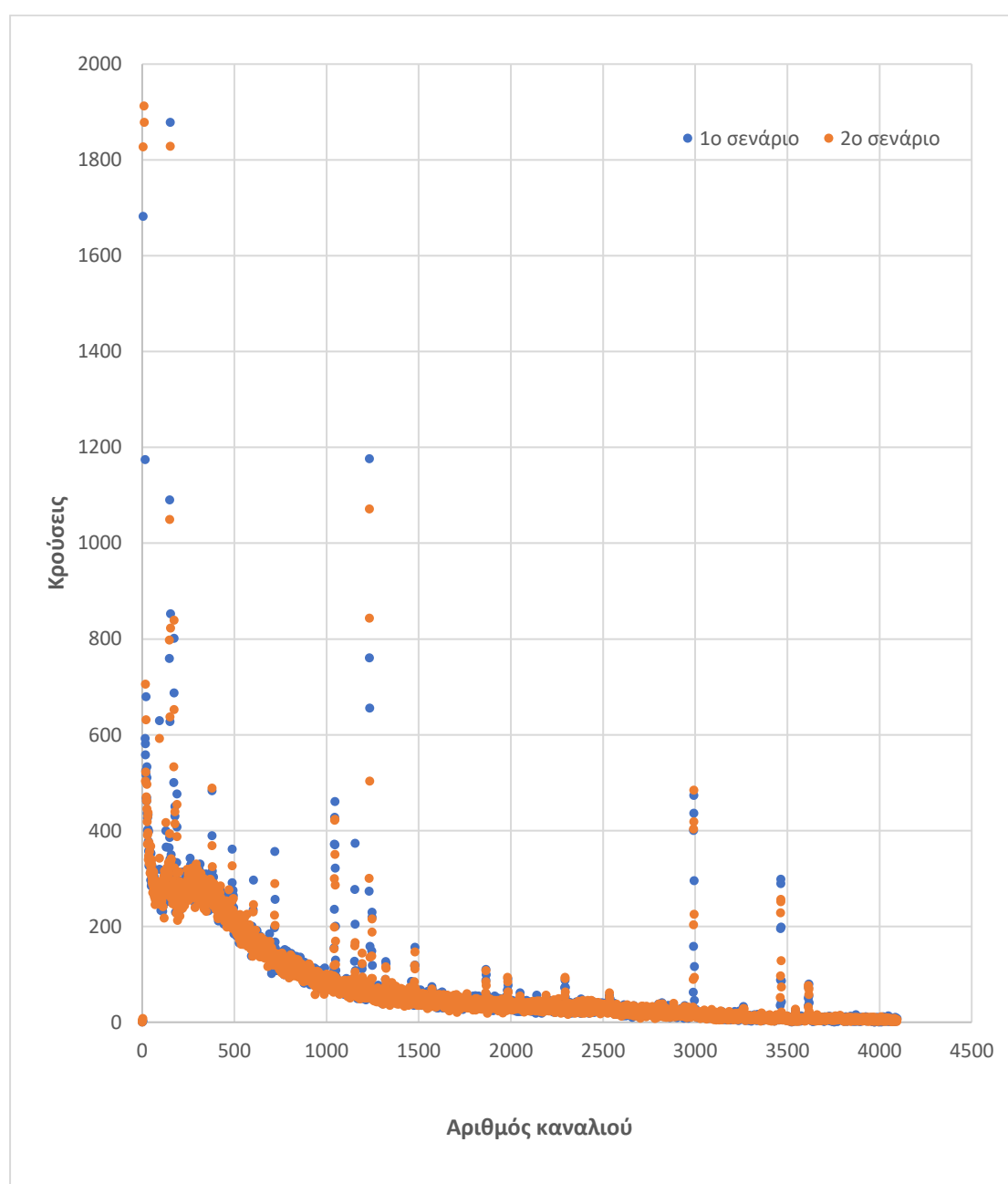
- Οδήγηση του αερίου αζώτου από την εξάτμιση του dewar εντός της θωράκισης. Η διαδικασία αυτή επιλέχθηκε με σκοπό την μείωση της συγκεντρώσεως των

θυγατρικών ισotόπων του ραδονίου από το εσωτερικό της θωράκισης. Επιπλέον, έχει ελεγχθεί για την αποτελεσματικότητά της στις υπόλοιπες ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

- Απομάκρυνση ορισμένων πηγών θαλασσίου ύδατος οι οποίες ευρίσκονταν στο χώρο των μετρήσεων και οι οποίες περιείχαν πολύ χαμηλές ποσότητες ^{137}Cs .

Για την εξακρίβωση του κατά πόσο επηρεάζεται το φάσμα από την χρήση του αερίου αζώτου υπολογίστηκε η καθαρή επιφάνεια κάθε φωτοκορυφής που οφείλεται σε θυγατρικό ισotόπο του ραδονίου και στα δύο σενάρια.

Στο Σχήμα 7.7 που ακολουθεί διακρίνονται τα φάσματα των δύο σεναρίων, ενώ στον Πίνακα 7.4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της επιφάνειας επιλεγμένων φωτοκορυφών που ανιχνεύονται στο υπόστρωμα.



Σχήμα 7.7: Συγκριτικό φάσμα για τα δύο σενάρια

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Net Area (1ο σενάριο)	Net Area (2ο σενάριο)	Μείωση % Net Area	U-Test
²¹² Pb	238.632	151±86	110±84	3.4%	0.34
²¹⁴ Pb	295.224	194±75	191±62	13%	0.03
²¹⁴ Pb	351.932	489±84	367±82	4%	1.04
²⁰⁸ Tl	510.74	1777±82	1568±79	11%	1.84
¹²² Sb	564.24	732±66	238±50	66 %	5.97
¹²⁴ Sb	602.727	2741±126	2569±131	7.1%	0.94
²¹⁴ Bi	609.312	485±34	423±36	16%	1.25
¹²⁴ Sb	645.854	169±65	205±63	46%	0.39
¹²⁴ Sb	722.784	250±61	250±63	15%	0
⁴⁰ K	1460.822	1853±61	1810±60	3.3%	0.50
¹²⁴ Sb	1690.971	1180±46	1051±46	14%	1.98
²¹⁴ Bi	1764.494	302±35	315±34	4.0%	0.26

Πίνακας 7.4: Πίνακας καθαρών επιφανειών φωτοκορυφής του φάσματος υποστρώματος με θωράκιση

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι για όλες τις φωτοκορυφές θυγατρικών του ραδονίου (αναγράφονται με πράσινο) παρατηρήθηκε μείωση της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής με την προσθήκη αερίου αζώτου εντός της μολύβδινης θωρακίσεως. Παρόλα αυτά, με σκοπό την επιβεβαίωση ότι η μείωση αυτή είναι στατιστικά σημαντική, πραγματοποιήθηκε ένα U-Test.

