



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Μελέτη του φαινομένου της πραγματικής  
σύμπτωσης σε ανιχνευτές Γερμανίου με χρήση  
προσομοίωσης Monte-Carlo

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Μηλιώνη Αναστασίας

Επιβλέπων: Μάριος Αναγνωστάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Μελέτη του φαινομένου της πραγματικής  
σύμπτωσης σε ανιχνευτές Γερμανίου με χρήση  
προσομοίωσης Monte-Carlo

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Μηλιώνη Αναστασίας

Τριμελής επιτροπή:

Μ. Αναγνωστάκης: Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Θ. Βασιλοπούλου: Ερευνήτρια Γ', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δ"

Ν. Πετρόπουλος: Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της. Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Αναγνωστάκη, για την ουσιαστική καθοδήγηση και τις συμβουλές του όποτε τις χρειαζόμουν κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Ήταν πάντα ανοικτός σε οποιαδήποτε ερώτηση παρά τον περιορισμένο χρόνο του και δεν δίσταζε να με εμπνέει, συζητώντας και επιλύοντας απορίες που αφορούσαν ζητήματα και εκτός των ορίων της μελέτης αυτής. Στάθηκε πολύτιμος δάσκαλος σε κάθε περίπτωση!

Ακόμη, ευχαριστώ πολύ τον κ. Ίωνα Σταματελάτο, ερευνητή Α' του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, για την παροχή του εργαστηρίου, αλλά κυρίως για την καθοριστική συνεργασία του στα ζητήματα που αφορούσαν τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την αποπεράτωση της μελέτης μου συνολικά, καθώς και τον κ. Πετρόπουλο, καθηγητή ΕΜΠ, για την προθυμία του να συνεργαστεί για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Δε θα μπορούσα βέβαια να μην ευχαριστήσω ειλικρινά την ερευνήτρια Γ' του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Θεοδώρα Βασιλοπούλου, για την αναντικατάστατη συνεισφορά της στην επίβλεψη της ΔΕ, το χρόνο που αφιέρωσε για την ολοκλήρωσή της και κυρίως για το όμορφο κλίμα συνεργασίας που φροντίζει να δημιουργεί με όλους τους συνεργάτες της, ανεξαρτήτως βαθμίδας. Αποτελεί ένα φωτεινό παράδειγμα για νέους ερευνητές και φοιτητές. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη μεταδιδακτορική ερευνήτρια του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Μαρίλια Σάββα για τον προσωπικό και τον υπολογιστικό (!) χρόνο που αφιέρωσε για την εκπλήρωση αυτής της μελέτης. Η συμβολή της ήταν πολύτιμη και η εμπειρία που μετέδιδε σε κάθε μας συζήτηση συνιστά πολύ σημαντικό και αξέχαστο εφόδιο για μένα. Χωρίς αυτήν και τη Δώρα, ίσως οι προσομοιώσεις που διεξήχθησαν να μην είχαν φτάσει στο τέλος τους όσο γράφονται αυτές οι ευχαριστίες!

Τέλος, με την εργασία αυτή ολοκληρώνεται ο κύκλος των μεταπτυχιακών σπουδών μου συνολικά και δε μπορώ να μην αναφερθώ στους συναδέλφους εκείνους (την Αφροδίτη, το Λεονάρντο, το Νίκο, το Βασίλη, τη Θεοδώρα και τόσους άλλους), που αυτά τα δύο χρόνια ήταν παρόντες σε κάθε σημαντικό βήμα, έκαναν όλες τις δυσκολίες πιο βατές με την παρουσία τους και όλες τις όμορφες στιγμές, ακόμη ωραιότερες! Αποτελούν και θα συνεχίσουν να αποτελούν τεράστιο και σημαντικό κομμάτι των αναμνήσεων μου από την πορεία αυτή, διότι χωρίς τη συνεργασία και την κατανόησή τους, όλη η εμπειρία των σπουδών μου δε θα ήταν τόσο έντονη και γεμάτη!!

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αποτελεί ζήτημα υψηλής σημασίας στη  $\gamma$  – φασματοσκοπική ανάλυση καθώς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματά της. Το εν λόγω φαινόμενο προκύπτει όταν δύο ή περισσότερες ακτίνες- $\gamma$  (ή μια ακτίνα- $\gamma$  και μία ακτίνα- $X$ ) εκπέμπονται σε σειρά από διεγερμένο πυρήνα και ανιχνεύονται “ταυτόχρονα”, δηλαδή εντός της χρονικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Στην παρούσα εργασία, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης μελετάται σε τρεις διατάξεις ανιχνευτών Γερμανίου, για μια σειρά ισοτόπων, με ποικίλες γεωμετρίες πηγών και διαφορετικές γεωμετρίες πηγής-ανιχνευτή, μέσω υπολογιστικών εργαλείων, βασισμένων στη μέθοδο Monte Carlo (M-C). Συγκεκριμένα, η επέκταση του κώδικα MCNP, MCNP-CP και η έκδοση του κώδικα Penelope 2018 – που μπορούν να λαμβάνουν υπόψη το διάγραμμα διάσπασης των ισοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά (γνωστά ως cascade emitters) – χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency-FEPE) για τις αντίστοιχες ενέργειες φωτονίων. Οι συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης υπολογίζονται από το λόγο της απόδοσης φωτοκορυφής για κάθε ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο, προς την απόδοση φωτοκορυφής που προκύπτει αγνοώντας το. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στους συντελεστές που υπολογίζονται με τη χρήση του MCNP-CP και της Penelope 2018 αντίστοιχα.

Ακόμη, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση επιβεβαιώνονται έναντι πειραματικών τιμών. Για το λόγο αυτό, συντελεστές διόρθωσης που υπολογίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού TrueCoinc εφαρμόζονται στις τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά σε αυτές τις διατάξεις με τη χρήση πηγών αναφοράς. Οι διορθωμένες τιμές της FEPE συγκρίνονται με εκείνες της προσομοίωσης, στην περίπτωση που το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αγνοείται και παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να συμβάλλουν στον έλεγχο των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τη  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση των νουκλιδίων που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά.

## ABSTRACT

An issue of outmost importance in gamma-ray spectrometry is the true coincidence phenomenon. It occurs in experiments involving cascade emitters, when two or more gamma rays (or a  $\gamma$ -ray and an X-ray) are emitted in cascade from an excited nucleus and they are detected “simultaneously”, namely within the resolution time of the gamma-ray detector.

In this work, the true coincidence effect is studied for three Germanium (Ge) detector spectrometry systems and a variety of isotopes, source geometries and source to detector configurations, via computational tools based on Monte Carlo simulations. In particular, the upgraded patch of MCNP code MCNP-CP and the 2018 version of PENELOPE, which take into account the actual decay scheme of each cascade emitter nuclide, are used to calculate the Full Energy Peak Efficiency (FEPE) for the corresponding gamma-ray energies. The true coincidence correction (TCC) factors are calculated as the ratio of FEPE derived for each nuclide taking into consideration the true coincidence phenomenon, to the FEPE estimated neglecting the phenomenon. In all cases, a satisfactory agreement is observed between the TCC factors calculated using MCNP-CP and PENELOPE 2018.

Furthermore, the computational results are validated against experimentally determined efficiency values. For this reason, the calculated via TrueCoinc software TCC factors are applied on the experimentally determined FEPE curves, based on measurements using reference sources. Finally, the corrected experimental curves are compared to the respective simulated ones for the “non-coincidence” case.

The results of this work contribute to the validation of the computational tools and codes used to study the true coincidence effect and determine the corresponding correction factors, providing important data for gamma-spectrometry studies of cascade emitters.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή	
1.1 Σκοπός.....	1
1.2 Δομή εργασίας.....	2
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Θεωρητικό μέρος	
2.1 Ανίχνευση ακτινοβολίας-γ.....	3
2.2 Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης.....	7
2.3 Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτω.....	10
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Ανιχνευτικές διατάξεις ΕΠΤ – ΕΜΠ	
3.1 Ανιχνευτές Γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	13
3.1.1 Εισαγωγή.....	13
3.1.2 Ανιχνευτής υπερακαθαρού ΓερμανίουGe33.....	16
3.1.3 Ανιχνευτής υπερακαθαρού Γερμανίου Ge40.....	19
3.1.4 Ανιχνευτής Γερμανίου LEGe.....	21
3.2 Λογισμικό ανάλυσης φασμάτων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Πειραματικό μέρος	
4.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής.....	25
4.2 Πηγές αναφοράς.....	28
4.3. Πειραματικές μετρήσεις.....	29
4.3.1 Πειράματα για την επιβεβαίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ανιχνευτών.....	29
4.3.2 Πειράματα για τη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης .....	32
4.4 Η περίπτωση του ισοτόπου <sup>22</sup> Na .....	36
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Κώδικες προσομοίωσης Monte-Carlo	
5.1 Μέθοδος Monte-Carlo.....	39
5.2 Κώδικας προσομοίωσης Penelope.....	42
5.2.1 Εισαγωγή.....	42
5.2.2 Αρχεία εισόδου του κώδικα Penelope.....	44
5.2.2.1 Εικονικοί ανιχνευτές.....	47
5.2.3 Αρχεία εξόδου του κώδικα Penelope.....	48
5.2.4 Γραφικό περιβάλλον gview.....	50
5.2.5 Υπορουτίνα renmain του κώδικα PENELOPE.....	51
5.3 Κώδικας προσομοίωσης MCNP.....	53
5.3.1 Εισαγωγή.....	53
5.3.2 Αρχεία εισόδου του κώδικα MCNP.....	54
5.3.2.1 Κάρτες του αρχείου εισόδου.....	54
5.3.2.2 Εικονικοί ανιχνευτές.....	56

5.3.3 Αρχεία εξόδου του κώδικα MCNP.....	57
5.3.4 Γραφικό περιβάλλον Vised .....	58
5.3.5 Προέκταση MCNP-CP του κώδικα MCNP.....	59
5.4 Μοντελοποίηση ανιχνευτών.....	60
5.4.1 Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλων.....	60
5.4.2 Ανάπτυξη και επιβεβαίωση μοντέλου ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 33.8% .....	61
5.4.3 Μοντέλα ανιχνευτικών διατάξεων ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	66
6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Υπολογισμοί	
6.1 Προσομοιώσεις των πειραμάτων – Εισαγωγή.....	71
6.2 Ανιχνευτής Γερμανίου απόδοσης 33.8%.....	73
6.3 Ανιχνευτής Γερμανίου απόδοσης 40%.....	78
6.4 Ανιχνευτής Γερμανίου χαμηλών ενεργειών LEGe.....	80
7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Αποτελέσματα & Συζήτηση	
7.1 Εισαγωγή.....	82
7.2 Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μέσω προσομοιώσεων.....	83
7.2.1 Συντελεστές διόρθωσης για τον ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 33.8% (Ge33).....	83
7.2.2 Συντελεστές διόρθωσης για τον ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 40% (Ge40).....	86
7.2.3 Συντελεστές διόρθωσης για τον ανιχνευτή Γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe).....	88
7.3 Διόρθωση πειραματικών τιμών απόδοσης φωτοκορυφής με τη χρήση του λογισμικού TrueCoinc.....	90
7.3.1 Το λογισμικό TrueCoinc.....	90
7.3.2 Συντελεστές διόρθωσης.....	92
7.3.3 Διόρθωση πειραματικών τιμών και σύγκριση έναντι προσομοιώσεων.....	95
7.4 Συζήτηση.....	97
8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμπεράσματα.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ.....	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ.....	110
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – U-test.....	115

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) και ο υπολογισμός των αντίστοιχων συντελεστών διόρθωσης με χρήση προσομοιώσεων σε διατάξεις ανιχνευτών Γερμανίου. Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης παρουσιάζεται κατά την πρόσπτωση δύο ή περισσότερων φωτονίων (ή μιας ακτίνας- $\gamma$  και μιας ακτίνας-X) που εκπέμπονται σε σειρά (in cascade) από διεγερμένο πυρήνα και ανιχνεύονται “ταυτόχρονα”, δηλαδή εντός της χρονικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή, με αποτέλεσμα να μην έχει τη δυνατότητα να τα διακρίνει. Η μελέτη που ακολουθεί εστιάζει στον προσδιορισμό συντελεστών διόρθωσης σε τρεις ανιχνευτές Γερμανίου του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) σε διαφορετικές γεωμετρίες, προκειμένου να μελετηθεί η εξάρτηση του φαινομένου από μία σειρά παραμέτρων. Η τιμή του συντελεστή διόρθωσης επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δείγματος και ανιχνευτή, αλλά και από τη μεταξύ τους σχετική θέση. Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται κυρίως σε τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo και συγκεκριμένα σε δύο κώδικες, Penelope 2018 και MCNP (έκδοση MCNP5 και έκδοση MCNP-CP), των οποίων επιδιώκεται και η σύγκριση. Ακόμη, επιχειρείται η διόρθωση πειραματικών τιμών της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω της εφαρμογής συντελεστών διόρθωσης που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του λογισμικού TrueCoins, προκειμένου να συγκριθούν με τις υπολογισμένες από την προσομοίωση τιμές.



