



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

## Πτυχιακή Εργασία

# **Βαθμονόμηση ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας HPGe, για διάφορες γεωμετρίες δειγμάτων, με τεχνικές Monte Carlo**

---

Καμούτσης Κωνσταντίνος (Α.Μ. 092572)

Επιβλέπων Καθηγητής: Dr. Ξανθός Στυλιανός

*a*

Θεσσαλονίκη 2016

# Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1	Σκοπός της εργασίας.....	3
1.2	Διάρθρωση της εργασίας .....	3
1.3	Ραδιενεργός διάσπαση-Έννοιες και μεγέθη.....	4
1.4	Γενικά Ακτινοβολία $\gamma$ .....	5
1.5	Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – $\gamma$ με την ύλη .....	8
2	ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ (HPGe).....	14
2.1	Γενικά στοιχεία .....	14
2.2	Περιγραφή του ανιχνευτή BEGe .....	23
2.3	Περιγραφή του ανιχνευτή και του αντίστοιχου εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στην πτυχιακή .....	24
2.4	Εργαστηριακές μετρήσεις με τον ανιχνευτή HPGe .....	31
3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ .....	40
3.1	Monte Carlo - Γενικά .....	40
3.2	Εφαρμογή της μεθόδου για τη μελέτη της κίνησης των σωματιδίων και τις διάφορες αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη .....	42
3.3	Ο κώδικας MCNP 4c2 .....	44
3.4	Απαριθμητής Ύψους Παλμών (Pulse Height Tally, f8) .....	45
3.5	Μορφή αρχείου εισόδου .....	45
3.6	Προσομοίωση των μετρήσεων με κώδικα Monte Carlo.....	52
4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΘΗΚΑΝ .....	61
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	69
6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	71
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	86

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας ελήφθησαν ενεργειακά φάσματα πηγών βαθμονόμησης μέσω εργαστηριακών γ-φασματοσκοπικών μετρήσεων με ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe). Στη συνέχεια οι παραπάνω μετρήσεις προσομοιώθηκαν με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo σε υπολογιστή.

Αναλυτικότερα, οι βασικοί στόχοι της εργασίας ήταν:

1. Αρχικά, η σωστή προσομοίωση του εργαστηριακού ανιχνευτή γερμανίου BE2020 της εταιρείας CANBERRA με τη βοήθεια παλαιότερων μετρήσεων και υπολογισμών της απόδοσης του ανιχνευτή.
2. Ο υπολογισμός της απόδοσης του ανιχνευτή για μετρήσεις δειγμάτων διαφορετικών γεωμετριών και πυκνοτήτων με τη χρήση του κώδικα MCNP 4C2 (Monte Carlo N-Particle Transport Code System). Ειδικότερα, ερευνήθηκαν γεωμετρίες σημειακών πηγών και κυλινδρικές (για χρήση σε μετρήσεις δειγμάτων σε δοχείο).

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 δίνονται ορισμένα γενικά και θεωρητικά στοιχεία πάνω στη γ-φασματοσκοπία, που ήταν και η βασική μέθοδος μέτρησης. Επίσης παραθέτονται οι τρόποι αλληλεπίδρασης της γ-ακτινοβολίας με την ύλη.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας των ανιχνευτών HPGe και πιο συγκεκριμένα του ανιχνευτή και του αντίστοιχου εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε. Παρατίθενται, επιπλέον, οι τρόποι αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας γ με τον ανιχνευτή και κατ' επέκταση με την ύλη, καθώς επίσης δίνεται ο ορισμός της απόδοσης του ανιχνευτή. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα με τη χρήση του παραπάνω ανιχνευτή.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται παρουσίαση της μεθόδου Monte Carlo και του κώδικα MCNP, καθώς παρουσιάζεται ο τρόπος προσομοίωσης του ανιχνευτή HPGe και περιγράφεται η μορφή του

αρχείου εισόδου. Ακόμη, παρατίθεται ένα πρότυπο αρχείο εισόδου με κώδικα Monte Carlo των μετρήσεων της σημειακής πηγής που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τις αντίστοιχες των προσομοιώσεων, ενώ στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

Τέλος, στο Παράρτημα παρατίθενται αναλυτικά αποτελέσματα μετρήσεων και προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας.

### 1.3 Ραδιενεργός διάσπαση-Έννοιες και μεγέθη

Ο πυρήνας ενός ατόμου δεν μπορεί να έχει οποιαδήποτε εσωτερική ενέργεια. Για κάθε είδους πυρήνα υπάρχουν διακριτές επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές του είδους του πυρήνα. Η πιο ευσταθής κατάσταση, με τη μικρότερη ενέργεια από τις επιτρεπόμενες, ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση, ενώ οι υπόλοιπες ονομάζονται και είναι καταστάσεις διέγερσης. Πυρήνας ατόμου που βρίσκεται σε κάποια κατάσταση διέγερσης, αργά ή γρήγορα, με κάποιο τρόπο, θα μεταβεί στην θεμελιώδη κατάσταση του ελευθερώνοντας την περίσσεια ενέργεια.

Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθείς. Παθαίνουν δηλαδή χωρίς καμία εξωτερική διέγερση, μετατροπή σε κάποιο άλλο πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια, ή μεταβαίνουν από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια χαμηλότερη εκπέμποντας φωτόνια. Μιλάμε τότε για ραδιενεργό διάσπαση του ασταθούς πυρήνα. Ο αρχικός πυρήνας ονομάζεται μητρικός και αυτός που προκύπτει μετά τη διάσπαση ονομάζεται θυγατρικός. Τα σωματίδια εκπέμπονται με σημαντική ενέργεια και είναι αυτή ακριβώς η εκπομπή που ονομάζεται ραδιενεργός ακτινοβολία. Η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών ονομάζεται ραδιενέργεια και αποδόθηκε από το ζεύγος Currie το 1898.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάσπασης που παράγουν αντίστοιχες ραδιενεργές ακτινοβολίες.

Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι παρακάτω:

- **Διάσπαση α:** Επιτυγχάνεται με εκπομπή ακτινοβολίας με τη μορφή σωματιδίου α, το οποίο αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια (πυρήνας ηλίου). Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα σε σχέση με τον μητρικό είναι μειωμένος κατά δύο και άρα πρόκειται για διαφορετικό χημικό στοιχείο.

- **Διάσπαση β<sup>-</sup>**: Επιτυγχάνεται με εκπομπή ακτινοβολίας με τη μορφή σωματιδίου β<sup>-</sup> (ένα ηλεκτρόνιο), κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι αυξημένος κατά ένα και άρα έχουμε διαφορετικό χημικό στοιχείο.
- **Διάσπαση β<sup>+</sup>**: Επιτυγχάνεται με εκπομπή ακτινοβολίας με τη μορφή σωματιδίου β<sup>+</sup> (ένα ποζιτρόνιο), κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά ένα, οπότε έχουμε διαφορετικό χημικό στοιχείο.
- **Ακτινοβολία γ**: Κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα ο θυγατρικός πυρήνας σχηματίζεται συνήθως σε διεγερμένη κατάσταση. Κατά την μετάβαση του θυγατρικού πυρήνα σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη εκπέμπεται φωτόνιο υψηλής ενέργειας. Αυτή η μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται ακτινοβολία γ.

Τα βασικά μεγέθη που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία είναι ο **χρόνος ημιζωής** ( $t_{1/2}$ ) και η **ενεργότητα** (A). Ως χρόνο ημιζωής ορίζουμε τον χρόνο που απαιτείται για να διασπαστούν οι μισοί από τους αρχικούς μητρικούς πυρήνες. Ισχύει ότι:

$$t_{\left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.3.1)$$

Όπου  $\lambda$  : σταθερά διάσπασης, έχει μονάδες χρόνου και είναι χαρακτηριστική του είδους του ραδιενεργού πυρήνα. Συνήθως είναι γνωστός ο χρόνος ημιζωής και το ζητούμενο είναι η σταθερά διάσπασης.

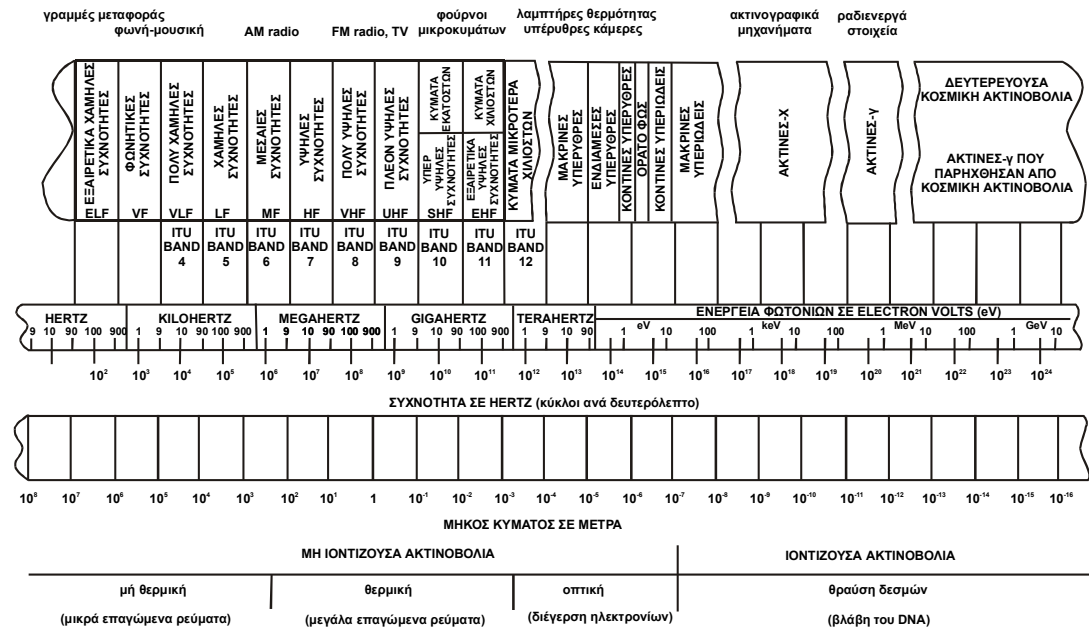
Ως **ενεργότητα** μιας ποσότητας υλικού ορίζουμε τον αριθμό των διασπάσεων κάθε είδους που συμβαίνουν στη συγκεκριμένη ποσότητα ανά μονάδα χρόνου. Μονάδα μέτρησης της ενεργότητας στο SI είναι το Becquerel και ορίζεται ως:

$$1\text{Bq}=1\text{διάσπαση/sec} \quad (1.3.2)$$

## 1.4 Γενικά Ακτινοβολία γ

Η γ-ακτινοβολία εκτός από το ότι είναι ανήκει στην ιοντίζουσα ακτινοβολία αποτελεί και ένα κομμάτι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας ή από το μήκος κύματός της. Υπάρχει εξάρτηση της συχνότητας με το μήκος κύματος και γενικά η αύξηση της συχνότητας οδηγεί

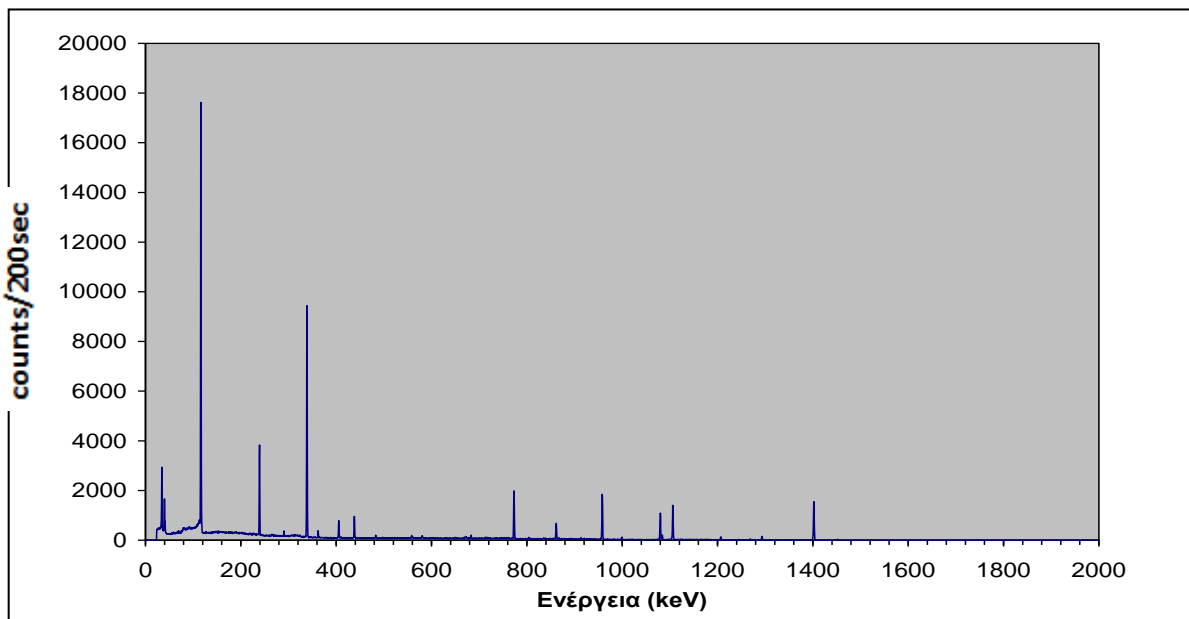
σε ελάττωση του μήκους κύματος. Παρακάτω δίνεται το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξηγώντας παράλληλα τα είδη των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών. Δίνονται οι συχνότητες και τα μήκη κύματος εντός των οποίων βρίσκονται οι διάφορες ακτινοβολίες καθώς και οι συνήθεις εφαρμογές τους ή η προέλευσή τους.



Σχήμα 1.4.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Τέλος, το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χωρίζεται σε δύο μεγάλα μέρη, την ιοντίζουσα ακτινοβολία που προκαλεί ιονισμό των μορίων των κυττάρων και τη μη ιοντίζουσα που προκαλεί συνήθως θερμικά φαινόμενα στα κύτταρα των ζώντων οργανισμών.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μέτρηση της γ-ακτινοβολίας είναι η γ-φασματοσκοπία. Όλα σχεδόν τα υλικά περιέχουν έστω και ελάχιστες ποσότητες ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Το ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό, με άλλα λόγια αποτελεί ταυτότητα, του νουκλιδίου που την εκπέμπει. Από το χαρακτηριστικό φάσμα που εκπέμπει το ραδιενεργό ισότοπο, μπορεί να διαγνωστεί η παρουσία ακόμα και ελάχιστων ποσοτήτων κάποιου στοιχείου σε υλικό. Ενδεικτικά, παρατίθεται στο σχήμα 1.2.2 φάσμα σημειακής πηγής του ραδιενεργού ισότοπου Eu-152 που λήφθηκε με ανιχνευτή HPGe. Είναι ορατές οι φωτοκορυφές που υποδεικνύουν την ύπαρξη ραδιενεργών ισοτόπων



Σχήμα 1.4.2 Φάσμα σημειακής πηγής Eu-152 απόστασης 63cm από τον Ανιχνευτή.

Η γ-φασματοσκοπία λοιπόν εφαρμόζεται ευρύτατα ως ένα εργαλείο για την ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος και συγκεκριμένα τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ισοτόπων που υπάρχουν σ' αυτό. Με τον όρο ραδιενέργεια εννοείται η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση των ραδιενεργών πυρήνων με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών.

Οι εφαρμογές της γ-φασματοσκοπίας περιλαμβάνουν τομείς όπως: παρακολούθηση πυρηνικών εγκαταστάσεων, ακτινοφυσική, πυρηνική ιατρική, επιστήμη περιβάλλοντος, έρευνα υλικών, βιοεπιστήμες και βιομηχανικές εφαρμογές ραδιοϊσοτόπων.

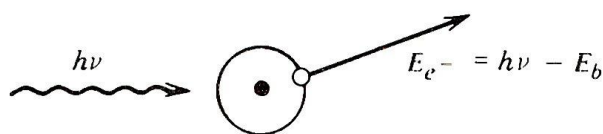
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτή η ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος μπορεί να διεξαχθεί και με μία τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά για την προσομοίωση συστημάτων. Η τεχνική αυτή είναι η μέθοδος **Monte Carlo**. Με τη μέθοδο αυτή προσομοιώθηκαν ο ανιχνευτής και οι ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές μετρήσεις για τον καθορισμό της απόδοσης του ανιχνευτικού συστήματος υπερκαθαρού γερμανίου.

## 1.5 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – $\gamma$ με την ύλη

Τρεις είναι οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη: 1) το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, 2) η σκέδαση Compton και 3) η δίδυμη γένεση. Και οι τρεις αυτές διαδικασίες οδηγούν στην ολική ή μερική μετατροπή της ενέργειας του φωτονίου σε ενέργεια ηλεκτρονίου, καταλήγοντας στην εξαφάνιση ή στη σκέδαση -μέσω μιας μεγάλης μέσης γωνίας- του αρχικού φωτονίου. Στις χαμηλές ενέργειες, μέχρι μερικές εκατοντάδες keV, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αυτό που κυριαρχεί ενώ στις ενέργειες πάνω από 5MeV επικρατεί η δίδυμη γένεση. Ανάμεσα σ' αυτές τις τιμές η σκέδαση Compton είναι η πιο πιθανή εξέλιξη. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και ο ατομικός αριθμός του υλικού με το οποίο συμβαίνει η αλληλεπίδραση, ασκώντας ισχυρή επιρροή στις σχετικές πιθανότητες μεταξύ των τριών φαινομένων. Οι βασικές αρχές των τριών μηχανισμών αναλύονται αμέσως παρακάτω.

### Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (φωτοηλεκτρική απορρόφηση)

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, που αναφέρεται συνήθως και ως φωτοηλεκτρική απορρόφηση (photoelectric absorption), αποτελεί την αλληλεπίδραση που οδηγεί στην ολική εξαφάνιση του αρχικού φωτονίου και στη θέση αυτού την εμφάνιση ενός φωτοηλεκτρονίου που προέρχεται από μία από τις ηλεκτρονιακές στοιβάδες του ατόμου-απορροφητή. Για συνηθισμένες ενέργειες η πιθανότερη στοιβάδα που θα δώσει το ηλεκτρόνιο είναι η K, για την οποία οι τυπικές τιμές για την ενέργεια σύνδεσης κυμαίνονται από μερικά keV, για υλικά με μικρό ατομικό αριθμό, μέχρι μερικές δεκάδες keV για υλικά με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό. Αξίζει να σημειωθεί πως η αλληλεπίδραση έχει να κάνει συνολικά με ολόκληρο το άτομο και δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποιο ελεύθερο ηλεκτρόνιο.



Σχήμα 1.5.1 Φωτοηλεκτρική απορρόφηση.



Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου που αποδεσμεύεται είναι ίση με την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου, μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης της στοιβάδας από την οποία προήλθε, δηλαδή :

$$E_{e^-} = \frac{1}{2} m u^2 = h \cdot \nu - E_b$$

όπου, **E<sub>b</sub>** η ενέργεια σύνδεσης του φωτοηλεκτρονίου στην αρχική του στοιβάδα

**m** η μάζα του ηλεκτρονίου

**u** η ταχύτητά του

**h** η σταθερά του Planck

**ν** η συχνότητα του φωτονίου.

Από αυτήν τη σχέση γίνεται φανερό πως για την πραγματοποίηση του φαινομένου υπάρχει κατώφλι ενέργειας του φωτονίου, δηλαδή θα πρέπει  $h \cdot \nu > E_b$ . Για ενέργειες λοιπόν της ακτινοβολίας μερικών εκατοντάδων keV το φωτοηλεκτρόνιο φέρει το μεγαλύτερο μέρος του αρχικού φωτονίου.

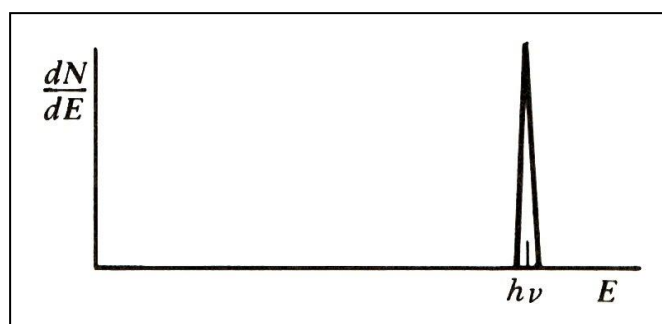
Το κενό, τώρα, που έχει δημιουργηθεί από την εκπομπή του ηλεκτρονίου αναπληρώνεται σύντομα από κάποιο ελεύθερο ηλεκτρόνιο ή από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στο άτομο. Γι' αυτόν το λόγο το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συνοδεύεται και από την εκπομπή μιας ή και περισσότερων χαρακτηριστικών ακτίνων X. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές οι ακτινοβολίες απορροφούνται ξανά κοντά στην περιοχή δημιουργίας τους μέσω φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, εμπλέκοντας στοιβάδες χαμηλότερων ενεργειών σύνδεσης.

Όπως προαναφέρθηκε, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό της αλληλεπίδρασης των ακτίνων γ με σχετικά χαμηλές ενέργειες, και εντείνεται με την παρουσία υλικών με μεγάλο ατομικό αριθμό. Αν και γενικά δεν υπάρχει για κάθε άτομο ξεχωριστά μία αναλυτική έκφραση της σχέσης μεταξύ της πιθανότητας του φαινομένου με τον ατομικό του αριθμό (Z) και την ενέργεια της ακτινοβολίας (E<sub>γ</sub>), κατά προσέγγιση ισχύει :

$$\tau \cong \text{const} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^3} \quad (3)$$

όπου ο εκθέτης  $n$  κυμαίνεται μεταξύ του 4 και του 5, εξαρτώμενος από την περιοχή των ενεργειών που εξετάζουμε. Αυτή λοιπόν η επιρροή του ατομικού αριθμού στην πιθανότητα πραγματοποίησης της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης οδηγεί στην επιλογή υλικών με μεγάλο ατομικό αριθμό (όπως ο μόλυβδος) ως θωράκιση έναντι της ακτινοβολίας  $\gamma$ , καθώς και για την κατασκευή ανιχνευτών.

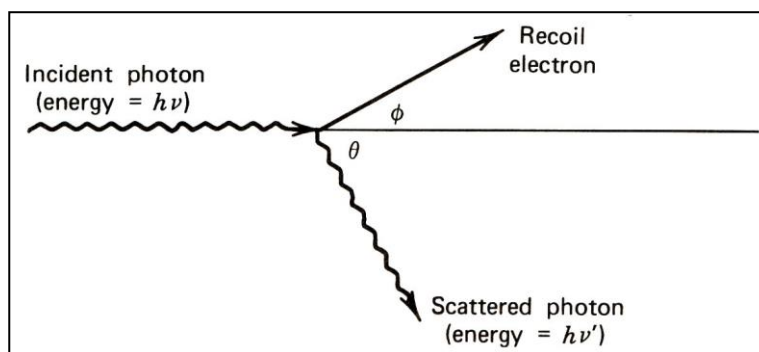
Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε πως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί τον ιδανικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης αν κάποιος θέλει να μετρήσει την ενέργεια του αρχικού φωτονίου. Το άθροισμα των κινητικών ενεργειών του φωτοηλεκτρονίου και των υπόλοιπων ηλεκτρονίων που ίσως ακολουθήσουν το αρχικό φαινόμενο πρέπει να ισούται με την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου, με την προϋπόθεση ότι εμπλέκονται μονοενεργειακά φωτόνια. Στην ιδανική περίπτωση λοιπόν που κανένα από τα ηλεκτρόνια δεν θα ξεφύγει από τον ανιχνευτή, η μορφή του φάσματος θα είναι μία απλή συνάρτηση δέλτα (ώση) και η κορυφή αυτή θα αντιπροσωπεύει την ενέργεια του αρχικού φωτονίου.



**Σχήμα 1.5.2** Κατανομή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, συνεπώς και της ενέργειας των προσπιπτόντων φωτονίων.

### Σκέδαση Compton

Ο μηχανισμός της σκέδασης Compton λαμβάνει χώρα μεταξύ του προσπίπτοντος φωτονίου (incident photon) και ενός ηλεκτρονίου από το υλικό πρόσπτωσης. Το αποτέλεσμα είναι η κίνηση του σκεδασμένου φωτονίου (scattered photon), με μικρότερη πλέον ενέργεια από αυτή που είχε αρχικά, κατά μία γωνία  $\theta$  σε σχέση με την αρχική του κατεύθυνση και η εκτίναξη του ηλεκτρονίου (recoil electron), που αρχικά θεωρείται ακίνητο, απορροφώντας μέρος από την ενέργεια του φωτονίου.



Σχήμα 1.5.3 Σκέδαση Compton.

Το φαινόμενο μπορεί να θεωρηθεί σαν ελαστική σκέδαση του φωτονίου με ελεύθερο ηλεκτρόνιο και χρησιμοποιώντας τις αρχές διατήρησης της ορμής και της ενέργειας, η ενέργεια του σκεδασμένου φωτονίου, χρησιμοποιώντας τα σύμβολα του σχήματος, αποδεικνύεται πως δίνεται από τη σχέση :

$$h \cdot \nu' = \frac{h \cdot \nu}{1 + \frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (3) \quad (1.5.1)$$

όπου  $m_0 \cdot c^2$  η ενέργεια του ηλεκτρονίου σε κατάσταση ηρεμίας, με τιμή 0,511MeV.

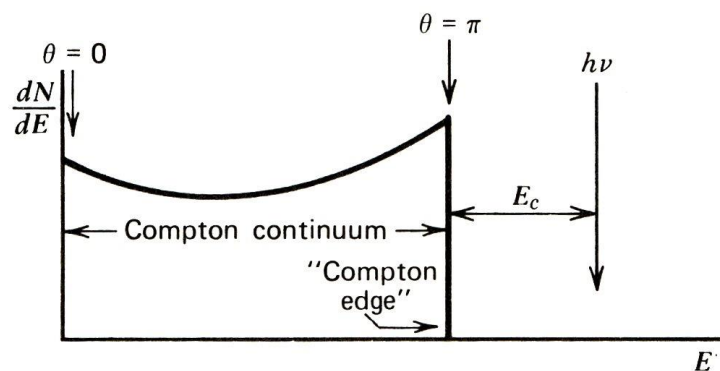
Επομένως η κινητική ενέργεια που αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο ισούται με :

$$E_{e^-} = h \cdot \nu - h \cdot \nu' = h \cdot \nu \left[ \frac{\frac{h \cdot \nu}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{h \cdot \nu}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \right] \quad (1.5.2)$$

Στις ακραίες περιπτώσεις, δηλαδή για  $\theta \cong 0$  rad όπου το φωτόνιο συνεχίζει να κινείται στην ίδια σχεδόν διεύθυνση η ενέργεια που μεταφέρεται είναι η ελάχιστη, ενώ για  $\theta = \pi$  rad όπου το φωτόνιο οπισθοσκεδάζεται παρατηρείται η μέγιστη δυνατή μεταφορά ενέργειας που μπορεί να συμβεί μέσω του μηχανισμού Compton (Compton edge). Έτσι, από τις σχέσεις 1.5.1, 1.5.2 προκύπτει :

$$h\nu]_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2\frac{h\nu}{m_0c^2}} \quad \text{και} \quad E_{e^-}]_{\theta=\pi} = h\nu \cdot \left[ \frac{\frac{2h\nu}{m_0c^2}}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \right]$$

Για τον λόγο ότι είναι πιθανό να συμβούν όλες οι γωνίες σκέδασης, η ενέργεια που μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο κυμαίνεται ανάμεσα στις ακραίες τιμές που βρέθηκαν παραπάνω. Μία τυπική λοιπόν μορφή υποβάθρου Compton για μονοενεργειακά φωτόνια δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα1.5.4** Υπόβαθρο Compton για μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων, ενέργειας  $h\nu$ .