Με το στατιστικό έλεγχο U-Test, ελέγχεται το κατά πόσο δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, όταν είναι γνωστές οι τιμές τους και οι αβεβαιότητές που τις συνοδεύουν. Ο στατιστικός έλεγχος στηρίζεται στη σύγκριση της μεταβλητής ελέγχου U με δεδομένη τιμή, η οποία προκύπτει από την υπόθεση ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή ($\mu=0, \sigma=1$) και το επίπεδο εμπιστοσύνης που επιλέγεται ισούται με 95%. Η τιμή της παραμέτρου U παρέχεται από την παρακάτω σχέση (7.1):

$$U = \frac{|Net Area1 - Net Area2|}{\sqrt{\sigma1^2 + \sigma2^2}} \quad (7.1)$$

Όπου:

- Net Area1: Η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής από το πρόγραμμα SPUNAL της εκάστοτε ενέργειας του ραδιοϊσοτόπου για το 1^ο σενάριο.
- Net Area2: Η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής από το πρόγραμμα SPUNAL της εκάστοτε ενέργειας του ραδιοϊσοτόπου για το 2^ο σενάριο.
- $\sigma1$: Η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης με βάση το πρόγραμμα SPUNAL για το 1^ο σενάριο
- $\sigma2$: Η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης με βάση το πρόγραμμα SPUNAL για το 2^ο σενάριο

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

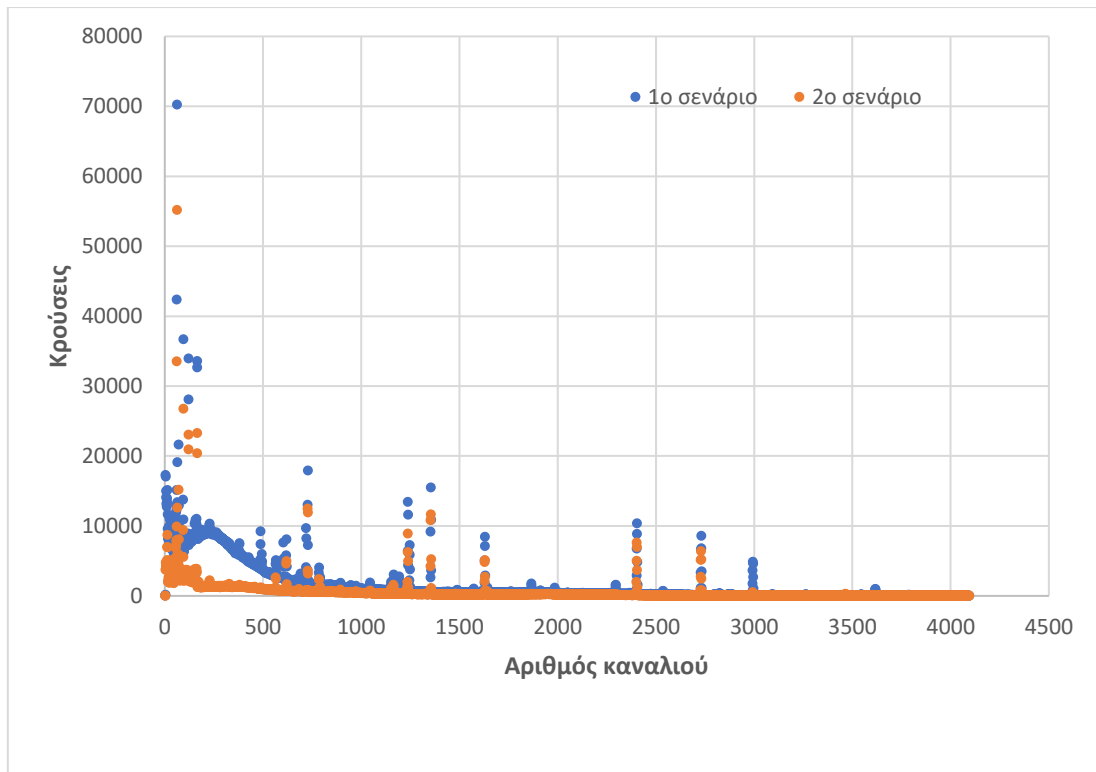
Παρατηρώντας τις τιμές του U-Test του Πίνακα 7.4, διαπιστώνεται ότι για όλα τα θυγατρικά του ραδονίου η τιμή του U-Test είναι αισθητά μικρότερη από 1.96. Επομένως η μείωση των τιμών της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής δεν είναι στατιστικά σημαντική για κανένα θυγατρικό του ραδονίου και άρα η παροχή αζώτου εντός της θωρακίσεως δεν είναι βέβαιο πως βελτιώνει την ανιχνευτική διάταξη. Τα υπόλοιπα ισότοπα του παραπάνω πίνακα, πέραν του ^{40}K , οφείλονται στην θωράκιση μολύβδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ανιχνεύονται τα ισότοπα ^{124}Sb και ^{122}Sb , με χρόνο ημιζωής ($T_{1/2}$) 60.2 ημέρες και 2.7 ημέρες αντίστοιχα. Από τα ισότοπα αυτά διαπιστώνεται ότι μόνο για το ισότοπο ^{122}Sb το U-Test δίνει τιμή μεγαλύτερη από 2.576, δηλαδή υποδεικνύει μείωση στο υπόστρωμα, κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από τον μικρό χρόνο ημιζωής του και το γεγονός ότι τα δύο σενάρια πραγματοποιήθηκαν με τέσσερις ημέρες διαφορά (δηλαδή σχεδόν δύο χρόνους ημιζωής). Τελικώς λοιπόν, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής για κάθε ισότοπο που ανιχνεύεται στο φάσμα υποστρώματος δεν μειώνεται στατιστικά σημαντικά με την προσθήκη του αερίου αζώτου, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η θωράκιση, όπως έχει κατασκευαστεί, δεν είναι στεγανή και επιτρέπει την είσοδο του αέρα με μεγάλη ευκολία.

7.5 Μέτρηση πηγής TEL200403 στην ανιχνευτική διάταξη με και χωρίς θωράκιση

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης της θωράκισης του ανιχνευτή BEGe, αποφασίστηκε να μελετηθεί κατά πόσο επηρεάζεται το αποτέλεσμα της ανάλυσης μίας πραγματικής πηγής από τη χρήση της θωράκισης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα ασθενές μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα. Το δείγμα που αναλύθηκε ήταν η πηγή TEL200403 που παρασκευάστηκε στα πλαίσια διεθνούς άσκησης διασύγκρισης. (IAEA Intercomparison Exercise) και η ανάλυση του δείγματος έγινε για 82000 sec. Η σύγκριση έγινε με το βασικό σενάριο ανάλυσης της πηγής από τον ανιχνευτή, εκτός θωράκισης. ραδιενεργού πηγής πολλών ισωτόπων με την προσθήκη θωρακίσεως μολύβδου περιμετρικά της πηγής και του ανιχνευτή.

Η ανάλυση μέσα στη θωράκιση έγινε 334 ημέρες μετά από το βασικό σενάριο και 616 μέρες από την ημερομηνία αναφοράς που αναγράφεται στο πιστοποιητικό της πηγής και διήρκεσε επίσης 82000 sec.