## 1.2 Δομή εργασίας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Αναλύεται δηλαδή η διαδικασία της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης και ο τρόπος με τον οποίο το φαινόμενο υπεισέρχεται σε αυτήν (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια, παρατίθενται όλες οι ανιχνευτικές διατάξεις του ΕΠΤ-ΕΜΠ, στις οποίες εξετάστηκε το εν λόγω φαινόμενο και περιγράφονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (Κεφάλαιο 3). Ακολουθούν (Κεφάλαιο 4) τα πειράματα που διεξήχθησαν για την παρούσα μελέτη, η παράθεση των πηγών αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και η διαδικασία της επιβεβαίωσης για το γεωμετρικό μοντέλο του ενός εκ των εξεταζόμενων ανιχνευτών. Κατόπιν όλων αυτών, στο Κεφάλαιο 5 δίνεται αναλυτική περιγραφή των κωδικών προσομοίωσης που αξιοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τον κώδικα Penelope, περιγράφεται η μορφή των αρχείων εισόδου, τα περαιτέρω προγράμματα που διαθέτει ο κώδικας στο χρήστη, τα αρχεία εξόδου και αντίστοιχα οι επιμέρους δυνατότητες του κώδικα που χρησιμοποιούνται για τη συγκεκριμένη μελέτη. Αντίστοιχα, γίνεται περιγραφή για τον κώδικα MCNP/MCNP-CP, ενώ σημειώνονται οι διαφορές και οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι δύο κώδικες όταν επιθυμείται η προσομοίωση όμοιων περιπτώσεων. Εν συνέχεια στο Κεφάλαιο 6, δίνονται αναλυτικά οι περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν, δηλαδή κάθε συνδυασμός διάταξης, πηγών, σχετικών τους θέσεων, θωράκισης ανιχνευτή, η χρήση των υλικών και φυσικά τα αποτελέσματα για την απόδοση φωτοκορυφής που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή. Στο Κεφάλαιο 7 δίνονται οι συντελεστές διόρθωσης που αφορούν κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, όπως προκύπτουν από κάθε κώδικα και αντίστοιχα οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών αυτών. Ακόμη, παρατίθενται οι συντελεστές που υπολογίζονται από το λογισμικό TrueCoinc και εφαρμόζονται στα πειραματικά δεδομένα, προκειμένου να τα διορθώσουν και γίνεται συζήτηση επί των αποτελεσμάτων. Τέλος στο Κεφάλαιο 8, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για το σύνολο της μελέτης αυτής και τονίζονται τα στοιχεία που απαιτούν ακόμη περισσότερη διερεύνηση ή βελτίωση. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση της βιβλιογραφίας και του παραρτήματος, που περιλαμβάνει πιστοποιητικά πηγών και ανιχνευτών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

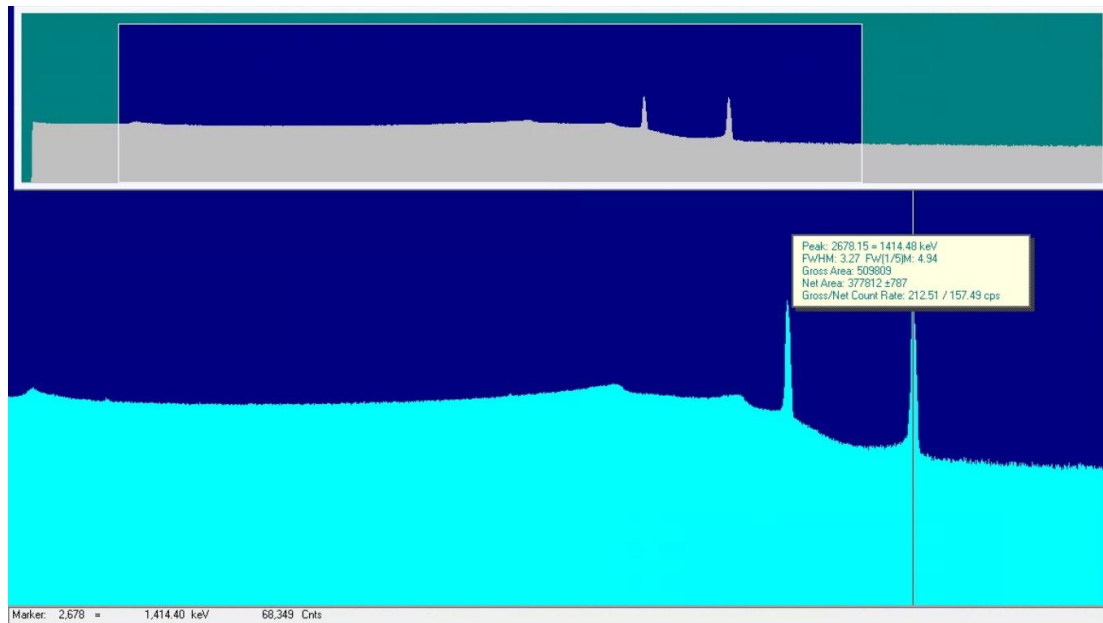
### 2.1 Ανίχνευση ακτινοβολίας- $\gamma$

Στη φασματοσκοπία- $\gamma$  μελετώνται ραδιενεργοί πυρήνες που διασπώνται μέσω αποδιέγερσης- $\gamma$  και εκπέμπουν φωτόνια με ενέργειες εύρους μερισίων keV έως περίπου 10MeV. Στην περίπτωση αυτή, παράγεται ένα γραμμικό φάσμα ακτίνων- $\gamma$ , δηλαδή το κάθε φωτόνιο εκπέμπεται σε συγκεκριμένες διακριτές ενέργειες. Υψηλότερες ενέργειες μελετώνται σε άλλους κλάδους της φυσικής, όπως φυσική υψηλών ενεργειών, αστροφυσική κ.α.

Η μελέτη της εκπεμπόμενης από ραδιοϊσότοπα ακτινοβολίας- $\gamma$  επιτυγχάνεται μέσω της  $\gamma$ -φασματοσκοπικής ανάλυσης. Ο όρος αναφέρεται στη διαδικασία της ανίχνευσης και κατόπιν της καταγραφής των ακτίνων- $\gamma$ . Η τεχνική της  $\gamma$ -φασματοσκοπίας βασίζεται στον προσδιορισμό των ραδιονουκλιδίων από τη “μοναδικότητα” των εκπεμπόμενων ακτίνων- $\gamma$ . Για το σκοπό αυτό, λαμβάνεται το ενεργειακό φάσμα του προς μέτρηση δείγματος ή πηγής. Ακολουθεί η ποιοτική ή ποσοτική ανάλυσή του. Η ποιοτική ανάλυση αφορά την εύρεση της σύστασης του εξεταζόμενου δείγματος (προσδιορισμός ισοτόπων), ενώ η ποσοτική σχετίζεται με την εκτίμηση της περιεκτικότητάς του, δηλαδή των επιπέδων ραδιενέργειας αυτού, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια.

Πιο συγκεκριμένα, κατάλληλο ανιχνευτικό σύστημα χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ακτινοβολίας- $\gamma$ , που προκύπτει κατά τη διάσπαση ραδιενεργού πυρήνα. Οι ακτίνες- $\gamma$  προσπίπτουν στο υλικό του ανιχνευτή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του  $\gamma$ -φάσματος από φωτόνια που είτε εναποθέτουν ολόκληρη είτε μέρος της ενέργειάς τους σε αυτό. Στην πρώτη περίπτωση, ακολουθεί ο σχηματισμός φωτοκορυφών πλήρους απορρόφησης, που καταγράφονται σε ένα κανάλι, με ενέργεια αντίστοιχη του εκπεμπόμενου φωτονίου.

Η ενέργεια αυτή είναι και η χαρακτηριστική ενέργεια εκπομπής φωτονίων του συγκεκριμένου ραδιενεργού πυρήνα που διασπάται και η καταγραφή της στο φάσμα αποτυπώνεται ως μία γκαουσιανή καμπύλη. Με τον τρόπο αυτό, ο πειραματιστής, γνωρίζοντας τη θέση της φωτοκορυφής, μπορεί να ταυτοποιήσει τον διασπώμενο πυρήνα και τελικά να αποφανθεί ως προς τον ποιοτικό προσδιορισμό του δείγματος. Επιπρόσθετα, η επιφάνεια της φωτοκορυφής πλήρους απόθεσης υποδεικνύει το πλήθος των κρούσεων, δηλαδή τον αριθμό των φωτονίων που εναπόθεσαν πλήρως την ενέργειά τους στον ανιχνευτή. Κατά συνέπεια, ο πειραματιστής μπορεί να εκτιμήσει το ρυθμό διασπάσεων του δείγματος ενδιαφέροντος, άρα την ενεργότητά του.



ΣΧΗΜΑ 2.1: Παράδειγμα φάσματος  $^{60}\text{Co}$ , όπου φαίνονται οι φωτοκορυφές των 1173.228 και 1332.492 keV

Η  $\gamma$  – φασματοσκοπική ανάλυση, συνιστά μία διαδεδομένη μέθοδο, διότι αποτελεί μία ευέλικτη, άμεση και υψηλής ακρίβειας διαδικασία, με την οποία μπορούν να διεξαχθούν μετρήσεις μεγάλου αριθμού ισοτόπων, φυσικών ή τεχνητών. Ακόμη, αποτελεί μία μη καταστροφική τεχνική ανάλυσης, εφόσον δεν απαιτεί προετοιμασία του δείγματος, ενώ ταυτόχρονα συνοδεύεται από πλήθος εφαρμογών, καθώς δείγματα πάσης φύσεως, στερεά, υγρά και αέρια (κατάλληλα συσκευασμένα), είναι δυνατό να μελετηθούν μέσω αυτής.

Οι ανιχνευτικές διατάξεις που συναντώνται συχνότερα αποτελούνται από ανιχνευτές σπινθηρισμού και ημιαγωγούς ανιχνευτές, δηλαδή ανιχνευτές στερεάς κατάστασης. Συγκεκριμένα, στη  $\gamma$ -φασματοσκοπία, ο ανιχνευτής αποτελεί ένα παθητικό υλικό, στου οποίου τον όγκο θα προσπέσει η προς ανίχνευση ακτινοβολία. Η καταγραφή μιας ακτίνας- $\gamma$  από μία ανιχνευτική διάταξη προϋποθέτει αρχικά την αλληλεπίδρασή της με το υλικό του ανιχνευτή. Τα φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση φωτονίων και ύλης συνοδεύονται από διάφορους μηχανισμούς, όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η δίδυμη γένεση, η σκέδαση Compton και η σύμφωνη σκέδαση.

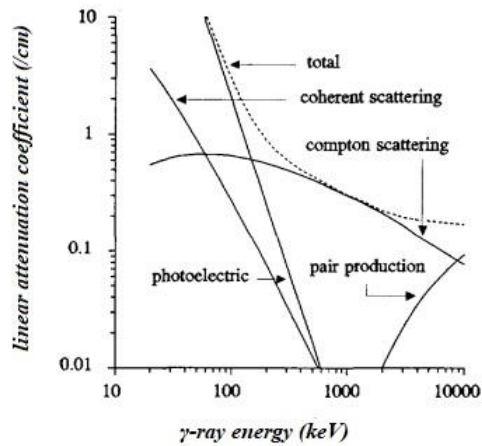
- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: Προσπίπτον σε πυρήνα φωτόνιο συγκρούεται και μεταδίδει όλη την ενέργειά του σε ατομικό ηλεκτρόνιο. Το φωτόνιο απορροφάται πλήρως και κατόπιν το ηλεκτρόνιο εκπέμπεται με ενέργεια ( $E_e$ ) ίση με τη διαφορά της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου ( $E_\gamma$ ) με την ενέργεια σύνδεσης ( $E_B$ ), δηλαδή:

$$E_e = E_\gamma - E_B$$

- Δίδυμη γένεση: Στο φαινόμενο αυτό, εισερχόμενο φωτόνιο υπόκειται σε ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση με ατομικό πυρήνα, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του σε ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Συνιστά την αντίθετη διαδικασία από την εξαΰλωση, αφού εδώ η ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε μάζα.
- Σκέδαση Compton: Προσπίπτει φωτόνιο αλληλεπιδρά με ατομικό ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της συχνότητας του φωτονίου και συνεπώς και της ενέργειάς του. Τελικά, τα σωματίδια σκεδάζονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις.
- Σύμφωνη σκέδαση: Παρατηρείται όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη της ενέργειας ιοντισμού του ατόμου. Με άλλα λόγια, η ενέργεια της ακτίνας-γ δεν είναι σε θέση να απελευθερώσει ένα ατομικό ηλεκτρόνιο από τη δεσμευμένη του κατάσταση, όπως συμβαίνει στη σκέδαση Compton. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη μεταφορά ενέργειας και τη σκέδαση του φωτονίου σε διαφορετική από την αρχική του κατεύθυνση.