Η απόσταση ανάμεσα στην κορυφή Compton και την φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στην ενέργεια των ολικά απορροφημένων φωτονίων δίνεται από τη σχέση :

$$E_c \equiv h\nu - E_{e^-}]_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}}$$

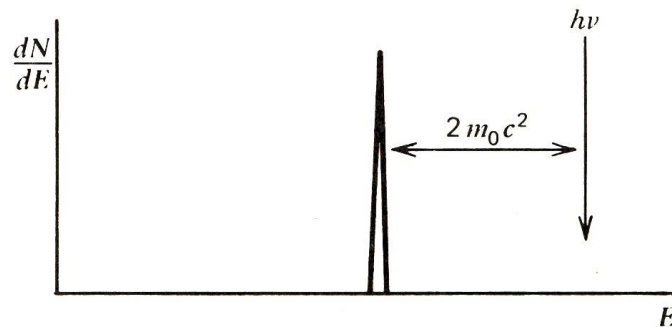
## Δίδυμη γένεση

Ο τρίτος σημαντικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης είναι η δίδυμη γένεση. Σύμφωνα με αυτόν η αλληλεπίδραση του φωτονίου με την ύλη οδηγεί στην εξαφάνιση του πρώτου και στην δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Καθώς η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία αυτού του ζεύγους είναι  $2 \cdot m_0 \cdot c^2$  συνεπάγεται πως για να είναι ενεργειακά πιθανό αυτό το φαινόμενο, χρειάζεται η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον 1,02MeV.

Έτσι, στην περίπτωση που ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, η επιπλέον ενέργεια του φωτονίου θα αποδοθεί στο ζεύγος ως κινητική ενέργεια, δηλαδή:

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_0c^2$$

Μετά την δημιουργία τους, το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο επιβραδύνονται με διαδοχικές συγκρούσεις με τα άτομα του υλικού και η απόσταση που διανύουν μέσα σ' αυτό είναι το πολύ μερικά χιλιοστά. Η παράσταση της κινητικής ενέργειας του ζεύγους είναι και πάλι μία συνάρτηση δέλτα της οποίας όμως η κορυφή εντοπίζεται μετατοπισμένη κατά  $2 \cdot m_0 \cdot c^2$  αριστερά από την ενέργεια  $h\nu$  του προσπίπτοντος φωτονίου.



**Σχήμα 1.5.5** Κατανομή της ενέργειας του ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου.

Η δίδυμη γένεση αποτελεί μία διαδικασία σχετικά περίπλοκη από την άποψη πως το ποζιτρόνιο δεν είναι ένα σταθερό σωματίδιο. Καθώς η κινητική του ενέργεια μειωθεί αρκετά, η σύγκρουση του ποζιτρονίου με κάποιο ηλεκτρόνιο οδηγεί στην σύντηξη των δύο

σωματιδίων, οπότε εξαφανίζονται και στη θέση τους εμφανίζονται δύο φωτόνια ενέργειας  $2 \cdot m_0 \cdot c^2$  το καθένα (εξαΰλωση). Ο χρόνος που απαιτείται για να επιβραδυνθεί το ποζιτρόνιο και να εξαΰλωθεί είναι μικρός και επομένως η ενέργεια από την εξαΰλωση θεωρούμε πως εμφανίζεται στην πραγματικότητα ταυτόχρονα με την αρχική αλληλεπίδραση.

Κάθε μία από τις αντιδράσεις φωτονίου ορισμένης ενέργειας με συγκεκριμένο υλικό, χαρακτηρίζεται από αντίστοιχη μικροσκοπική διατομή  $\sigma$  μέτρο της πιθανότητας να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Προκειμένου για φωτόνια, αντί για τον όρο «μακροσκοπική διατομή» τη αντίδρασης, χρησιμοποιείται όρος γραμμικός συντελεστής απορρόφησης  $\mu$  των φωτονίων στο συγκεκριμένο υλικό. Ο όρος «συντελεστής απορρόφησης» είναι ατυχής διότι στην περίπτωση του φαινομένου Compton δεν έχουμε εξαφάνιση του φωτονίου αλλά μείωση της ενέργειας του. Πιο σωστός είναι ο όρος συντελεστής εξασθένησης (attenuation coefficient). Ο  $\mu$ , όπως και κάθε μακροσκοπική διατομή αντιδράσεων έχει διαστάσεις (μήκος)<sup>-1</sup>.

## **2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ (HPGe)**

### **2.1 Γενικά στοιχεία**

Για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe) του εργαστηρίου, τύπου BEGe. Κρίθηκε λοιπόν αναγκαίο να γίνει σύντομη αναφορά στους ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου καθώς και σε κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη τους.

#### **Βασικές αρχές λειτουργίας**

Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές κατασκευάζονται συνήθως από πυρίτιο (Si) ή γερμάνιο (Ge). Οι απολύτως καθαροί ημιαγωγοί, αυτοί δηλαδή χωρίς την παραμικρή πρόσμιξη, ονομάζονται ενδογενείς (intrinsic) ημιαγωγοί. Σε αυτούς όλα τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας προκύπτουν από θερμική διέγερση, εφόσον δεν έχουν παραχθεί από αλληλεπίδραση με ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Εφόσον κάθε ηλεκτρόνιο που διεγείρεται στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει πίσω του μία θετική οπή έπεται ότι στους ενδογενείς ημιαγωγούς η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι ίση με την πυκνότητα των οπών. Όπως φαίνεται από τη σχέση:

$$P(T) = CT^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2) \quad (2.1)$$

όπου  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία του κρυστάλλου,

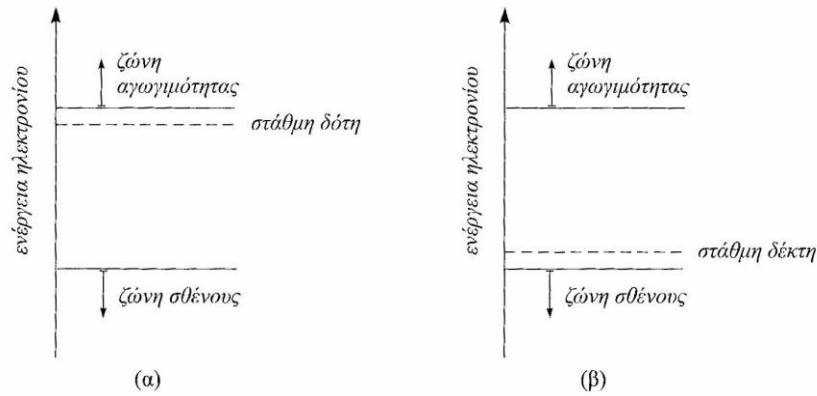
$k$  η σταθερά του Boltzmann,

$C$  σταθερά αναλογίας και

$E_g$  το εύρος της απαγορευμένης ζώνης.

Οι πυκνότητες αυτές μειώνονται όσο αυξάνεται το εύρος της απαγορευμένης ζώνης και μειώνεται η θερμοκρασία του κρυστάλλου. Οι πυκνότητες αυτές σε θερμοκρασία δωματίου είναι  $2,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  στο γερμάνιο και  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  στο πυρίτιο. Στην ηλεκτρική αγωγιμότητα συμβάλλουν τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές.

Είναι αδύνατον να παρασκευασθούν ενδογενείς ημιαγωγοί. Τα πραγματικά υλικά περιέχουν πάντα πολύ μικρές ποσότητες προσμίξεων, που καθορίζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών. Τα ουδέτερα άτομα του Ge και του Si έχουν 4 ηλεκτρόνια σθένους και στη συνήθη κρυσταλλική δομή κάθε άτομο, π.χ. Ge, διαμορφώνει δεσμούς με τα 4 κοντινότερα προς αυτό άτομα γερμανίου. Ας υποθεθεί τώρα ότι ο κρύσταλλος, έστω του Ge, περιέχει μικρή συγκέντρωση (π.χ. της τάξης μερικών ατόμων ανά εκατομμύριο άτομα) πρόσμιξης πεντασθενών ατόμων, π.χ. φωσφόρου (P). Τότε σε κάποιες θέσεις της κρυσταλλικής δομής θα υπάρχουν άτομα του πεντασθενούς P, αντί ατόμων του τετρασθενούς Ge. Από τα 5 ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, τα 4 σχηματίζουν δεσμό με ηλεκτρόνια σθένους 4 γειτονικών ατόμων Ge και θα περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου του P το οποίο θα είναι ασθενώς συνδεδεμένο με τη θέση της κρυσταλλικής δομής που βρίσκεται το άτομο του P. Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν επιτρεπόμενη ενέργεια πολύ κοντά στη στάθμη αγωγιμότητας (όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.1) και με πολύ μικρή ενέργεια μπορούν να διεγερθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Προσμίξεις αυτού του είδους ονομάζονται προσμίξεις-δότες, διότι συνεισφέρουν εύκολα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, δεδομένου ότι η ενεργειακή απόσταση της στάθμης του ηλεκτρονίου του δότη από τη ζώνη αγωγιμότητας είναι αρκετά μικρή, σχήμα 2.1.1(α), ώστε μεγάλο ποσοστό (πιθανότητα, σχέση 2.1) των δοτών να δώσουν με θερμική διέγερση ηλεκτρόνια αγωγιμότητας.



**Σχήμα 2.1.1:** Ενεργειακές στάθμες (α) δότη και (β) δέκτη.

Κάθε τέτοιο ηλεκτρόνιο αφήνει πίσω του στη θέση του ατόμου-πρόσμιξης θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό το φορτίο ευρισκόμενο στο άτομο-πρόσμιξη, που συνιστά μέρος της κρυσταλλικής δομής, είναι μη μετακινήσιμο, δεν μπορεί να μετατοπιστεί υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, δεδομένου ότι οι 4 δεσμοί των ηλεκτρονίων του ατόμου-πρόσμιξης με τα 4 γειτονικά άτομα είναι πλήρεις και δεν χωράει εκεί άλλο ηλεκτρόνιο. Κατά συνέπεια, τα θετικά ηλεκτρικά φορτία στις θέσεις των ατόμων πρόσμιξης δεν αποτελούν οπές, είναι δεσμευμένα στην κρυσταλλική δομή και δεν μπορούν να διακινηθούν, καθώς επίσης δεν συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Ο κρύσταλλος παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερος, αφού κάθε ηλεκτρόνιο που μεταβαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει ένα άτομο με ίσο και αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Δεδομένου ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις η πυκνότητα των προσμίξεων και κατά συνέπεια η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας που συνεισφέρουν είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα ηλεκτρονίων αγωγιμότητας που διατίθενται από το ενδογενές υλικό, έπεται ότι :

**α)** ο αριθμός των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας καθορίζεται πλήρως από τη συμβολή των δοτών και

**β)** η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα των οπών, δεδομένου ότι οπές αφήνουν μόνο τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του ενδογενούς υλικού και αυτά των δοτών.

Ως εκ τούτων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα τέτοιων ημιαγωγών καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τα ηλεκτρόνια και σε πολύ μικρότερο βαθμό από τις οπές. Τέτοιοι ημιαγωγοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου-n.

Αν υποθεθεί, για παράδειγμα, ότι σε κρύσταλλο Ge προστίθεται μικρή ποσότητα πρόσμιξης τρισθενούς ατόμου (π.χ. βορίου, B), αυτό συνεπάγεται την κατάληψη κάποιων θέσεων της

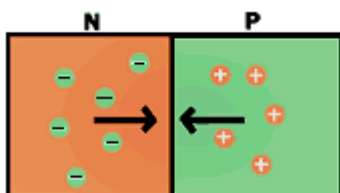


κρυσταλλικής δομής από άτομα της τρισθενούς πρόσμιξης, αντί των ατόμων του τετρασθενούς Ge. Σε κάθε μία από τις θέσεις αυτές υπάρχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους απ' ό,τι στις γειτονικές θέσεις που καταλαμβάνονται από άτομα Ge. Αυτή η "άδεια υποδοχή" ηλεκτρονίου αποτελεί οπή. Η επιτρεπόμενη ενεργειακά στάθμη σε αυτή τη θέση βρίσκεται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του κρυστάλλου και πολύ κοντά στη ζώνη σθένους, σχήμα 2.1.1(β).

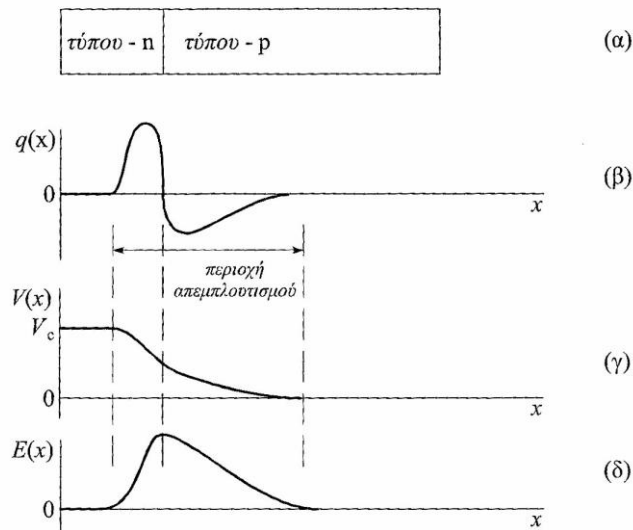
Τέτοιες προσμίξεις ονομάζονται δέκτες. Η πιθανότητα να πληρωθεί η οπή αυτή από θερμικά διεγερμένα ηλεκτρόνια είναι μεγάλη και έτσι ένα μεγάλο ποσοστό των οπών των δεκτών πληρούνται με θερμικά διεγερμένα ηλεκτρόνια.

Αυτά προέρχονται από άλλες θέσεις οπών στον κρύσταλλο και κατά συνέπεια αφήνουν πίσω τους οπές. Έτσι για κάθε δέκτη δημιουργείται μία οπή. Τέτοιοι ημιαγωγοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου-p και σε αυτούς η ροή των οπών καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Οι πληρωμένες με ηλεκτρόνια θέσεις των δεκτών συνιστούν ακίνητα ηλεκτρικά φορτία τα οποία ισοσταθμίζουν τα ηλεκτρικά φορτία των αντίστοιχων οπών.

Αν φαντασθεί κάποιος ότι έρχονται σε "τέλεια επαφή" ημιαγωγός τύπου-n με ημιαγωγό τύπου-p, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.3. τότε μία τέτοια διάταξη ονομάζεται ζεύξη p-n, p-n junction (σχήμα 2.1.2).



**Σχήμα 2.1.2:** Επαφή τύπου p-n



**Σχήμα 2.1.3**

- α)** ζεύξη p-n,
- β)** δεσμευμένα ηλεκτρικά φορτία  $q(x)$ ,
- γ)** ηλεκτρικό δυναμικό  $V(x)$  και
- δ)** ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E(x)$ .

Στην επιφάνεια επαφής των δύο ημιαγωγών συμβαίνουν τα εξής: Αριστερά της επιφάνειας όπου βρίσκεται ο κρύσταλλος τύπου-n υπάρχει μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρονίων αγωγιμότητας ενώ στα δεξιά, όπου ευρίσκεται ο κρύσταλλος τύπου-p, υπάρχει πρακτικά μηδενική πυκνότητα ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Υπάρχει, δηλαδή, στην επιφάνεια αυτή μεγάλη κλίση  $dn/dx$ , από τα αριστερά προς τα δεξιά, της πυκνότητας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας.

Κατά συνέπεια γίνεται διάχυση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από τον κρύσταλλο τύπου-n προς τον κρύσταλλο τύπου-p. Η έξοδος των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από τον κρύσταλλο τύπου-n, αφήνει πίσω της δεσμευμένα, δηλαδή μη δυνάμενα να διακινηθούν, θετικά ηλεκτρικά φορτία στις θέσεις των ιοντισμένων δοτών. Ενώ προηγουμένως αυτά τα θετικά φορτία εξισορροπούνταν από τα αρνητικά φορτία των αντίστοιχων ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, μετά την έξοδο των τελευταίων από τον κρύσταλλο τύπου-n δημιουργείται στον κρύσταλλο τύπου-n, αριστερά της επιφάνειας ζεύξης, στατικό, μη μετακινήσιμο θετικό ηλεκτρικό φορτίο.

Τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στον κρύσταλλο τύπου-p συνδυάζονται γρήγορα με οπές, συλλαμβάνονται από κάποιες από τις κενές θέσεις σθένους στον κρύσταλλο τύπου-p. Παρόμοια, στην επιφάνεια ζεύξης υπάρχει κλίση  $dp/dx$  της πυκνότητας  $p$  των οπών, τώρα από τα δεξιά προς τα αριστερά, δεδομένου ότι οι οπές υπάρχουν πρακτικά μόνο στον κρύσταλλο τύπου-p. Συνεπώς, θα υπάρχει διάχυση οπών από τον κρύσταλλο τύπου-p προς τον κρύσταλλο τύπου-n. Κάθε οπή που φεύγει έξω από τον κρύσταλλο τύπου-p αφήνει πίσω της μια θέση δέκτη που έχει συλλάβει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο και κατά συνέπεια συνιστά ένα δεσμευμένο, δηλαδή μη μετακινήσιμο, αρνητικό ηλεκτρονικό φορτίο. Έτσι, ο συνδυασμός διάχυσης ηλεκτρονίων και οπών αναπτύσσει θετικό φορτίο χώρου στην πλευρά-n αριστερά της επιφάνειας της ζεύξης και αρνητικό φορτίο χώρου στην πλευρά-p δεξιά της ζεύξης. Αυτά τα φορτία χώρου αντιστέκονται στην περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων και οπών και τελικά αποκαθίσταται ισορροπία, ευσταθής κατάσταση φορτίου  $q(x)$  στο χώρο, περίπου της μορφής του σχήματος 2.1.3 β).

Η περιοχή στην οποία υπάρχουν αυτά τα φορτία χώρου ονομάζεται περιοχή απεμπλουτισμού (depletion region) διότι σε αυτήν οι πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών είναι εξαιρετικά μικρές. Το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται από τα φορτία χώρου της περιοχής απεμπλουτισμού, ωθεί οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας που εμφανίζεται εκεί προς τον κρύσταλλο τύπου-n και οποιαδήποτε οπή προς τον κρύσταλλο τύπου-p. Με αυτόν τον τρόπο, στην περιοχή απεμπλουτισμού εξαφανίζονται, πρακτικά δεν υπάρχουν, φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Τα μόνα φορτία που υπάρχουν στην περιοχή απεμπλουτισμού είναι τα αμετακίνητα φορτία χώρου. Δεδομένου ότι αυτά δεν συμβάλλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα η περιοχή απεμπλουτισμού έχει μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε σχέση με τις γειτονικές της περιοχές. Το δυναμικό  $V(x)$  και η ένταση  $E(x)$  του ηλεκτρικού πεδίου είναι περίπου της μορφής των σχημάτων 2.1.3 γ) και 2.1.3 δ) αντίστοιχα. Το δυναμικό  $V_c$  της επαφής της ζεύξης είναι της τάξης του ενός Volt.

Εφόσον ιοντίζουν σωματίδιο αλληλεπιδράσει με το υλικό εντός της απεμπλουτισμένης περιοχής, θα παραχθούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία θα ωθηθούν από το ηλεκτρικό πεδίο έξω από την απεμπλουτισμένη περιοχή, οπότε η κίνηση τους συνιστά ηλεκτρικό σήμα. Το εγγενές δυναμικό  $V_c=1\text{Volt}$  είναι ανεπαρκές για να προκληθεί γρήγορη κίνηση των φορτίων, οπότε φορτία μπορούν εύκολα να χαθούν με επανασύνδεση ηλεκτρονίων και οπών, με αποτέλεσμα το συλλεγόμενο ηλεκτρικό φορτίο από την αλληλεπίδραση του ιοντίζοντος σωματιδίου να μην επαρκεί για τη διάκρισή του από το υπόβαθρο που π.χ μπορεί να προέρχεται από θερμική διέγερση. Ως εκ τούτου, εφαρμόζεται στη ζεύξη αυτό που ονομάζεται αντιστροφή πόλωσης, με την έννοια ότι το p-άκρο της ζεύξης καθίσταται αρνητικό σε σχέση με το n-άκρο, η δε εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού μπορεί να είναι από μερικές

εκατοντάδες ως μερικές χιλιάδες Volt. Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών από αλληλεπίδραση ιοντίζοντος σωματιδίου έξω από την απεμπλουτισμένη περιοχή δεν θα δώσει σήμα διότι, σχήμα 2.1.3 δ), η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εκεί είναι μηδενική και τα ηλεκτρόνια-οπές θα επανασυνδεθούν. Προφανώς, είναι επιθυμητή η αύξηση του όγκου της απεμπλουτισμένης περιοχής. Σε μονοδιάστατο πρόβλημα, όπως αυτό που παριστάνεται στο σχήμα 2.1.3, αποδεικνύεται ότι το πάχος  $d$  της απεμπλουτισμένης περιοχής είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του λόγου  $V/N$ .

$$d \approx \sqrt{\frac{V}{N}}$$

όπου  $V$  : η τάση αντίστροφης πόλωσης και

$N$  : η πυκνότητα προσμίξεων στον ημιαγωγό

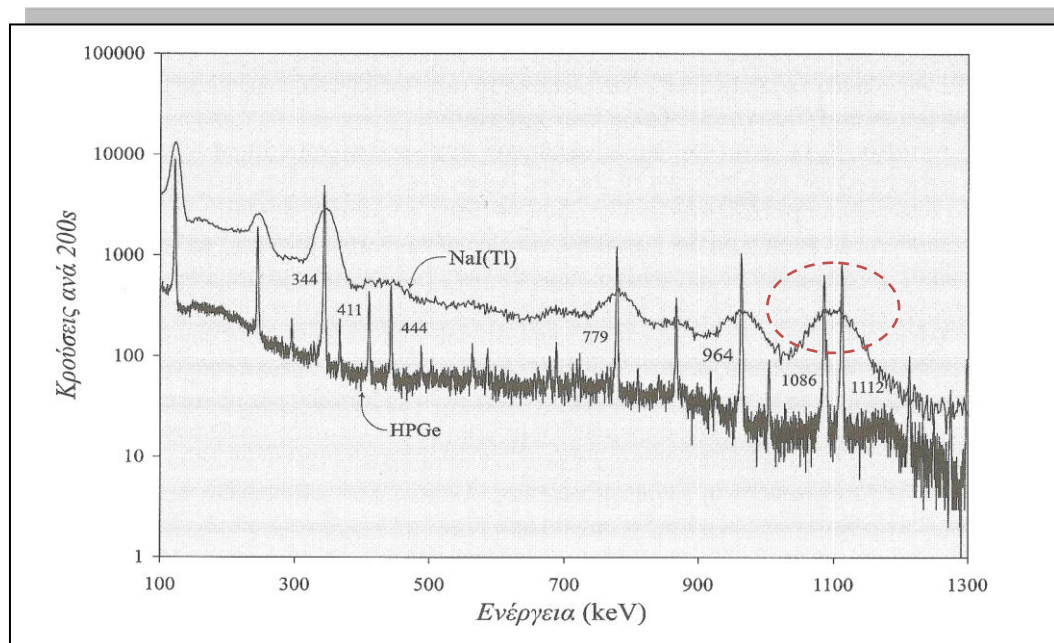
Πολλοί ανιχνευτές λειτουργούν με τάσεις αντίστροφης πόλωσης τόσο μεγάλες, ώστε η περιοχή απεμπλουτισμού εκτείνεται σε ολόκληρο τον όγκο του κρυστάλλου οπότε ο ανιχνευτής ονομάζεται πλήρως απεμπλουτισμένος. Βεβαίως, αν η τάση αυτή υπερβεί κάποια τιμή, δημιουργείται κατάρρευση της διόδου και διέλευση μεγάλων ρευμάτων, συχνά με καταστροφικά για τον ανιχνευτή αποτελέσματα.

Για δεδομένη τάση  $V$ , μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερος όγκος απεμπλουτισμού με μείωση της πυκνότητας  $N$  της πρόσμιξης. Η αναγκαίες μειώσεις έχουν επιτευχθεί μόνο σε κρυστάλλους γερμανίου, όπου πραγματοποιούνται προσμίξεις της τάξης  $10^{10}$  άτομα ανά  $\text{cm}^3$  που αντιστοιχούν σε επίπεδα μικρότερα του ενός ατόμου πρόσμιξης ανά  $10^{12}$  άτομα του κρυστάλλου.

Ανιχνευτές κατασκευασμένοι από τέτοιο υπερκαθαρό γερμάνιο ονομάζονται ενδογενείς (intrinsic) ανιχνευτές γερμανίου ή ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe). Τέτοιοι ανιχνευτές είναι διαθέσιμοι από τις αρχές τις δεκαετίας του '80 οπότε και έγινε δυνατή η κατασκευή με την σύγχρονη τεχνολογία ημιαγωγών, κρυστάλλου γερμανίου πολύ μεγάλης καθαρότητας και είναι πλέον οι μοναδικοί που χρησιμοποιούνται για φασματόμετρα υψηλής διακριτικής ικανότητας ακτινοβολιών με μεγάλη εμβέλεια, όπως η ακτινοβολία  $\gamma$ . Λειτουργούν ως πλήρως απεμπλουτισμένοι ανιχνευτές, με τυπικές τάσεις 3-5kV.

Μεγάλοι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου έχουν τιμές FWHM (Full Width Half Maximum) από 0,8 ως 1,2 keV για φωτόνια 122 keV και από 1,7 ως 2,3 keV για φωτόνια 1333 keV. Στο σχήμα 2.1.4 συγκρίνονται οι διακριτικές ικανότητες ανιχνευτών NaI (TI) – Ιωδιούχου Νατρίου - και HPGe. Η πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα του HPGe φαίνεται

π.χ. από το γεγονός ότι στις δύο "αιχμηρές κορυφές" που διακρίνει ο HPGe στις ενέργειες 1086 keV και 1112 keV ο NaI (TI) δεν τις διακρίνει, τις θεωρεί ως μια ευρεία κορυφή.



**Σχήμα 2.1.4:** γ-φάσμα Eu- 152.

*Το επάνω φάσμα με ανιχνευτή NaI (TI), το κάτω φάσμα με ανιχνευτή HPGE*

### Χαρακτηριστικά μεγέθη ανιχνευτών

- **Πάχος παραθύρου**

Για να φτάσει ένα φωτόνιο στην ευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή θα πρέπει πρώτα να περάσει από την περιοχή που χαρακτηρίζεται ως "νεκρή ζώνη"(dead layer). Η νεκρή αυτή ζώνη ονομάζεται παράθυρο του ανιχνευτή και το εύρος της, πάχος παραθύρου.

- **Επιφάνεια ανιχνευτή**

Χαρακτηρίζεται η τομή της ευαίσθητης περιοχής του, που είναι κάθετη προς την διεύθυνση κατά την οποία επιτρέπεται η είσοδος των φωτονίων στον ανιχνευτή.