Στο Σχήμα 7.8 φαίνονται τα φάσματα των δύο μετρήσεων της πηγής TEL200403, ενώ στο Σχήμα 7.9 φαίνεται η τοποθέτηση πηγής μπροστά από τον ανιχνευτή, για την τοποθέτηση της πηγής, όταν η θωράκιση έχει ολοκληρωθεί πρέπει να μετακινηθεί ο ανιχνευτής.



Σχήμα 7.8: Σύγκριση των δύο φασμάτων της πηγής TEL200403



Σχήμα 7.9: Εσωτερική όψη του 2^{ου} σεναρίου με πηγή μπροστά στον ανιχνευτή BEGe

Εκ πρώτης όψεως, στο συγκριτικό φάσμα των δύο σεναρίων (Σχήμα 7.8), διαπιστώνει κανείς ότι το φάσμα υποστρώματος στις χαμηλές ενέργειες μειώνεται όπως ήταν αναμενόμενο με την προσθήκη θωρακίσεως. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση στο ύψος των φωτοκορυφών φωτοκορυφής. Επειδή όμως τα δύο αυτά σενάρια μελετήθηκαν με αρκετές ημέρες διαφορά, δεν είναι δυνατόν να αποφανθεί κανείς αν αυτό οφείλεται στην θωράκιση ή στην εξασθένηση της πηγής χωρίς να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί και διορθώσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$N_{\text{new}} = N_{\text{old}} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (7.1)$$

Όπου

N_{new} : Η καθαρή επιφάνεια κάθε φωτοκορυφής στις 08/09/2021

N_{old} : Η καθαρή επιφάνεια κάθε φωτοκορυφής στις 09/10/2020

λ : Ο λόγος $\ln 2 / \text{half life}$, όπου **half life**, ο χρόνος ημιζωής του ισότοπου σε sec

t : Ο χρόνος που παρήλθε μεταξύ των δύο σεναρίων (334 ημέρες) σε δευτερόλεπτα

Από τα παραπάνω προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας 7.5. Από αυτόν, διαπιστώνει κανείς ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν μέσα στη θωράκιση είναι σε όρους επιφάνειας κατά 13-19% χαμηλότερα, με εξαίρεση το ισότοπο ^{210}Pb . Αυτό δείχνει ότι η απόδοση ανίχνευσης είναι χαμηλότερη από την αρχική μέτρηση (1^ο σενάριο) που είχε γίνει με τον ανιχνευτή σε κατακόρυφη θέση, και μπορεί να οφείλεται στην κακή τοποθέτηση του δείγματος μπροστά στον ανιχνευτή στο 2^ο σενάριο. Άλλωστε η τοποθέτηση αυτή του δείγματος – σε οριζόντια θέση – δεν μπορεί να ελεγχθεί καθώς δεν υπάρχει πρόσβαση μέσα στη θωράκιση μετά την τοποθέτηση του ανιχνευτή. Όσον αφορά στη φωτοκορυφή του ^{210}Pb στα 46.54keV, όπου διαπιστώνεται διαφορά περί το 27%, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η φωτοκορυφή αυτή ανιχνεύεται και στο υπόστρωμα της διάταξης, και κατά συνέπεια θα έπρεπε να έχει αφαιρεθεί καταλλήλως.

Isotope	Energy (keV)	Net Area _{old} (1 ^ο σενάριο)	Net Area _{new} (2 ^ο σενάριο)	Net Area _{old} (2 ^ο σενάριο)	Ποσοστιαία μείωση Net Area _{old}
^{210}Pb	46.539	47008.73	33194	34156.07	27.34%
^{241}Am	59.5409	47428	39900.33	39958.87	15.75%
^{133}Ba	80.9979	47232.33	38572.67	40972.2	13.25%
^{133}Ba	356.0129	35333.5	28727.17	30514.23	13.64%
^{134}Cs	604.721	34337.83	20671.67	28103.4	18.61%
^{137}Cs	661.657	39212.25	31297.83	31964.79	18.48%
^{134}Cs	795.864	23890.65	14993.17	20383.4	14.68%
^{60}Co	1173.228	34593.36	25490.33	28747.4	16.9%
^{60}Co	1332.492	30557.7	22849.33	25768.94	15.67%

Πίνακας 7.5: Πίνακας καθαρών επιφανειών φωτοκορυφής των ισότοπων της πηγής TEL200403

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8.1 Σύνοψη και συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της ΔΕ ήταν η κατασκευή μιας θωράκισης για έναν φορητό ανιχνευτή BEGe, ούτως ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μετρήσεις εντός εργαστηρίου καθώς οι μετρήσεις στο πεδίο είναι αρκετά σπάνιες. Εξαιτίας λοιπόν της σπάνιας χρήσης του, υπήρξαν μεγάλες περίοδοι κατά τις οποίες παρέμεινε δίχως ψύξη και επομένως ανενεργός. Για τον λόγο αυτό, αφού ψύχθηκε εκ νέου με υγρό άζωτο, ελέγχθηκε αν με την πάροδο του χρόνου είχε μεταβληθεί η διακριτική του ικανότητα. Διαπιστώθηκε ότι, η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή δεν επηρεάστηκε από την αδράνεια ή την πάροδο του χρόνου.

Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι επιφάνειες φωτοκορυφής για πηγή διασύγκρισης TEL200403 και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες που ελήφθησαν από την χρήση των προγραμμάτων SPUNAL και GENIE 2000. Οι αποκλίσεις στις τιμές μεταξύ όλων των μεθόδων ήταν αμελητέες. Επομένως, αφού τα μεγέθη yield, time και activity ήταν γνωστά, επιβεβαιώθηκε ότι οι τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής που υπολογίστηκαν ωριότερα ήταν ορθές.

Έπειτα, μελετήθηκαν διάφορες γεωμετρίες θωράκισης, με στόχο τη μείωση της οπισθοσκέδασης των φωτονίων μέσα στη θωράκιση, με χρήση του κώδικα προσομοίωσης Monte-Carlo PENELOPE. Από τη διερεύνηση αυτή δεν διαπιστώθηκε αξιόλογη βελτίωση του φαινομένου της οπισθοσκέδασης με χρήση συστήματος οπών ή πλέγματος εντός της θωράκισης για τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν. Για το λόγο αυτό, τόσο οι γεωμετρίες με οπές όσο και αυτές των πλεγμάτων απορρίπτονται ως ιδέες μελλοντικής κατασκευής θωρακίσεων. Επιπλέον, η περαιτέρω μελέτη πιο πολύπλοκων γεωμετρικά λύσεων, δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην ταχύτητα της προσομοίωσης, η οποία γίνεται όλο και πιο αργή, όσο η γεωμετρία γίνεται πολυπλοκότερη. Πάντως, αυτό που φαίνεται ότι πραγματικά παίζει ρόλο είναι η απόσταση του ανιχνευτή από τη θωράκιση, με την οπισθοσκέδαση να μειώνεται όσο η απόσταση αυξάνεται. Παρόλα αυτά, δεν αποκλείεται να υπάρχει κάποια γεωμετρία θωράκισης, η οποία πραγματικά να προκαλεί αξιόλογη μείωση της οπισθοσκέδασης. Σε κάθε περίπτωση πάντως ο σχεδιασμός μίας θωράκισης εξαρτάται από τα διαθέσιμα υλικά καθώς και τα κατάλληλα εργαλεία για την κατασκευή πολύπλοκων κατασκευών.