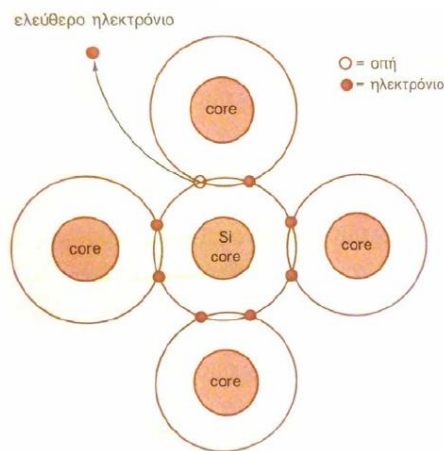
Οι παραπάνω μηχανισμοί συνεπάγονται απώλεια ολόκληρης ή μέρους της ενέργειας του φωτονίου, μέσα στο υλικό του ανιχνευτή. Σε χαμηλές ενέργειες φωτονίων, η απώλεια αυτή προέρχεται από την απορρόφηση των φωτονίων εξαιτίας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Σε μεγαλύτερες ενέργειες, πλήθος φωτονίων είναι δυνατό να εξέλθει από το υλικό του ανιχνευτή αφού σκεδαστούν και ως αποτέλεσμα έχουν εναποθέσει τμήμα της ενέργειάς τους. Αν τέλος πρόκειται για ενέργειες φωτονίων άνω των 1.022 MeV, είναι δυνατή η δίδυμη γένεση. Στη συνέχεια, το παραγόμενο ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου εξαΰλωναται και ακολουθεί παραγωγή δύο φωτονίων, το καθένα ενέργειας 0.511 MeV. Όπως και τα υπόλοιπα φωτόνια εναποθέτουν μέρος ή όλη την ενέργειά τους στον ανιχνευτή, γι' αυτό και στο γ-φάσμα μπορεί να παρατηρηθεί η φωτοκορυφή των 511 keV. Στην πρώτη περίπτωση βέβαια υπάρχει πιθανότητα να διαφύγει μόνο το ένα φωτόνιο (μονή διαφυγή-single escape) ή αντίστοιχα είναι δυνατό να διαφύγουν και τα δύο (διπλή διαφυγή-double escape).

Πιο συγκεκριμένα, εστιάζοντας στην εξασθένιση των ακτίνων-γ στο υλικό του Γερμανίου (Ge), (Γράφημα 2.1), παρατηρείται η υπερχή στις χαμηλές ενέργειες της απορρόφησης λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου, ενώ στις υψηλές ( $E_\gamma > 8 \text{ MeV}$ ) η επικράτηση της δίδυμης γένεσης. Για τις ενδιάμεσες τιμές ενεργειών  $200 \text{ keV} < E_\gamma < 8 \text{ MeV}$  φαίνεται να κυριαρχεί η σκέδαση Compton, ενώ η συνεισφορά της σύμφωνης σκέδασης στη μεταφορά ενέργειας στον ανιχνευτή είναι αμελητέα.



ΓΡΑΦΗΜΑ 2.1: Γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης συναρτήσει της ενέργειας των ακτίνων-γ για τους κυρίαρχους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης στο Γερμάνιο (R. M. W. Overwater, 1994)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, συνήθης είναι η επιλογή ημιαγωγικών υλικών, στα οποία η ζώνη σθένους διαχωρίζεται από τη ζώνη αγωγιμότητας λόγω ενεργειακού κενού, ενώ τα ηλεκτρόνια συνήθως βρίσκονται στην πρώτη. Κατά κύριο λόγο επιλέγεται Γερμάνιο (Ge), με ενεργειακό εύρος περίπου 0.67 eV και Πυρίτιο (Si) με ενεργειακό εύρος περίπου 1.12eV. Παρ' όλο που τα υλικά αυτά έχουν φτωχή αγωγιμότητα, χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση ακτινοβολίας, διότι όταν εισέρχεται στο υλικό τους ιοντίζουσα ακτινοβολία, ηλεκτρόνια ανέρχονται στη ζώνη αγωγιμότητας και το σύστημα γίνεται στιγμιαία αγωγίμο. Αν τότε μέσω κατάλληλων ηλεκτροδίων εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο, τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών διαχωρίζονται (Σχήμα 2.2), κινούνται προς τα ηλεκτρόδια και τελικά συλλέγονται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικού σήματος. Το πλήθος των ζευγών αυτών εξαρτάται από την αποτιθέμενη στον ανιχνευτή ενέργεια. Εφόσον η απαιτούμενη για τη δημιουργία ζεύγους ενέργεια είναι γνωστή και ανεξάρτητη από την ενέργεια εκπομπής του φωτονίου, η μέτρηση του πλήθους των ζευγών ηλεκτρικών φορέων και συνακόλουθα το ύψος του παλμού τάσης που παράγεται, επιτρέπει τον προσδιορισμό της ενέργειας της εν λόγω ακτινοβολίας. Ο ταχύς διαχωρισμός και η ταχεία συλλογή των φορτίων αυτών είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ενός καλού ημιαγωγού ιοντιζουσών ακτινοβολιών.



ΣΧΗΜΑ 2.2: Δημιουργία ζεύγους ελεύθερου ηλεκτρονίου-οπής (Mahvino A.P., 2006)

## 2.2 Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης

Ως πραγματική σύμπτωση (true coincidence) ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ή περισσότερα φωτόνια που εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο διάσπασης του πυρήνα ενός ισοτόπου, ανιχνεύονται ταυτόχρονα από την ανιχνευτική διάταξη και καταγράφονται ως ένα φωτόνιο, ενέργειας ίσης με το άθροισμα των ενεργειών των φωτονίων που ανιχνεύονται. (Κ.Λ. Καρφόπουλος, Νοέμβριος 2012). Το φαινόμενο εμφανίζεται εξαιτίας της χρονικής διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτικών διατάξεων, η οποία είναι μεγαλύτερη από τη χρονική διαφορά εκπομπής των δύο ή περισσότερων φωτονίων σε σειρά. Συνεπώς, η εξέλιξη του φαινομένου της διάσπασης ενός ισοτόπου δεν παρακολουθείται πάντα πιστά, γεγονός που πρόκειται να επηρεάσει τη μορφή του καταγραφόμενου γ-φάσματος. Πιο συγκεκριμένα, αφενός παρατηρείται η μη καταγραφή γεγονότων που θα οφείλονταν σε κάθε ένα από τα εκπεμπόμενα φωτόνια ξεχωριστά και αφετέρου η καταγραφή ενός μη πραγματικού φωτονίου ενέργειας ίσης με το άθροισμα των ενεργειών των επιμέρους φωτονίων που εκπέμφθηκαν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σχηματισμό φωτοκορυφών από τα “υποθετικά” φωτόνια που εναποθέτουν πλήρως την ενέργειά τους στον ανιχνευτή, αλλά και την αύξηση του συνεχούς υποστρώματος από τα αντίστοιχα που εναποθέτουν μέρος αυτής της ενέργειας. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα, ότι το καταγραφόμενο φάσμα περιέχει φωτοκορυφές από τις οποίες έχουν αφαιρεθεί γεγονότα-κρούσεις με την αντίστοιχη ενέργεια των επιμέρους φωτονίων που λήφθηκαν από τον ανιχνευτή ως ένα (summing-out effect), ενώ παράλληλα εμφανίζονται άλλες φωτοκορυφές, στις οποίες έχουν προστεθεί γεγονότα (summing-in effect). Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, ο πειραματιστής οφείλει να λάβει υπόψη την επίδραση που έχει το φαινόμενο, στην επιφάνεια (area) της ελάχιστης εξεταζόμενης φωτοκορυφής. Αναλυτικότερα δηλαδή, κατά το φαινόμενο “summing-out”, χρειάζεται η επιφάνεια της φωτοκορυφής να θεωρηθεί πιο αυξημένη, εφόσον έχει υποεκτιμηθεί από τη διάταξη λόγω του φαινομένου, ενώ αντίθετα, στην περίπτωση του φαινομένου “summing-in”, να θεωρηθεί μειωμένης επιφάνειας ή και αμιγώς “υποθετική”.

Με δεδομένο, ότι η πραγματική σύμπτωση οφείλεται στην εγγενή αδυναμία της ανιχνευτικής διάταξης να ακολουθήσει επακριβώς τα γεγονότα από τη διάσπαση ενός ισοτόπου, αποτελεί μία πηγή συστηματικού σφάλματος, που επηρεάζει άμεσα τον ποσοτικό προσδιορισμό του προς μελέτη δείγματος. Σε πολλές περιπτώσεις, αν παραλειφθεί η διόρθωση του φαινομένου, είναι δυνατό σε μία διαδικασία να εισαχθεί αβεβαιότητα πολύ μεγαλύτερη από την απαιτούμενη. Για παράδειγμα, σε ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 15%, εξήχθησαν σφάλματα της τάξης των 20-50% για πηγή τοποθετημένη κοντά στον ανιχνευτή και αντίστοιχα της τάξης των 5-10% για πηγή όγκου (De Felice P. et al., 2002). Καταγράφηκαν μάλιστα περιπτώσεις αύξησης, που κυμαινόταν στο 100-500%, για ανιχνευτές τύπου n, well detectors ή ανιχνευτές σχετικής απόδοσης 100% (De Felice P. et al., 2002).

Οι παράγοντες που συνεισφέρουν στην εμφάνιση ή την όξυνση του φαινομένου κατηγοριοποιούνται, σε αυτούς που εξαρτώνται από το προς μελέτη ισότοπο και σε αυτούς που είναι ανεξάρτητοι από αυτό.

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη κατηγορία αναφέρονται οι εξής:

- Το διάγραμμα διάσπασης ισοτόπου. Όσο πολυπλοκότερη είναι η δομή του διαγράμματος διάσπασης, δηλαδή το συνολικό πλήθος των σταθμών άρα και των αποδιεγέρσεων του πυρήνα, τόσο αυξημένη είναι η πιθανότητα εκπομπής διαδοχικών φωτονίων.
- Ο χρόνος ημιζωής των ενδιάμεσων σταθμών ενέργειας του ραδιονουκλιδίου. Πρόκειται για το μέγεθος εκείνο, που αντικατοπτρίζει τη χρονική διαφορά ανάμεσα στην εκπομπή διαδοχικών φωτονίων και συνεπώς σχετίζεται άμεσα με την εμφάνιση και την ένταση του φαινομένου. Το μέγεθος αυτό είναι σε πολλές περιπτώσεις πολύ μικρότερο από τη χρονική διακριτική ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης.
- Το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων που θα εκπεμφθούν διαδοχικά. Αυτό καθορίζει την ένταση των φαινομένων “summing-out” και “summing-in”. Καθώς δηλαδή αυξάνεται η πιθανότητα εκπομπής διαδοχικών φωτονίων με την αποδιέγερση του προς μελέτη πυρήνα, αυξάνεται κατά συνέπεια η πιθανότητα σχηματισμού “αυξημένων” και “μειωμένων” φωτοκορυφών.
- Τα είδη των διασπάσεων που ακολουθεί ο πυρήνας. Το φαινόμενο δεν εμφανίζεται μόνο στην περίπτωση “ταυτόχρονης” ανίχνευσης δύο ή περισσότερων ακτίνων- $\gamma$ , όπου έχουμε τη σύμπτωση  $\gamma$ - $\gamma$ . Είναι πιθανό να προκύψει κατά την ταυτόχρονη καταγραφή φωτονίου και ακτίνας- $X$ , (σύμπτωση  $\gamma$ - $X$ ), αλλά και κατά την καταγραφή σωματιδίου- $\beta$  και φωτονίου (σύμπτωση  $\beta$ - $\gamma$ ). Ειδικότερα για την τελευταία περίπτωση, είναι πιθανό να καταγραφούν φωτόνια, προερχόμενα από τη διάσπαση του πυρήνα και της ακτινοβολίας πέδησης (bremsstrahlung), που προκύπτει ως αποτέλεσμα της επιβράδυνσης των σωματιδίων- $\beta$  στα υλικά που περιβάλλουν ή συνιστούν τον ανιχνευτή. Τέλος, αναφέρεται και η περίπτωση της διάσπασης  $\beta^+$ , κατά την οποία η εκπομπή ποζιτρονίου οδηγεί σε αντίδραση εξαΰλωσης και συνεπώς στην εκπομπή δύο φωτονίων, ενέργειας 511 keV. Τα φωτόνια αυτής της ενέργειας συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (είτε με την ενέργεια των 511keV, είτε με την αθροιστική ενέργεια των δύο φωτονίων που παράγονται από την εξαΰλωση, δηλαδή τα 1022keV).