- **Ρεύμα διαρροής**

Το ρεύμα που διαρρέει τον ανιχνευτή, όταν σ' αυτόν έχει εφαρμοστεί η τάση λειτουργίας και δεν είναι εκτεθειμένος σε ακτινοβολία. Αποτελείται από δυο συνιστώσες. Η μια οφείλεται στην επιφανειακή διαρροή φορτίων και η άλλη στην κίνηση των φορέων μειονότητας (ρεύμα ανάστροφης πόλωσης).

- **Διακριτική ικανότητα**

Με τον όρο αυτόν δηλώνεται η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει δυο φωτόνια με παραπλήσιες ενέργειες και βέβαια όσο μικρότερο είναι το μέγεθος  $R$  που την ορίζει τόσο καλύτερη είναι αυτή η διάκριση.

$$R = (\sum R_i^2)^{0,5}$$

Όπου  $R_i$  : Οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως, η στατιστικότητα του φαινομένου της δημιουργίας σπών και ηλεκτρονίων, ο θόρυβος του ανιχνευτή και του ενισχυτή, η ανομοιογένεια του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού, το μη σταθερό εύρος της περιοχής, η ποικιλία των γωνιών πρόσπτωσης των σωματιδίων, το μεταβλητό πλάτος του παραθύρου από την μία θέση στην άλλη.

- **Συντελεστής απόδοσης ( $N_0/\phi$ )**

Ο συντελεστής αυτός σχετίζεται με την εσωτερική απόδοση του ανιχνευτή, η οποία, ως γνωστόν, ορίζεται από τον λόγο του αριθμού ασκέδαστων φωτονίων που καταγράφει ο ανιχνευτής προς τον αριθμό των προσπιπτόντων ασκέδαστων φωτονίων. Η εσωτερική απόδοση του ανιχνευτή είναι αδιάστατος αριθμός εν αντιθέσει με το συντελεστή  $N_0/\phi$  που έχει διαστάσεις ( $\text{cpm}/\text{φωτόνια}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) και εκφράζει το λόγο του ρυθμού των ασκέδαστων φωτονίων που καταγράφει ο ανιχνευτής (για δέσμη φωτονίων κάθετη στο παράθυρο του ανιχνευτή) προς τη ροή των προσπιπτόντων ασκέδαστων φωτονίων. Στο κεφάλαιο 2.4 γίνεται εκτενέστερη ανάλυση σχετικά με την εσωτερική απόδοση.

- **Σύστημα ψύξης στον ανιχνευτή**

Εξαιτίας του μικρού εύρους της απαγορευμένης ζώνης ( $E_g = 0,7 \text{ eV}$ ) είναι αδύνατη η λειτουργία του ανιχνευτή HPGe σε θερμοκρασία δωματίου, διότι το ρεύμα που προκύπτει από θερμική διέγερση είναι μεγάλο με αποτέλεσμα του λόγου σήματος προς θόρυβο. Ως εκ

τούτου λειτουργούν σε θερμοκρασία υγρού αζώτου ( $77^{\circ}\text{K}$ ) με χρήση μονωμένου δοχείου υγρού αζώτου και κατάλληλη διάταξη ψύξης του κρυστάλλου.

Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές γερμανίου–λιθίου ( $\text{Ge}(\text{Li})$ ) έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τους ανιχνευτές  $\text{HPGe}$ , αλλά ένα σοβαρό μειονέκτημα: ο κρύσταλλος πρέπει να διατηρείται συνεχώς σε χαμηλή θερμοκρασία ( $77^{\circ}\text{K}$ ), διαφορετικά, αν θερμανθεί σε θερμοκρασία δωματίου συμβαίνει καταστροφική ανακατανομή του λιθίου.

Σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος η ευκινησία ιόντων  $\text{Li}$  στο  $\text{Ge}$  είναι πολύ μεγάλη. Αυτό έχει σαν συνέπεια μετά την δημιουργία της περιοχής αντιστάθμισης να παρατηρείται ανακατανομή ιόντων  $\text{Li}$  στην περιοχή αυτή, οπότε η αντιστάθμιση καταστρέφεται και ο ανιχνευτής χάνει τις ιδιότητές του.

Για αυτό, αμέσως μετά την δημιουργία του, ο ανιχνευτής  $\text{Ge}(\text{Li})$  πρέπει να ψυχθεί και να παραμείνει σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία ώστε να εξασφαλισθεί η "διατήρηση" της περιοχής αντιστάθμισης. Βρέθηκε ότι η θερμοκρασία η κατάλληλη για να διατηρήσει ο ανιχνευτής τις ιδιότητές του είναι η θερμοκρασία του υγρού αζώτου ( $77^{\circ}\text{K}$ ). Το σύστημα ψύξης παίζει σημαντικό ρόλο στον περιορισμό του ρεύματος διαρροής.

Ο περιορισμός αυτός οδηγεί σε αύξηση του λόγου "σήματος προς θόρυβο" μεγιστοποίηση του οποίου είναι το επιθυμητό.

Προκύπτει λοιπόν ότι θα πρέπει να παρακολουθείται προσεκτικά η ποσότητα υγρού αζώτου στο δοχείο Dewar όπου είναι εμβαπτισμένος ο κρυστάλλος που συνδέεται με τον κρύσταλλο.

Για ανιχνευτές  $\text{Ge}(\text{Li})$  η χαμηλή θερμοκρασία πρέπει να είναι συνεχής, για να εμποδιστεί μια καταστροφική ανακατανομή του διαχεόμενου λιθίου η οποία θα λάμβανε χώρα ραγδαία, αν δεν είχαμε συνεχή ψύξη. Στους  $\text{HPGe}$  το παραπάνω πρόβλημα δεν υφίσταται, γι αυτό και μπορούμε να κάνουμε μετρήσεις χωρίς συνεχή ψύξη. Γι αυτό τέλος και οι  $\text{HPGe}$  έχουν αντικαταστήσει τους ανιχνευτές  $\text{Ge}(\text{Li})$ .

## 2.2 Περιγραφή του ανιχνευτή BEGe

Οι BEGe (Broad Energy Germanium Detectors) είναι οι ανιχνευτές Γερμανίου ευρείας ενέργειας. Οι BEGe της Canberra καλύπτουν το ενεργειακό εύρος  $3\text{ keV} - 3\text{ MeV}$  με τον καλύτερο τρόπο. Η ανάλυση σε χαμηλές ενέργειες είναι ισοδύναμη με εκείνη των LEGe (Lower Energy Germanium Detectors) ανιχνευτών και σε υψηλές ενέργειες μπορεί να συγκριθεί ποιοτικά με αυτή των SEGe (Standard Electrode Coaxial Ge Detectors) ανιχνευτών.

Χαρακτηριστικό του BEGe ανιχνευτή είναι το κοντό κοντό, παχύ σχήμα που βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του για ενέργειες μικρότερες του 1 MeV σε τυπικά δείγματα γεωμετριών. Αυτό το σχήμα επιλέγεται για τη βέλτιστη απόδοση (στα πραγματικά δείγματα) στο ενεργειακό εύρος. Αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό για τις συνήθεις αναλύσεις ακτίνων  $\gamma$ . Οι περισσότεροι ανιχνευτές χαμηλής ενέργειας δεν δίνουν καλή ανάλυση σε υψηλότερες ενέργειες. Στην πράξη, η ανάλυση δεν καθορίζεται συνήθως πάνω από 122 keV.

Όμως ο BEGe είναι σχεδιασμένος με μια δομή ηλεκτροδίου που ενισχύει τις αναλύσεις στις χαμηλές ενέργειες. Είναι κατασκευασμένος από επιλεγμένο γερμάνιο. Τέλος έχει ένα προφίλ προσμίξεων που βελτιώνει την συλλογή του φορτίου (αναλύσεις και τα σχήματα κορυφής-peak shapes) σε υψηλές ενέργειες.

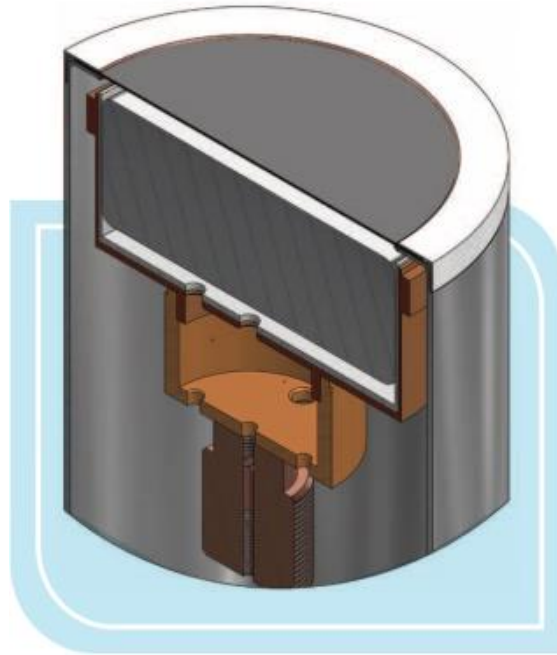
Ο BEGe χρησιμοποιείται σε πολλές ακόμη εφαρμογές πέραν της βασικής μέτρησης. Στην εσωτερική δοσιμέτρηση -έλεγχος του ανθρώπινου σώματος για έκθεση σε ραδιενεργά στοιχεία που εκπέμπουν  $\alpha$ ,  $\beta$ , και  $\gamma$  ακτινοβολία- δίνει τη δυνατότητα υψηλής ανάλυσης και χαμηλού βάθους το οποίο χρησιμεύει στην ανάλυση των ακτινών των επιβαρημένων πνευμόνων, καθώς και στην αποδοτικότητα και τη διακριτική ικανότητα ανάλυσης σε υψηλή ενέργεια για όλη την καταμέτρηση του σώματος. Το ίδιο ισχύει και για ορισμένα συστήματα ανιχνεύσεως αποβλήτων, ιδίως σε εκείνες τις περιπτώσεις που αφορούν ειδικά πυρηνικά υλικά.

### **2.3 Περιγραφή του ανιχνευτή και του αντίστοιχου εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στην πτυχιακή**

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η ανιχνευτική διάταξη της εικόνας 2.3.2, ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου της εταιρίας Canberra, που είναι διαθέσιμος στο τμήμα Αυτοματισμού του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης στο εργαστήριο Ραδιενέργειας (Κεντρικό Κτίριο στην αίθουσα 113).

Ο ανιχνευτής που προσομοιώθηκε είναι ο ευρείας ενεργείας ανιχνευτής γερμανίου BE2020 της εταιρείας Canberra. Πρόκειται για έναν κυλινδρικό ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου με απόδοση 9%. Η εικόνα του ανιχνευτή ακολουθεί παρακάτω (εικόνα 2.3.1)

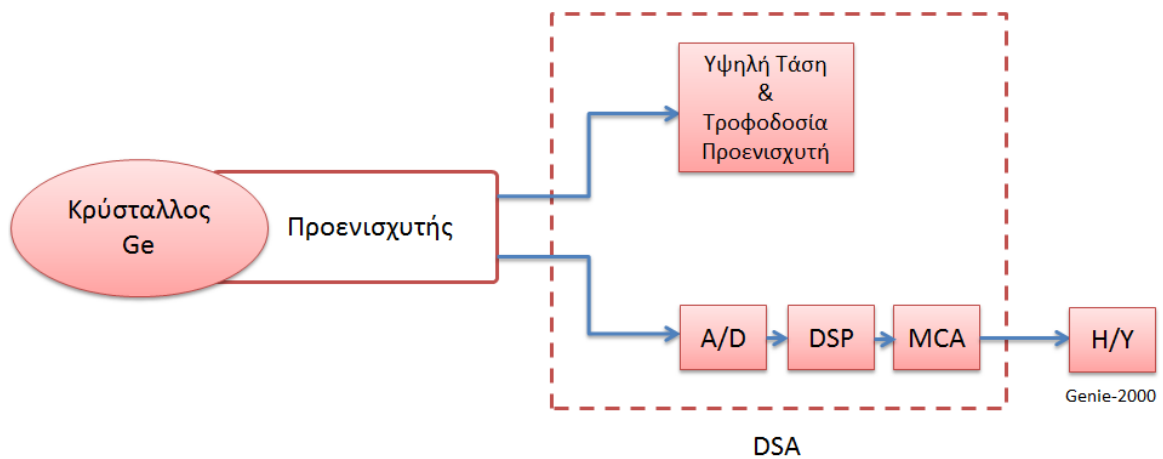




**Εικόνα 2.3.1:** Εικόνα ανιχνευτή



**Εικόνα 2.3.2:** Η ανιχνευτική διάταξη HPGe που χρησιμοποιήθηκε.



**Σχήμα 2.3.1:** Σχηματικό διάγραμμα της ανιχνευτικής διάταξης.

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση της ανιχνευτικής διάταξης.

**Κρύσταλλος:** Όπως αναφέραμε και παραπάνω πρόκειται για κρύσταλλο υπερκαθαρού Γερμανίου (high purity Ge), κατασκευασμένο από την εταιρία Canberra. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο BE2020 της σειράς Broad Energy Germanium Detectors. Έχει διάμετρο 50,5mm και ύψος 20mm. Αποτελείται, όπως αναφέρθηκε, από γερμάνιο (ο κρύσταλλος), χαλκό, τεφλόν και αλουμίνιο.

Η συγκεκριμένη σειρά ανιχνευτών είναι ειδικά κατασκευασμένη για μετρήσεις δειγμάτων, προσφέροντας πολύ καλή διακριτική ικανότητα για ενέργειες μεταξύ 3keV – 3 MeV και βέλτιστη απόδοση για ενέργειες κάτω από 1 MeV, όπου έχουμε συνήθως τη μεγαλύτερη δραστηριότητα ακτινοβολιών γ. Η απόδοσή του είναι 9% και η τάση λειτουργίας 3500.



**Εικόνα 2.3.3:** Κρυοστάτης και θωράκιση του κρυστάλλου

Ο κρύσταλλος, βρίσκεται μέσα στον κρυοστάτη, όπου στο εσωτερικό αυτού υπάρχει κενό αέρος για την αποφυγή αγωγής θερμότητας. Έτσι διατηρείται ο κρύσταλλος σε θερμοκρασία -196 °C (περίπου 77° K). Στην εικόνα 2.3.3 φαίνεται το πάνω μέρος του κρυοστάτη καθώς και η θωράκιση του ανιχνευτή, που αποτελείται από μόλυβδο μεγάλου πάχους και εσωτερικά αυτής έχουμε λεπτό φύλλο χαλκού.

*Ο κρυοστάτης και η θωράκιση είναι απαραίτητα για την προστασία του δείγματος που θέλουμε να μετρήσουμε από την φυσική ραδιενέργεια που υπάρχει στο περιβάλλον.*

Model Number	Area (cm <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Typical Rel. Eff. (%) ≥	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV)			Endcap diameter mm (in.)
				At 5.9 keV energy	At 122 keV energy	At 1332 keV energy	
BE2020	20	20	9	0.35	0.65	1.90	76 (3.0)
BE2820	28	20	13	0.40	0.70	1.90	82 (3.25)
BE2825	28	25	18	0.40	0.70	1.90	82 (3.25)
BE2825P	28	25	18	0.40	0.68	1.80	82 (3.25)
BE3820	38	20	20	0.45	0.75	1.90	89 (3.50)
BE3825	38	25	26	0.45	0.75	1.90	89 (3.50)
BE3825P	38	25	26	0.45	0.72	1.80	89 (3.50)
BE3830	38	30	34	0.45	0.75	1.90	89 (3.50)
BE3830P	38	30	34	0.45	0.72	1.80	89 (3.50)
BE5020	50	20	28	0.50	0.75	2.10	102 (4.0)
BE5025	50	25	37	0.50	0.75	2.00	102 (4.0)
BE5030	50	30	48	0.50	0.75	2.00	102 (4.0)
BE5030P	50	30	48	0.48	0.72	1.80	102 (4.0)
BE6530	65	30	60	0.50	0.75	2.00	114 (4.5)

**Συνοπτικός πίνακας μοντέλων BEGe**

**Δοχείο υγρού Αζώτου (LN2):** Για την αποθήκευση του υγρού Αζώτου και την επαγωγή της θερμότητας στον κρύσταλλο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο 7500sl της εταιρίας Canberra (εικόνα 2.3.4). Περιλαμβάνει ένα δοχείο Dewar (διπλού τοιχώματος, κενό αέρος μεταξύ των τοιχωμάτων) για την αποθήκευση του υγρού Αζώτου και ψύχει τον ανιχνευτή μέσω μιας ράβδου χαλκού (cold finger). Η ράβδος αυτή είναι βυθισμένη στο υγρό άζωτο από τη μία πλευρά, και διερχόμενη μέσα από τον κρυοστάτη, εφάπτεται στον κρύσταλλο από την άλλη.



**Εικόνα 2.3.4:** Δοχείο Dewar υγρού Αζώτου.

**Προενισχυτής:** Χρησιμοποιήθηκε ο προενισχυτής 2002cs1 της Canberra, ευαίσθητος σε φορτία. Ο προενισχυτής συλλέγει τα φορτία που παράγονται στον κρύσταλλο και τα μετατρέπει σε βηματικό παλμό (ολοκλήρωση), ύψους ανάλογο του συσσωρευμένου φορτίου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (event). Ο παλμός μειώνεται εκθετικά με χρονική σταθερά 50μs για την αποφυγή aliasing. Έτσι μπορεί να επιτύχει μετρήσεις 200000 κρούσεων ανά δευτερόλεπτο. Για τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου ο προενισχυτής είναι και αυτός τοποθετημένος στον κρυοστάτη και ψύχεται από το υγρό άζωτο μέσω της χάλκινης ράβδου. Επίσης υπάρχει κατάλληλο κύκλωμα για την επίβλεψη της θερμοκρασία του κρυστάλλου και έχει ενδεικτική λυχνία προειδοποίησης για ενδεχόμενη βλάβη. Στο πάνω μέρος της εικόνας 2.3.4 φαίνεται το σημείο του κρυοστάτη που είναι τοποθετημένος ο προενισχυτής με τα καλώδια τροφοδοσίας και εξόδου.

**Ψηφιακός Αναλυτής Φάσματος:** Πρόκειται για το μοντέλο DSA-1000 της Canberra. Ο αναλυτής δέχεται το σήμα από τον προενισχυτή, το μετατρέπει (αναλογικό) σε ψηφιακό και χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (εφαρμόζοντας τραπεζοειδή φίλτρα), διαμορφώνει το σήμα στην κατάλληλη μορφή. Έχοντας πλέον το σήμα σε κατάλληλη μορφή είναι υπεύθυνος για την κατανομή του παλμού ανάλογα με το ύψος του στο αντίστοιχο κανάλι.

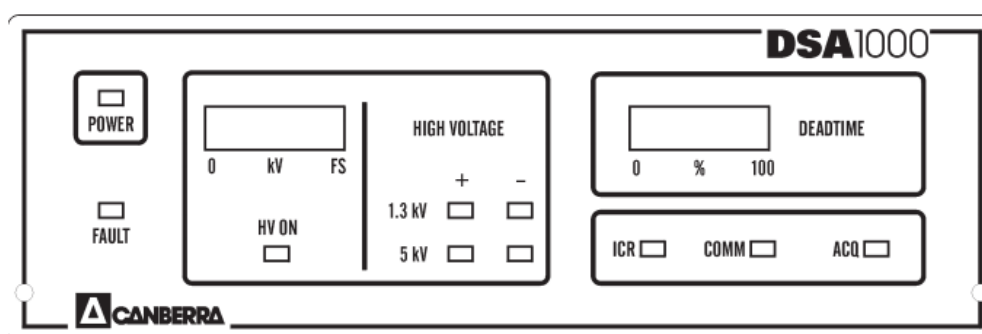
Ο ψηφιακός αναλυτής DSA-1000 προσφέρει:

- Τεχνικές ταχύτατης μετατροπής A/D,
- Υψηλής ταχύτητας ψηφιακούς υπολογισμούς
- Πολυκαναλικό αναλυτή 8192 καναλιών και
- Συχνότητα δειγματοληψίας 10 MHz (0.1μs).

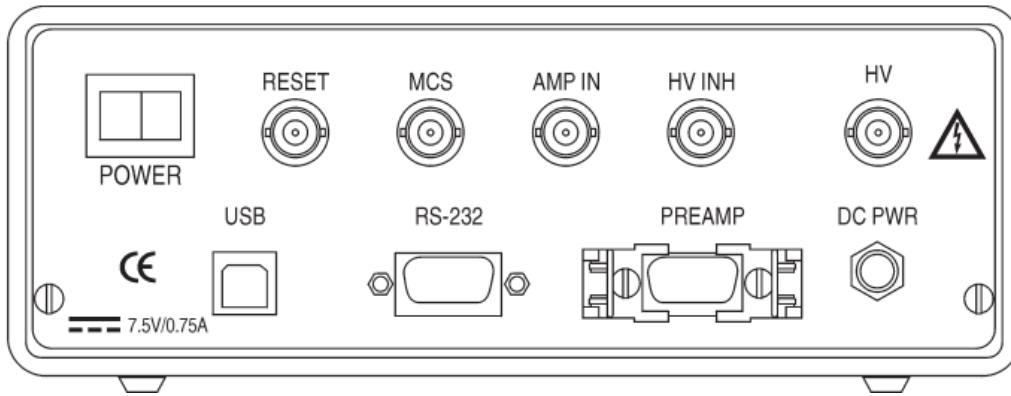
Δουλεύοντας στο ψηφιακό πεδίο έχουμε μεγαλύτερη σταθερότητα, καλύτερη απόδοση επί του ρυθμού κρούσεων και καλύτερη ανάλυση, σε σύγκριση με το αναλογικό που χρησιμοποιούσαμε παλαιότερα. Στην εικόνα 2.3.5 φαίνεται ο ψηφιακός αναλυτής που χρησιμοποιήθηκε, με τις ενδεικτικές λυχνίες υψηλής τάσης.



Εικόνα 2.3.5: Ψηφιακός Αναλυτής Φάσματος Canberra DSA-1000.



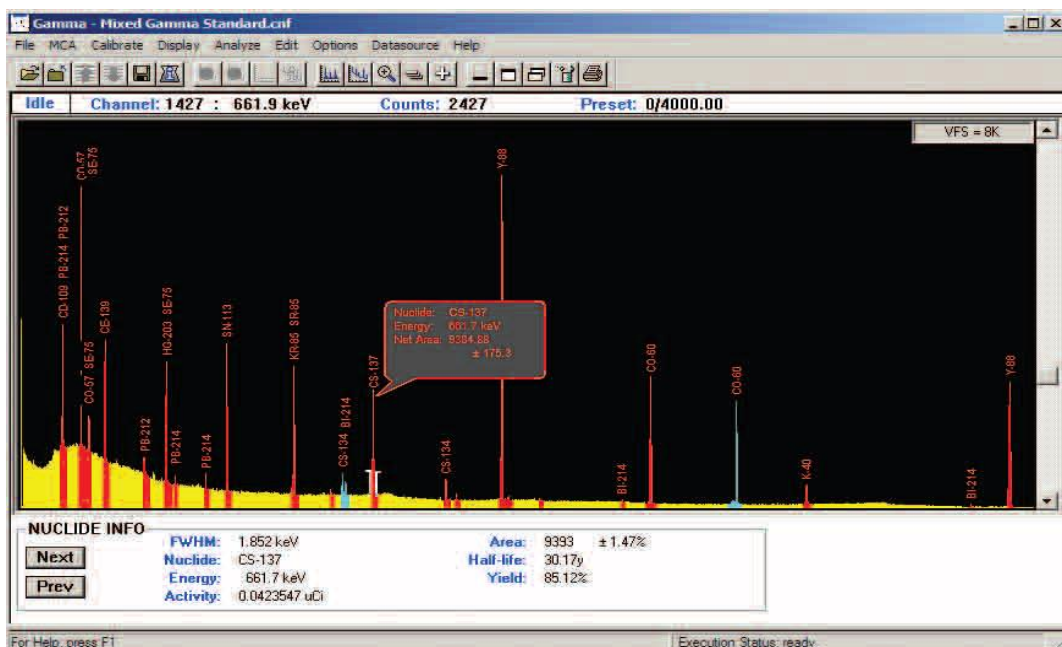
Μπροστινό panel



**Πίσω panel**

**Λογισμικό Η/Υ:** Πρόκειται για το ηλεκτρονικό λογισμικό Genie-2000 της εταιρίας Canberra. Μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος (εικόνα 2.3.6) γίνεται

- Ο έλεγχος της μονάδας του ψηφιακού αναλυτή,
- Η παρουσίαση με τη μορφή φάσματος και
- Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της μέτρησης.
- Έχει δυνατότητες αυτόματης ανίχνευσης, υπολογισμού του κέντρου και του συνολικού αριθμού κρούσεων της φωτοκορυφής, των κρούσεων του υποβάθρου και των αβεβαιοτήτων των υπολογισμών.



**Εικόνα 2.3.6:** Γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Genie-2000.



## 2.4 Εργαστηριακές μετρήσεις με τον ανιχνευτή HPGe

Σε αυτό το μέρος περιγράφονται οι πειραματικές μετρήσεις της απόδοσης του ανιχνευτή που έγιναν με χρήση πηγών διαφόρων γεωμετριών.

### 1) Σημειακή πηγή σε απόσταση από τον ανιχνευτή

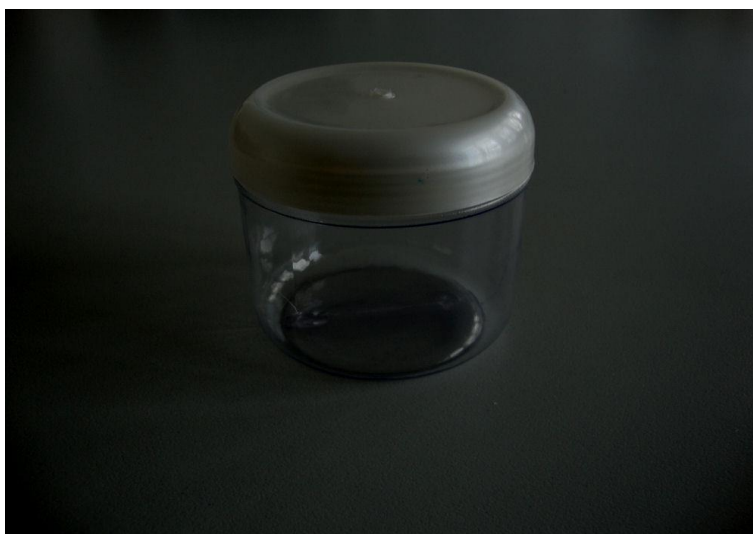
- Ευρωπίου Eu-152

### 2) Πηγή κυλινδρικής γεωμετρίας δοχείου με H<sub>2</sub>O πυκνότητας:

- 1 g/ cm<sup>3</sup> για 100ml
- 0.7 g/ cm<sup>3</sup> για 100ml
- 1 g/ cm<sup>3</sup> για 260ml
- 1.3 g/ cm<sup>3</sup> για 260ml

(περιέχει Am-241, Cd-109, Co-60, Cs-134, Cs-137, Mn-54, Pb-210, Zn-65)

Στη φωτογραφία 2.4.1 έχουμε το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις μετρήσεις που οι πηγές είχαν κάποιο όγκο. Το δοχείο αποτελείται από πλαστικό με **πάχος** στα τοιχώματα 1mm, έχει **εσωτερική ακτίνα** 3.75cm και **ύψος** 7.5cm. Σε κάθε επιπρόσθετο όγκο η στάθμη άλλαζε και έμπαινε ένα παραπάνω επίπεδο (αυτό της στάθμης) στο αρχείο εισόδου το οποίο αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.4.1: Πλαστικό δοχείο κυλινδρικής γεωμετρίας.