Μετά την διερεύνηση που προηγήθηκε κατασκευάστηκε ορθογωνική θωράκιση μολύβδου και μελετήθηκε κατά πόσο επηρεάζει τα φάσματα του ανιχνευτή. Αρχικά τοποθετήθηκε έμπροσθεν του ανιχνευτή χωρίς να τον περικλείει και το φάσμα που λήφθηκε δεν διέφερε σημαντικά με το αντίστοιχο χωρίς την ύπαρξη θωρακίσεως ως προς την αιχμή υποστρώματος στις χαμηλές ενέργειες. Παρόλα αυτά, υπήρξαν

φωτοκορυφές οι οποίες αυξήθηκαν με την προσθήκη θωρακίσεως και οφείλονται στις ακτίνες-X του μολύβδου (κανάλι 153) και στα ισότοπα ^{124}Sb και ^{122}Sb , με τα τελευταία να ανιχνεύονται εξαιτίας του γεγονότος ότι τα τούβλα αυτά ευρίσκονταν μέχρι πρότινος σε περιβάλλον νετρονίων και είχαν υποστεί νετρονική ενεργοποίηση. Παρόλα αυτά, επειδή τα δύο αυτά ισότοπα διαθέτουν μικρούς χρόνους ημιζωής, σε μελλοντικές μετρήσεις δεν θα ανιχνεύονται στο φάσμα.

Στην συνέχεια, η θωράκιση τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περικλείει πλήρως τον ανιχνευτή και διαπιστώθηκε ότι με την μεταβολή αυτή το φάσμα υποστρώματος μειώθηκε σε βαθμό που πλέον δεν παρατηρείται αιχμή υποστρώματος στις χαμηλές ενέργειες. Επιπλέον, υπολογίστηκε ότι το ποσοστό βελτίωσης της ανιχνευτικής διατάξεως είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο του 90%, είτε ομιλούμε για υψηλές, είτε για χαμηλές ενέργειες φωτονίων, με μια τάση βελτίωσης όσο μειώνονται οι ενέργειες των προς μελέτη ισωτόπων. Εν συνεχεία, υπολογίστηκε η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια για τα ισότοπα ^{131}I , ^{137}Cs και ^{134}Cs – τρία ισότοπα που παρουσιάζουν ιδιαίτεροι ενδιαφέρον σε συνθήκες πυρηνικού ατυχήματος – και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη της διατάξεως χωρίς θωράκιση. Όσον αφορά τα δύο πρώτα ισότοπα, διαπιστώθηκε όπως αναμενόταν μείωση 23% και 15% αντίστοιχα, όμως για το ^{134}Cs παρατηρήθηκε αύξηση η οποία είναι πλασματική, καθώς πλησίον της φωτοκορυφής των 604.721 keV του ^{134}Cs ευρίσκεται η φωτοκορυφή των 602.726 keV του ^{124}Sb η οποία δυσκολεύει τον υπολογισμό του MDA.

Μία ακόμα παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η προσθήκη αερίου αζώτου εντός της θωράκισης για μείωση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου (^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi). Ενώ μεν παρατηρήθηκε μια μικρή τάση μείωσης σε όλα τα ισότοπα, η μείωση αυτή δεν κρίθηκε στατιστικά σημαντική. Κλείνοντας, τοποθετήθηκε η προαναφερθείσα πηγή διασύγκρισης εντός του ανιχνευτή και συγκρίθηκε το φάσμα της με το αντίστοιχο της πηγής, δίχως να περικλείεται από την θωράκιση. Διαπιστώθηκε ότι η αιχμή υποστρώματος στις χαμηλές ενέργειες εξαλείφεται, ενώ ταυτόχρονα δεν παρατηρείται αύξηση στην αιχμή οπισθοσκεδάσεως. Επιπλέον – και αυτό είναι το σημαντικότερο – διαπιστώθηκε μείωση της απόδοσης ανίχνευσης κατά περίπου 13-18%, πιθανότατα λόγω κακής τοποθέτησης του δείγματος.

8.2 Προτάσεις και μελλοντικά βήματα

Το άμεσο μελλοντικό βήμα που προτείνεται είναι η επανάληψη της λήψης φασμάτων υποστρώματος και πηγής έπειτα από έναν χρόνο (περίοδος έξι χρόνων ημιζωής του ^{124}Sb). Την περίοδο εκείνη τόσο το ισότοπο ^{122}Sb όσο και το ^{124}Sb θα έχουν εξαλειφθεί. Κατά την ίδια χρονική περίοδο προτείνεται επιπλέον, να γίνει πάλι ο υπολογισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ραδιενέργειας (MDA) για το ισότοπο ^{134}Cs και η εκ νέου σύγκρισή του με εκείνο χωρίς την παρουσία θωρακίσεως.

Όσον αφορά τη μείωση των θυγατρικών του ραδονίου μπορούμε να υποθέσουμε ότι η επίτευξη της είναι δυνατή σε περίπτωση που καταστεί η θωράκιση περισσότερο

αεροστεγής. Συγκεκριμένα, η θωράκιση που κατέστη δυνατόν να κατασκευαστεί, διαθέτει οπές από όπου εισχωρεί συνεχώς αέρας από το περιβάλλον είτε μέσω των διακένων όπου ενώνεται το ένα τούβλο με το άλλο, είτε εξαιτίας του γεγονότος ότι ο ανιχνευτής είναι κυλινδρικού σχήματος και η οπή στην οποία εισχωρεί τετραγωνική. Σε μελλοντική αναβάθμιση της παρούσας θωρακίσεως προτείνεται η κατά σειρά εσωτερική επίστρωση της θωρακίσεως με λεπτά φύλλα κασσιτέρου (Sb) και χαλκού (Cu). Ο κασσίτερος έχει την ιδιότητα να απορροφά τις K_{α} και K_{β} ακτίνες-X του μολύβδου, ενώ ο χαλκός απορροφά τις ακτίνες-X που προέρχονται από τον κασσίτερο. Επιπλέον, για την μείωση του εισερχόμενου αέρα εντός της θωρακίσεως, μια εξωτερική επίστρωση όλης της μολύβδινης επιφάνειας με πλήθος φύλλων Al, θα ήταν λογικά αποτελεσματική.

Παρότι η μελέτη των γεωμετριών θωράκισης που ελέγχθηκαν στην παρούσα ΔΕ μέσω προσομοίωσης δεν κατέληξε στα επιθυμητά αποτελέσματα, αναφορικά με τη μείωση της οπισθοσκέδασης, αξίζει η μελέτη άλλων πρωτότυπων γεωμετριών με κυρίαρχη εκείνη των ανηχοϊκών θαλάμων. Επιπλέον, προτείνεται η σύγκριση φασμάτων προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά στα οποία χρησιμοποιούνται παρόμοιες σημειακές πηγές.