Στη δεύτερη κατηγορία αναφέρονται οι παρακάτω παράγοντες:

- Ανιχνευτική διάταξη. Αναλυτικότερα, τα στοιχεία της διάταξης που μπορούν να επηρεάσουν ή και να οξύνουν το φαινόμενο σχετίζονται με την απόδοση του ανιχνευτή, αλλά και με το υλικό και το πάχος του παραθύρου του κρυστάτη. Όσον αφορά στο παράθυρο, οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν την πιθανότητα να εισέλθουν στην ευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή φωτόνια χαμηλών ενεργειών ή και ακτίνες- $X$ . Αντίστοιχα, ο παράγοντας της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης αντικατοπτρίζει την πιθανότητα ανίχνευσης φωτονίων, που αποθέτουν πλήρως ή μερικώς την ενέργειά τους. Σαφώς λοιπόν, σε μία διάταξη υψηλής απόδοσης, η παρουσία του φαινομένου θα είναι εντονότερη. Τέλος, στην έννοια της ανιχνευτικής διάταξης δε μπορεί να μη συνυπολογιστεί η παρουσία της χρησιμοποιούμενης θωράκισης. Η συμβολή της στο φαινόμενο συνίσταται στην εμφάνιση σκεδαζόμενων φωτονίων, προερχόμενων από την ενδεχόμενη αλληλεπίδραση με αυτήν ενός ή περισσότερων διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων. Οι παράγοντες αυτοί θα

σχολιαστούν εκτενέστερα στη συνέχεια (Κεφάλαιο 3), όπου και θα αναφερθούν τα διαφορετικά είδη των χρησιμοποιούμενων ανιχνευτών, οι αποδόσεις τους και αντίστοιχα η πιθανότητα εισόδου χαμηλοενεργειακών φωτονίων ή ακτίνων—X στην ευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή σε κάθε περίπτωση.

- Γεωμετρία δείγματος–ανιχνευτή. Η απόσταση του δείγματος από τον ανιχνευτή, αλλά και η γεωμετρία της ίδια της πηγής – σημειακή, επιφανειακή, όγκου – έχουν άμεση επίδραση στον παράγοντα της απόδοσης. Επομένως λοιπόν, η ένταση του φαινομένου εκτιμάται ότι θα διαφέρει για κάθε χρησιμοποιούμενη γεωμετρία. Η συμπεριφορά αυτή θα εξετασθεί και συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 7, όπου θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα σε κάθε διαφορετική περίπτωση.
- Στερεά γωνία πηγής – ανιχνευτή. Ουσιαστικά, λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι, ένα ποσοστό μόνο των εκπεμπόμενων φωτονίων θα προσπέσει στον ανιχνευτή. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τη στερεά γωνία  $\Omega$ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχετική θέση δείγματος – ανιχνευτή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για τον παράγοντα αυτόν, αποτελεί η πρακτικά αμελητέα επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης σε μακρινές αποστάσεις πηγής – ανιχνευτή. Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει επίσης την απόδοση για την κάθε μέτρηση και συνεπώς την ένταση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Για το λόγο αυτό, για να μελετηθεί δηλαδή η επίδραση αυτής της παραμέτρου, εξετάζονται δείγματα σε μεγάλες αποστάσεις από τον ανιχνευτή, όπου το φαινόμενο εξασθενεί.

Συνοψίζοντας λοιπόν, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης μπορεί να εμφανιστεί και να ενταθεί μέσω δύο μηχανισμών, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάσπαση ενός ισοτόπου και κατά την ανίχνευση των ακτίνων- $\gamma$  που εκπέμπει. Ο πρώτος αφορά τη διαδοχική εκπομπή φωτονίων (καταιγισμός–cascade), ενώ εξαρτάται και διαφοροποιείται από την πρώτη κατηγορία των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν. Ο δεύτερος σχετίζεται με την πρακτικά “ταυτόχρονη” για τον ανιχνευτή καταγραφή των φωτονίων και επηρεάζεται από την επιλογή των παραμέτρων της δεύτερης κατηγορίας, οι οποίες ελέγχονται και τροποποιούνται άμεσα από τον πειραματιστή. Τέλος, μπορεί να αναφερθεί ένας επιπλέον παράγοντας που σχετίζεται και με τις δύο παραπάνω κατηγορίες, αυτός της γωνιακής συσχέτισης (angular correlation) μεταξύ των διαδοχικά εκπεμπόμενων ακτίνων- $\gamma$ . (Knoll G.F., 2000)

Η εμφάνιση και η ένταση του φαινομένου εξαρτάται αποκλειστικά από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, των οποίων η συνεισφορά θα μελετηθεί στη συνέχεια της εργασίας και θα εξαχθούν συμπεράσματα για τη σημασία της επιλογής τους και της τροποποίησής τους. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί, ότι ο πειραματιστής δεν πρέπει να συγχέει τα επίπεδα ενεργότητας του προς εξέταση δείγματος, αλλά και τη διάρθρωση των ηλεκτρονικών της ανιχνευτικής διάταξης με την εμφάνιση ή την όξυνση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Ο τελευταίος ισχυρισμός δεν έρχεται σε αντίθεση με τα επιχειρήματα για την εγγενή αδυναμία του ανιχνευτή να καταγράψει δύο φωτόνια σε σειρά με χρονική διαφορά μικρότερη της διακριτικής του ικανότητας, από την άποψη, ότι ο χρόνος απόκρισης μιας τέτοιας διάταξης με ανιχνευτή γερμανίου είναι εν γένει τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής σταθμών αποδιέγερσης πλήθους ισοτόπων.



## 2.3 Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί με μία σειρά από τεχνικές που θα αναφερθούν στην παράγραφο αυτή.

Σε πρώτο επίπεδο, ο πειραματιστής θα μπορούσε να επιλέξει τη βαθμονόμηση της χρησιμοποιούμενης ανιχνευτικής διάταξης με πρότυπες πηγές, οι οποίες να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με το προς μελέτη δείγμα. Συγκεκριμένα δηλαδή, να περιέχουν τα ίδια ισότοπα, με την ίδια σύσταση και γεωμετρία, αλλά και κατά την πειραματική διαδικασία να επιλεγθεί η ίδια απόσταση πηγής-ανιχνευτή. Αν επιτευχθούν οι προϋποθέσεις αυτές, ο υπολογισμός της ενεργότητας είναι ανεξάρτητος του φαινομένου (Semkow T.M. et al., 1990). Ωστόσο υπογραμμίζεται, ότι μια τέτοια διαδικασία απαιτεί πλήθος πρότυπων πηγών, με τις αντίστοιχες γεωμετρίες και συστάσεις, προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση υπολογισμών σε ολόκληρο το προς μελέτη ενεργειακό εύρος.

Εναλλακτικά, θα μπορούσε να επιλέξει κανείς να διεξάγει μετρήσεις σε μεγάλες αποστάσεις δείγματος-ανιχνευτή, ή με άλλα λόγια σε μικρή στερεά γωνία, όπου η επίδραση του φαινομένου μειώνεται ριζικά (Semkow T.M. et al., 1990). Μια τέτοια διαδικασία βέβαια μειώνει το εύρος των ενεργειών που μελετώνται, διότι η κατεύθυνση της αύξησης της απόστασης οδηγεί σε μείωση της απόδοσης και ως αποτέλεσμα απαιτείται περαιτέρω χρόνος συλλογής του φάσματος. Αν δε, πραγματοποιηθεί μία μέτρηση με αυξημένη χρονική διάρκεια, θα καταγραφεί αυξημένο υπόστρωμα και συνεπώς θα αυξηθεί το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης (MDA-Minimum Detectable Activity).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέθοδος που ακολουθείται για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης αφορά τη διόρθωση της επιφάνειας (area) της καταγραφόμενης φωτοκορυφής. Στη βιβλιογραφία, συναντώνται διάφορες μέθοδοι διόρθωσης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται συγκεκριμένα στις παρακάτω:

- Αναλυτικές-θεωρητικές μέθοδοι:  
Η αντιμετώπιση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης συναντάται αρχικά στις εργασίες των Andreev D.S. et al., 1972 και Andreev D.S. et al., 1973 και αναπτύσσεται περαιτέρω από τους McCallum G.J. and Coote G.E., 1975 (Κ.Α. Καρφόπουλος, Νοέμβριος 2012). Για να χρησιμοποιηθεί μία αναλυτική-θεωρητική μέθοδος είναι απαραίτητη η γνώση της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης και σαφώς του διαγράμματος διάσπασης του εκάστοτε ισότοπου. Ουσιαστικά, αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης βασίζεται στη μελέτη της πιθανότητας διαδοχικής εκπομπής και κατόπιν καταγραφής των παραγόμενων φωτονίων. Θεωρώντας δηλαδή γνωστό το διάγραμμα διάσπασης και τα ποσοστά εκπομπής των διάφορων ακτίνων-γ υπολογίζεται η πιθανότητα διαδοχικής εκπομπής φωτονίων, ενώ μέσω των τιμών της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης προσδιορίζεται η πιθανότητα “ταυτόχρονης”, για τη

διάταξη, ανίχνευσής τους. Στη συνέχεια, αναλύεται η περίπτωση μίας σημειακής πηγής με ένα απλό διάγραμμα διάσπασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, θα υπολογιστεί ο συντελεστής διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης για τις επιφάνειες φωτοκορυφής των φωτονίων  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  με ενέργειες  $E_1, E_2, E_3$  αντίστοιχα, μέσω των παρακάτω μαθηματικών σχέσεων (2.1) και (2.2):

$$C_1 = \frac{1}{1 - p_{1,2} \cdot \epsilon_{T2}} \quad (2.1)$$

$$C_2 = \frac{1}{1 - p_{1,2} \cdot \epsilon_{T1}} \quad (2.2)$$

$$C_3 = \frac{1}{1 + \frac{I_1 \cdot \epsilon_{p1} \cdot \epsilon_{p2}}{I_3 \cdot \epsilon_{p3}} p_{1,2}} \quad (2.3)$$

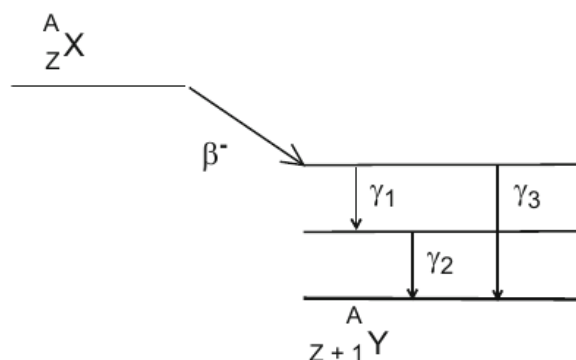
$C_i$ : ο συντελεστής διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης για την επιφάνεια της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στο φωτόνιο  $\gamma_i$  ( $i=1, 2, 3$ )

$I_i$ : το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου  $\gamma_i$

$p_{i,j}$ : η πιθανότητα διαδοχικής εκπομπής των φωτονίων  $\gamma_i$  και  $\gamma_j$ . Για το παράδειγμα του σχήματος (2.3),  $p_{1,2} = 1$

$\epsilon_{pi}$ : η απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) ανιχνευτικής διάταξης για φωτοκορυφή ενέργειας  $E_i$  που αντιστοιχεί στα φωτόνια  $\gamma_i$

$\epsilon_{Ti}$ : η ολική απόδοση (total efficiency) ανιχνευτικής διάταξης για φωτοκορυφή ενέργειας  $E_i$  που αντιστοιχεί στα φωτόνια  $\gamma_i$



ΣΧΗΜΑ 2.3: Απλό διάγραμμα διάσπασης με δύο διεγερμένες καταστάσεις

- Εμπειρικές-ημιεμπειρικές μέθοδοι:  
Στην περίπτωση αυτή στον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης μπορεί να ληφθούν αρχικά υπόψη μαθηματικές εκφράσεις, που πηγάζουν από τις αναλυτικές-θεωρητικές μεθόδους και να ακολουθηθεί μία πειραματική διαδικασία (De Felice P. et al., 2000) και (De Felice P. et al., 2002).