## Προσδιορισμός απόδοσης ανιχνευτή πειραματικά

Η απόδοση του ανιχνευτή είναι διαφορετική για κάθε ενέργεια των ακτινοβολιών  $\gamma$ , καθώς επίσης και για κάθε γεωμετρία δείγματος. Για την πειραματική διαδικασία η σχέση θα έχει ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{\text{cps (counts per second)}}{\text{gps (gamma_rays per second)}} \quad (2.4.1)$$

Όπου:

- **cps (counts per second):** Ο λόγος του πλήθους των κρούσεων της φωτοκορυφής με τον συνολικό χρόνο μέτρησης. Εκφράζει τον αριθμό ακτινοβολιών  $\gamma$  συγκεκριμένης ενέργειας που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή ανά δευτερόλεπτο (200sec στην περίπτωση μας) .
- **gps (gamma-rays per second):** Ο αριθμός των ακτινοβολιών  $\gamma$  συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπει η πηγή ανά δευτερόλεπτο. Υπολογίζεται από τις συνολικές διαστάσεις του νουκλιδίου ανά δευτερόλεπτο (ενεργότητα), πολλαπλασιασμένη με το Fractional Yield (FY), μέγεθος που εκφράζει την πιθανότητα να προκύψει ακτινοβολία  $\gamma$  συγκεκριμένης ενέργειας σε κάποια διάσπαση του νουκλιδίου και βρίσκεται βιβλιογραφικά.

### Απόδοση ανιχνευτή

Έστω ότι ένα φωτόνιο εισέρχεται στον ανιχνευτή. Υπάρχει πιθανότητα να διασχίσει τον ανιχνευτή και να εξέλθει από αυτόν χωρίς αλληλεπίδραση με το υλικό του ανιχνευτή. Ορίζουμε ως ενδογενή ή εσωτερική απόδοση το μέγεθος:

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{αριθμός παλμών που μετρηθηκαν}}{\text{αριθμός φωτονίων που εισέρχονται στον κρύσταλλο}} \quad (2.4.2)$$

Η εσωτερική απόδοση εξαρτάται από το υλικό και τις διαστάσεις του ανιχνευτή καθώς και από την ενέργεια της ακτινοβολίας  $\gamma$ .



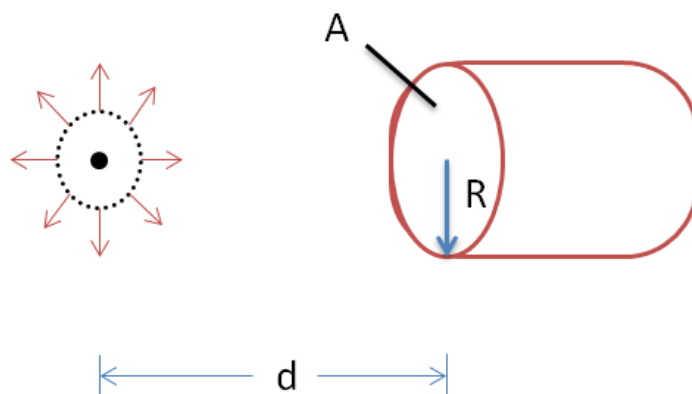
Όμως κατά την διαδικασία της ανίχνευσης και μέτρησης μιας ραδιενεργούς πηγής δεν εισέρχονται στον ανιχνευτή όλα τα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή. Έτσι ορίζουμε ως απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή το μέγεθος:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{αριθμός παλμών που μετρηθηκαν}}{\text{αριθμός φωτονίων που εκπεμπονται από την πηγη}} \quad (2.4.3)$$

Η απόλυτη απόδοση εξαρτάται από τα εξής:

- Χαρακτηριστικά του ανιχνευτή
- Χαρακτηριστικά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας,
- Τη γεωμετρία της διάταξης της μέτρησης,

Στις περισσότερες διατάξεις ένα ποσοστό μόνο των εκπεμπόμενων από την πηγή φωτονίων προσπίπτει στον ανιχνευτή. Έστω ότι η σημειακή πηγή του σχήματος 2.4.1 εκπέμπει ισοτροπικά φωτόνια σε απόσταση  $d$  από ανιχνευτή επιφάνειας  $A = \pi R^2$ .



**Σχήμα 2.4.1:** Εξάρτηση απόλυτης απόδοσης από την γεωμετρία της μέτρησης.

Αφού η πηγή είναι ισοτροπική, σε απόσταση  $d$ , στην επιφάνεια  $A$  του ανιχνευτή προσπίπτουν φωτόνια ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή ένα ποσοστό μόνο των συνολικών φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή. Ο υπολογισμός της ροής των φωτονίων δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Ροή} = \frac{S_0}{4\pi r^2}$$

όπου

- $S_0$ : Ο αριθμός των φωτονίων ανά μονάδα χρόνου
- $r$ : Η ακτίνα

Λόγω του σχετικά μικρού χρόνου ημιζωής τους, τα νουκλίδια που περιέχονται στο πρότυπο δείγμα έχουν χάσει μέρος της ενεργότητάς τους. Οι αναγραφόμενες λοιπόν *gamma-rays per second* κατά την ημερομηνία μέτρησης τους από την εταιρία κατασκευής (Μάιος 2007) δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα κατά την ημερομηνία της μέτρησης μας .

Είναι απαραίτητη λοιπόν η αναγωγή των συνολικών ακτινών  $\gamma$  που εκπέμπει η πηγή από την ημερομηνία αρχικής μέτρησης στην ημερομηνία της μέτρησης μας. Από τον θεμελιώδη νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων έχουμε:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.4.4)$$

Όπου:

- **A(t):** Η ενεργότητα τη χρονική στιγμή που έχουμε ως στόχο
- **A<sub>0</sub>:** Η ενεργότητα τη χρονική στιγμή 0
- **λ:** Η σταθερά διάσπασης όπως έχει οριστεί από τη σχέση 1.3.1
- **t:** Ο χρόνος που έχει παρέλθει μεταξύ των χρονικών στιγμών (σε χρόνια)

Άρα τώρα έχουμε τον τύπο:

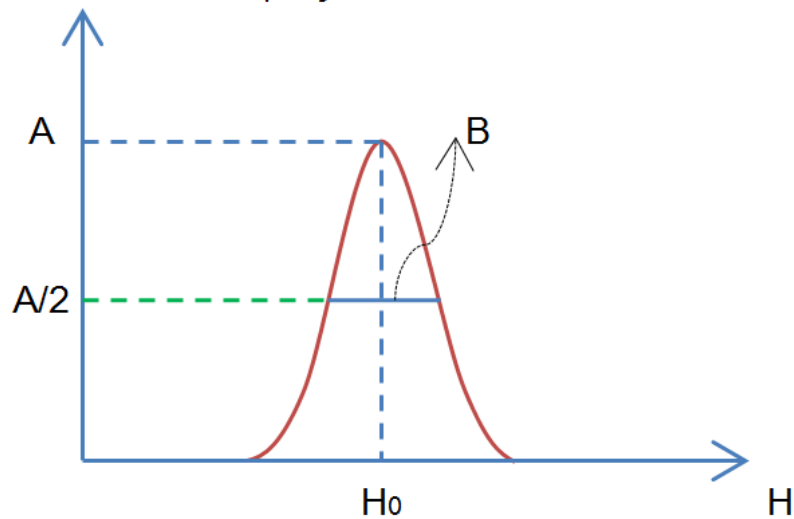
$$g_{ps} = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot FY$$

Επομένως είμαστε πλέον σε θέση να υπολογίσουμε την απόδοση του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια της συγκεκριμένης γεωμετρίας με τη βοήθεια της σχέσης 2.4.1.

### Ενεργειακή διακριτική ικανότητα

Ας υποθέσουμε ότι προσπίπτουν στον ανιχνευτή μονοενεργειακά φωτόνια ενέργειας  $E_0$ . Στην ιδανική περίπτωση θα καταγράφονταν στον ανιχνευτή όλοι οι παλμοί με το ίδιο ύψος  $H_0$ , που αντιστοιχεί στην ενέργεια  $E_0$ . Στην πράξη όμως λόγω της στατιστικής διακύμανσης του μετρούμενου ύψους παλμών από παλμό σε παλμό, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4.2, καταγράφονται παλμοί με κατανομή ύψους  $H$  ακόμα και όταν εναποτίθεται στον ανιχνευτή η ίδια ενέργεια  $E_0$  από όλα τα φωτόνια.

Αριθμός φωτονίων/Μονάδα ύψους



Σχήμα 2.4.2: Φάσμα από μονοενεργειακά φωτόνια ενέργειας  $E_0$ , ύψους παλμού  $H_0$ .

Το φορτίο το οποίο παράγεται από την εναπόθεση της ενέργειας του φωτονίου φέρεται από έναν διακριτό αριθμό φορέων φορτίου. Η γκαουσιανή κατανομή του ύψους των παλμών οφείλεται στο γεγονός ότι ο αριθμός των φορέων φορτίου που συλλέγεται από τον ανιχνευτή έχει τυχαίες διακυμάνσεις από γεγονός σε γεγονός.

Η ενέργεια των μονοενεργειακών φωτονίων προσδιορίζεται από την κορυφή του μετρούμενου φάσματος, η οποία ονομάζεται κορυφή πλήρους ενέργειας (Full Energy Peak). Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα ορίζεται ως:

$$R = B / H_0 \quad (2.4.5)$$

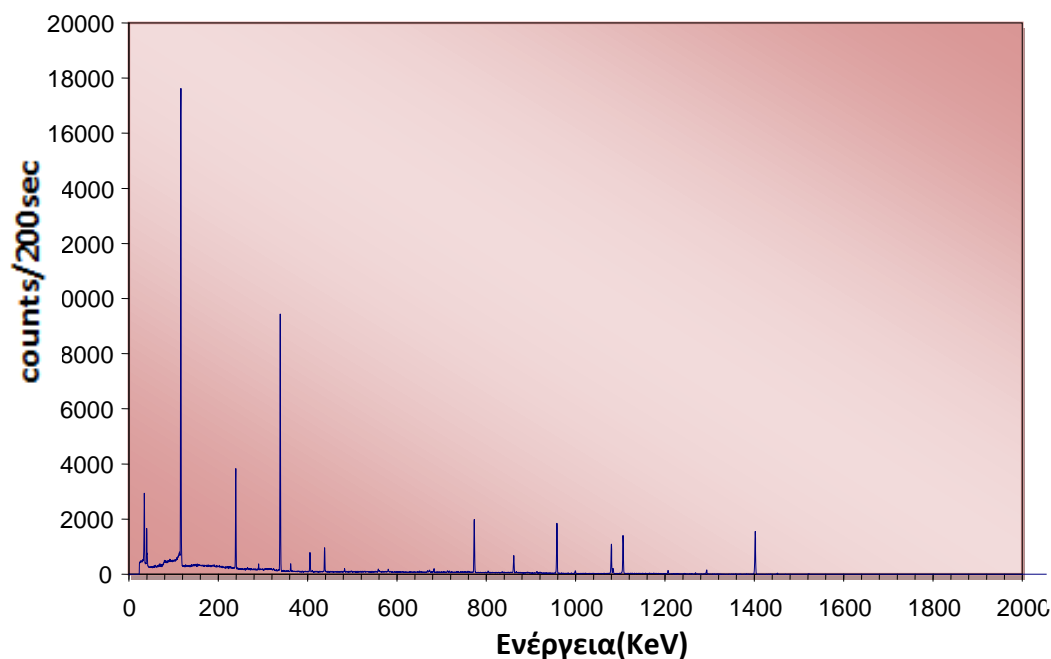
Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, όσο πιο μικρή είναι η τιμή της διακριτικής ικανότητας, τόσο πιο μικρό θα είναι το εύρος  $B$  της κατανομής και κατά συνέπεια τόσο πιο μεγάλη η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει ενέργειες φωτονίων με μικρή διαφορά. Στην αγγλική ορολογία το εύρος  $B$  ονομάζεται *Full Width at Half Maximum (FWHM)* και αναφέρεται σε μονάδες ενέργειας.

Η διακριτική ικανότητα και το FWHM εξαρτώνται από την ενέργεια των φωτονίων. Για παράδειγμα μεγάλοι ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου έχουν **FWHM**:

- περίπου 1 keV για φωτόνια ενέργειας 122 keV και
- περίπου 2 keV για φωτόνια ενέργειας 1330 keV.

## Προσδιορισμός απόδοσης ανιχνευτή για σημειακές πηγές

Αρχικά για τη σημειακή πηγή του Eu-152 (Eu<sub>152</sub>, 4.114 MBq/sec. 15 Μαΐου 2000) έγινε η αναγωγή της ενεργότητας αυτής σε εκείνη την ημέρα που διεξήχθη η πρώτη μέτρηση (6 Νοεμβρίου 2014), **1.96MBq**. (Για τον αναλυτικό υπολογισμό της αναγωγής της ενεργότητας ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στους πίνακες Π1 και Π2 στο Παράρτημα). Από το φάσμα που προέκυψε, επιλέχθηκαν **6 ενέργειες**. Τοποθετήσαμε την πηγή σε απόσταση 63 cm από τον κρύσταλλο.



**Σχήμα 2.4.3:** Φάσμα που λήφθηκε από ανιχνευτή HPGe,σημειακής πηγής Eu-152 στα 63cm.

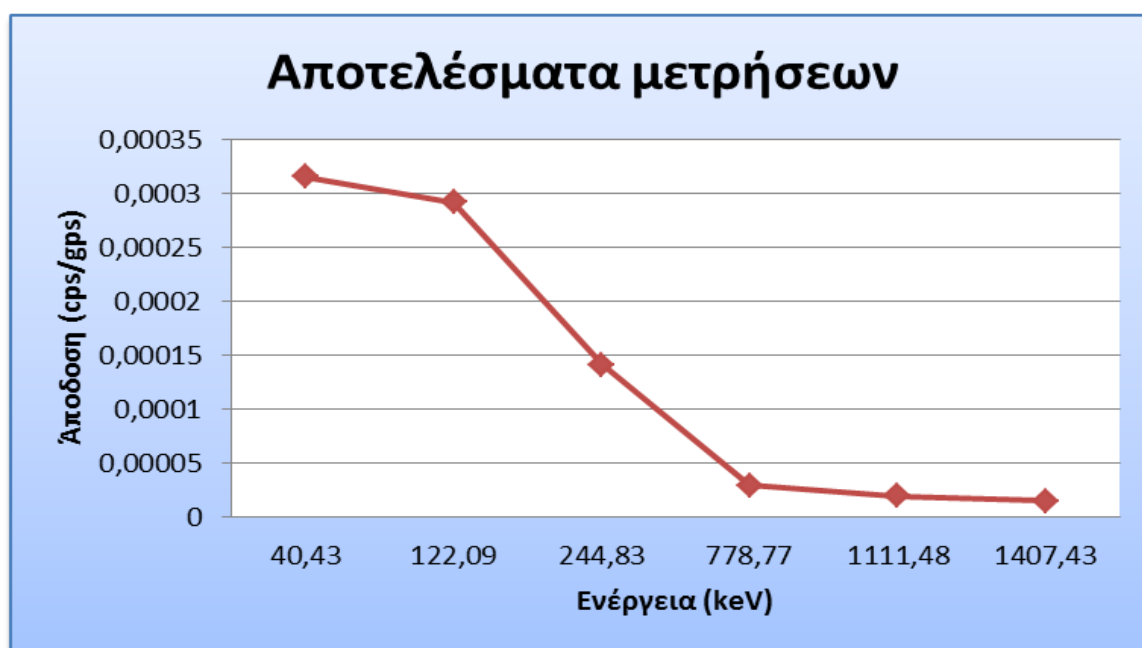
Για το ραδιενεργό ισότοπο Eu-152, χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες ενέργειες (σε keV):

40,43
122,09
244,83
778,77
1111,48
1407,43

Ακολουθεί ο πίνακας 2.4.1. στον οποίο αναγράφονται οι αποδόσεις των μετρήσεων και το σχήμα 2.4.4 όπου φαίνονται αυτές οι μετρήσεις συγκεντρωτικά σε ένα γράφημα.

Ενέργεια(keV)	Απόδοση(Cps/Gps)
40,43	0.000315958
122,09	0.000291872
244,83	0.000141086
778,77	0.0000292444
1111,48	0.0000197594
1407,43	0.0000147497

**Πίνακας 2.4.1:** Αποτελέσματα των μετρήσεων της σημειακής πηγής Eu-152, για απόσταση του ανιχνευτή 63cm από την πηγή.



**Σχήμα 2.4.4:** Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της σημειακής πηγής Eu-152, για απόσταση του ανιχνευτή 63cm από την πηγή.

## Προσδιορισμός απόδοσης ανιχνευτή για κυλινδρική γεωμετρία με υλικό που περιέχει H<sub>2</sub>O

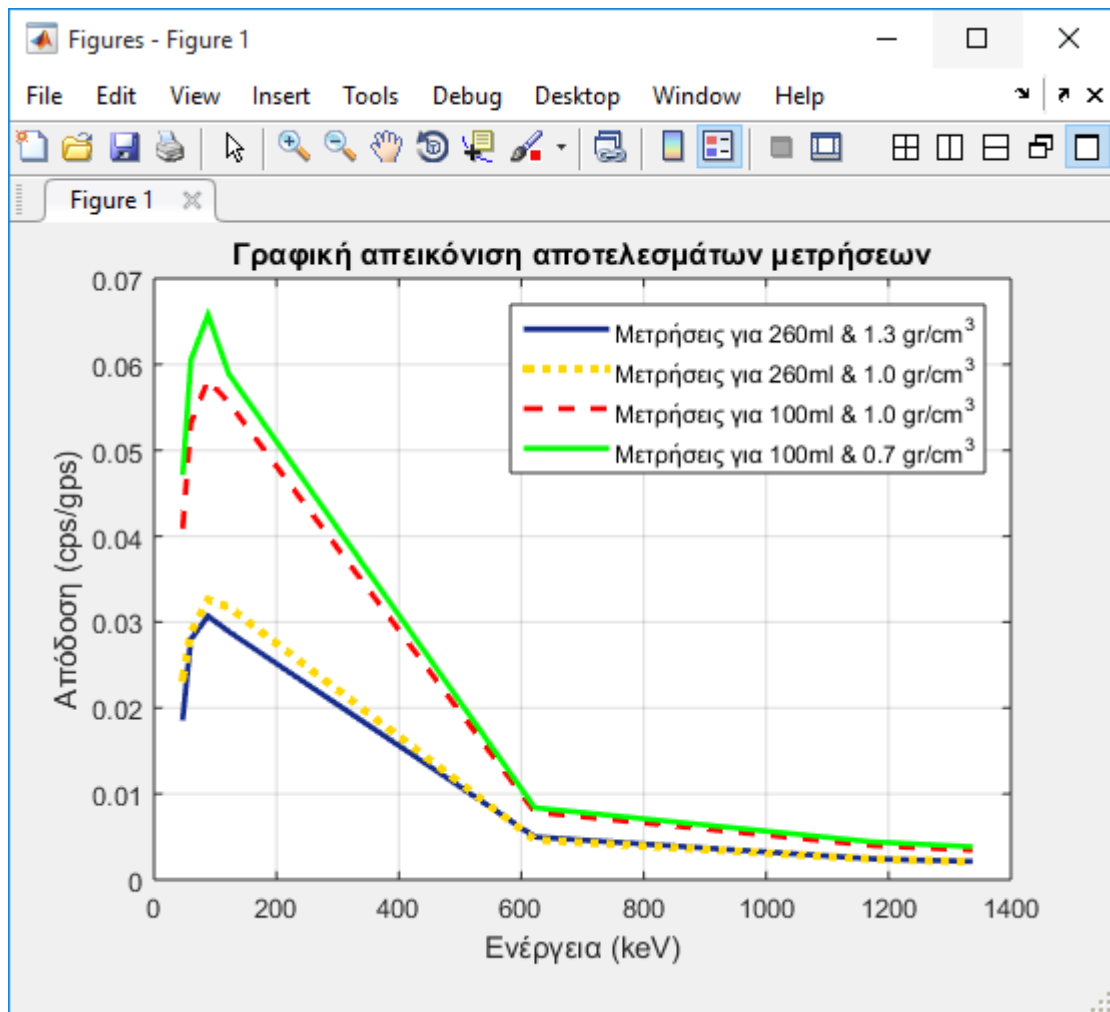
Επίσης διερευνήθηκε η περίπτωση πηγής με κυλινδρική γεωμετρία (φωτογραφία 2.4.1) στο εσωτερικό της οποίας υπήρχε H<sub>2</sub>O (το οποίο περιείχε Am-241, Cd-109, Co-60, Cs-134, Cs-137, Mn-54, Pb-210, Zn-65) με πυκνότητα

- 1 gr/cm<sup>3</sup> και όγκων **100 ml** και **260 ml**
- 1.3 gr/cm<sup>3</sup> και όγκου **260 ml**
- 0.7 gr/cm<sup>3</sup> και όγκου **100 ml**

Ακολουθεί ο πίνακας 2.4.2, όπου έχουμε τα αποτελέσματα των αποδόσεων των μετρήσεων για κάθε ενέργεια και το σχήμα 2.4.5 όπου βλέπουμε την γραφική τους απεικόνιση

Ενέργεια(KeV)	H <sub>2</sub> O των 260ml, πυκνότητας 1.3gr/cm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> O των 260ml, πυκνότητας 1.0gr/cm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> O των 100ml, πυκνότητας 1.0gr/cm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> O των 100ml, πυκνότητας 0.7gr/cm <sup>3</sup>
47	0.018864	0.023478	0.04117	0.047448077
60	0.027979	0.028720	0.053129	0.060522056
88	0.030688	0.032595	0.058190	0.065771373
122	0.02889	0.031732	0.055562	0.058891434
622	0.004981	0.004641	0.007877	0.008381078
1173	0.00243	0.002406	0.003976	0.004412768
1333	0.002138	0.002101	0.003459	0.003851365

**Πίνακας 2.4.2:** Αποτελέσματα των μετρήσεων με δείγμα H<sub>2</sub>O των 100ml, 260ml, για πυκνότητα 1.3 gr/ cm<sup>3</sup>, 1 gr/ cm<sup>3</sup> και 1 gr/ cm<sup>3</sup>, 0.7 gr/ cm<sup>3</sup> αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.4.5:** Αποτελέσματα των μετρήσεων με δείγμα H<sub>2</sub>O των 100ml, 260ml, για πυκνότητα 1.3 gr/cm<sup>3</sup>, 1 gr/cm<sup>3</sup> και 1 gr/cm<sup>3</sup>, 0.7 gr/cm<sup>3</sup> αντίστοιχα.

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για το Σχήμα 2.4.5

```
x=[47 60 88 122 622 1173 1333]; %Ενέργεια (keV)
%Για 260ml & 1.3 gr/cm^3 :
y=[0.018864 0.027979 0.030688 0.02889 0.004981 0.00243 0.002138];
plot(x,y)
hold
%Για 260ml & 1.0 gr/cm^3 :
y=[0.023478 0.028720 0.032595 0.031732 0.004641 0.002406 0.002101];
plot(x,y)
%Για 100ml & 1.0 gr/cm^3 :
y=[0.04117 0.053129 0.058190 0.055562 0.007877 0.003976 0.003459];
plot(x,y)
%Για 100ml & 0.7 gr/cm^3 :
y=[0.047448077 0.060522056 0.065771373 0.058891434 0.008381078
0.004412768 0.003851365];
plot(x,y)
xlabel('Ενέργεια (keV)')
ylabel('Απόδοση (cps/gps)')
title('Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων μετρήσεων')
grid
```

## 3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

### 3.1 Monte Carlo - Γενικά

Σε πολλά προβλήματα δοσιμετρίας, ακτινοπροστασίας αλλά και εν γένει αλληλεπιδράσεων με την ύλη, χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη και προσδιορισμού του φάσματος ροής σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου. Ως ορισμός μπορεί να ειπωθεί συνοπτικά ότι το Monte Carlo είναι στοχαστική προσομοίωση, δηλαδή χρησιμοποιεί τυχαίους αριθμούς (για γνωστή κατανομή) ενώ η προσομοίωση είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για διεξαγωγή πειραμάτων σε Η/Υ και εμπλέκει μαθηματικά μοντέλα, που περιγράφουν το σύστημα στην χρονική του εξέλιξη. Η προσομοίωση αποτελεί σημαντικό εργαλείο για σχεδίαση πτήσεων αεροπλάνων, τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και πολλών άλλων εφαρμογών. Επίσης, επιτρέπει την αναπαραγωγή σε Η/Υ, κάποιου πειράματος. Αναπαραγωγή σημαίνει η επανάληψη ενός πειράματος με παραμέτρους που ορίζει ο ερευνητής.

Η προσομοίωση είναι μια ανακριβής μέθοδος. Περιέχει στατιστικές εκτιμήσεις και όχι ακριβή αποτελέσματα. Όμως, πρόκειται για ένα γρήγορο και όχι δαπανηρό τρόπο μελέτης ενός προβλήματος. Αν και αποτελεί την «έσχατη λύση» όταν οποιαδήποτε άλλη μέθοδος έχει αποτύχει, η σύγχρονη τεχνολογία κατέστησε την προσομοίωση ευρέως χρησιμοποιούμενη και αποδεκτή. Οι μέθοδοι Monte Carlo χρησιμοποιούνται για χρόνια, αλλά μόνο τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των Η/Υ, αναπτύχθηκαν τόσο ώστε να θεωρούνται μία αριθμητική μέθοδος ικανή να εφαρμοστεί και στις πιο περίπλοκες εφαρμογές.

Το όνομα Monte Carlo δόθηκε από την ομάδα Metropolis (εμπνευσμένο από το ενδιαφέρον του Ulam για το πόκερ) κατά τη διάρκεια του σχεδίου Manhattan στον 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο, λόγω της ομοιότητας της στατιστικής προσομοίωσης με παιχνίδια τύχης, καθώς και λόγω του ότι η πρωτεύουσα του Monaco ήταν το κέντρο αυτού του είδους παιχνιδιών. Η αναλογία των μεθόδων Monte Carlo με τα τυχερά παιχνίδια είναι καλή, μόνο που εδώ το «παιχνίδι» είναι ένα φυσικό σύστημα, και το αποτέλεσμα του παιχνιδιού δεν είναι χρήματα ή μάρκες (εκτός αν προσομοιωθούν) αλλά η λύση κάποιου προβλήματος.

Η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλά διαφορετικά πεδία, κάποια από αυτά είναι τα ακόλουθα:



- Η προσομοίωση περίπλοκων φυσικών φαινομένων, όπως η μεταφορά ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της γης
- Η προσομοίωση διεργασιών στη φυσική υψηλών ενεργειών,
- Η προσομοίωση παιχνιδιών πχ. Bingo.