Τέλος, μία σημαντική βελτίωση που θα πρέπει να γίνει στη διάταξη ανίχνευσης αφορά στην τοποθέτηση του δείγματος μπροστά στον ανιχνευτή, ή και ενδεχομένως στην επανασχεδίαση και κατασκευή της θωράκισης, ώστε ο ανιχνευτής να είναι τοποθετημένος σε κατακόρυφη θέση, κάτι που θα διασφαλίζει την καλύτερη τοποθέτηση του δείγματος.

Βιβλιογραφία

- Athens Pro Audio*. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://www.athensproaudio.gr/el/room-taming.html>
- Bailey, D. (2014). *Nuclear Medicine Physics. A Handbook for Teachers and Students*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Canberra Industries. (2003). *Germanium Detectors User's Manual*. United States of America.
- Canberra Industries. (2006). *Genie 2000 Spectroscopy Software*.
- Francesc Salvat, J. M.-V. (2003). *PENELOPE-A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency.
- Gilmore, G., & Hemingway, J. (1995). *Practical gamma-ray spectrometry*. Chichester: John Wiley & Sons.
- J.Baró, J. J.-V. (1994). *PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter*. Elsevier B.V.
- Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurements*. John Wiley and Sons.
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Malvino A.P. (2006).
- PENELOPE-A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. (2003). France: Nuclear Energy Agency.
- Simopoulos, S. E. (1989). *Soil Sampling and 137Cs Analysis of the Chernobyl Fallout in Greece*. Στο *Applied Radiation and Isotopes* (σσ. 607-613). Athens.
- Steven B. Dowd, E. R. (1994). *Practical Radiation Protection and Applied Radiobiology*.
- Αγραφιώτης, Κ. (2009). *Βαθμονόμηση απόδοσης φορητού ανιχνευτή (in-situ) BEGe στην ενεργειακή περιοχή 59-1596 keV για γεωμετρία επιφανειακής πηγής ραδιενέργειας, με την μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Καρφόπουλος, Κ. (2007). *Έλεγχος διακριτικής ικανότητας φορητού ανιχνευτή BEGe της εταιρίας CANBERRA*. Αθήνα.
- Λεωνίδου, Δ. Ι. (1984). *Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Ύλης - Δοσιμετρία - Θωράκιση*. Αθήνα.
- ΛΕΩΝΙΔΟΥ, Δ. Ι. (1990). *ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΕΩΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ*. ΑΘΗΝΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΕΜΠ.
- Παπαδιονυσίου, Μ. Ν. (2015). *Μελέτη της απόκρισης ανιχνευτή γερμανίου πειραματικά και με τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

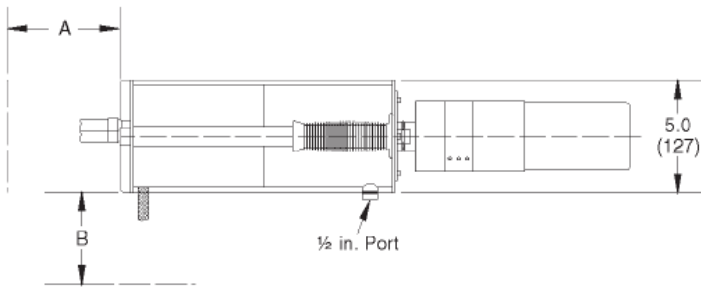
Σάββα, Μ. Ι. (2009). *Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης Γερμανίου για τον προσδιορισμό του ισότοπου BE-7 στα ατμοσφαιρικά αερολύματα με την χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo* Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

Χαινούτης, Χ. (2014). *Παραμετρική Μελέτη Υποστρώματος Ανιχνευτικών Διατάξεων Γερμανίου Με Χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης Monte Carlo*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.

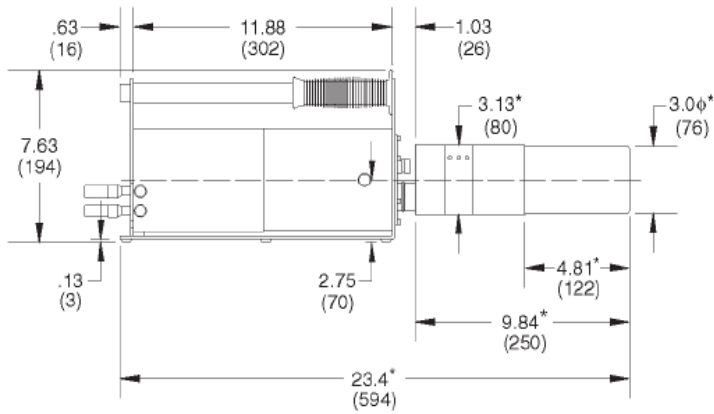
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ

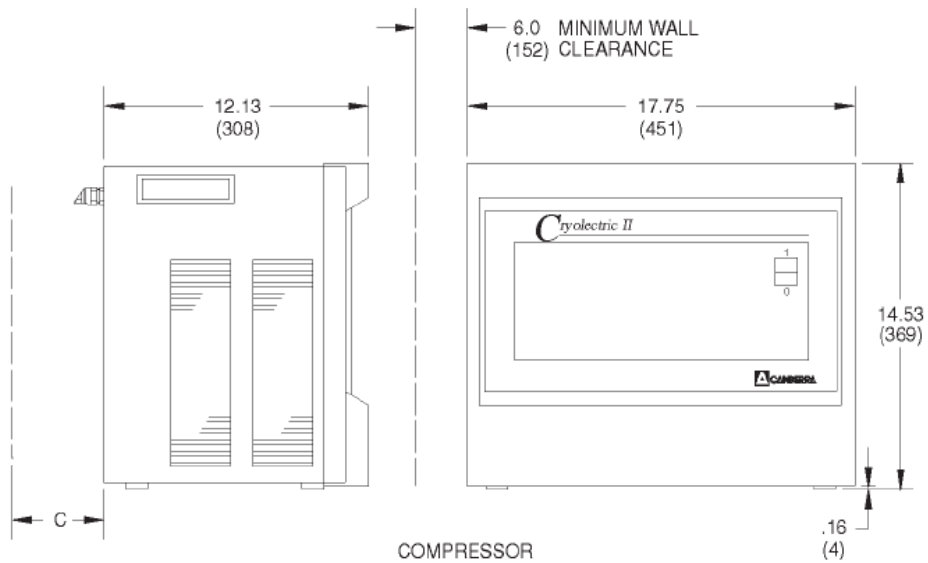
ΦΟΡΗΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΒΕGe



MINIMUM WALL CLEARANCE			
HOSE CONFIG.	A	B	C
RIGHT ANGLE AT COLD HEAD	0	6.0 (152)	10.0 (254)
RIGHT ANGLE AT COMPRESSOR	6.0 (152)	0	6.0 (152)



*End-cap diameter and length shown for detectors of less than 40% efficiency.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΠΗΓΗΣ

ΔΙΑΣΥΓΚΡΙΣΗΣ TEL200403

The reference date for all sample is 01 January 2020.

Your personal Lab-Code for this exercise will be sent via email at the same time with sample shipment.