Ωστόσο, είναι δυνατόν να ακολουθηθεί μία αμιγώς πειραματική διαδικασία όπως λόγου χάριν η σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών γεωμετριών δείγματος-ανιχνευτή, προκειμένου να προκύψουν εμπειρικοί ή ημιεμπειρικοί συντελεστές διόρθωσης (Quintana B. and Fernandez F., 1995).

- Μέθοδοι με χρήση κωδίκων προσομοίωσης:  
Κατά κύριο λόγο, στις μεθόδους προσομοίωσης για τη διόρθωση του φαινομένου χρησιμοποιείται η τεχνική Monte Carlo. Υπάρχουν δε περιπτώσεις όπου αξιοποιείται μόνο αυτή η μέθοδος, ενώ είναι δυνατό να αξιοποιηθεί συνδυαστικά και με κάποια θεωρητική-αναλυτική. Συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής τέτοιων κωδίκων και ανάλυση του τρόπου λειτουργίας τους ακολουθεί στο κεφάλαιο 5. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας και χρήσης δύο διαφορετικών κωδίκων, που αξιοποιούν μεθόδους Monte-Carlo και παρέχουν τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη από το χρήστη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, για την προσομοίωση τριών ανιχνευτικών διατάξεων βασισμένων στο Γερμάνιο, στις οποίες εξετάζονται μια σειρά περιπτώσεις γεωμετριών και ισοτόπων. Η χρήση κωδίκων προσομοίωσης για την προσέγγιση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης έχει παρουσιαστεί ξανά σε προγενέστερες εργασίες, που είτε έγιναν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Κ.Α. Καρφόπουλος, Νοέμβριος 2012), (Δ.Α. Χιώνης, 2011), είτε σε ασκήσεις διασύγκρισης μεθόδων διόρθωσής του, όπως στα πλαίσια του ICRM-GSWG (International Committee for Radionuclide Metrology, Gamma Spectrometry Working Group) (Vidmar T. et al., 2008).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

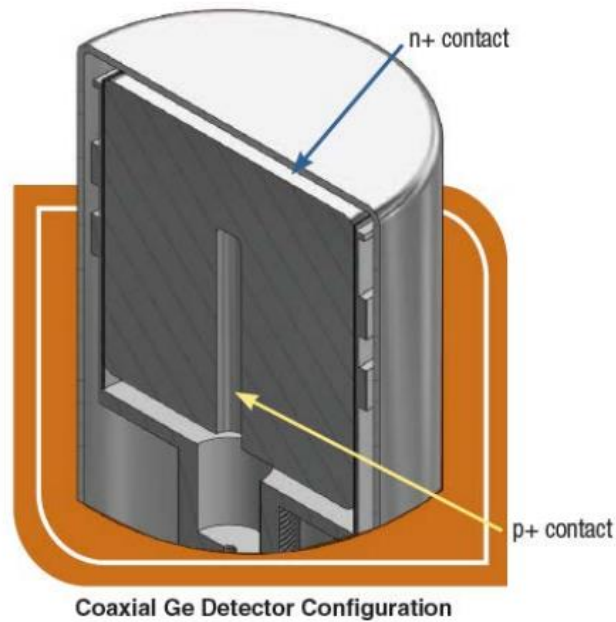
### ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΠΤ – ΕΜΠ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το σύνολο των ανιχνευτικών διατάξεων που μελετήθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μία σειρά ανιχνευτών, διαφορετικών αποδόσεων για την εξέταση της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Οι διατάξεις που μελετήθηκαν ανήκουν στο Εργαστήριο του τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας (ΕΠΤ), της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Στον τομέα διατίθενται ανιχνευτές υπεριαθαρού Γερμανίου, απόδοσης 33.8% (Ge33), απόδοσης 40% (Ge40) και ανιχνευτής χαμηλών ενεργειών (Low Energy Germanium-LEGe). Οι λεπτομέρειες για τον καθέναν από αυτούς, καθώς και για τον τρόπο χρήσης τους παρατίθενται στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού.

### 3.1 Ανιχνευτές Γερμανίου του ΕΠΤ – ΕΜΠ

#### 3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανιχνευτές Γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium–HPGe) συνίστανται από έναν κρύσταλλο αποτελούμενο αμιγώς από γερμάνιο, προκειμένου η πρόσπτωση της ακτινοβολίας και η αλληλεπίδρασή του με αυτόν να οδηγήσει στη δημιουργία σήματος και επομένως στην ανίχνευσή της. Ωστόσο, στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται, ότι στην έκταση του κρυστάλλου αυτού συνήθως περιμετρικά, σαν ένα εξωτερικό στρώμα αυτού, εμφανίζονται περιοχές, οι λεγόμενες “νεκρές ζώνες” (dead layers), στις οποίες δεν καταγράφεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η ύπαρξη της ζώνης αυτής είναι αναπόφευκτη, εξ’ αιτίας της ίδιας της διαδικασίας κατασκευής του ανιχνευτή και του σχηματισμού της ζώνης αντιστάθμισης (intrinsic region), που αποτελεί την ενεργό περιοχή του και εμφανίζεται κατά την ανάστροφη πόλωσή του. Οι διαστάσεις του dead layer εξαρτώνται από τα εικάστοτε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, το είδος και το βάθος της επαφής (p+ ή n+ contact), καθώς και από την εφαρμοζόμενη υψηλή τάση πόλωσης του ανιχνευτή (High Voltage). Επισημαίνεται βέβαια, ότι όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, το εύρος του dead layer δεν παραμένει σταθερό ούτε σε όλη την έκταση του κρυστάλλου, αλλά ούτε και με την πάροδο του χρόνου. Η μεταβολή του εξαρτάται από τη χρήση της ανιχνευτικής διάταξης, την σταθερή ή διαλείπουσα εφαρμογή της υψηλής τάσης, αλλά ενδεχομένως και από το ίδιο το πέρασμα των ετών. Ταυτόχρονα, η αρχική τιμή του πάχους του δεν είναι ήδη προσδιορισμένη από τον κατασκευαστή, γι’ αυτό και σε πολλές περιπτώσεις πριν τη χρήση του ανιχνευτή απαιτείται ο προσδιορισμός αυτού, αλλά και διάφορων ακόμα μεγεθών από τον πειραματιστή. Σχηματική αναπαράσταση τέτοιων ανιχνευτών δίνεται στο Σχήμα 3.1.



ΣΧΗΜΑ 3.1: Απεικόνιση ανιχνευτή Γερμανίου υψηλής καθαρότητας

Η πλειοψηφία των ανιχνευτών τύπου HPGe λειτουργούν τοποθετημένοι εντός ειδικής θωράκισης, με στόχο την κατά το δυνατόν απομείωση καταγραφής ακτινοβολίας από εξωγενείς παράγοντες, δηλαδή όσους δεν αφορούν το υπό ανάλυση δείγμα, όπως η κοσμική ακτινοβολία, τα οικοδομικά υλικά, η ραδιενέργεια περιβάλλοντος ή τυχούσες άλλες πηγές που βρίσκονται στο εργαστήριο. Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό κομμάτι μιας ανιχνευτικής διάταξης, με μεγάλη επίδραση στην ανάλυση ενός δείγματος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για δείγματα χαμηλής ραδιενέργειας και φωτόνια στην περιοχή χαμηλών ενεργειών. Κατάλληλα για την θωράκιση τέτοιων διατάξεων κρίνονται τα υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό, προκειμένου να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή εξασθένιση φωτονίων. Σε συνδυασμό με την αναζήτηση χαμηλού κόστους επιλέγονται τελικά κατά κύριο λόγο ο μόλυβδος ή το ατσάλι. Στο σημείο αυτό τονίζεται, ότι η ίδια η ύπαρξη της θωράκισης κατά την αλληλεπίδραση φωτονίων της πηγής με αυτήν μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ακτίνων-X ή ακόμη να περιέχει η ίδια ίχνη ραδιενεργών στοιχείων. Επομένως, η παντελής εξάλειψη του υποστρώματος δεν είναι εφικτή.

Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός περιλαμβάνει ακόμη μονάδες πυρηνικών ηλεκτρονικών για τη συλλογή και επεξεργασία του σήματος, όπως αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC), πολυκαναλικό αναλυτή (MCA), αλλά και σύστημα ψύξης. Αναλυτικότερα, το παραγόμενο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία σήμα ενισχύεται και διαμορφώνεται στον ενισχυτή και στη συνέχεια καταγράφεται μέσω του πολυκαναλικού αναλυτή. Για το λόγο αυτό, ο MCA διαθέτει συγκεκριμένο πλήθος καναλιών, δηλαδή συγκεκριμένη ενεργειακή διαμέριση, βάσει της οποίας καταγράφονται τα φωτόνια διάφορων ενεργειών. Ουσιαστικά, η ψηφιακή πληροφορία που εμπεριέχει την ενέργεια της εκάστοτε ενέργειας του φωτονίου είναι

αντίστοιχη με την διεύθυνση του καναλιού υπό το οποίο θα συλλεχθεί το υπόψη φωτόνιο. Το πλήθος και συνεπώς και το εύρος των καναλιών μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις συνθήκες και τις απαιτήσεις του πειράματος, αλλά και ανάλογα με την προς μελέτη ενεργειακή περιοχή. Η διάταξη καταλήγει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο πραγματοποιείται η καταγραφή, η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων.

Αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των ημιαγωγών ανιχνευτών είναι ότι η ενέργεια που χρειάζεται για τη δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη ενέργεια για παραγωγή ζεύγους ιόντων σε έναν ανιχνευτή αερίου, π.χ. Geiger Müller. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται παραγωγή μεγάλου πλήθους φορέων και συνεπώς μικρότερη στατιστική διακύμανση του ύψους του παλμού, οπότε επιτυγχάνεται η υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution). Ταυτόχρονα παρατηρείται καλή χρονική ανάλυση (time resolution), η οποία συνδέεται άμεσα με το χρόνο απόκρισης του μετρητικού οργάνου (rise time), καθώς τα ηλεκτρόνια κινούνται με υψηλές ταχύτητες εντός του ημιαγωγικού υλικού και συλλέγονται ταχύτατα. Αξίζει τέλος να αναφερθεί η υπεροχή των ημιαγωγικών ανιχνευτών εξαιτίας της μεγαλύτερης πυκνότητας του υλικού τους συγκριτικά με τους ανιχνευτές ιονισμένου αερίου. Λόγω αυτής τα προσπίπτοντα φωτόνια είναι δυνατό να εναποθέσουν ολόκληρη την ενέργειά τους σε αυτό, ακόμη κι αν πρόκειται για ημιαγωγό μικρών διαστάσεων.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα των ημιαγωγικών ανιχνευτών είναι ότι η ψύξη τους απαιτεί θερμοκρασίες ψυχρού αζώτου. Διαφορετικά, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μια μερίδα ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό είναι πολύ πιθανό να μεταβεί εύκολα στη ζώνη αγωγιμότητας, χωρίς να έχει προηγηθεί προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την παραγωγή έντονου ηλεκτρονικού θορύβου. Πρόκειται για το ρεύμα διαρροής, το οποίο ευθύνεται για την απώλεια πληροφορίας για την προσπίπτουσα στον ανιχνευτή ακτινοβολία. Πετυχαίνοντας θερμοκρασίες κοντά στις αντίστοιχες του υγρού αζώτου (77K) εξασθενούν οι θερμικές διεργασίες της ζώνης σθένους και τελικά παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών μόνο κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στο υλικό του ανιχνευτή. Για την ψύξη της διάταξης ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία, κατά την οποία απαιτείται πλήρωση ειδικού δοχείου με υγρό άζωτο κάθε 7-10 ημέρες περίπου, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένο λειτουργικό κόστος και δυσχεραίνει τη χρήση της. Βέβαια, όταν ένας ανιχνευτής δε βρίσκεται υπό τάση είναι εφικτή η διακοπή αυτής της διαδικασίας και η θέρμανση του έως θερμοκρασία δωματίου, κάτι το οποίο ωστόσο συχνά δε συνιστάται.