### Εφαρμογές της μεθόδου Monte Carlo:

- Σχεδιασμός πυρηνικών αντιδραστήρων
- Ακτινοθεραπεία κατά του καρκίνου
- Ροή κυκλοφορίας
- Εξέλιξη αστέρων
- Οικονομετρία
- Εξερεύνηση κοιτασμάτων πετρελαίου
- προστασία από την ακτινοβολία και τη δοσιμετρία,
- σχεδιασμός του αντιδραστήρα σύντηξης και σχάσης, αλλά και την απολύμανση και τον παροπλισμό τους.
- Σχεδιασμός VLSI

Το **βασικό πεδίο** χρήσης της μεθόδου Monte Carlo είναι οι εφαρμογές που περιέχουν **μετακίνηση σωματιδίων**. Αυτές χαρακτηρίζονται συνήθως από:

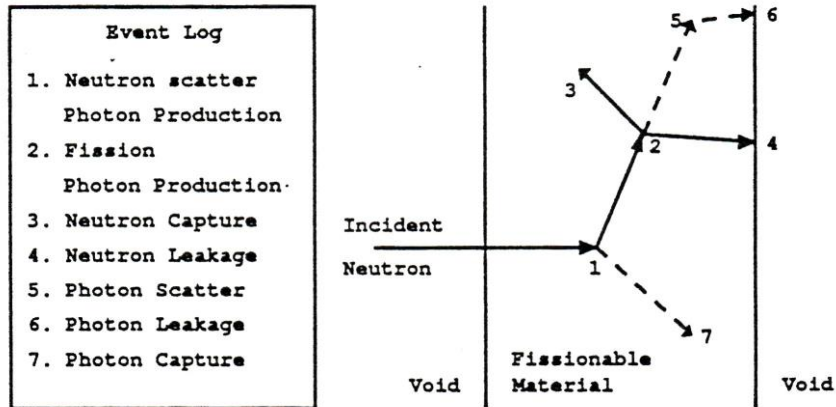
- Πολύπλοκη τρισδιάστατη και μη καρτεσιανή γεωμετρία
- Περίπλοκα υλικά
- Περίπλοκα φυσικά φαινόμενα λόγω αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας (νετρόνια, φωτόνια, κτλ) με την ύλη
- Κάποια γνωστή πηγή ακτινοβολίας μέσα στη γεωμετρία

- Ζητούμενα στην έξοδο να είναι το ποσό ακτινοβολίας, ή η εναπόθεσή της σε κάποιο υλικό
- Υπολογισμό σφαλμάτων στην προσομοίωση
- Λογική υπολογιστική ισχύ για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης

Σε πολλές εφαρμογές Monte Carlo, η φυσική διεργασία προσομοιώνεται απ' ευθείας, χωρίς να χρειάζεται καν να γραφτούν οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Η μόνη απαίτηση είναι το φυσικό ή μαθηματικό σύστημα να περιγράφεται από συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Εφόσον είναι γνωστές αυτές, η προσομοίωση Monte Carlo μπορεί να προχωρήσει δειγματοληπτώντας τυχαία από τις συναρτήσεις. Πολλές προσομοιώσεις διεξάγονται τότε (histories ή trials) και το επιθυμητό αποτέλεσμα λαμβάνεται σαν ένας μέσος όρος από τον αριθμό των παρατηρήσεων. Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, μπορεί να προβλεφθεί το στατιστικό σφάλμα σε αυτό το «μέσο αποτέλεσμα» και επομένως να υπολογισθεί και ο αριθμός των «σεναρίων» (histories) που χρειάζονται για να επιτευχθεί το επιθυμητό σφάλμα. Τυπικά, η ακρίβεια μιας προσομοίωσης Monte Carlo είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα των σεναρίων που χρησιμοποιήθηκαν. Καθώς οι υπολογιστές γίνονται όλο και πιο ισχυροί είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου σε όλο και πιο πολύπλοκα προβλήματα με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια. Βέβαια, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε έναν κώδικα Monte Carlo έχει στατιστική έννοια και δεν πρέπει να συγχέεται με την ορθότητα του αποτελέσματος που έχει φυσική έννοια.

### **3.2 Εφαρμογή της μεθόδου για τη μελέτη της κίνησης των σωματιδίων και τις διάφορες αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη**

Η εφαρμογή εδώ θεωρείται εξαιρετικά ρεαλιστική. Συνίσταται στην ακριβή παρακολούθηση καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής καθενός από τα πολλά σωματίδια, που εκπέμπονται από μία πηγή ή δημιουργούνται κατά την πορεία κάποιου άλλου σωματιδίου, από τη στιγμή της γέννησής του ως τον θάνατό του με κάποια από τις καταληκτικές διαδικασίες, δηλαδή απορρόφηση, διαφυγή κτλ. Οι κατανομές των διάφορων πιθανοτήτων δειγματοληπτούνται τυχαία και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα κίνησης - μεταφοράς των σωματιδίων προσδιορίζεται η έκβαση σε κάθε φάση της ζωής του.



**Σχήμα 3.2.1:** Παρακολούθηση ενός νετρονίου κατά την εισαγωγή του σε ένα υλικό που μπορεί να υποστεί διάσπαση.

Το σχήμα 3.2.1 αντιπροσωπεύει την τυχαία "ιστορία" ενός νετρονίου σε ένα υλικό στο οποίο μπορεί να συμβεί κάποια διάσπαση. Τυχαίοι αριθμοί, επιλέγονται για να καθορίσουν ποιά θα είναι (αν ποτέ συμβεί) και πού θα λάβει χώρα μια αλληλεπίδραση με το υλικό, βασιζόμενη στους κανόνες της φυσικής και στις πιθανότητες που διέπουν τη συμπεριφορά του σωματιδίου εντός του υλικού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το νετρόνιο πραγματοποιεί μια κρούση στο σημείο 1 και κατόπιν σκεδάζεται προς την κατεύθυνση που δηλώνεται με τη συνεχή γραμμή. Η κατεύθυνση στην οποία το νετρόνιο συνεχίζει την πορεία του προέκυψε τυχαία από την κατανομή της πιθανότητας που αφορά την πορεία του νετρονίου μετά από μία σκέδαση. Ταυτόχρονη ήταν η παραγωγή ενός φωτονίου, το οποίο όμως αποθηκεύεται προσωρινά για να εξεταστεί και να αναλυθεί αργότερα.

Στο σημείο 2 λαμβάνει χώρα μία διάσπαση που οδηγεί στην εξαφάνιση του αρχικού νετρονίου και στην εκπομπή δύο νέων νετρονίων και ενός φωτονίου. Το ένα νετρόνιο και το φωτόνιο αποθηκεύονται για να αναλυθούν αργότερα. Το άλλο νετρόνιο απορροφάται στο σημείο 3 και τερματίζεται η ιστορία του. Στη συνέχεια, το αποθηκευμένο νετρόνιο αποδεσμεύεται και κατόπιν τυχαίας δειγματοληψίας εγκαταλείπει το υλικό στο σημείο 4. Όσο για το φωτόνιο που προέκυψε από τη διάσπαση, αρχικά σκεδάζεται στο σημείο 5 και στη συνέχεια διαφεύγει από το υλικό στο σημείο 6.

Τέλος, αποδεσμεύεται και το φωτόνιο που προέκυψε από την κρούση του αρχικού νετρονίου και σύμφωνα με τυχαίες πάλι διαδικασίες απορροφάται στο σημείο 7, ολοκληρώνοντας έτσι την ιστορία του αρχικού νετρονίου.

### 3.3 Ο κώδικας MCNP 4c2

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας Monte Carlo **MCNP έκδοση 4c2**. Ο MCNP είναι ένας κώδικας Monte Carlo γενικής χρήσης, με δυνατότητες προσομοίωσης προβλημάτων μεταφοράς νετρονίων, ηλεκτρονίων και φωτονίων, με συνεχείς ενέργειες, σε γενικευμένες γεωμετρίες, με εξάρτηση από τον χρόνο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρκετά προβλήματα αλληλεπίδρασης όπως:

- νετρονίων μόνο
- φωτονίων μόνο
- ηλεκτρονίων μόνο
- συνδυασμού φωτονίων και νετρονίων όπου τα φωτόνια παράγονται από αλληλεπιδράσεις των νετρονίων
- νετρονίων - φωτονίων - ηλεκτρονίων
- φωτονίων - ηλεκτρονίων
- ηλεκτρονίων - φωτονίων με την ύλη.

*Η ενέργεια των νετρονίων μπορεί να κυμανθεί από  $10^{-11}$  MeV έως τα 20 MeV, ενώ των ηλεκτρονίων και φωτονίων από 1 keV έως 1000 MeV.*

Ο χρήστης δημιουργεί ένα αρχείο εισόδου το οποίο στη συνέχεια διαβάζεται από τον MCNP. Αυτό το αρχείο περιέχει πληροφορίες σχετικά με το πρόβλημα σε τομείς όπως:

- *Ο καθορισμός της γεωμετρίας.*
- *Η περιγραφή των υλικών και η επιλογή των μικροσκοπικών διατομών.*
- *Η θέση και τα χαρακτηριστικά της πηγής νετρονίων, φωτονίων ή ηλεκτρονίων.*
- *Η μορφή και ο τύπος των αποτελεσμάτων.*
- *Οι τεχνικές ελαχιστοποίησης της διακύμανσης.*

Οι πληροφορίες αυτές διαβιβάζονται στον κώδικα και με αυτόν τον τρόπο ξεκινά η επεξεργασία. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αποθηκεύονται σε ένα αρχείο εξόδου (.o). Συνήθως έχουμε τη ροή των φωτονίων σε κάποια σημεία του χώρου. Στη συνέχεια, από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ζητούμενα μεγέθη.

Η μορφή των αποτελεσμάτων, από την εκτέλεση του κώδικα, εξαρτάται από το είδος των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται από τον MCNP. Ο MCNP παρέχει 6 διαφορετικούς ανιχνευτές φωτονίων. Οι 6 ανιχνευτές φωτονίων μπορούν να υπολογίσουν:

- Ρεύμα επιφάνειας (σωματίδια)
- Ροή από επιφάνεια ( $\text{cm}^{-2}$ )
- Ροή σε έναν όγκο ( $\text{cm}^{-2}$ )
- Ροή σε σημείο ( $\text{cm}^{-2}$ )
- Εναπόθεση ενέργειας (MeV/g)
- Απαρίθμηση ύψους παλμών (παλμοί)

### 3.4 Απαριθμητής Ύψους Παλμών (Pulse Height Tally, f8)

Ο απαριθμητής ύψους παλμών παρέχει την ενεργειακή κατανομή των παλμών που δημιουργούνται στο κελί που ορίζεται ως ανιχνευτής, ενώ μπορεί επίσης να υπολογίζει την εναπόθεση ενέργειας σε κάποιο άλλο κελί. Γενικά, ο συγκεκριμένος τύπος ανιχνευτή είναι ανάλογος με τον πραγματικό ανιχνευτή, καθώς η διαμέριση των ενεργειών που ορίζονται αντιστοιχεί στα κανάλια του πολυκαναλικού αναλυτή στα οποία καταμετρούνται τα σωματίδια ανάλογα με την ενέργεια που καθένα από αυτά εναποθέτει στον κρύσταλλο του ανιχνευτή. Για παράδειγμα, αν από μία πηγή εκπέμπονται 100 φωτόνια ενέργειας 10 keV τότε 10 από αυτά εισέρχονται στο κελί του ανιχνευτή. Το πρώτο φωτόνιο εναποθέτει ενέργεια 1 keV, το δεύτερο 2 keV, κ.ο.κ μέχρι το δέκατο φωτόνιο που εναποθέτει 10 keV. Έτσι, το αποτέλεσμα της καταμέτρησης του ανιχνευτή θα είναι:

- *ένας παλμός στη διαμέριση του ενός keV,*
- *ένας παλμός στη διαμέριση των 2 keV,*
- *και συνεχίζοντας ανάλογα, ένας παλμός σε κάθε διαμέριση μέχρι τα 10 keV.*

Με απλά λόγια ο απαριθμητής ύψους παλμών καταγράφει τους παλμούς σε μία μνήμη ανάλογα με το ύψος τους.

### 3.5 Μορφή αρχείου εισόδου

Πιο συγκεκριμένα, το αρχείο εισόδου που δημιουργείται από το χρήστη έχει μια μορφή η οποία αποτελείται κυρίως από 6 μέρη τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

- Ορισμός επιπέδων

```
c
c surface cards
c
c
c
c          normal to x axis surfaces
1  px 0.
2  px 1.2
3  px 4.85
4  px 6.05
5  px 6.95
6  px 10.3  $ start of crystal
7  px 10.35 $depth groove
8  px 10.3  $start of 1st ear
9  px 11.   $end of 1st ear
10 px 11.3  $start of 2nd ear
31 px 12.   $end of 2nd ear
11 px 12.15 $ end of holder
12 px 12.3  $ front window of crystal
13 px 12.75
14 px 12.8
15 px 80.   $ poli megalos
16 px -2.
```

```

c      Cylinder surfaces
17  cx 0.2
18  cx 0.5
19  cx 0.5
20  cx 0.9
21  cx 2.525 $outside of crystal
22  cx 2.625 $ start holder
23  cx 2.775 $ end holder
24  cx 2.965 $ out of ear
25  cx 3.65
26  cx 3.8
27  cx 6.
28  cx 0.5 $ groove cylinder start
29  cx 0.55 $ groove cylinder end
30  px 12.29995 $ front dead layer 0.5 micro
C      complementary surfaces (dead layer)
48  px 10.45 $bottom dead layer
49  cx 2.375 $outside of active Ge

```

Το παραπάνω αρχείο περιέχει κάθε επίπεδο (αριθμημένα) που διακρίνεται στον ανιχνευτή (χωρίς τοποθέτηση πηγής).

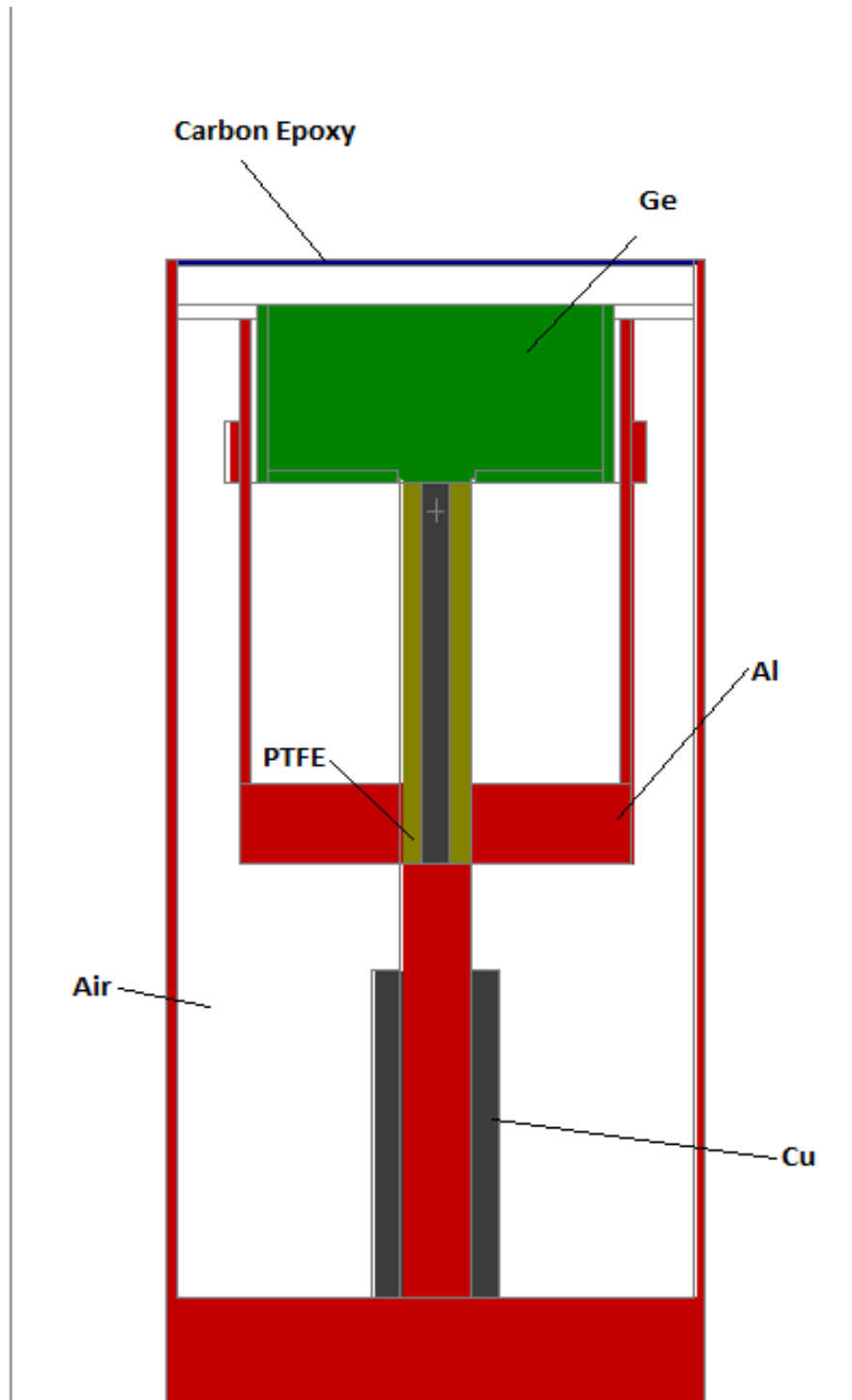
- Τα διάφορα **οριζόντια επίπεδα** ορίζονται με το px (normal to x axis) και
- Τα **κάθετα επίπεδα** (κύλινδροι) με το cx (on x axis).

*Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να προστεθούν τα νέα επίπεδα που δημιουργούνται με την προσθήκη κάθε νέας πηγής.*

- Το c μπροστά από κάθε γραμμή δηλώνει ότι ακολουθεί **σχόλιο**.

Τα επίπεδα αυτά ορίστηκαν χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το Manual του ανιχνευτή (BE2020 Manual) καθώς και κάποιες διαστάσεις επιλέχτηκαν από την δημοσίευση Fantinova-Fojtik (Monte Carlo simulation of the BEGe detector response function)

Εισάγοντας λοιπόν στο πρόγραμμα τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή όπως αυτά δόθηκαν από τον κατασκευαστή παίρνουμε το **σκαρίφημα** του μοντέλου του ανιχνευτή όπως **προσομοιώθηκε** με τον κώδικα **MCNP**.



Σχήμα 3.5.1: Προσομοίωση ανιχνευτή με κώδικα Monte Carlo



- **Εγγραφές γεωμετρίας**

Σε αυτό το κομμάτι του κώδικα ορίζονται οι όγκοι που περικλείονται από τα επίπεδα που ορίστηκαν παραπάνω. Χαρακτηριστικό κάθε όγκου είναι ότι αποτελείται από **ένα μόνο υλικό**. Κάθε γραμμή όγκου αποτελείται από τα επίπεδα που ορίζουν τον όγκο, την πυκνότητα του υλικού που περικλείουν και τον αριθμό του, που θα ορισθεί σε άλλο μέρος παρακάτω. Η μορφή του μέρους αυτού είναι η εξής:

1	2	-0.00129	-15	16	-27	(14:26:-1)	\$ air over detector
2	3	-2.69	1	-26	(25:-2)	-14	\$ Al cover
3	2	-0.00129	2	-25	(23:-4)	-11 #5 #16 #17 #4	\$ air inside cover exept front air
4	4	-8.96	2	-3	-20	18	\$ Cu
5	3	-2.69	2	-4	-18		\$ Al cryostat
6	3	-2.69	4	-5	-23	19	\$ Al base of holder
7	4	-8.96	4	-6	-17		\$ Cu inside teflon
8	1	-2.2	4	-6	-19	#7	\$ PTFE
9	2	-0.00129	11	-12	-25	21	\$ air below front window above holder
10	2	-0.00129	5	-6	-22	19	\$ air base of crystal
13	5	-5.36	6	-30	-49	#21 #20	\$ Ge Crystal
11	2	-0.00129	6	-11	-22	21	\$ air inside holder-crystal
14	2	-0.00129	12	-13	-25		\$ air in front window
15	10	-1.42	13	-14	-25		\$ carbon window
16	3	-2.69	8	-9	-24	23	\$ Al 1st ear
17	3	-2.69	11	-31	-24	23	\$ Al 2nd ear
18	3	-2.69	5	-11	-23	22	\$ Al holder
19	5	-5.36	6	-12	-21	49	\$ Ge dead layer side 1.5mm
20	5	-5.36	6	-48	-49	29	\$ Ge dead layer bottom 1.5mm
21	2	-0.00129	28	-29	6	-7	\$ groove
22	5	-5.36	30	-12	-49		\$ Ge dead layer front 0.5microm
25	0		15:	-16	:27		\$ outside

- Δήλωση υλικών

Στη συνέχεια ορίζονται όλα τα υλικά από τα οποία αποτελείται το υπό μελέτη σύστημα. Αυτά αριθμούνται για να χρησιμοποιηθούν στο κομμάτι με τους όγκους που παρουσιάστηκε παραπάνω. Επιπλέον, ορίζονται τα χημικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται η ποσοστιαία χημική τους σύσταση.

c material cards			
c			
m1	9000 0.667 6000 0.333		\$ PTFE (C2F4)
m2	7014 3.64E-5		\$ Air
	8016 9.74E-6		
m3	13000 1		\$ Al
m4	29000 1		\$ Cu
m5	32000 1		\$ Ge
m8	8000 -0.501		\$ O
	13000 -0.073		\$ Al
	26000 -0.039		\$ Fe
	14000 -0.327		\$ Si
	6000 -0.021		\$ C
	20000 -0.014		\$ Ca
	19000 -0.009		\$ k
	12000 -0.005		\$ Mg
	7000 -0.001		\$ N
	11000 -0.006		\$ Na
	22000 -0.004		\$ Ti
m9	1000 2		\$H2O
	8000 1		
m10	6000 1		\$aluminio

- **Ορισμός πηγής**

Απαραίτητος είναι ο αναλυτικός ορισμός της εκάστοτε πηγής. Ορίζεται η **θέση** της καθώς και η **ενέργειά** της. Ανάλογα με το **είδος της γεωμετρίας** της πηγής που μελετάται (σημειακή, δίσκος, όγκος κτλ.), καθορίζεται και ο τρόπος ορισμού της θέσης της. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά ο ορισμός μιας **σημειακής πηγής**:

```
c
c source specification
c source distance from front window 63cm without petri
sdef pos 75.3 0. 0. erg=0.0404
```

- **Ορισμός απεριθμητή**

Σε αυτό το κομμάτι ορίζεται το κομμάτι του ανιχνευτή (όγκος) που θα αποτελεί το σημείο μέτρησης και τον τύπο του ανιχνευτή. Δηλαδή, τα αποτελέσματα που θα λαμβάνονται θα είναι η αλληλεπίδραση της ύλης με αυτό το κομμάτι του ανιχνευτή μόνο. Επίσης, αναγράφεται η διαμέριση της ενέργειας της πηγής καθώς και ότι είναι απεριθμητής ύψους παλμών (**f8**).

```
c tallies specification
c
f8:p 13 $ simio που vriskete o kristalos Ge
e8 0. 0.0399 0.0409 $0.0005 +- KeV diamerisi
c
```

- **Εγγραφές κελιών**

*Οι όγκοι με τους οποίους αλληλεπιδρά η ύλη.*

```
c data cards
c
mode p
imp:p 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
c
```

- Δήλωση παραμέτρων

Στο σημείο αυτό ορίζονται οι παράμετροι που καθορίζουν το **μέγιστο αριθμό σωματιδίων** που θα παρακολουθηθούν και το **μέγιστο χρόνο τρεξίματος**.

```
c problem cut-offs
```

```
c
```

```
nps 100000000
```

```
ctme 300
```

```
c
```

#### Παρατήρηση

*Ένα από τα αρχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία υπάρχει στο παράρτημα ολόκληρο.*

### 3.6 Προσομοίωση των μετρήσεων με κώδικα Monte Carlo

Στο σημείο αυτό κύριος στόχος ήταν να προσομοιωθεί σωστά η εκάστοτε πηγή και στη συνέχεια να επιλεγεί η κατάλληλη νεκρή ζώνη.

Η **νεκρή ζώνη** (dead layer), είναι η περιοχή του κρυστάλλου που καθορίζεται από το πάχος της n- και p- επαφής, στην οποία η **αλληλεπίδραση** με την ύλη **δεν** εμφανίζεται στο ενεργειακό φάσμα. Διεξήχθησαν προσομοιώσεις των μετρήσεων που είχαν γίνει στο πειραματικό κομμάτι με τον κώδικα MCNP.

Το τρέξιμο του κάθε αρχείου έγινε για  **$100 \times 10^6$  σωματίδια**. Ο χρόνος στον οποίο πραγματοποιήθηκε κάθε προσομοίωση των 100 εκατομμυρίων σωματιδίων ήταν της τάξης των **30-35λεπτών**. Από το αρχείο εξόδου λαμβάνεται η **απόλυτη απόδοση** του ανιχνευτή.

#### Προσομοιώσεις σημειακής πηγής

Στο πειραματικό μέρος η **απόσταση** της πηγής από τον κρύσταλλο που ελήφθει ήταν **63cm**. Η ίδια απόσταση ισχύει και στο κομμάτι της προσομοίωσης. Στον πίνακα 3.6.1 έχουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που ελήφθησαν για την απόδοση πηγής Eu-152. Η νεκρή

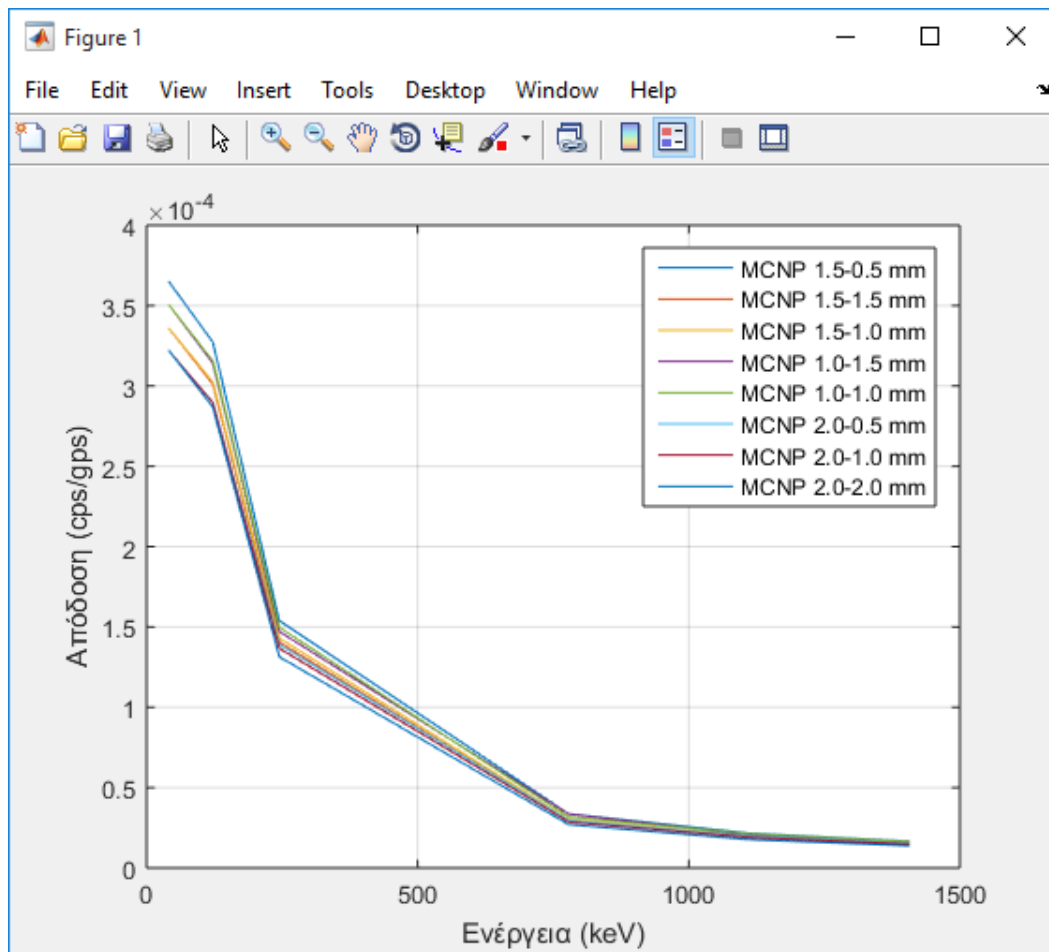
ζώνη μειώνεται κάθε φορά από τα πλάγια και το κάτω επίπεδο του κρυστάλλου σε διαφορετικές περιπτώσεις κατά :

- 0.5 mm
- 1.0 mm
- 1.5 mm
- 2.0mm

Ενέργεια (KeV)	1,5-0,5 (mm)	1,5-1,5 (mm)	1,5-1,0 (mm)	1,0-1,5 (mm)
40.43	0.0003652	0.00033617	0.00033617	0.00035074
122.09	0.00032726	0.00030108	0.00030236	0.00031418
244.83	0.00015387	0.00014056	0.00014301	0.00014711
778.47	0.00003365	0.00002928	0.00003023	0.00003365
1111.48	0.00002159	0.00001939	0.00002002	0.00002048
1407.43	0.00001663	0.00001497	0.00001555	0.00001576
Ενέργεια (KeV)	1,0-1,0 (mm)	2,0-0,5 (mm)	2,0-1,0 (mm)	2,0-2,0 (mm)
40.43	0.00035074	0.000322	0.00032228	0.00032228
122.09	0.00031549	0.00029	0.00028942	0.0002868
244.83	0.0001497	0.000139	0.00013662	0.00013135
778.47	0.00003185	0.00002962	0.00002864	0.00002702
1111.48	0.0000212	0.00001962	0.00001896	0.00001764
1407.43	0.00001639	0.00001528	0.00001486	0.00001379

**Πίνακας 3.6.1:** Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για σημειακή πηγή **Eu-152** στα **63cm** για διάφορες τιμές **Side** (Πλάγιο) και **Bottom** (Κάτω) **Dead Layer**

Η γραφική απεικόνιση (σχήμα 3.6.1) που ακολουθεί παρουσιάζει όλες τις ενέργειες για τις διαφορετικές νεκρές ζώνες που έγιναν προσομοιώσεις.