The radionuclides and their activity concentrations in the QC material (Sample 03)

Isotope	Activity concentration, Bq/kg	Uncertainty, Bq/kg
⁶⁰ Co	307	3
¹³³ Ba	171	2
¹³⁴ Cs	210	2
¹³⁷ Cs	210	2
²¹⁰ Pb	905	17
²¹⁰ Po ¹	921	20
²⁴¹ Am	117	1

¹ In transient equilibrium to the ²¹⁰Pb the ratio of ²¹⁰Po/²¹⁰Pb= 1.0173

The uncertainty is the combined uncertainty at coverage factor k=1.

Before returning the enclosed acknowledgment, receipt form and carrying out the analyses *please read the "Instructions to participants"*. In order to ensure a comprehensive evaluation and enhanced understanding of the reported results each participant is kindly requested to complete a short questionnaire which is available on the website of the proficiency test.

The results of the analysis and estimated standard combined uncertainties (with coverage factor, k=1) should be reported using the on-line reporting forms, accessible also via the website of the proficiency test. The online Proficiency Test Reporting System can be reached at:

<http://curem.iaea.org/ptreporting/>

Your credentials for login was sent you by e-mail and will remain valid for all IAEA-TEL proficiency test exercises you might be participating also in future. Please keep/store these credentials.

The rapid reporting deadline is 10 working days after receiving the sample set for gamma ray emitters only in Sample 01, Sample 04, Sample 05, Sample 06 and Sample 07.

The deadline for long-term reporting is 25th October 2020.

IMPORTANT INFORMATION: The individual tracking code of the parcel is available on the home page of the exercise.

mass = 281,5 g

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΤΟΥ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗ

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA AFTER REPAIR

Specifications

Detector Model BE3825 Serial number b 04070
 Cryostat Model 7935SL-7
 Preamplifier Model 2002CSL

Cryostat description or Drawing Number if special Multi Attitude cryostat, type 7935SL-7

Physical Characteristics

Active Diameter 70 mm Distance from window (outside) 5 mm
 Active Area 3800 mm² Window thickness 0.5 mm
 Thickness 25 mm Window material Carbon Epoxy

Electrical Characteristics


Depletion voltage (+)3000 Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+)3500 Vdc
 Reset rate at recommended bias / sec (PO preamp only)
 Preamplifier test point voltage at recommended bias -0.6 Vdc (RC preamp only)

Resolution and Efficiency


With amp time constant of 4 μs

Isotope	⁵⁵ Fe	⁵⁷ Co	60Co		
Energy (keV)	5.9	122	1332.5		
FWHM (eV)	440	658	1780		
FWTM (eV)		1204	3295		

- Tests are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996
- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by : 

Date : January 25, 2007

Approved by : 

Date : January 25, 2007

CANBERRA Semiconductor is an ISO 9000 certified comp

1.

CSNV Repair nr :	GHR4182
Date of arrival :	27/11/06
Subs repair nr :	RAN2909
Customer order nr :	

Isocs: YES / NO
Quote: YES / NO



DETECTOR SERVICE REPORT

Customer identification

Subsidiary : **ANTISEL**
Customer name :
Contacted person :
Address :

Detector elements

Detector Model : **BE3825** s/n **b 04070**
Cryostat Model : **7935SL-7**
Preamp model : **2002CSL** s/n
Dewar : s/n
Collar :
Cables : **yes (= inspector cable)**
HV shut-off **yes**
Manuals
Carry handle **yes**
Muffler **yes**
Other **inspector 2000 sn 10035497**

Visual Inspection

Endcap	<input type="checkbox"/> broken	<input type="checkbox"/> bent	<input type="checkbox"/> dented	<input type="checkbox"/> OK
Cryostat	<input type="checkbox"/> broken	<input type="checkbox"/> bent	<input type="checkbox"/> dented	<input type="checkbox"/> OK
Dewar	<input type="checkbox"/> broken	<input type="checkbox"/> bent	<input type="checkbox"/> dented	<input type="checkbox"/> OK
Preamp	<input type="checkbox"/> broken	<input type="checkbox"/> bent	<input type="checkbox"/> dented	<input type="checkbox"/> OK

Tests before cool down

Test point YES NO
Defective cooled fet assembly YES NO
Defective : Field Effect Transistor Feedback Resistor Feedback capacitor Protection diode Test Capacitor No contact
Defective preamp YES NO
Defective : HV network Electronics

Detector tests (cooled down)

Resolution conform to specs : YES No . keV

Vacuum OK
 Vacuum problem
 HV leakage to the ground
 Internal External
 Detector leakage current
 OK
 Increased
 Breakdown at
 Microphonics : YES NO
 Damaged components of preamp
 Defective components of preamp
 Peak shift
 Pole zero
 Drain current
 Oscillations
 Neutron damage

Replaced parts

Feedthroughs Preamplifier Dewar Crystal Endcap Collar Cryostat Fet

Comments : Incoming test showed us a broken fet and PA and an increased crystal leakage current. Fet has been replaced
Crystal has been re-etched and remounted. Vacuum has been reconditioned and checked after a cycle. PA has been repaired
Detector has been 5 times tested and cycled and has had 1 long term stability test before shipment.

SERVICE MANAGER : P. VERMEULEN

Date : January 25, 2007

Signature :

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ .IN ΚΑΙ .GEO ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PENELOPE

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα αρχεία **.in** και **.geo** που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Λόγω όμως της μεγάλης πολυπλοκότητας και έκτασης της πλειοψηφίας των αρχείων, επιλέχθηκε η παράθεση μονάχα ορισμένων σεναρίων προσομοιώσεων. Το σύνολο των σεναρίων που μελετήθηκαν, υπάρχουν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

6.2.1.1

2^ο Σενάριο

- Αρχείο **.in**

```
TITLE Trial
. (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 661620 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0.0,0.0,-25.0
SCONE 0.0,0.0,90.0
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME lead.dat
MFNAME germanium.dat
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN holes.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 0,662000,200 [Energy window and no. of bins]
NBANGL 10,10 [Nos. of bins for the angles THETA and PHI]
.
ENDETC 0,662000,1000
EDBODY 15
.
>>>>>> Job properties.
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]
```



```

SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 67), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 66), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 140), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

**. TO 4° ΚΑΙ TO 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
. ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE**

```

BODY ( 81) Pb brick.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 101), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 102), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

```

BODY ( 82) Pb brick.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 104), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 105), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

**. TO 4° ΚΑΙ TO 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
. ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE**

```

BODY ( 94) Pb brick.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 142), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 141), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

```

BODY ( 95) Pb brick.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 145), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 144), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 59), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

**. TO 4° ΚΑΙ TO 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
. ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE**