### 3.1.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ Ge33

Το μοντέλο του ανιχνευτή του ΕΠΤ-ΕΜΠΙ G12-S με σειριακό αριθμό 9831018 είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ημιαγωγός ανιχνευτής, κατασκευασμένος από υπερχαθαρό γερμάνιο (HPGe) με σχετική απόδοση 33.8%. (Θ. Βασιλοπούλου, Αθήνα 2008).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίνονται στον πίνακα 3.1.

Διάμετρος κρυστάλλου	55.3mm
Ύψος κρυστάλλου	65mm
Ενεργός περιοχή που “βλέπει” το παράθυρο	24.15cm <sup>2</sup>
Απόσταση από το παράθυρο	5mm

*ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Χαρακτηριστικά ανιχνευτή υπερχαθαρού Γερμανίου απόδοσης 33.8% σύμφωνα με το πιστοποιητικό του*

Διαθέτει ακόμη:

- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3106D, της CI
- Προενισχυτή τύπου 2001
- Ενισχυτή ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI
- Αναλογοψηφιακό μετατροπέα, τύπου 8701 της CI
- Πολυκαναλικό αναλυτή, AIM-550 της CI
- Ελεγκτή στάθμης υγρού αζώτου LN<sub>2</sub>, τύπου 1786A της CI

Σύμφωνα με το πιστοποιητικό με το οποίο συνοδεύεται η συγκεκριμένη διάταξη (Παράρτημα Α), η συνιστώμενη τάση για τη δημιουργία της ευαίσθητης περιοχής (depletion region), αλλά και η τάση λειτουργίας του κυμαίνονται στα 3000 V, ενώ διαθέτει διακριτική ικανότητα:

- FWHM: 0.85 keV και FWTM: 1.61 keV για ενέργεια φωτονίων 122 keV
- FWHM: 1.78 keV και FWTM: 3.26 keV για ενέργεια φωτονίων 1332 keV,

Στο σχήμα 3.2 δίνεται άποψη του υπερχαθαρού ανιχνευτή Γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠΙ.

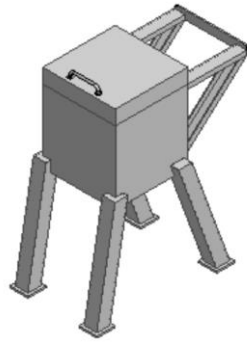


ΣΧΗΜΑ: 3.2 Άποψη του ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 33.8% του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Όπως είναι φανερό λοιπόν από τον πίνακα 3.1, στο πιστοποιητικό δίνονται μόνο οι συνολικές διαστάσεις του ανιχνευτή, ενώ δεν προσδιορίζεται ο ενεργός όγκος του. Σημειώνεται δε, ότι στη συγκεκριμένη μορφή του κρυστάλλου προβλέπεται εκ κατασκευής η ύπαρξη ομοαξονικής οπής (finger) κατά τον άξονά του, η οποία δε δίνεται από το πιστοποιητικό, αλλά πρέπει να υπολογιστεί μαζί με όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του ανιχνευτή, που απουσιάζουν από αυτό. Ακόμη, δεν αναφέρεται το πάχος του παραθύρου ΑΙ, που τοποθετείται στο άνω τμήμα του ανιχνευτή, παρ' όλο που δίνεται η απόσταση του παραθύρου από την επιφάνεια του κρυστάλλου. Εξ' αιτίας της παρουσίας του υλικού αυτού ο ανιχνευτής θα χρησιμοποιείται για φωτόνια υψηλών ενεργειών ( $E > 200\text{keV}$ ).

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να γίνει λόγος για τη θωράκιση του συγκεκριμένου ανιχνευτή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεγεί κυβική θωράκιση με κυλιόμενο κάλυμμα τύπου "roll top", όπως φαίνεται στα σχήματα 3.3.α και 3.3.β, η οποία είναι κατασκευασμένη από την εταιρία Gamma Products Inc.





ΣΧΗΜΑ 3.3.α: Σκαρίφημα της θωράκισης του ανιχνευτή Γερμανίου Ge33

ΣΧΗΜΑ 3.3.β: Άποψη της θωράκισης του ανιχνευτή Γερμανίου Ge33

Στη βάση της έχει σχεδιαστεί κατάλληλη οπή, προκειμένου να καθίσταται εφικτή η σύνδεση του ανιχνευτή με το δοχείο του υγρού αζώτου. Ακόμη έχουν τοποθετηθεί τρία στρώματα για τα τοιχώματά της, στρώμα χαλκού, κασσίτερου και ατσάλιου, ξεκινώντας από το εσωτερικό προς τα έξω. Η επιλογή αυτή στοχεύει στη θωράκιση του ανιχνευτή από τις χαρακτηριστικές ακτίνες-X, που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας  $\gamma$  με το ατσάλι, αλλά και με τον κασσίτερο. Στον πίνακα 3.2 παρατίθενται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τη θωράκιση.

Μοντέλο	Εσωτερικές διαστάσεις		Υλικό θωράκισης	Πάχος θωράκισης
	Ύψος ID	Διάμετρος ID		
G12-S	12"	12 x 12"	Ατσάλι	4"

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυβικής θωράκισης ανιχνευτή

### 3.1.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΥΠΕΡΚΑΘΑΡΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ Ge40

Το μοντέλο GC4018 της Canberra Industries INC (CI) με σειριακό αριθμό b12099 του ΕΠΤ-ΕΜΠ αποτελεί ομοαξονικό ανιχνευτή υψηλής καθαρότητας και απόδοσης 40%, με εσωτερική οπή. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τον κατασκευαστή (Παράρτημα Α) για τη γεωμετρία του κρυστάλλου δίνονται στον πίνακα 3.3.

Εξωτερική διάμετρος κρυστάλλου	59.5mm
Μήκος κρυστάλλου	61mm
Απόσταση από τον κρυστάτη	6mm

*ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υπερκαθαρού Γερμανίου ΕΠΤ-ΕΜΠ απόδοσης 40%, σύμφωνα με το πιστοποιητικό του*

Η τάση που συνιστάται για τη δημιουργία της ευαίσθητης περιοχής (depletion region) σε όλο τον όγκο του ανιχνευτή κυμαίνεται στα 3000V, ενώ η τάση για τη λειτουργία του είναι 3500V. Ο ανιχνευτής είναι τύπου-p και διαθέτει επαφή τύπου-p (με εμφύτευση ιόντων Β σε πάχος ~0.3mm) στην εξωτερική επιφάνεια και επαφή τύπου-n (με διάχυση ιόντων Li σε πάχος ~0.5mm) στην επιφάνεια της αξονικής οπής. (Μ. Παπαδιονυσίου, 2015). Προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία μεγάλης ενεργού περιοχής στον κρυστάλλο, στην οποία θα εκτείνεται το ηλεκτρικό πεδίο, εφαρμόζεται αντίστροφη πόλωση με ένα επίπεδο προσμίξεων της τάξης των  $10^{10}$  atoms/cm<sup>3</sup>. Ο ανιχνευτής διαθέτει κατακόρυφο κρυστάτη, τύπου 7500 της CI, κατασκευασμένο από υλικά πολύ χαμηλού υποστρώματος (της σειράς “Ultra-low background detector systems” της CI), με στόχο τη μείωση του υποβάθρου που παράγεται από το ίδιο το ανιχνευτικό σύστημα. Το παράθυρο του ανιχνευτή αποτελείται από αλουμίνιο περί τα 0.5mm, από το οποίο είναι εφικτή η διέλευση του 60% των φωτονίων ενέργειας 20 keV και το 2% των φωτονίων ενέργειας 6 keV. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τον πειραματιστή, εφόσον ο ανιχνευτής προορίζεται για την ανίχνευση φωτονίων υψηλών ενεργειών ( $E > 200$ keV). Ο κρυστάτης βυθίζεται σε κατάλληλο δοχείο υγρού αζώτου Dewar χωρητικότητας 30 lt, το οποίο ο πειραματιστής οφείλει να πληρώνει με άζωτο, συνήθως σε χρονικό διάστημα 7 ημερών, ανάλογα με τη χρήση του ανιχνευτή. Εντός του κρυστάτη και επιπλέον του ανιχνευτή, τοποθετείται και ο προενισχυτής, μοντέλο 2002CSL της CI, έτσι ώστε με την ψύξη του να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία του. Σύμφωνα με το πιστοποιητικό που συνοδεύει τη διάταξη, η διακριτική του ικανότητα είναι:

- FWHM: 821 keV για ενέργεια φωτονίων 122 keV
- FWHM: 1770 eV και FWTM: 3280eV για ενέργεια φωτονίων 1332 keV



ΣΧΗΜΑ: 3.4 Άποψη του ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 40% του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Η θωράκιση του ανιχνευτή έχει κατασκευαστεί από την εταιρία ITECO Engineering σε κυλινδρικό σχήμα και διαθέτει και αυτή κυλιόμενο κάλυμμα τύπου “roll-top”, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.4). Αποτελείται κυρίως από μόλυβδο (Pb), πάχους 100.5 mm, ενώ εσωτερικά του μολύβδου υπάρχει επένδυση από φύλλα κασσίτερου (Sn) και χαλκού (Cu), με στόχο από τον πρώτο να απορροφώνται οι ακτίνες-X του μολύβδου και από το δεύτερο οι ακτίνες-X του κασσίτερου. Οι διαστάσεις της θωράκισης (εσωτερικά) δίνονται στον πίνακα 3.4.

Εσωτερικές διαστάσεις		Υλικό θωράκισης	Πάχος θωράκισης
Ύψος ID	Διάμετρος ID	Μόλυβδος	100.5mm
400mm	246mm		

ΠΙΝΑΚΑΣ: 3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυλινδρικής θωράκισης ανιχνευτή

### 3.1.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ LEGe

Το μοντέλο GL2020-7500 της Canberra Industries INC (CI) με σειριακό αριθμό b87547 αποτελεί ανιχνευτή τύπου LEGe (Low Energy Germanium Detector). Η διάταξη τέθηκε σε λειτουργία το 1988 και έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση φωτονίων είτε σε ενεργειακό εύρος [20-200 keV] είτε σε εύρος [20-2000 keV]. Πρόκειται για έναν επίπεδο ανιχνευτή από Γερμάνιο (Ge) τύπου π κυλινδρικού σχήματος με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που δίνονται στον πίνακα 3.5, βάσει του πιστοποιητικού του (Παράρτημα Α).

Ενεργή διάμετρος κρυστάλλου	50.5mm
Ύψος κρυστάλλου	20mm
Επιφάνεια κρυστάλλου	2000mm <sup>2</sup>
Απόσταση από τον κρυστάτη	5mm
Πάχος του κρυστάτη	0.5mm

ΠΙΝΑΚΑΣ: 3.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή LEGe ΕΠΤ-ΕΜΠ, σύμφωνα με το πιστοποιητικό του

Πέραν του κρυστάλλου αυτού διαθέτει και τα παρακάτω επιμέρους στοιχεία:

- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3105 της CI
- Προενισχυτής τύπου 2100CP της CI, ενσωματωμένος στον κρυστάτη
- Ενισχυτής ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI
- Αναλογοψηφιακός μετατροπέας, τύπου 8075 της CI
- Πολυκαναλικός αναλυτής, AIM-550 της CI
- Ελεγκτής στάθμης υγρού αζώτου LN<sub>2</sub>, τύπου 1786A της CI

Η τάση που σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι επαρκής για τη δημιουργία της ευαίσθητης περιοχής (depletion region) σε όλο τον όγκο του ανιχνευτή είναι 1500V, ενώ η συνιστώμενη τάση για τη δημιουργία του κατάλληλα ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου είναι 2000V. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος από τον κατασκευαστή μέσα σε κατακόρυφο κρυστάτη τύπου 7500 της CI. (Μ. Ι. Αναγνωστάκης, Αθήνα 1998) Διαθέτει παραθύρο Βηρυλλίου (Be) πάχους 0.5mm, γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή εξασθένιση των ακτινών-γ χαμηλών ενεργειών (E<200 keV). Το μικρό πάχος του παραθύρου Be σε συνδυασμό με την ύπαρξη κενού μέσα στον κρυστάτη, το καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητο. Ταυτόχρονα, οι σχετικά μικρές διαστάσεις του συμβάλλουν στη βελτίωση της διακριτικής του ικανότητας. Εκτός από τον ανιχνευτή, εντός του κρυστάτη εντοπίζεται τμήμα του προενισχυτή που περιλαμβάνει και το FET (Field Effect Transistors), προκειμένου με την ψύξη του να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του. Για την ψύξη του ανιχνευτή χρησιμοποιείται δοχείο υγρού αζώτου dewar, συνολικού όγκου 30 lt, του οποίου απαιτείται πλήρωση κάθε 14 μέρες. Η δοθείσα από το πιστοποιητικό διακριτική ικανότητά του είναι:

- FWHM: 341 eV για ενέργεια φωτονίων 5.9 keV
- FWHM: 530 eV και FWTM: 996 eV για ενέργεια φωτονίων 122 keV

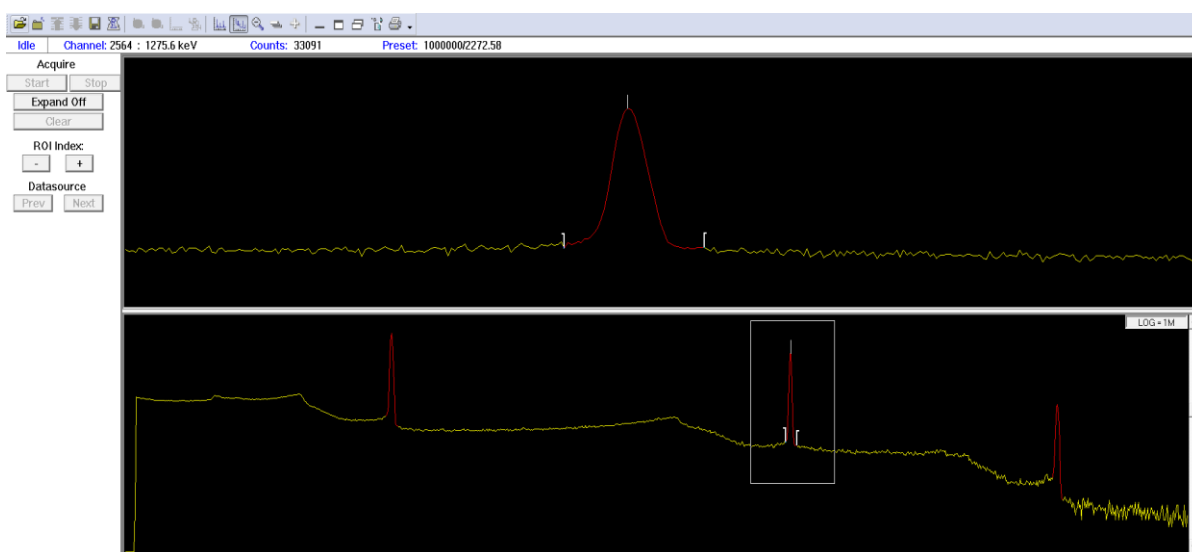


*ΣΧΗΜΑ: 3.5 Άποψη του ανιχνευτή Γερμανίου LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ*

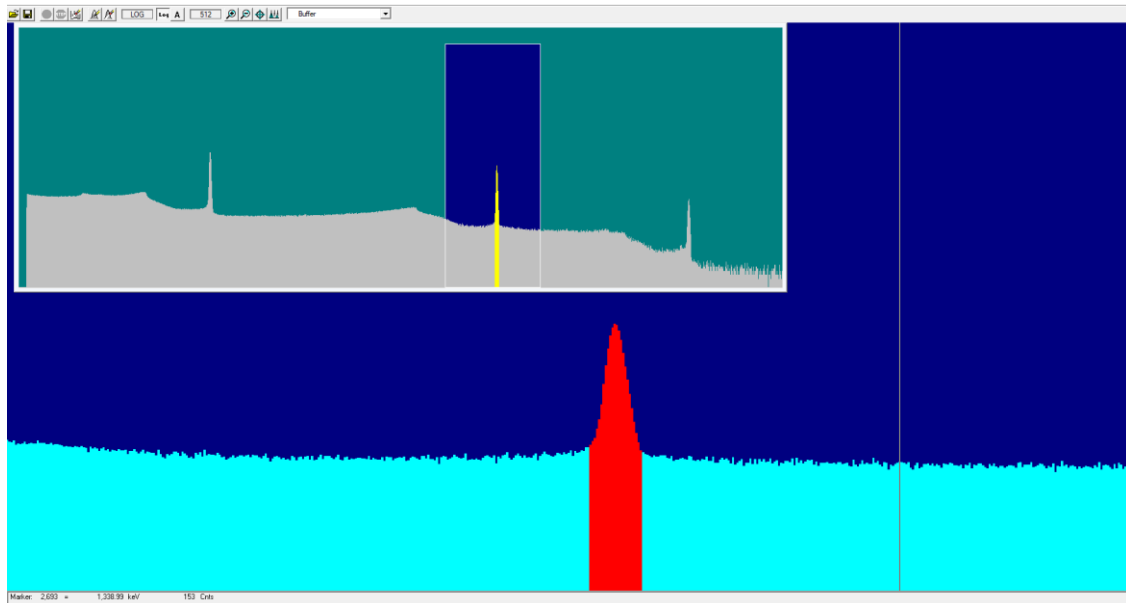
Σε ότι αφορά τη θωράκιση της συγκεκριμένης ανιχνευτικής διάταξης είναι κατασκευασμένη στο ΕΠΤ-ΕΜΠ με κάλυμμα τύπου “roll-top” από ατσάλι, αλλά και με εσωτερική επένδυση από χαλκό και κασσίτερο για βελτίωση του υποστρώματος. Όπως δηλαδή αναφέρθηκε και σε προηγούμενες περιπτώσεις ανιχνευτών, οι επιστρώσεις από τα υλικά αυτά είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση των ακτίνων-X που δημιουργούνται από την πρόσπτωση ακτινοβολίας-γ.

## 3.2 Λογισμικό ανάλυσης φασμάτων

Η συλλογή και η ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιείται σε δύο στάδια και με τη βοήθεια δύο διαφορετικών λογισμικών. Αρχικά, ο εκάστοτε ανιχνευτής του ΕΠΤ-ΕΜΠ που χρησιμοποιείται για τη συλλογή του φάσματος, είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Genie της Canberra Industries, Inc, υπεύθυνο για την αποθήκευση και προβολή του φάσματος. Η αποθήκευση των φασμάτων στο σκληρό δίσκο του Η/Υ γίνεται υπό τη μορφή αρχείων .CNF και .IEC, εκ των οποίων το πρώτο περιέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία για την αναπαράσταση του φάσματος, την ενεργειακή του βαθμονόμηση, τη χρονική διάρκεια και την ημερομηνία συλλογής του. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η ανάλυση του φάσματος, το αρχείο αυτό μετατρέπεται σε αρχείο τύπου .SPE, με σκοπό να είναι συμβατό με το λογισμικό ανάλυσης φασμάτων Gamma Vision™, της εταιρίας EG&G ORTEC-USA, το οποίο διατίθεται στο εργαστήριο του Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. Παρακάτω (Σχήματα 3.6 και 3.7) παρατίθεται το ίδιο φάσμα σε κοντινή απόσταση από τον ανιχνευτή Ge του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως παρουσιάζεται από κάθε ένα από τα δύο λογισμικά. Σε κάθε περίπτωση, ο πειραματιστής εστιάζει στη φωτοκορυφή ενδιαφέροντος και οριοθετεί την επιφάνειά της, μέσω της οποίας το λογισμικό εξάγει τα γεγονότα που έχουν καταγραφεί σε αυτήν με το αντίστοιχο σφάλμα.



ΣΧΗΜΑ 3.6: Φάσμα  $^{22}\text{Na}$  από τον ανιχνευτή  $\text{Ge33}$  του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε κοντινή απόσταση από τον ανιχνευτή, όπως αναπαριστάται από το λογισμικό Genie. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η φωτοκορυφή της χαρακτηριστικής ενέργειας του  $^{22}\text{Na}$ , στα 1274.5 keV. Στο κατώτερο τμήμα παρουσιάζεται το πλήρες φάσμα, στο οποίο διαφαίνονται και άλλες κορυφές όπως αυτή της εξαύλωσης, ενέργειας 511 keV.



ΣΧΗΜΑ 3.7: Φάσμα  $^{22}\text{Na}$  από τον ανιχνευτή  $\text{Ge40}$  του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε κοντινή απόσταση από τον ανιχνευτή, όπως αναπαρίσταται από το λογισμικό *Gamma Vision*. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η φωτοκορυφή της χαρακτηριστικής ενέργειας του  $^{22}\text{Na}$ , στα 1274.5 keV. Στο κατώτερο τμήμα παρουσιάζεται το πλήρες φάσμα, στο οποίο διαφαίνονται και άλλες κορυφές όπως αυτή της εξαύλωσης, ενέργειας 511 keV.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία για τον υπολογισμό της απόλυτης απόδοσης φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency-FEPE) για μια σειρά ενεργειών διάφορων ισotόπων. Το μέγεθος αυτό είναι απαραίτητο για τη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και την εξαγωγή συντελεστών διόρθωσης για τις φωτοκορυφές των ισotόπων στα οποία αυτό εμφανίζεται. Εξετάστηκαν για το σκοπό αυτό ποικίλες περιπτώσεις, με διαφορετικές παραμέτρους η κάθε μία προκειμένου να μελετηθεί η επίδρασή τους σε αυτό. Οι περιπτώσεις αυτές διέφεραν ως προς:

- το είδος της πηγής, δηλαδή είτε ως προς τη γεωμετρία της, είτε ως προς το ισotόπο
- την απόσταση πηγής – ανιχνευτή
- την επιλογή της θωράκισης της διάταξης (κλειστή ή ανοιχτή)

### 4.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής

Ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής μιας συγκεκριμένης ενέργειας μέσω πειραματικής διαδικασίας βασίζεται στη χρήση πηγών με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- πηγές γνωστής ραδιενέργειας
- πηγές που εκπέμπουν φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας
- πηγές ίδιας γεωμετρίας με το προς ανάλυση δείγμα

Η πηγή πρέπει να τοποθετηθεί στην ίδια θέση, με αυτήν στην οποία θα εξετασθεί το δείγμα που ενδιαφέρει τον πειραματιστή και αφού συλλεχθεί το αντίστοιχο φάσμα, η απόδοση φωτοκορυφής υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$Eff_{peak} = \frac{cps}{gps} \quad (4.1)$$

όπου:

$Eff_{peak}$ : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή

cps: ο αριθμός των ανιχνευόμενων κρούσεων

gps: ο αριθμός των εκπεμπόμενων από την πηγή ακτίνων- $\gamma$  (gammas per second)

Αναλυτικότερα, το μέγεθος gps (gammas per second) υποδεικνύει ουσιαστικά τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό η έκφραση:

$$gps = A \times f_{\gamma} \quad (4.2)$$

όπου:

A: η ενεργότητα της πηγής, δηλαδή ο αριθμός των διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου (Activity)

$f_{\gamma}$ : ο αριθμός των εκπεμπόμενων ακτίνων- $\gamma$  ανά διάσπαση (yield)

Θεωρώντας επίσης ότι ο ρυθμός των ανιχνευόμενων κρούσεων ισούται με τον αριθμό των



γεγονότων που καταγράφει ο ανιχνευτής στη μονάδα του χρόνου, το μέγεθος cps μπορεί να γραφεί ως:

$$cps = \frac{N}{t} \quad (4.3)$$

όπου:

N: η καθαρή επιφάνεια ή το εμβαδόν της φωτοκορυφής (Area)

t: η χρονική διάρκεια της μέτρησης

Συνδυάζοντας λοιπόν τις παραπάνω σχέσεις εξάγεται για την απόδοση φωτοκορυφής η επόμενη σχέση:

$$Eff_{peak} = \frac{N}{A \times f_{\gamma} \times t} \quad (4.4)$$

Συνεπώς, γνωρίζοντας τις τιμές για την ενεργότητα της πηγής και το yield των προς μελέτη διασπάσεων, είναι δυνατόν να υπολογιστεί πειραματικά το μέγεθος αυτό, με την καταγραφή από το αντίστοιχο φάσμα του εμβαδού της φωτοκορυφής και του χρόνου μέτρησης του δείγματος.