**Σχήμα 3.6.1:** Αποτελέσματα των προσομοιώσεων για σημειακή πηγή Eu-152 στα 63cm για διάφορες τιμές Side (Πλάγιο) και Bottom (Κάτω) Dead Layer.

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για το Σχήμα 3.6.1

```
x=[40.43 122.09 244.83 778.47 1111.48 1407.43]; %Ενέργεια (eKV)
y1=[0.0003652 0.00032726 0.00015387 0.00003365 0.00002159 0.00001663];
% Για 1.5-0.5
y2=[0.00033617 0.00030108 0.00014056 0.00002928 0.00001939 0.00001497];
% Για 1.5-1.5
y3=[0.00033617 0.00030236 0.00014301 0.00003023 0.00002002 0.00001555];
% Για 1.5-1.0
y4=[0.00035074 0.00031418 0.00014711 0.0000336 0.00002048 0.00001576];
% Για 1.0-1.5
y5=[0.00035074 0.00031549 0.0001497 0.00003185 0.0000212 0.00001639];
% Για 1.0-1.0
y6=[0.000322 0.00029 0.000139 0.00002962 0.00001962 0.00001528];
% Για 2.0-0.5
y7=[0.00032228 0.00028942 0.00013662 0.00002864 0.00001896 0.00001486];
% Για 2.0-1.0
y8=[0.00032228 0.0002868 0.00013135 0.00002702 0.00001764 0.00001379];
% Για 2.0-2.0
plot(x,y1,x,y2,x,y3,x,y4,x,y5,x,y6,x,y7,x,y8)
%Γραφική απεικόνιση και των 8 περιπτώσεων
```

## Προσομοιώσεις κυλινδρικής γεωμετρίας

Είναι ήδη γνωστό από τα προηγούμενα ότι η κυλινδρική γεωμετρία προσομοιώθηκε με τη χρήση δοχείου (βλ. Φωτογραφία 2.4.1) στο εσωτερικό του οποίου τοποθετούνταν δείγμα νερού H<sub>2</sub>O .

Προσομοιώθηκε δείγμα νερού όγκου 260 ml πυκνότητας 1g/cm<sup>3</sup> και 1,3g/cm<sup>3</sup> για διάφορες διαστάσεις της νεκρής ζώνης από τα πλάγια και από το κάτω επίπεδο αντίστοιχα:

- 2 mm - 1 mm
- 2 mm – 0.5 mm
- 1.5 mm - 1.5 mm

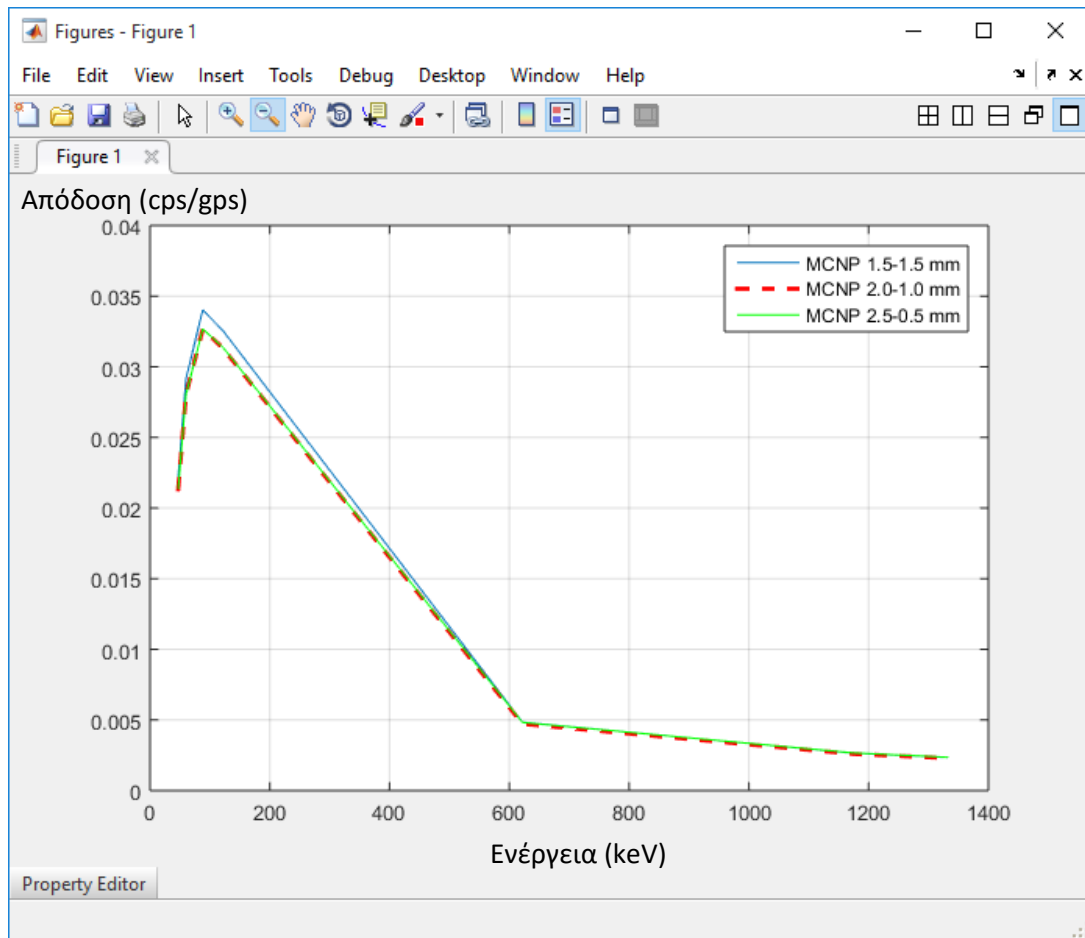
Επίσης προσομοιώθηκε δείγμα νερού όγκου 100 ml πυκνότητας 1g/cm<sup>3</sup> και 0,7g/cm<sup>3</sup> για διάφορες διαστάσεις της νεκρής ζώνης από τα πλάγια και από το κάτω επίπεδο αντίστοιχα:

- 2 mm - 1 mm
- 2 mm – 0.5 mm
- 1.5 mm - 1.5 mm

Για όγκο 260 ml προέκυψαν τα εξής (πίνακας 3.6.2 και 3.6.3):

Ενέργεια (KeV)	M <sub>cnp</sub> 1.5-1.5(mm)	M <sub>cnp</sub> 2.0-1.0(mm)	M <sub>cnp</sub> 2.0-0.5(mm)
47	0.022185	0.0213336	0.021334
60	0.02915	0.0280146	0.028015
88	0.034033	0.0326767	0.032681
122	0.032538	0.0312939	0.03136
662	0.004837	0.00471644	0.004824
1173	0.002657	0.00259904	0.00267
1333	0.002347	0.00229424	0.002357

**Πίνακας 3.6.2:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 260ml πυκνότητας 1gr/cm<sup>3</sup> για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer



**Σχήμα 3.6.2:** Προσομοίωση δείγματος  $H_2O$  260ml πυκνότητας  $1gr/cm^3$  για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer

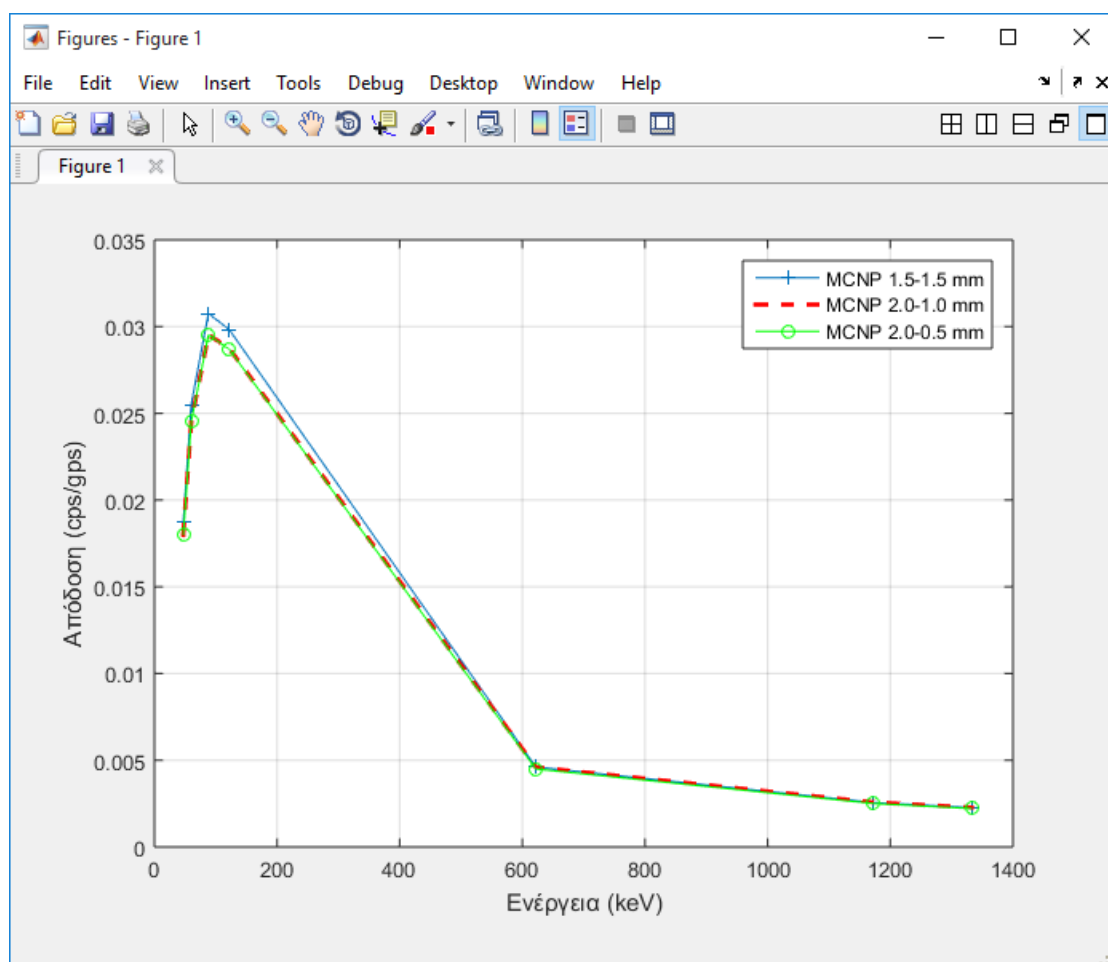
Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για το Σχήμα 3.6.2

```
%Για όγκο 260ml & 1gr/cm^3
xc=[47 60 88 122 622 1173 1333]; %Ενέργεια (keV)
y9=[0.022185 0.02915 0.034033 0.032538 0.004837 0.002657
0.002347]; %1.5-1.5
y10=[0.0213336 0.0280146 0.0326767 0.0312939 0.00471644
0.00259904 0.00229424]; %2.0-1.0
y11=[0.021334 0.028015 0.032681 0.03136 0.004824 0.00267
0.002357]; %2.0-0.5
plot(xc, y9, xc, y10, 'r', xc, y11, 'g')
```



Ενέργεια(KeV)	Mcpn 1.5-1.5(mm)	Mcpn 2.0-1.0(mm)	Mcpn 2.0-0.5(mm)
47	0.01871	0.017989	0.017989
60	0.025511	0.0245132	0.024513
88	0.030756	0.0295334	0.02953
122	0.029823	0.0287444	0.028684
662	0.00461	0.00459773	0.004495
1173	0.002559	0.00257252	0.002504
1333	0.002267	0.00227595	0.002215

**Πίνακας 3.6.3:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 260ml πυκνότητας 1.3gr/cm<sup>3</sup>



**Σχήμα 3.6.3:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 260ml πυκνότητας 1,3gr/cm<sup>3</sup> για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για το Σχήμα 3.6.3

```
%Για όγκο 260ml & 1.3gr/cm^3
xc=[47 60 88 122 622 1173 1333]; %Ενέργεια (keV)
y12=[0.01871 0.025511 0.030756 0.029823 0.00461 0.002559
0.002267]; %1.5-1.5
y13=[0.017989 0.024513 0.0295334 0.0287444 0.0045977
0.00257252 0.00227595]; %2.0-1.0
y14=[0.017989 0.024513 0.02953 0.028684 0.004495 0.002504
0.002215]; %2.0-0.5
plot(xc,y12,xc,y13,'r',xc,y14,'g')
```

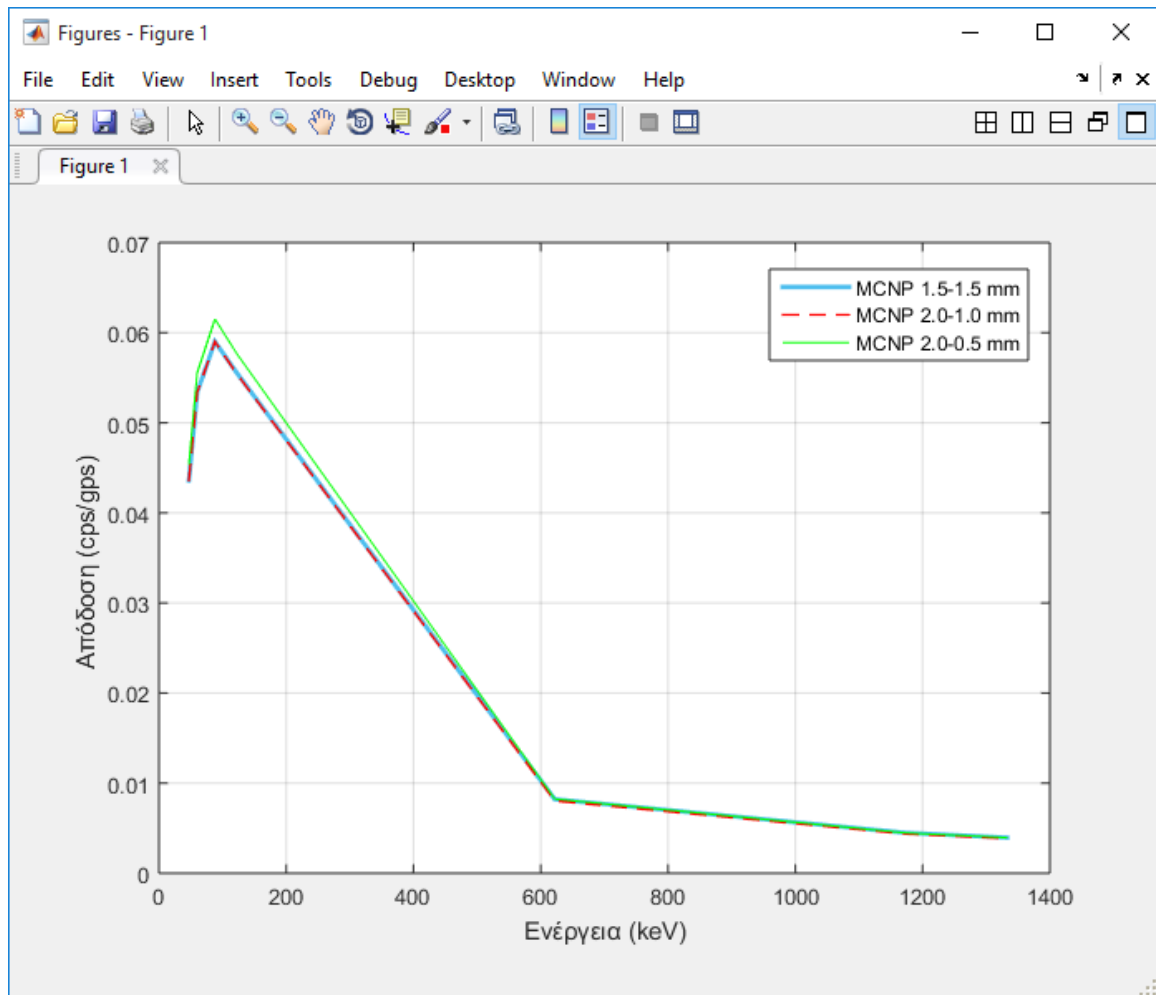
Στη συνέχεια προσομοιώθηκε το δείγμα νερού **100ml** για

- **1.0gr/cm<sup>3</sup>**
- **0.7gr/cm<sup>3</sup>**

Προέκυψαν οι ακόλουθοι πίνακες (3.6.4 και 3.6.5) :

Ενέργεια(KeV)	Mcp 1.5-1.5 (mm)	Mcp 2.0-1.0 (mm)	Mcp 2.0-0.5 (mm)
47	0.0435931	0.0435927	0.045347
60	0.0533491	0.0533488	0.055525
88	0.059003	0.0589941	0.061508
122	0.0555706	0.0554622	0.057701
662	0.00820569	0.00802985	0.008238
1173	0.00448848	0.00437341	0.004476
1333	0.00395296	0.00385097	0.003944

**Πίνακας 3.6.4:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 100ml πυκνότητας 1gr/cm<sup>3</sup>  
για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer



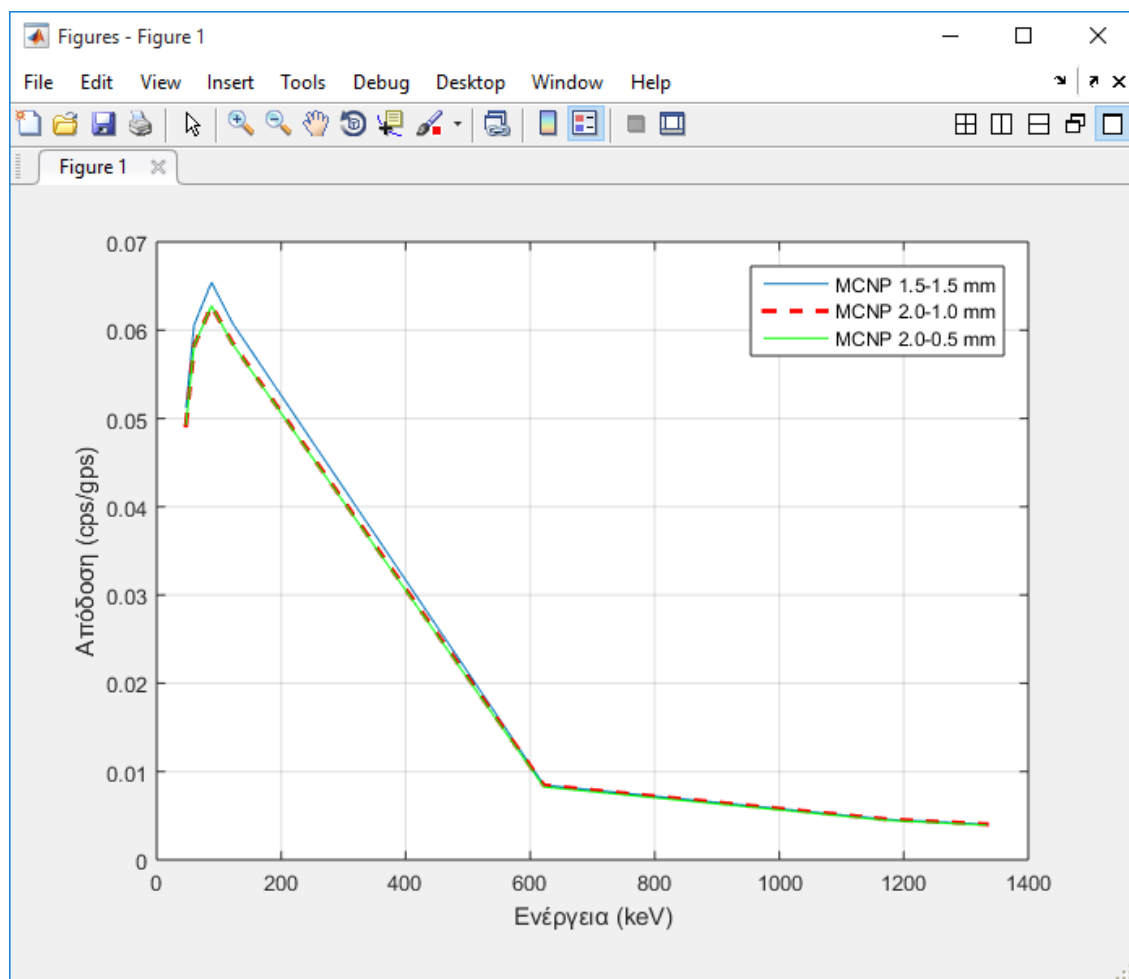
**Σχήμα 3.6.4:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 100ml πυκνότητας 1gr/cm<sup>3</sup> για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για το Σχήμα 3.6.4

```
%Για όγκο 100ml & 1.0gr/cm^3
xc=[47 60 88 122 622 1173 1333]; %Ενέργεια (keV)
y15=[0.0435931 0.0533491 0.059003 0.0555706 0.00820569
0.00448848 0.00395296]; %1.5-1.5
y16=[0.0435927 0.0533488 0.0589941 0.0554622 0.00802985
0.00437341 0.00385097]; %2.0-1.0
y17=[0.045347 0.055525 0.061508 0.057701 0.008238 0.004476
0.003944]; %2.0-0.5
plot(xc,y15,xc,y16,'r',xc,y17,'g')
```

Ενέργεια(KeV)	Μcnp 1.5-1.5 (mm)	Μcnp 2.0-1.0 (mm)	Μcnp 2.0-0.5 (mm)
47	0.0511965	0.049223	0.049223
60	0.0605636	0.058194	0.058194
88	0.0654227	0.062762	0.062753
122	0.0607641	0.058521	0.058407
662	0.00846382	0.00843	0.008249
1173	0.00457067	0.004583	0.004466
1333	0.00402226	0.004031	0.003927

**Πίνακας 3.6.5:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 100ml πυκνότητας 0.7gr/cm<sup>3</sup> για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer



**Σχήμα 3.6.5:** Προσομοίωση δείγματος H<sub>2</sub>O 100ml πυκνότητας 0,7gr/cm<sup>3</sup> για διάφορες τιμές Side και Bottom Dead Layer

#### Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για το Σχήμα 3.6.5

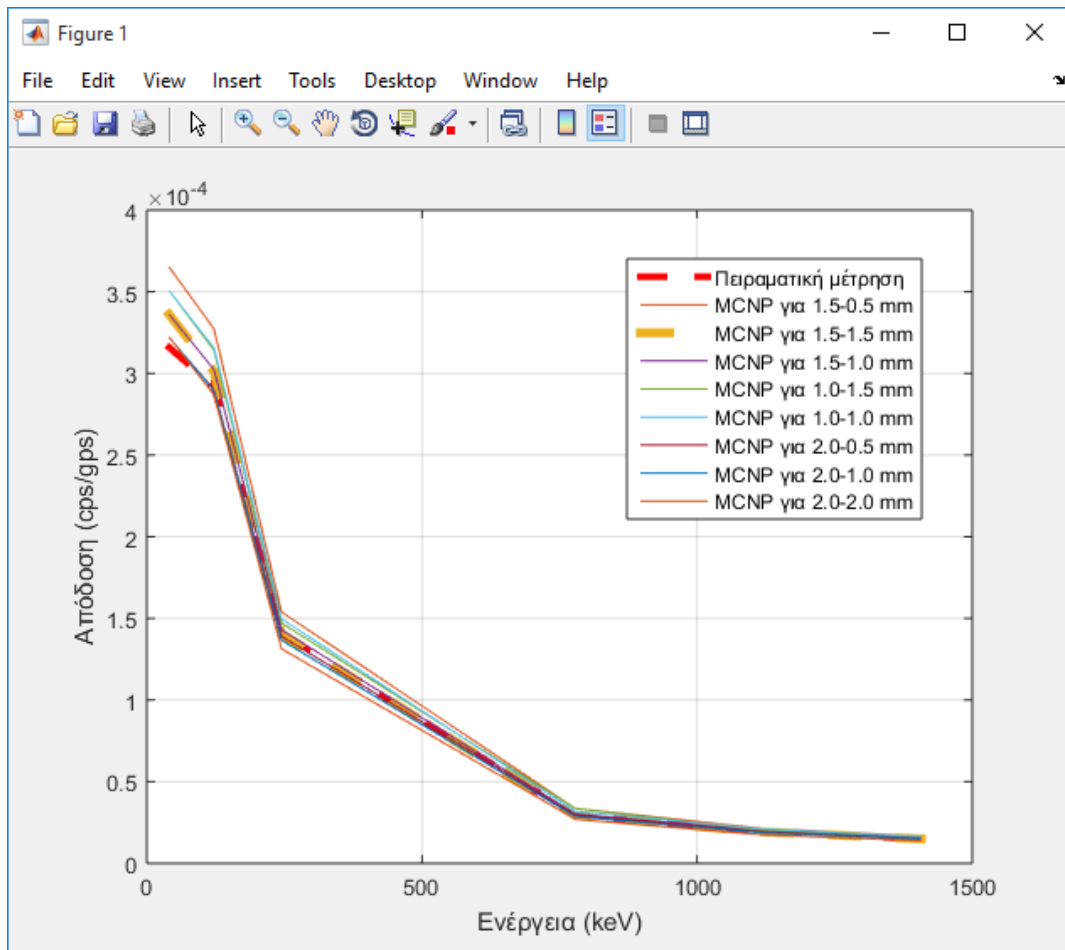
```
%Για όγκο 100ml & 0.7gr/cm^3
xc=[47 60 88 122 622 1173 1333]; %Ενέργεια (keV)
y18=[0.0511965 0.0605636 0.0654227 0.0607641 0.00846382
0.0045706 0.00402226]; %1.5-1.5
y19=[0.049223 0.058194 0.062762 0.058521 0.00843 0.004583
0.004031]; %2.0-1.0
y20=[0.049223 0.058194 0.062753 0.058407 0.008249 0.004466
0.003927]; %2.0-0.5
plot(xc,y18,xc,y19,'r',xc,y20,'g')
```

## 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΘΗΚΑΝ

Ένας από τους στόχους της πτυχιακής εργασίας ήταν η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με εκείνα των προσομοιώσεων του MCNP έτσι ώστε να προκύψει η καλύτερη διαστασιολόγηση της νεκρής ζώνης, η οποία αν προσομοιωθεί υπολογίζει αποδόσεις κοντινές στις πραγματικές που υπάρχουν από πειραματικές μετρήσεις.