```

BODY ( 107) Pb brick.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 21), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 100), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 140), SIDE POINTER=(+1)

```


00
 BODY (108) Pb brick.
 MATERIAL(1)
 SURFACE (11), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (12), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (23), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (24), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (100), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (140), SIDE POINTER=(+1)
 00

.
.

. TO 4° ΚΑΙ ΤΟ 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
. ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE

BODY (133) Pb brick.
 MATERIAL(1)
 SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (13), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (101), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (102), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (19), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (59), SIDE POINTER=(+1)
 00

BODY (134) Pb brick.
 MATERIAL(1)
 SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (13), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (104), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (105), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (19), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (59), SIDE POINTER=(+1)
 00

.
.

. TO 4° ΚΑΙ ΤΟ 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
. ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE

BODY (159) Pb brick.
 MATERIAL(1)
 SURFACE (13), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (14), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (20), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (21), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (100), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (140), SIDE POINTER=(+1)
 00

BODY (160) Pb brick.
 MATERIAL(1)
 SURFACE (13), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (14), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (23), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (24), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (100), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (140), SIDE POINTER=(+1)
 00

.
.

. TO 4° ΚΑΙ ΤΟ 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
. ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE

BODY (185) Pb brick.
 MATERIAL(1)
 SURFACE (14), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (15), SIDE POINTER=(+1)

SURFACE (101), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (102), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (59), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (186) Pb brick.
MATERIAL(1)
SURFACE (14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (15), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (104), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (105), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (59), SIDE POINTER=(+1)
00
.
.

**TO 4° ΚΑΙ ΤΟ 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3
ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ 5° ΚΑΙ 6° SURFACE**

BODY (211) Pb brick.
MATERIAL(1)
SURFACE (15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (20), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (21), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (100), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (140), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (212) Pb brick.
MATERIAL(1)
SURFACE (15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (23), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (24), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (100), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (140), SIDE POINTER=(+1)
00
.
.

TO 4° ΚΑΙ ΤΟ 3° SURFACE ΑΠΌ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ΑΝΑ 3

BODY (237) Water source
MATERIAL(3)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (180), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(+1)
00
END 00

6.2.3.2

2° Σενάριο

- Αρχείο .in


```

AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AO=( 1.75000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 38) PLANE Y=22.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
Ayy=( 0.00000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AO=( -2.25000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 39) PLANE Y=-22.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
Ayy=( 0.00000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AX=( 0.00000000000000E+00, 0)
AY=( 1.00000000000000E+00, 0)
AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AO=( 2.25000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 40) PLANE X= 22.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
Ayy=( 0.00000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AO=( -2.25000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 41) PLANE X=-22.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AXX=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXY=( 0.00000000000000E+00, 0)
AXZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
Ayy=( 0.00000000000000E+00, 0)
AYZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AZZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AX=( 1.00000000000000E+00, 0)
AY=( 0.00000000000000E+00, 0)
AZ=( 0.00000000000000E+00, 0)
AO=( 2.25000000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 42) PLANE Z23=+1,7
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.70000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 43) PLANE Z16=+1,75
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 1.75000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 44) CYLINDER R7=0.5
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.50000000000000E-00, 0)
Y-SCALE=( 0.50000000000000E-00, 0)
X-SHIFT=( 5.50000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 45) CYLINDER R8=0.5

```



```

SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 18), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 8) Cu Side 5/7
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 9) Cu Side 6/7
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 10) Cu Side 6/7
MATERIAL( 3)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 11) Ge Dead Layer
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 12) Ge Crystal
MATERIAL( 4)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 21), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 13) Hole 1
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(+1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 7)
BODY ( 8)
BODY ( 9)
BODY ( 10)
BODY ( 11)
BODY ( 12)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 14) Hole 2
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 26), SIDE POINTER=(+1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 7)
BODY ( 8)
BODY ( 9)
BODY ( 10)
BODY ( 11)

```


BODY (16)
BODY (17)
BODY (18)
BODY (19)
BODY (20)
BODY (21)
BODY (22)
BODY (23)
BODY (24)
BODY (25)
BODY (26)
BODY (27)
BODY (28)
BODY (29)
BODY (30)
BODY (31)
BODY (32)
BODY (33)
BODY (34)
BODY (35)
BODY (36)
BODY (37)
BODY (38)
BODY (39)
BODY (40)
BODY (41)
BODY (42)
BODY (43)
BODY (44)
BODY (45)
BODY (46)
BODY (47)
BODY (48)
BODY (49)
BODY (50)
BODY (51)
BODY (52)
BODY (53)
BODY (54)
BODY (55)
BODY (56)
BODY (57)
BODY (58)
BODY (59)
BODY (60)
BODY (61)
BODY (62)
BODY (63)
BODY (64)
BODY (65)
BODY (66)
BODY (67)
BODY (68)
BODY (69)
BODY (60)
BODY (61)
BODY (62)
BODY (63)
BODY (64)
BODY (65)
BODY (66)
BODY (67)
BODY (68)
BODY (69)
BODY (70)
BODY (71)
BODY (72)
BODY (73)
BODY (74)
BODY (75)

BODY (96)
BODY (97)
BODY (98)
BODY (99)
BODY (100)
BODY (101)
BODY (102)
BODY (103)
BODY (104)
BODY (105)
BODY (106)
BODY (107)
BODY (108)
BODY (109)
BODY (110)
BODY (111)
BODY (112)
BODY (113)
BODY (114)
BODY (115)
BODY (116)
BODY (117)
BODY (118)
BODY (119)
BODY (120)
BODY (121)
BODY (122)
BODY (123)
BODY (124)
BODY (125)
BODY (126)
BODY (127)
BODY (128)
BODY (129)
BODY (130)
BODY (131)
BODY (132)
BODY (133)
BODY (134)
BODY (135)
BODY (136)
BODY (137)
BODY (138)
BODY (139)
BODY (140)
BODY (141)
BODY (142)
BODY (143)
BODY (144)
BODY (145)
BODY (146)
BODY (147)
BODY (148)
BODY (149)
BODY (150)
BODY (151)
BODY (152)
BODY (153)
BODY (154)
BODY (155)
BODY (156)
BODY (157)
BODY (158)
BODY (159)
BODY (160)
BODY (161)
BODY (162)
BODY (163)
BODY (164)
BODY (165)

BODY (108)
BODY (109)
BODY (110)
BODY (111)
BODY (112)
BODY (113)
BODY (114)
BODY (115)
BODY (116)
BODY (117)
BODY (118)
BODY (119)
BODY (120)
BODY (121)
BODY (122)
BODY (123)
BODY (124)
BODY (125)
BODY (126)
BODY (127)
BODY (128)
BODY (129)
BODY (130)
BODY (131)
BODY (132)
BODY (133)
BODY (134)
BODY (135)
BODY (136)
BODY (137)
BODY (138)
BODY (139)
BODY (140)
BODY (141)
BODY (142)
BODY (143)
BODY (144)
BODY (145)
BODY (146)
BODY (147)
BODY (148)
BODY (149)
BODY (150)
BODY (151)
BODY (152)
BODY (153)
BODY (154)
BODY (155)
BODY (156)
BODY (157)
BODY (158)
BODY (159)
BODY (160)
BODY (161)
BODY (162)
BODY (163)
BODY (164)
BODY (165)
BODY (166)
BODY (167)
BODY (168)
BODY (169)
BODY (170)
BODY (171)
BODY (172)
BODY (173)
BODY (174)
BODY (175)
BODY (176)
BODY (177)