Ύστερα από πολυάριθμες προσομοιώσεις, οι οποίες παρουσιάστηκαν παραπάνω, στον MCNP προέκυψε το συμπέρασμα ότι **η πιο καλή και με τη λιγότερη απόκλιση από τα πραγματικά δεδομένα νεκρή ζώνη είναι αυτή που χρησιμοποιεί 1,5 mm από τα πλάγια και 1,5 mm από το κάτω επίπεδο**. Να προσθέσουμε ότι υπάρχει και front dead layer που από τον κατασκευαστή είναι της τάξης του 0,5μm.

*Για να δικαιολογήσουμε την επιλογή μας θα ακολουθήσουν κάποια συγκριτικά διαγράμματα των διαφόρων προσομοιώσεων με την αντίστοιχη πειραματική μέτρηση.*



**Σχήμα 4.1:** Σύγκριση αποδόσεων από προσομοιώσεις διαφόρων διαστάσεων νεκρής ζώνης με την πειραματική για σημειακή πηγή Eu-152 στα 63cm.

Στο συγκριτικό γράφημα του σχήματος 4.1 παρουσιάζονται οι αποδόσεις προσομοιώσεων σημειακής πηγής Eu-152 τοποθετημένη στα 63 cm απόστασης από τον ανιχνευτή, για διαφορετικές νεκρές ζώνες.

Ειδικότερα, η νεκρή ζώνη τροποποιήθηκε κατά

- 0.5mm
- 1mm
- 1.5mm
- 2mm

από την **κάτω** και τις **πλάγιες** πλευρές. Στο ίδιο γράφημα υπάρχει και η απόδοση της εργαστηριακής μέτρησης στον ανιχνευτή για να μπορέσει να γίνει η σύγκριση. Χρησιμοποιήσαμε **διακεκομμένη γραμμή** στο **πειραματικό** και στο αποτέλεσμα για **νεκρή ζώνη 1.5mm από πλάγια και 1.5mm από κάτω** και έτσι φαίνεται ξεκάθαρα ότι στο μεγαλύτερο μέρος **ταυτίζονται**.

Από τα παραπάνω βγήκε το **συμπέρασμα** ότι μικρές αλλαγές στον καθορισμό της νεκρής ζώνης επηρεάζουν αρκετά τις προσομοιωμένες αποδόσεις.

Στους πίνακες 4.1, 4.2 που ακολουθούν, στον πρώτο αναγράφονται συγκεντρωτικά οι αποδόσεις των διάφορων τιμών νεκρής ζώνης που προσομοιώθηκαν ,ενώ στο δεύτερο υπολογίστηκαν οι λόγοι των προσομοιωμένων αποδόσεων προς των πειραματικών. Θα δούμε ότι ο λόγος θα πλησιάζει την μονάδα καλύτερα στην περίπτωση για **νεκρή ζώνη 1.5mm από πλάγια και 1.5mm από κάτω**.

Ενέργεια (KeV)	Πειραματικό	1,5-1,5 (mm)	1,5-1,0 (mm)	1,5-0,5 (mm)	1,0-1,5 (mm)
40.43	0,000315958	0.00033617	0,00033617	0,0003652	0.00035074
122.09	0,000291872	0.00030108	0,00030236	0.00032726	0.00031418
244.83	0,000141086	0.00014056	0,00014301	0.00015387	0.00014711
778.47	0,0000292444	0.00002928	0,00003023	0.00003365	0.00003365
1111.48	0,0000197594	0.00001939	0,00002002	0.00002159	0.00002048
1407.43	0,0000147497	0.00001497	0,00001555	0.00001663	0.00001576
Ενέργεια (KeV)	1,0-1,0 (mm)	2,0-0,5 (mm)	2,0-1,0 (mm)	2,0-2,0 (mm)	
40.43	0,0003652	0.00033617	0,00033617	0.00035074	
122.09	0.00032726	0.00030108	0,00030236	0.00031418	
244.83	0.00015387	0.00014056	0,00014301	0.00014711	
778.47	0.00003365	0.00002928	0,00003023	0.00003365	
1111.48	0.00002159	0.00001939	0,00002002	0.00002048	
1407.43	0.00001663	0.00001497	0,00001555	0.00001576	

**Πίνακας 4.1:** Πειραματική απόδοση και αποδόσεις προσομοιώσεων πηγής Eu-152 στα 63cm για διάφορες διαστάσεις νεκρής ζώνης.

Ενέργεια (keV)	Λόγος προσομοιωμένης απόδοσης προς την πειραματική απόδοση			
	Νεκρή ζώνη 1,5mm-1,5mm	Νεκρή ζώνη 1,5mm-0,5mm	Νεκρή ζώνη 1,5mm- 1mm	Νεκρή ζώνη 1mm-1,5mm
40.43	1,063970528	1,155849828	1,063970528	1,110084252
122.09	1,031548076	1,121244929	1,03593356	1,076430764
244.83	0,996271777	1,0906114	1,013637072	1,042697362
778.47	1,001217327	1,150647645	1,033702179	1,150647645
1111.48	0,9813051	1,092644513	1,01318866	1,036468719
1407.43	1,014935897	1,127480559	1,054258731	1,068496308
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,014874784</b>	<b>1,123079813</b>	<b>1,035781788</b>	<b>1,080804175</b>
Ενέργεια (keV)	Λόγος προσομοιωμένης απόδοσης προς την πειραματική απόδοση			
	Νεκρή ζώνη 1mm- 1mm	Νεκρή ζώνη 2 mm-0,5mm	Νεκρή ζώνη 2 mm- 1mm	Νεκρή ζώνη 2mm-2mm
40.43	1,110084	1,02000899	1,020009	1,020009
122.09	1,080919	0,99478539	0,991599	0,982623
244.83	1,061055	0,98372624	0,968346	0,930992
778.47	1,089097	1,07781319	0,979333	0,923938
1111.48	1,072907	0,99294513	0,959543	0,89274
1407.43	1,111209	1,03595327	1,007478	0,934934
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,087545</b>	<b>1,0175387</b>	<b>0,987718</b>	<b>0,947539</b>

**Πίνακας 4.2:** Λόγοι προσομοιωμένων αποδόσεων προς πειραματικών για διάφορες διαστάσεις νεκρής ζώνης πηγής Eu-152στα 63cm.

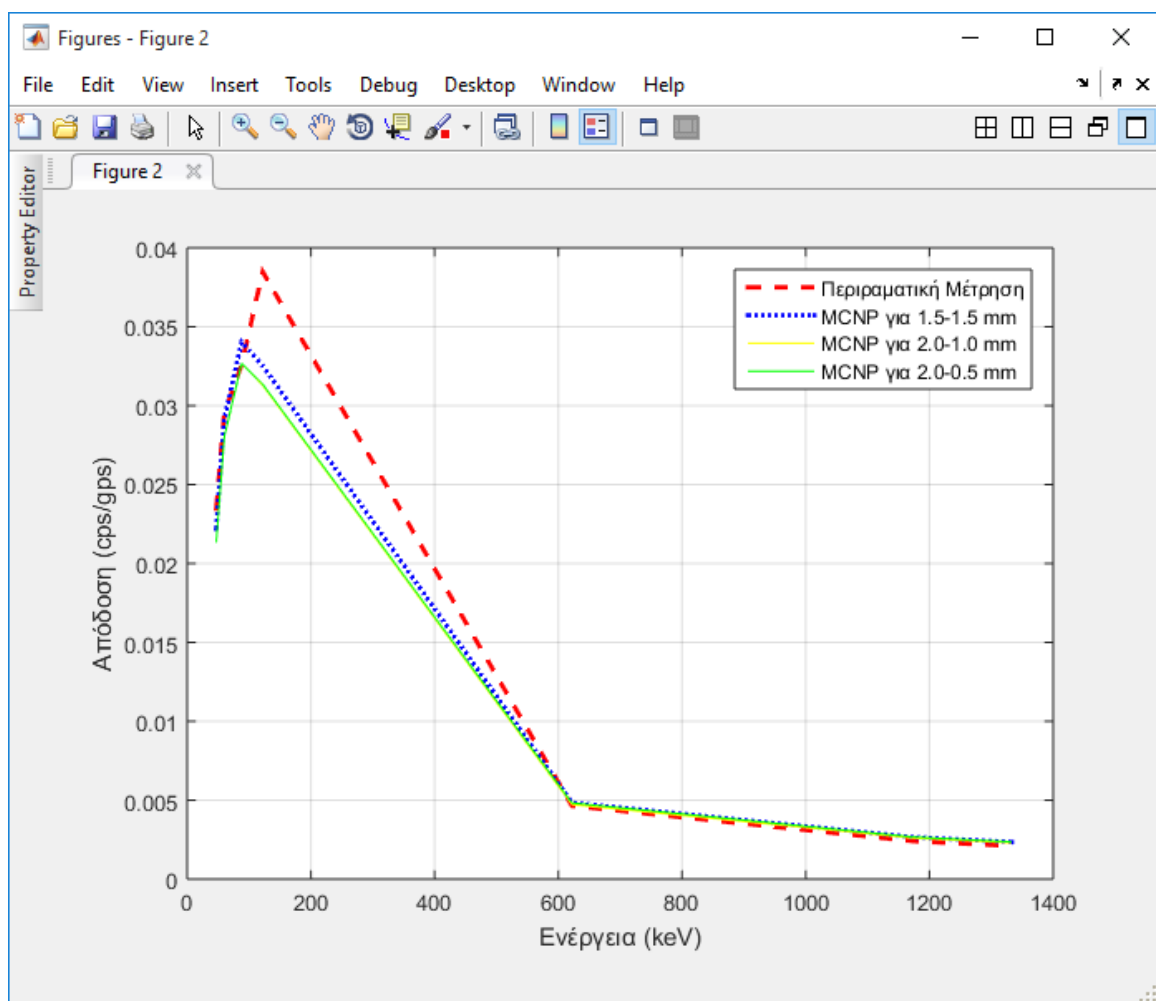
Στα παραπάνω αποτελέσματα βλέπουμε την προσέγγιση της μονάδας των λόγων προσομοιωμένης προς πειραματικής απόδοσης που αφορούν την επιλεγθείσα γεωμετρία νεκρής ζώνης, που είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα.



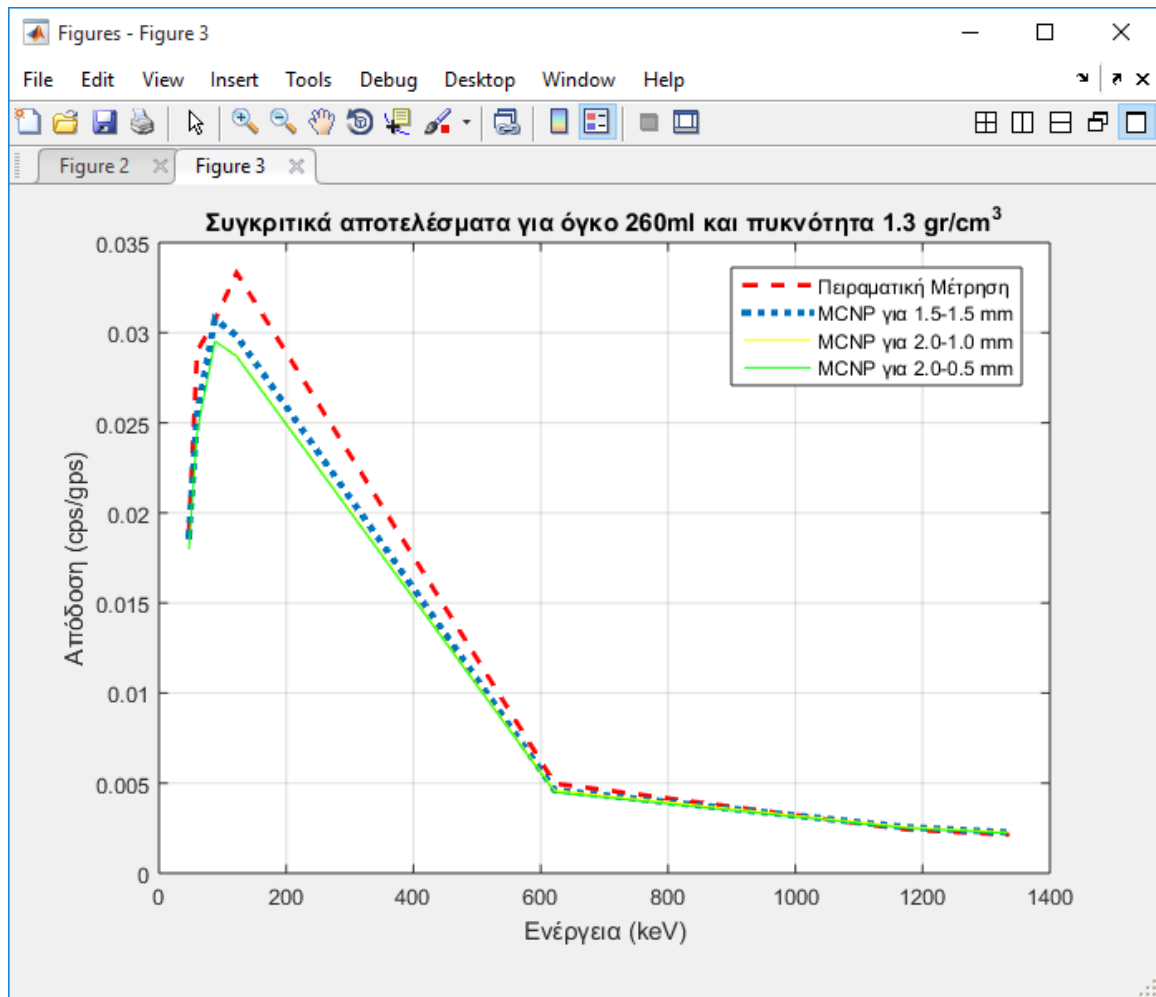
**Βέλτιστη λύση** είναι εκείνη που επιβάλλει νεκρή ζώνη στα **1,5mm - 1,5 mm (side-bottom)**. Επιλέχθηκε αυτή η λύση καθώς παρουσιάζει **μικρότερη απόκλιση** από τη μετρητική.

Για να επαληθευθεί περαιτέρω η λύση των 1.5mm – 1.5 mm, χρειάστηκε να προσομοιωθούν δείγματα κυλινδρικής γεωμετρίας που περιείχαν H<sub>2</sub>O με τα εξής χαρακτηριστικά :

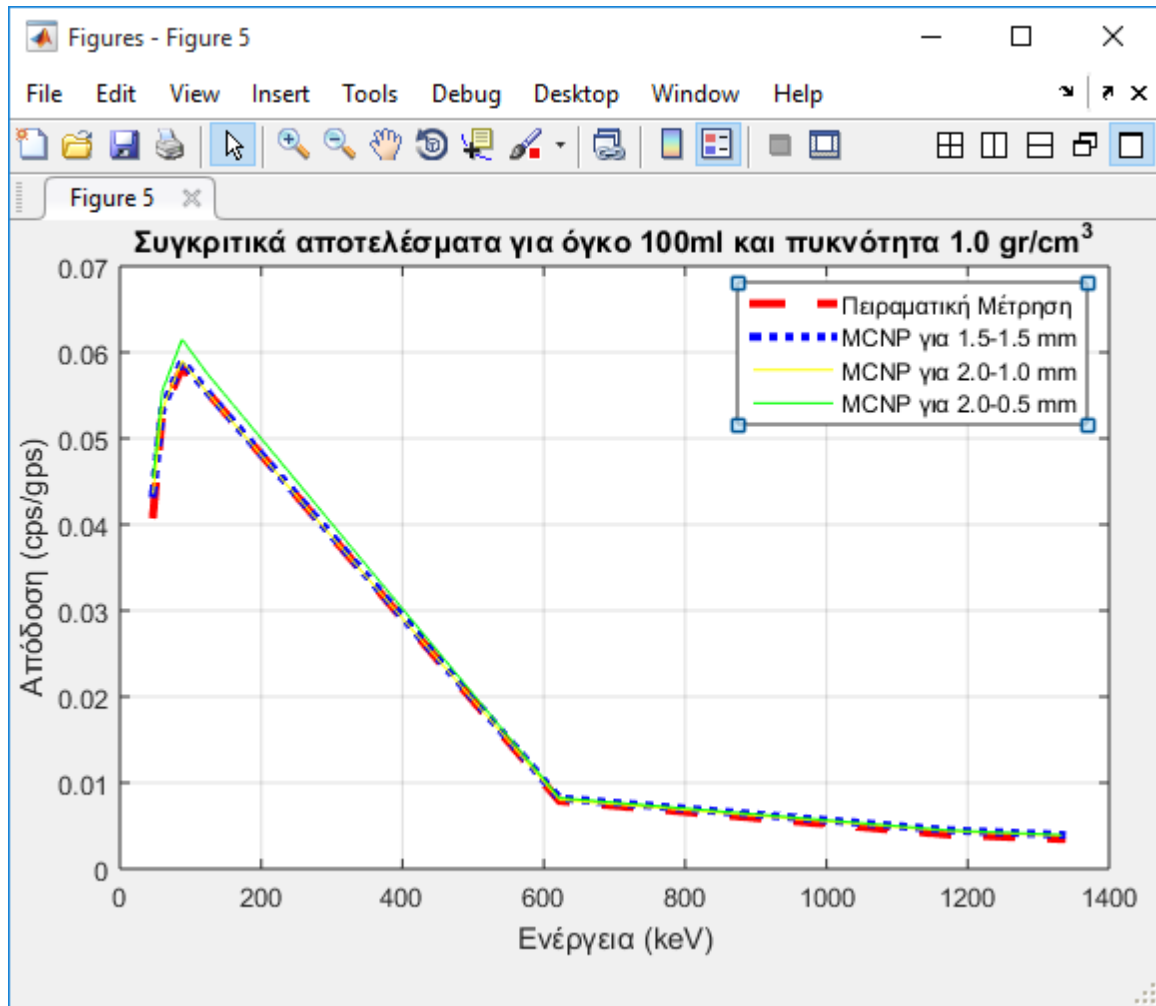
- όγκου 260 ml, πυκνοτήτων 1.3 gr/cm<sup>3</sup>, 1.0 gr/cm<sup>3</sup> και
- όγκου 100 ml πυκνοτήτων 1.0 gr /cm<sup>3</sup>, 0.7 gr /cm<sup>3</sup>



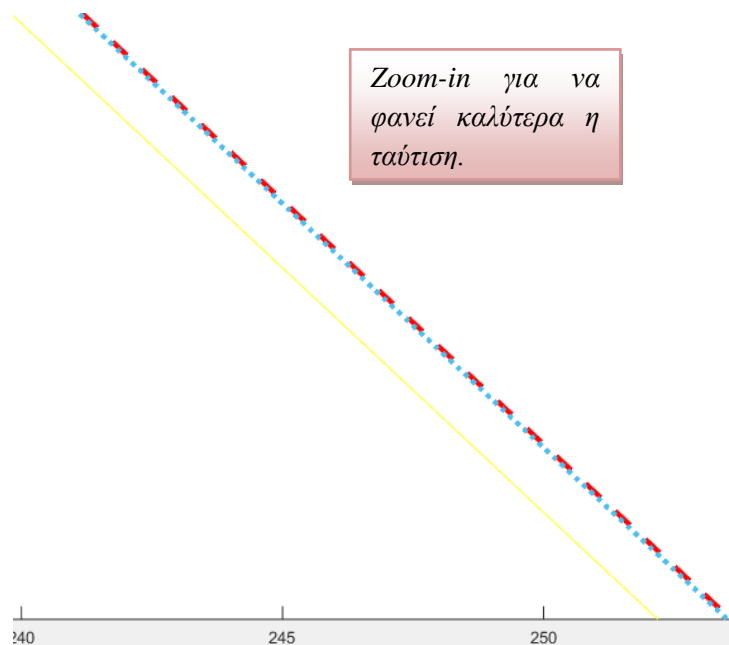
**Σχήμα 4.2:** Σύγκριση απόδοσης από προσομοίωση διάφορων τιμών νεκρής ζώνης με την πειραματική, για κυλινδρικής γεωμετρίας δείγμα νερού πυκνότητας 1 gr/cm<sup>3</sup>, 260 ml

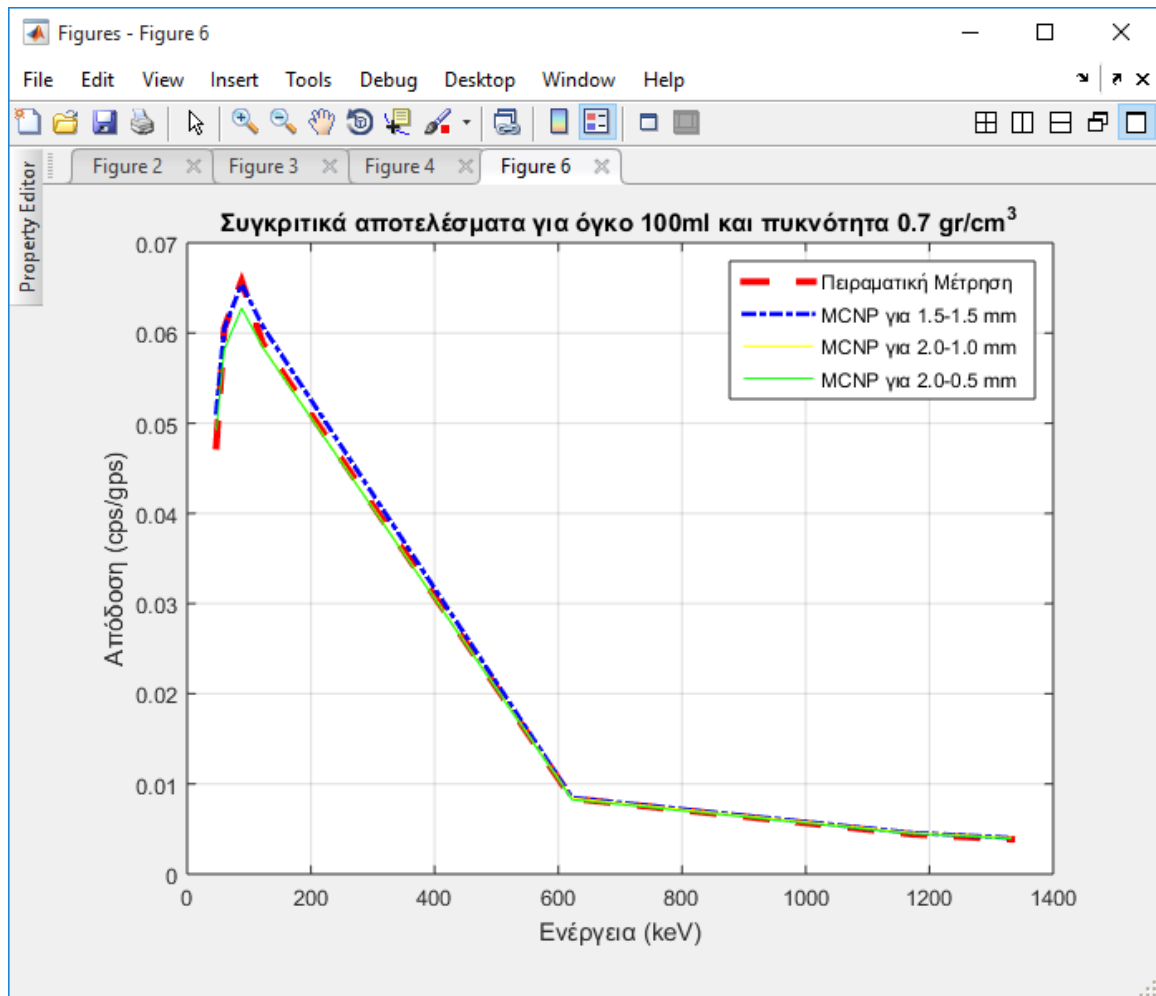


**Σχήμα 4.3:** Σύγκριση απόδοσης από προσομοίωση διάφορων τιμών νεκρής ζώνης με την πειραματική, για κυλινδρικής γεωμετρίας δείγμα νερού πυκνότητας  $1,3 \text{ gr/cm}^3$ , 260 ml



**Σχήμα 4.4:** Σύγκριση απόδοσης από προσομοίωση διάφορων τιμών νεκρής ζώνης με την πειραματική, για κυλινδρικής γεωμετρίας δείγμα νερού πυκνότητας  $1 \text{ gr/cm}^3$ ,  $100 \text{ ml}$





**Σχήμα 4.5:** Σύγκριση απόδοσης από προσομοίωση διάφορων τιμών νεκρής ζώνης με την πειραματική, για κυλινδρικής γεωμετρίας δείγμα νερού πυκνότητας 0.7 gr/cm<sup>3</sup>, 100 ml

Στο σημείο αυτό μπορούμε να πούμε ότι **επιβεβαιώνεται** η επιλογή μας για το **dead layer**, καθώς βλέπουμε ότι τα **πειραματικά διαγράμματα** για το δείγμα νερού τείνουν να **επικαλυφθούν** πλήρως από τα διαγράμματα των προσομοιώσεων του MCNP για τιμές νεκρής ζώνης **1,5mm-1,5mm**.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Έγινε εφικτός ο **καθορισμός** της γεωμετρίας του κρυστάλλου του ανιχνευτή με χρήση σημειακής πηγής Eu-152.
- **Μικρές αλλαγές** στον καθορισμό της νεκρής ζώνης επηρεάζουν αρκετά τις προσομοιωμένες αποδόσεις.
- Ύπαρξη **ταύτισης** της πειραματικής απόδοσης της σημειακής πηγής με αυτή της προσομοίωσης. Αυτό επετεύχθη όταν η **νεκρή ζώνη** του κρυστάλλου του ανιχνευτή καθορίστηκε να έχει διαστάσεις **1,5mm από τα πλάγια 1,5mm** από το κάτω επίπεδο (side and bottom dead layer).
- **Επέκταση** του προσδιορισμού της απόδοσης με την βοήθεια προσομοίωσης Monte Carlo και σε **άλλες γεωμετρίες** δειγμάτων π.χ. **κυλινδρική** γεωμετρία.
- **Ταύτιση** και για **κυλινδρική** γεωμετρία. Σύγκριση με πειραματική απόδοση για διαφορετικές πυκνότητες και ποσότητες δείγματος.
- Παρατηρώντας και το διάγραμμα η καμπύλη απόδοσης της πηγής νερού MCNP 1,5 mm side - 1,5bottom, είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των πειραματικών μετρήσεων **εκτός** από κάποια σημεία στις **χαμηλές ενέργειες** που μπορούν να εξηγηθούν. Στις χαμηλές ενέργειες το πειραματικό μπορεί να μην έχει 100% αληθή αποτελέσματα καθώς το σκεδασμένο κομμάτι μπλέκει με το ασκέδαστο **λόγω** του **εύρους της φωτοκορυφής**. Για παράδειγμα, στα 122 keV λόγω της χαμηλής ενεργότητας της πηγής, χρειάστηκε να υπολογιστεί **χειροκίνητα** και όχι αυτόματα μέσω του προγράμματος που παίρναμε τις μετρήσεις.
- **Δυνατότητα προσομοιώσεων** και **άλλων γεωμετριών** και προσδιορισμός της απόδοσης **χωρίς** χρήση πιστοποιημένων ραδιενεργών πηγών.

- Ο **ανιχνευτής υπερκαθαρού Γερμανίου** που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας παρουσιάζει **πολύ καλή διακριτική ικανότητα** σε όλο το φάσμα των ενεργειών και αρκετά υψηλή απόδοση για ενέργειες σχεδόν μέχρι τα 1000 keV, προσφέροντας πολύ καλά αποτελέσματα στο συγκεκριμένο εύρος ενεργειών. Για **υψηλότερες ενέργειες**, λόγω του **μικρού όγκου** του κρυστάλλου, **παρουσιάζεται** μια μικρή **αβεβαιότητα**. Εάν το **ζητούμενο** είναι **υψηλής ακρίβειας** μετρήσεις σε τόσο υψηλές ενέργειες προτείνεται η **χρήση** κρυστάλλου **μεγαλύτερου** όγκου. Βέβαια η μέτρηση φωτοκορυφών υψηλών ενεργειών με τον συγκεκριμένο κρύσταλλο δεν είναι **απαγορευτική**, με την προϋπόθεση όμως μεγάλης διάρκειας μέτρησης.
- Η **απόδοση** του ανιχνευτή είναι άμεσα **εξαρτώμενη** από την **ενέργεια** της ακτινοβολίας  $\gamma$ . Οι **χαμηλής ενέργειας** ακτίνες  $\gamma$  επηρεάζονται από την **αυτοαπορρόφηση**, ενώ στις **υψηλότερες** ενέργειες έχουμε την εμφάνιση φαινομένων **Compton** και **δίδυμων γενέσεων** καθώς και της πιθανότητας **μη αλληλεπίδρασης** των ακτινών  $\gamma$  με τον ανιχνευτή. Αυτά τα φαινόμενα έχουν ως αποτέλεσμα τη **μείωση** της **απόδοσης** σε αυτές τις περιοχές. Οι **υψηλότερες αποδόσεις** στον ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται για ακτινοβολίες  $\gamma$  μεταξύ των ενεργειών **40 και 122 keV**, ανάλογα με την εκάστοτε γεωμετρία.
- Λαμβάνοντας υπόψη την **ποιότητα** της πηγής και το **κόστος** σε **χρόνο, χρήμα** αλλά και τα ποσοστά **επικινδυνότητας** μπορούμε να πούμε ότι οι **προσομοιώσεις MCNP** διάφορων γεωμετριών είναι μια **ικανοποιητική λύση** για την εξυπηρέτηση μας σε τομείς της τεχνολογίας.

## 6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στους πίνακες Π1 και πίνακα Π2, έχει επιτευχθεί η αναγωγή της ενεργότητας σημειακής πηγής Ευρωπίου Eu-152 της ημερομηνίας 15/5/2000 στην ενεργότητα της ημερομηνίας που είχε διεξαχθεί το πείραμα, 6/11/2014.

**Πίνακας Π1**

<b>Eu-152</b>		
T1/2	13,537	[y]
Ao	4114000	[Bq]
λ	0,051203899	[1/y]
t <sub>specification</sub>	15/5/2000	
t <sub>measurement</sub>	6/11/2014	
t	14,47775496	[y]
A <sub>measure</sub>	1960262,296	[Bq]
r	63	[cm]
4πr <sup>2</sup>	49875,92497	

**Πίνακας Π2**

<b>Ενέργεια (keV)</b>	<b>FY</b>	<b>Source gamma/s</b>	<b>counts/200s</b>	<b>Απόδοση</b>
40,43	0,594	1164395,804	73580	0,000315958
122,09	0,284	556714,492	32497,93	0,000291872
244,83	0,075	1,47E+05	4148,49	0,000141086
778,47	0,129	252873,8361	1479,03	2,92444E-05
1111,48	0,135	264635,4099	1045,81	1,97594E-05
1407,43	0,208	407734,5575	1202,79	1,47497E-05

### Αρχείο Εισόδου για σημειακή πηγή:

c Canberra 9% 8/11/14

c geometry

c cell cards

c

1 2 -0.00129 -15 16 -27 (14:26:-1) \$ air over detector  
2 3 -2.69 1 -26 (25:-2) -14 \$ Al cover  
3 2 -0.00129 2 -25 (23:-4) -11 #5 #16 #17 #4 \$ air inside cover except front air  
4 4 -8.96 2 -3 -20 18 \$ Cu  
5 3 -2.69 2 -4 -18 \$ Al cryostat  
6 3 -2.69 4 -5 -23 19 \$ Al base of holder  
7 4 -8.96 4 -6 -17 \$ Cu inside teflon  
8 1 -2.2 4 -6 -19 #7 \$ PTFE  
9 2 -0.00129 11 -12 -25 21 \$ air below front window above holder  
10 2 -0.00129 5 -6 -22 19 \$ air base of crystal  
13 5 -5.36 6 -30 -49 #21 #20 \$ Ge Crystal  
11 2 -0.00129 6 -11 -22 21 \$ air inside holder-crystal  
14 2 -0.00129 12 -13 -25 \$ air in front window  
15 10 -1.42 13 -14 -25 \$ carbon window  
16 3 -2.69 8 -9 -24 23 \$ Al 1st ear  
17 3 -2.69 11 -31 -24 23 \$ Al 2nd ear  
18 3 -2.69 5 -11 -23 22 \$ Al holder  
19 5 -5.36 6 -12 -21 49 \$ Ge dead layer side 1.5mm  
20 5 -5.36 6 -48 -49 29 \$ Ge dead layer bottom 1.5mm  
21 2 -0.00129 28 -29 6 -7 \$ groove  
22 5 -5.36 30 -12 -49 \$ Ge dead layer front 0.5microm  
25 0 15: -16 :27 \$ outside

c

c surface cards

c

c

c

c normal to x axis surfaces

1 px 0.

2 px 1.2

3 px 4.85

4 px 6.05

5 px 6.95



```

6  px 10.3   $ start of crystal
7  px 10.35  $depth groove
8  px 10.3   $start of 1st ear
9  px 11.    $end of 1st ear
10 px 11.3   $start of 2nd ear
31 px 12.    $end of 2nd ear
11 px 12.15  $ end of holder
12 px 12.3   $ front window of crystal
13 px 12.75
14 px 12.8
15 px 80.    $ polu megalo
16 px -2.

c    Cylinder surfaces
17 cx 0.2
18 cx 0.5
19 cx 0.5
20 cx 0.9
21 cx 2.525  $outside of crystal
22 cx 2.625  $ start holder
23 cx 2.775  $ end holder
24 cx 2.965  $ out of ear
25 cx 3.65
26 cx 3.8
27 cx 6.
28 cx 0.5   $ groove cylinder start
29 cx 0.55  $ groove cylinder end
30 px 12.29995 $ front dead layer 0.5micro
C    complementary surfaces (dead layer)
48 px 10.45 $bottom dead layer
49 cx 2.375 $outside of active Ge

c

c data cards

c

mode p
imp:p 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
c

c source specification
c source distance from front window 63cm without petri

```

```

sdef pos 75.3 0. 0. erg=0.0404
c
c
c
c tallies specification
c
f8:p 13
e8 0. 0.0399 0.0409
c
c material cards
c
m1 9000 0.667 6000 0.333 $ PTFE (C2F4)
m2 7014 3.64E-5 $ Air
    8016 9.74E-6
m3 13000 1 $ Al
m4 29000 1 $ Cu
m5 32000 1 $ Ge
m8 8000 -0.501 $ O
    13000 -0.073 $ Al
    26000 -0.039 $ Fe
    14000 -0.327 $ Si
    6000 -0.021 $ C
    20000 -0.014 $ Ca
    19000 -0.009 $ k
    12000 -0.005 $ Mg
    7000 -0.001 $ N
    11000 -0.006 $ Na
    22000 -0.004 $ Ti
m9 1000 2 $H2O
    8000 1
m10 6000 1 $aluminio
c
c problem cut-offs
c
nps 100000000
ctme 300
c

```

**Αρχείο Εξόδου για σημειακή πηγή:**

lmcnp version 4c2 ld=01/20/01

03/16/15 12:45:10

\*\*\*\*\*

probid = 03/16/15 12:45:10

i=canb90 o=canb90.o

- 1- c Canberra 9% 8/11/14
- 2- c geometry
- 3- c cell cards
- 4- c
- 5- 1 2 -0.00129 -15 16 -27 (14:26:-1) \$ air over detector
- 6- 2 3 -2.69 1 -26 (25:-2) -14 \$ Al cover
- 7- 3 2 -0.00129 2 -25 (23:-4) -11 #5 #16 #17 #4 \$ air inside cover except
- 8- 4 4 -8.96 2 -3 -20 18 \$ Cu
- 9- 5 3 -2.69 2 -4 -18 \$ Al cryostat
- 10- 6 3 -2.69 4 -5 -23 19 \$ Al base of holder
- 11- 7 4 -8.96 4 -6 -17 \$ Cu inside teflon
- 12- 8 1 -2.2 4 -6 -19 #7 \$ PTFE
- 13- 9 2 -0.00129 11 -12 -25 21 \$ air below front window above hold
- 14- 10 2 -0.00129 5 -6 -22 19 \$ air base of crystal
- 15- 13 5 -5.36 6 -30 -49 #21 #20 \$ Ge Crystal
- 16- 11 2 -0.00129 6 -11 -22 21 \$ air inside holder-crystal
- 17- 14 2 -0.00129 12 -13 -25 \$ air in front window
- 18- 15 10 -1.42 13 -14 -25 \$ carbon window
- 19- 16 3 -2.69 8 -9 -24 23 \$ Al 1st ear
- 20- 17 3 -2.69 11 -31 -24 23 \$ Al 2nd ear
- 21- 18 3 -2.69 5 -11 -23 22 \$ Al holder
- 22- 19 5 -5.36 6 -12 -21 49 \$ Ge dead layer side 1.5mm
- 23- 20 5 -5.36 6 -48 -49 29 \$ Ge dead layer bottom 1.5mm
- 24- 21 2 -0.00129 28 -29 6 -7 \$ groove
- 25- 22 5 -5.36 30 -12 -49 \$ Ge dead layer front 0.5microm
- 26- 25 0 15: -16 :27 \$ outside
- 27-
- 28- c
- 29- c surface cards
- 30- c
- 31- c
- 32- c
- 33- c normal to x axis surfaces

34- 1 px 0.  
 35- 2 px 1.2  
 36- 3 px 4.85  
 37- 4 px 6.05  
 38- 5 px 6.95  
 39- 6 px 10.3 \$ start of crystal  
 40- 7 px 10.35 \$depth groove  
 41- 8 px 10.3 \$start of 1st ear  
 42- 9 px 11. \$end of 1st ear  
 43- 10 px 11.3 \$start of 2nd ear  
 44- 31 px 12. \$end of 2nd ear  
 45- 11 px 12.15 \$ end of holder  
 46- 12 px 12.3 \$ front window of crystal  
 47- 13 px 12.75  
 48- 14 px 12.8  
 49- 15 px 80. \$ polu megalo  
 50- 16 px -2.  
 51- c Cylinder surfaces  
 52- 17 cx 0.2  
 53- 18 cx 0.5  
 54- 19 cx 0.5  
 55- 20 cx 0.9  
 56- 21 cx 2.525 \$outside of crystal  
 57- 22 cx 2.625 \$ start holder  
 58- 23 cx 2.775 \$ end holder  
 59- 24 cx 2.965 \$ out of ear  
 60- 25 cx 3.65  
 61- 26 cx 3.8  
 62- 27 cx 6.  
 63- 28 cx 0.5 \$ groove cylinder start  
 64- 29 cx 0.55 \$ groove cylinder end  
 65- 30 px 12.29995 \$ front dead layer 0.5micro  
 66- C complementary surfaces (dead layer)  
 67- 48 px 10.45 \$bottom dead layer  
 68- 49 cx 2.375 \$outside of active Ge  
 69-  
 70- c  
 71- c data cards  
 72- c



110- c problem cut-offs  
 111- c  
 112- nps 100000000  
 113- ctme 300  
 114- c

surface 6 and surface 8 are the same. 8 will be deleted.

surface 18 and surface 19 are the same. 19 will be deleted.

surface 18 and surface 28 are the same. 28 will be deleted.

warning. 3 surfaces were deleted for being the same as others.

warning. 1 materials had unnormalized fractions. print table 40.

lcells print table 60

	atom	gram		photon				
cell	mat	density	density	volume	mass	pieces	importance	
1	1	2	5.38594E-05	1.29000E-03	8.69331E+03	1.12144E+01	1	1.0000E+00
2	2	3	6.00384E-02	2.69000E+00	9.51620E+01	2.55986E+02	1	1.0000E+00
3	3	2	5.38594E-05	1.29000E-03	2.98098E+02	3.84547E-01	1	1.0000E+00
4	4	4	8.49114E-02	8.96000E+00	6.42142E+00	5.75359E+01	1	1.0000E+00
5	5	3	6.00384E-02	2.69000E+00	3.80918E+00	1.02467E+01	1	1.0000E+00
6	6	3	6.00384E-02	2.69000E+00	2.10661E+01	5.66679E+01	1	1.0000E+00
7	7	4	8.49114E-02	8.96000E+00	5.34071E-01	4.78527E+00	1	1.0000E+00
8	8	1	7.94674E-02	2.20000E+00	2.80387E+00	6.16852E+00	1	1.0000E+00
9	9	2	5.38594E-05	1.29000E-03	3.27364E+00	4.22299E-03	1	1.0000E+00
10	10	2	5.38594E-05	1.29000E-03	6.98882E+01	9.01557E-02	1	1.0000E+00
11	13	5	4.44655E-02	5.36000E+00	3.29164E+01	1.76432E+02	1	1.0000E+00
12	11	2	5.38594E-05	1.29000E-03	2.99315E+00	3.86117E-03	1	1.0000E+00
13	14	2	5.38594E-05	1.29000E-03	1.88342E+01	2.42962E-02	1	1.0000E+00
14	15	10	7.11954E-02	1.42000E+00	2.09269E+00	2.97162E+00	1	1.0000E+00
15	16	3	6.00384E-02	2.69000E+00	2.39835E+00	6.45157E+00	1	1.0000E+00
16	17	3	6.00384E-02	2.69000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0	1.0000E+00
17	18	3	6.00384E-02	2.69000E+00	1.32324E+01	3.55951E+01	1	1.0000E+00
18	19	5	4.44655E-02	5.36000E+00	4.61814E+00	2.47532E+01	1	1.0000E+00
19	20	5	4.44655E-02	5.36000E+00	2.51553E+00	1.34833E+01	1	1.0000E+00

20	21	2	5.38594E-05	1.29000E-03	8.24668E-03	1.06382E-05	1	1.0000E+00
21	22	5	4.44655E-02	5.36000E+00	8.86027E-04	4.74911E-03	1	1.0000E+00
22	25	0	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0	0.0000E+00

total 9.27398E+03 6.62803E+02

warning. surface 10 is not used for anything.

random number control 0.505667699700000E+10

minimum source weight = 1.0000E+00 maximum source weight = 1.0000E+00

5 warning messages so far.

1cross-section tables

print table 100

table length

tables from file mcplib02

6000.02p	623	01/15/93
7000.02p	623	01/15/93
8000.02p	623	01/15/93
9000.02p	623	01/15/93
13000.02p	643	01/15/93
29000.02p	663	01/15/93
32000.02p	691	01/15/93

total 4489

maximum photon energy set to 100.0 mev (maximum electron energy)

tables from file el03

6000.03e	2333	6/6/98
7000.03e	2333	6/6/98
8000.03e	2333	6/6/98
9000.03e	2333	6/6/98
13000.03e	2337	6/6/98
29000.03e	2347	6/6/98

32000.03e 2349

6/6/98

warning. material 3 has been set to a conductor.

warning. material 4 has been set to a conductor.

warning. material 5 has been set to a conductor.

warning. material 10 has been set to a conductor.

decimal words of dynamically allocated storage

general 1048454

tallies 6548

bank 46724

cross sections 8978

total 1106840 = 4427360 bytes

available (mdas) 4000000

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

dump no. 1 on file runtpe nps = 0 coll = 0 ctm = 0.00 nrn = 0

9 warning messages so far.

1problem summary

run terminated when 100000000 particle histories were done.

+ 03/16/15 12:48:54

c Canberra 9% 8/11/14 probid = 03/16/15 12:45:10

0

photon creation	tracks	weight	energy	photon loss	tracks	weight	energy
	(per source particle)			(per source particle)			

source	100000000	1.0000E+00	4.0400E-02	escape	99884926	9.9885E-01	
	4.0348E-02						



				energy cutoff	0 0.	2.8033E-09
				time cutoff	0 0.	0.
weight window	0 0.	0.		weight window	0 0.	0.
cell importance	0 0.	0.		cell importance	0 0.	0.
weight cutoff	0 0.	0.		weight cutoff	0 0.	0.
energy importance	0 0.	0.		energy importance	0 0.	0.
dxtran	0 0.	0.		dxtran	0 0.	0.
forced collisions	0 0.	0.		forced collisions	0 0.	0.
exp. transform	0 0.	0.		exp. transform	0 0.	0.
from neutrons	0 0.	0.		compton scatter	0 0.	5.1566E-06
bremsstrahlung	666	6.6600E-06	4.1915E-08	capture	135074	1.3507E-03
						4.8165E-05
p-annihilation	0 0.	0.		pair production	0 0.	0.
photonuclear	0 0.	0.		photonuclear abs	0 0.	0.
electron x-rays	0 0.	0.				
1st fluorescence	19083	1.9083E-04	1.7734E-06			
2nd fluorescence	251	2.5100E-06	3.0647E-09			
total	100020000	1.0002E+00	4.0402E-02	total	100020000	1.0002E+00
						4.0402E-02

number of photons banked	917	average time of (shakes)	cutoffs	
photon tracks per source particle	1.0002E+00	escape	2.5593E-02	tco
				1.0000E+34
photon collisions per source particle	3.5292E-03	capture	1.3178E-01	eco
				1.0000E-03
total photon collisions	352916	capture or escape	2.5737E-02	wc1
				0.0000E+00
		any termination	2.5737E-02	wc2 0.0000E+00

computer time so far in this run	7.46 minutes	maximum number ever in bank	2
computer time in mcrun	3.73 minutes	bank overflows to backup file	0
source particles per minute	2.6841E+07	dynamic storage	1106844 words, 4427376 bytes.
random numbers generated	358677439	most random numbers used was	99 in history 14713899

range of sampled source weights = 1.0000E+00 to 1.0000E+00

1photon activity in each cell

print table 126

tracks	population	collisions	collisions	number	flux	average	average	
cell entering			* weight	weighted	weighted	track weight	track mfp	
		(per history)	energy	energy	(relative)	(cm)		
1	1	100013734	100000084	227761	2.2776E-03	4.0395E-02	4.0395E-02	1.0000E+00
								3.3912E+03
2	2	45412	42572	47868	4.7868E-04	4.0004E-02	4.0004E-02	1.0000E+00
								6.6867E-01
3	3	44487	36982	69	6.9000E-07	4.0221E-02	4.0221E-02	1.0000E+00
								3.3786E+03
4	4	178	179	259	2.5900E-06	3.6581E-02	3.6581E-02	1.0000E+00
								1.9251E-02
5	5	31	31	26	2.6000E-07	3.7232E-02	3.7232E-02	1.0000E+00
								5.7208E-01
6	6	819	820	849	8.4900E-06	3.8160E-02	3.8160E-02	1.0000E+00
								6.0467E-01
7	7	29	31	41	4.1000E-07	3.7487E-02	3.7487E-02	1.0000E+00
								1.9971E-02
8	8	81	81	31	3.1000E-07	3.7770E-02	3.7770E-02	1.0000E+00
								1.6406E+00
9	9	43707	43032	2	2.0000E-08	4.0220E-02	4.0220E-02	1.0000E+00
								3.3778E+03
10	10	1538	1374	2	2.0000E-08	3.8099E-02	3.8099E-02	1.0000E+00
								3.2201E+03
11	13	34600	35167	52541	5.2541E-04	3.8469E-02	3.8469E-02	1.0000E+00
								3.0028E-02
12	11	4226	3908	2	2.0000E-08	4.0141E-02	4.0141E-02	1.0000E+00
								3.3711E+03
13	14	84939	83442	13	1.3000E-07	3.9870E-02	3.9870E-02	1.0000E+00
								3.3397E+03
14	15	85225	83922	1368	1.3680E-05	3.9930E-02	3.9930E-02	1.0000E+00
								3.4309E+00
15	16	6278	6266	4153	4.1530E-05	4.0087E-02	4.0087E-02	1.0000E+00
								6.7154E-01
16	17	0	0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
								0.0000E+00
17	18	9846	9415	9147	9.1470E-05	3.9978E-02	3.9978E-02	1.0000E+00
								6.6781E-01

18	19	5720	5812	8507	8.5070E-05	3.8104E-02	3.8104E-02	1.0000E+00
2.9292E-02								
19	20	141	143	215	2.1500E-06	3.3630E-02	3.3630E-02	1.0000E+00
2.1313E-02								
20	21	0	0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00								
21	22	35311	34610	62	6.2000E-07	3.9383E-02	3.9383E-02	1.0000E+00
3.0820E-02								

total 100416302 100387871 352916 3.5292E-03

1tally 8 nps =100000000

tally type 8 pulse height distribution. units number

tally for photons

cell 13

energy

0.0000E+00 0.00000E+00 0.0000

3.9900E-02 9.73000E-06 0.0321

4.0900E-02 3.36170E-04 0.0055

total 3.45900E-04 0.0054

1analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 8 with nps = 100000000 print table 160

normed average tally per history = 3.45900E-04 unnormed average tally per history = 3.45900E-04

estimated tally relative error = 0.0054

estimated variance of the variance = 0.0000

relative error from zero tallies = 0.0054

relative error from nonzero scores = 0.0000

number of nonzero history tallies = 34590

efficiency for the nonzero tallies = 0.0003

history number of largest tally = 1354

largest unnormalized history tally = 1.00000E+00

(largest tally)/(average tally) = 2.89101E+03

(largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.00000E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000

shifted confidence interval center = 3.45905E-04

if the largest history score sampled so far were to occur on the next history, the tfc bin quantities would change as follows:

estimated quantities	value at nps	value at nps+1	value(nps+1)/value(nps)-1.
mean	3.45900E-04	3.45910E-04	0.000029
relative error	5.37588E-03	5.37580E-03	-0.000014
variance of the variance	2.88801E-05	2.88793E-05	-0.000029
shifted center	3.45905E-04	3.45905E-04	0.000000
figure of merit	9.28746E+03	9.28773E+03	0.000029

the 100 largest history tallies appear to have a maximum value of about 1.00000E+00  
the large score tail of the empirical history score probability density function appears to have no unsampled regions.

=====

=====

results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally 8

tfc bin	--mean--	-----relative error-----			----variance of the variance----			--figure of merit--
behavior	behavior	value	decrease	decrease rate	value	decrease	decrease rate	value
behavior	slope							
desired	random	<0.10	yes	1/sqrt(nps)	<0.10	yes	1/nps	constant
random	>3.00							
observed	random	0.01	yes	yes	0.00	yes	yes	constant
10.00								random
passed?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes

=====

=====

this tally meets the statistical criteria used to form confidence intervals: check the tally fluctuation chart to verify.

the results in other bins associated with this tally may not meet these statistical criteria.

estimated asymmetric confidence interval(1,2,3 sigma): 3.4405E-04 to 3.4776E-04; 3.4219E-04 to 3.4962E-04; 3.4033E-04 to 3.5148E-04

estimated symmetric confidence interval(1,2,3 sigma): 3.4404E-04 to 3.4776E-04; 3.4218E-04 to 3.4962E-04; 3.4032E-04 to 3.5148E-04

$$\text{fom} = (\text{histories/minute}) * (\text{f(x) signal-to-noise ratio})^{**2} = (2.684\text{E}+07) * (1.860\text{E}-02)^{**2} = (2.684\text{E}+07) * (3.460\text{E}-04) = 9.287\text{E}+03$$

1status of the statistical checks used to form confidence intervals for the mean for each tally bin

tally result of statistical checks for the tfc bin (the first check not passed is listed) and error magnitude check for all bins

8 passed the 10 statistical checks for the tally fluctuation chart bin result

passed all bin error check: 4 tally bins had 1 bins with zeros and 0 bins with relative errors exceeding 0.10

the 10 statistical checks are only for the tally fluctuation chart bin and do not apply to other tally bins.

the tally bins with zeros may or may not be correct: compare the source, cutoffs, multipliers, et cetera with the tally bins.

1tally fluctuation charts

tally	8	nps	mean	error	vov	slope	fom
8192000	3.4119E-04	0.0189	0.0004	10.0	9058		
16384000	3.4326E-04	0.0133	0.0002	10.0	9188		
24576000	3.4497E-04	0.0109	0.0001	10.0	9311		
32768000	3.4692E-04	0.0094	0.0001	10.0	9392		
40960000	3.4683E-04	0.0084	0.0001	10.0	9415		
49152000	3.4696E-04	0.0077	0.0001	10.0	9409		
57344000	3.4511E-04	0.0071	0.0001	10.0	9365		
65536000	3.4518E-04	0.0066	0.0000	10.0	9372		
73728000	3.4450E-04	0.0063	0.0000	10.0	9371		
81920000	3.4486E-04	0.0059	0.0000	10.0	9387		
90112000	3.4498E-04	0.0057	0.0000	10.0	9368		
98304000	3.4575E-04	0.0054	0.0000	10.0	9300		

100000000 3.4590E-04 0.0054 0.0000 10.0 9287

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

dump no. 2 on file runtpe nps = 100000000 coll = 352916 ctm = 3.73 nrn =  
358677439

9 warning messages so far.

run terminated when 100000000 particle histories were done.

computer time = 3.73 minutes

mcnp version 4c2 01/20/01 03/16/15 12:48:54 probid = 03/16/15  
12:45:10

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Μ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ - ΝΤΟΜΗΣ, <<Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία>>),  
Θεσσαλονίκη 2005.

[2] Fantinova-Fojtik ,<< Review: Monte Carlo simulation of the BEGe detector response  
function >>.

[3] [www.canberra.com](http://www.canberra.com)

[4] DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA for model BE2020.

[5] Oak Ridge National Laboratory, MCNP4C Monte Carlo N-Particle Transport Code  
System (2000).

[6] Εισαγωγή στην πυρηνική φυσική / W. N. Cottingham & D. A.

[7] [www.mcnp.lanl.gov](http://www.mcnp.lanl.gov)

[8] <http://physics.nist.gov/> Χημική σύσταση στοιχείων

[9] Πτυχιακή Εργασία: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ  
γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ του Ζέικου Χρήστου

[10] Προσομοίωση Ανιχνευτή Γερμανίου με τη μέθοδο Monte Carlo. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ  
ΕΡΓΑΣΙΑ των : Βανταράκη Αναστασία & Παπακωνσταντίνου Χριστίνα-Σουλτάνα

[11] ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ BEGe, ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ  
MONTE CARLO. Διπλωματική εργασία του: Χαμπέρη Κων/νου