```

BODY    ( 178)
BODY    ( 179)
BODY    ( 180)
BODY    ( 181)
BODY    ( 182)
BODY    ( 183)
BODY    ( 184)
BODY    ( 185)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    ( 195) 4th side lead shield 1st layer
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 33), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 35), SIDE POINTER=(+1)
BODY    ( 96)
BODY    ( 97)
BODY    ( 98)
BODY    ( 99)
BODY    ( 100)
BODY    ( 101)
BODY    ( 102)
BODY    ( 103)
BODY    ( 104)
BODY    ( 105)
BODY    ( 106)
BODY    ( 107)
BODY    ( 108)
BODY    ( 109)
BODY    ( 110)
BODY    ( 111)
BODY    ( 112)
BODY    ( 113)
BODY    ( 114)
BODY    ( 115)
BODY    ( 116)
BODY    ( 117)
BODY    ( 118)
BODY    ( 119)
BODY    ( 120)
BODY    ( 121)
BODY    ( 122)
BODY    ( 123)
BODY    ( 124)
BODY    ( 125)
BODY    ( 126)
BODY    ( 127)
BODY    ( 128)
BODY    ( 129)
BODY    ( 130)
BODY    ( 131)
BODY    ( 132)
BODY    ( 133)
BODY    ( 134)
BODY    ( 135)
BODY    ( 136)
BODY    ( 137)
BODY    ( 138)
BODY    ( 139)
BODY    ( 140)
BODY    ( 141)
BODY    ( 142)
BODY    ( 143)
BODY    ( 144)
BODY    ( 145)
BODY    ( 146)
BODY    ( 147)
BODY    ( 148)

```



```
BODY      ( 149)
BODY      ( 150)
BODY      ( 151)
BODY      ( 152)
BODY      ( 153)
BODY      ( 154)
BODY      ( 155)
BODY      ( 156)
BODY      ( 157)
BODY      ( 158)
BODY      ( 159)
BODY      ( 160)
BODY      ( 161)
BODY      ( 162)
BODY      ( 163)
BODY      ( 164)
BODY      ( 165)
BODY      ( 166)
BODY      ( 167)
BODY      ( 168)
BODY      ( 169)
BODY      ( 170)
BODY      ( 171)
BODY      ( 172)
BODY      ( 173)
BODY      ( 174)
BODY      ( 175)
BODY      ( 176)
BODY      ( 177)
BODY      ( 178)
BODY      ( 179)
BODY      ( 180)
BODY      ( 181)
BODY      ( 182)
BODY      ( 183)
BODY      ( 184)
BODY      ( 185)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 196) 1st side lead shield 2nd layer
MATERIAL(    6)
SURFACE  ( 29) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 26) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 38) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 34) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 36) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 37) , SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 197) 2nd side lead shield 2nd layer
MATERIAL(    6)
SURFACE  ( 29) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 26) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 35) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 39) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 36) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 37) , SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 198) 3rd side lead shield 2nd layer
MATERIAL(    6)
SURFACE  ( 29) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 26) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 40) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 36) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 38) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 39) , SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 199) 4th side lead shield 2nd layer
MATERIAL(    6)
SURFACE  ( 29) , SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 26) , SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 37) , SIDE POINTER=(-1)
```

SURFACE (41), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (38), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (39), SIDE POINTER=(+1)
 000
 BODY (200) water source
 MATERIAL(7)
 SURFACE (5), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (42), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (43), SIDE POINTER=(-1)
 000
 MODULE (999) Whole BEGe
 MATERIAL(0)
 BODY (1)
 BODY (2)
 BODY (3)
 BODY (4)
 BODY (5)
 BODY (6)
 BODY (7)
 BODY (8)
 BODY (9)
 BODY (10)
 BODY (11)
 BODY (12)
 BODY (13)
 BODY (14)
 BODY (15)
 BODY (16)
 BODY (17)
 BODY (18)
 BODY (19)
 BODY (20)
 BODY (21)
 BODY (22)
 BODY (23)
 BODY (24)
 BODY (25)
 BODY (26)
 BODY (27)
 BODY (28)
 BODY (29)
 BODY (30)
 BODY (31)
 BODY (32)
 BODY (33)
 BODY (34)
 BODY (35)
 BODY (36)
 BODY (37)
 BODY (38)
 BODY (39)
 BODY (40)
 BODY (41)
 BODY (42)
 BODY (43)
 BODY (44)
 BODY (45)
 BODY (46)
 BODY (47)
 BODY (48)
 BODY (49)
 BODY (50)
 BODY (51)
 BODY (52)
 BODY (53)
 BODY (54)
 BODY (55)
 BODY (56)
 BODY (57)
 BODY (58)

BODY (59)
BODY (60)
BODY (61)
BODY (62)
BODY (63)
BODY (64)
BODY (65)
BODY (66)
BODY (67)
BODY (68)
BODY (69)
BODY (60)
BODY (61)
BODY (62)
BODY (63)
BODY (64)
BODY (65)
BODY (66)
BODY (67)
BODY (68)
BODY (69)
BODY (70)
BODY (71)
BODY (72)
BODY (73)
BODY (74)
BODY (75)
BODY (76)
BODY (77)
BODY (78)
BODY (79)
BODY (80)
BODY (81)
BODY (82)
BODY (83)
BODY (84)
BODY (85)
BODY (86)
BODY (87)
BODY (88)
BODY (89)
BODY (90)
BODY (91)
BODY (92)
BODY (93)
BODY (94)
BODY (95)
BODY (96)
BODY (97)
BODY (98)
BODY (99)
BODY (100)
BODY (101)
BODY (102)
BODY (103)
BODY (104)
BODY (105)
BODY (106)
BODY (107)
BODY (108)
BODY (109)
BODY (110)
BODY (111)
BODY (112)
BODY (113)
BODY (114)
BODY (115)
BODY (116)
BODY (117)
BODY (118)

BODY (119)
BODY (120)
BODY (121)
BODY (122)
BODY (123)
BODY (124)
BODY (125)
BODY (126)
BODY (127)
BODY (128)
BODY (129)
BODY (130)
BODY (131)
BODY (132)
BODY (133)
BODY (134)
BODY (135)
BODY (136)
BODY (137)
BODY (138)
BODY (139)
BODY (140)
BODY (141)
BODY (142)
BODY (143)
BODY (144)
BODY (145)
BODY (146)
BODY (147)
BODY (148)
BODY (149)
BODY (150)
BODY (151)
BODY (152)
BODY (153)
BODY (154)
BODY (155)
BODY (156)
BODY (157)
BODY (158)
BODY (159)
BODY (160)
BODY (161)
BODY (162)
BODY (163)
BODY (164)
BODY (165)
BODY (166)
BODY (167)
BODY (168)
BODY (169)
BODY (170)
BODY (171)
BODY (172)
BODY (173)
BODY (174)
BODY (175)
BODY (176)
BODY (177)
BODY (178)
BODY (179)
BODY (180)
BODY (181)
BODY (182)
BODY (183)
BODY (184)
BODY (185)
BODY (186)
BODY (187)
BODY (188)

```
BODY      ( 189)  
BODY      ( 190)  
BODY      ( 191)  
BODY      ( 192)  
BODY      ( 193)  
BODY      ( 194)  
BODY      ( 195)  
BODY      ( 196)  
BODY      ( 197)  
BODY      ( 198)  
BODY      ( 199)  
BODY      ( 200)  
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000  
END      0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```