Για τη σχέση 4.4 ωστόσο απαιτούνται ορισμένες διορθώσεις είτε για το νεκρό χρόνο κατά την ανίχνευση είτε για την επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Ξεκινώντας από την πρώτη παράμετρο, ουσιαστικά πρόκειται για τη χρονική διαφορά, ανάμεσα στο χρόνο που στην πραγματικότητα διαρκεί η μέτρηση ( $t_{real}$ ) και στο χρόνο κατά τον οποίο ο ανιχνευτής καταγράφει φωτόνια ( $t_{live}$ ). Στην πραγματικότητα δηλαδή, οι ανιχνευτές συνοδεύεται από ένα χρόνο απόκρισης από τη στιγμή που καταγράφει ένα φωτόνιο μέχρι να καταγράψει ένα επόμενο. Στις περιπτώσεις όπου εξετάζονται μικρές αποστάσεις πηγής – ανιχνευτή ή/και σε ισχυρά ενεργές πηγές, η τιμή του νεκρού χρόνου είναι αυξημένη, διότι ο ανιχνευτής καλείται να καταγράψει μεγάλο αριθμό κρούσεων (counts). Συνεπώς, το επόμενο φωτόνιο προσπίπτει στον ανιχνευτή κατά τη διάρκεια επεξεργασίας από την ηλεκτρονική διάταξη του αρχικού φωτονίου, με απόρροια τη μη καταγραφή του. Εφαρμόζεται λοιπόν ένας παράγοντας διόρθωσης, προκειμένου να προσδιοριστεί ο πραγματικός αριθμός των φωτονίων που θα καταγράφονταν από τον ανιχνευτή. Τελικά, τα πραγματικά γεγονότα ( $N_{corr}$ ) προκύπτουν βάσει των γεγονότων που καταγράφηκαν από τον ανιχνευτή ( $N_{un}$ ), όπως παρουσιάζεται στη σχέση (4.5).

$$N_{corr} = \frac{t_{real}}{t_{live}} \times N_{un} \quad (4.5)$$

όπου  $t_{real} > t_{live}$ .

Συνεχίζοντας τώρα με την παράμετρο που αφορά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Ο μηχανισμός λειτουργίας του και ο τρόπος που επιδρά στο μέγεθος των καταγραφόμενων γεγονότων έχει αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 και συγκεκριμένα στην παράγραφο 2.2. Εφαρμόζοντας λοιπόν τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης στη σχέση που δόθηκε παραπάνω για την απόδοση φωτοκορυφής, προκύπτει:

$$Eff_{peak} = \frac{N}{A \times f_{\gamma} \times t} \times f_{tcc} \quad (4.6)$$

Επισημαίνεται εδώ, ότι κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής κρίνεται απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η “ακτινοβολία υποστρώματος” ή “ακτινοβολία υποβάθρου”

(background). Με άλλα λόγια, στο καταγραφόμενο φάσμα καταγράφονται και φωτόνια που δεν προέρχονται από την υπό μελέτη πηγή ή δείγμα. Ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, όπως η κοσμική ακτινοβολία ή η ακτινοβολία του περιβάλλοντος χώρου (οικοδομικά υλικά, συσκευές κ.α.) ή ακόμη ακτινοβολία άλλων ραδιενεργών δειγμάτων που βρίσκονται στον ίδιο χώρο με την ανιχνευτική διάταξη. Ωστόσο, στο φάσμα που συλλέγεται απεικονίζονται όλες οι κρούσεις και συνεπώς όλα τα καταγεγραμμένα φωτόνια, ανεξαρτήτως της προέλευσής τους. Προκειμένου λοιπόν να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς, ο αριθμός των προερχόμενων αποκλειστικά από την πηγή – δείγμα κρούσεων, αφαιρούνται τα γεγονότα της ακτινοβολίας υποβάθρου, όπως φαίνεται στη σχέση (4.7):

$$Area = Counts_{Spectrum} - Counts_{Background} \quad (4.7)$$

όπου:

Area: η επιφάνεια που αντιστοιχεί στον “καθαρό” αριθμό κρούσεων

Counts<sub>Spectrum</sub>: ο συνολικός αριθμός κρούσεων που καταγράφονται στο φάσμα

Counts<sub>Background</sub>: ο αριθμός των κρούσεων του υποστρώματος

τα οποία έχουν εκτιμηθεί μέσω της συλλογής αντίστοιχου φάσματος υποβάθρου, δηλαδή χωρίς το προς εξέταση δείγμα ή πηγή.

Για να ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής, είναι αναγκαία η εκτίμηση των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων που τη συνοδεύουν. Το βήμα αυτό αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη μετέπειτα αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση πειραματικών και τιμών προσομοίωσης. Συνεπώς παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των διάφορων σφαλμάτων. Αξιοποιούνται οι βασικοί τύποι της θεωρίας σφαλμάτων, που θα θεωρηθούν γνωστοί. Ξεκινώντας λοιπόν, διερευνάται η ύπαρξη ή μη σφάλματος στα μεγέθη της σχέσης (4.4). Με την παραδοχή ότι στο σχετικό σφάλμα της απόδοσης φωτοκορυφής συνεισφέρουν μόνο τα μεγέθη A και N, η τελική μορφή του τύπου για τον υπολογισμό του παρουσιάζεται στη σχέση (4.8).

$$\sigma(\text{Eff}_{\text{peak}}) = \sqrt{(\sigma N)^2 + (\sigma A)^2} \quad (4.8)$$

όπου:

$\sigma N = \frac{\delta N}{N}$  είναι το σχετικό σφάλμα της επιφάνειας της φωτοκορυφής

$\sigma A = \frac{\delta A}{A}$  είναι το σχετικό σφάλμα της ενεργότητας

Σημειώνεται δε, ότι το σχετικό σφάλμα  $\sigma(\text{Eff}_{\text{peak}})$  συνδέεται με το απόλυτο σφάλμα ως εξής:

$$\sigma(\text{Eff}_{\text{peak}}) = \frac{\delta(\text{Eff}_{\text{peak}})}{\text{Eff}_{\text{peak}}} \quad (4.9)$$

Για την έκφραση και την παρουσίαση των σφαλμάτων γίνεται συχνά χρήση του % σχετικού σφάλματος, το οποίο ουσιαστικά προκύπτει από το σχετικό σφάλμα πολλαπλασιασμένο επί εκατό. Το % σχετικό σφάλμα συνδέεται με το απόλυτο σφάλμα μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\% \sigma(x) = 100 \times \frac{\delta x}{x} \quad (4.10)$$

Βάσει λοιπόν των σχέσεων (4.8)–(4.10) υπολογίζονται όλα τα σφάλματα των μελετώμενων μεγεθών. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας όλα τα σφάλματα που παρουσιάζονται θα είναι τα σχετικά σφάλματα, σε επίπεδο αβεβαιότητας 1σ.

## 4.2 Πηγές αναφοράς

Η επιλογή των πηγών αναφοράς βασίστηκε στη δυνατότητά τους να πραγματοποιήσουν φαινόμενα σύμπτωσης, δηλαδή στην πιθανότητα, σύμφωνα με το διάγραμμα διάσπασής τους, να εκπέμπουν φωτόνια που θα ανιχνευτούν σε σειρά. Στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρθηκε και εισαγωγικά, τα ισότοπα αυτά συναντώνται με την ορολογία “cascade emitters”. Τα προς μελέτη ισότοπα λοιπόν ήταν τα εξής:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ . Στο σημείο αυτό ωστόσο χρειάζεται να τονιστεί, ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές γεωμετρικές πηγών που περιλάμβαναν τα ισότοπα αυτά. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν σημειακές πηγές, αλλά και μία επιφανειακή πηγή γεωμετρίας φίλτρου, με πλήθος ισοτόπων, σε γεωμετρία πηγής φίλτρου. Οι πληροφορίες για κάθε μία από αυτές βρίσκονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2.

- Σημειακές πηγές

Ισότοπο	Ημερομηνία αναφοράς	Ενεργότητα αναφοράς (kBq)	Κωδικός πηγής	Εργαστήριο
$^{60}\text{Co}$	1/1/2015	33.47	1772-79-4	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.
$^{60}\text{Co}$	1/1/1981	43.771	7U238	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π.
$^{60}\text{Co}$	1/2/1981	440.67	10557	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π. (V)
$^{22}\text{Na}$	1/1/2015	37.59	1772-79-7	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.
$^{57}\text{Co}$	1/1/2015	39.22	1772-79-3	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.
$^{133}\text{Ba}$	1/2/1981	384.8	1R473	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π. (V)
$^{137}\text{Cs}$	1/1/1981	36.741	7S266	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π. (V)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Χαρακτηριστικά σημειακών πηγών αναφοράς

- Επιφανειακή πηγή

Ισότοπο	Ημερομηνία αναφοράς	Ενεργότητα αναφοράς (kBq)	Κωδικός πηγής	Εργαστήριο
$^{133}\text{Ba}$	9/1/2010	2.00	SX569	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.
$^{57}\text{Co}$	9/1/2010	1.77	SX569	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.
$^{54}\text{Mn}$	9/1/2010	3.58	SX569	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.
$^{65}\text{Zn}$	9/1/2010	8.47	SX569	Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Χαρακτηριστικά επιφανειακής πηγής αναφοράς

## 4.3 Πειραματικές μετρήσεις

### 4.3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΩΝ

### ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ

### ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ

Πριν την έναρξη των πειραμάτων για τη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και προκειμένου να ελεγχθεί η μέχρι σήμερα εγκυρότητα του γεωμετρικού μοντέλου του ανιχνευτή ή η ενδεχόμενη μεταβολή σε κάποιο μέγεθος (γεγονός που συζητήθηκε στο κεφάλαιο 2), έγινε επανάληψη του πειράματος προγενέστερης εργασίας (Θ. Βασιλοπούλου, 2008) με τις ίδιες κατά το δυνατόν συνθήκες. Συγκεκριμένα δηλαδή, χρησιμοποιήθηκε μια σειρά ισοτόπων (Πίνακας 4.8) που προσέφεραν ενεργειακό εύρος: 53.1622 keV–1332.492 keV και υπολογίστηκε η απόδοση φωτοκορυφής για μία απόσταση πηγής – ανιχνευτή, δηλαδή τα 22.4 cm. Η ελάχιστη πηγή τοποθετούνταν κεντρικά, πάνω από το παράθυρο του ανιχνευτή, με τη θωράκισή του ανοιχτή. Η απόσταση αυτή επιλέγεται προκειμένου το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, όταν αυτό εμφανίζεται στο προς μελέτη ισότοπο, δηλαδή μόνο στο  $^{133}\text{Ba}$  και στο  $^{60}\text{Co}$ , να είναι ασθενές.

- Σημειακές πηγές

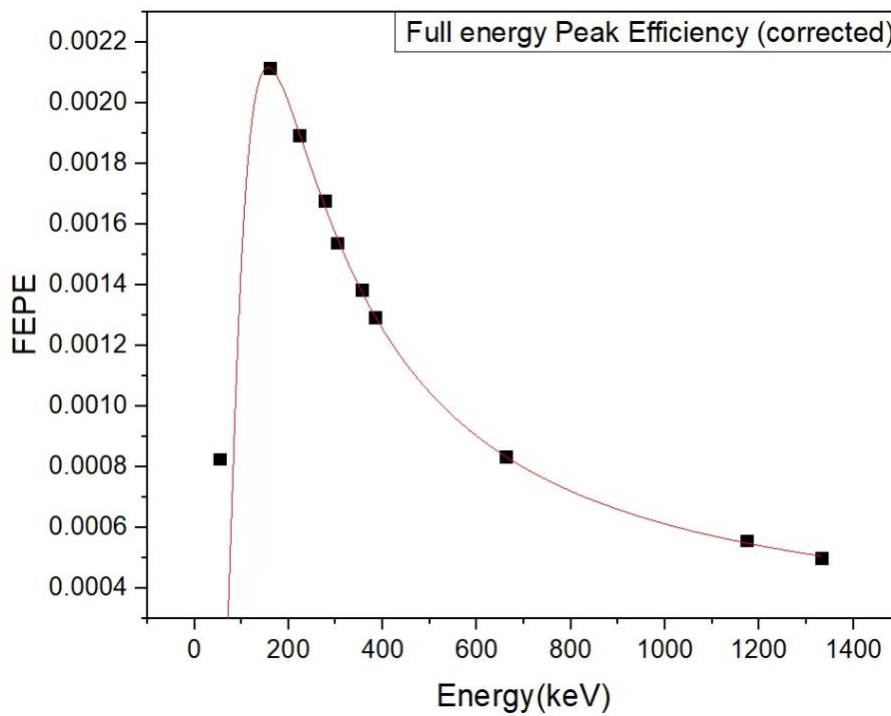
Ισότοπο	Ημερομηνία αναφοράς	Ενεργότητα αναφοράς (kBq)	Κωδικός πηγής	Εργαστήριο
$^{133}\text{Ba}$	1/2/1981	384.8	1R473	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π. (V)
$^{60}\text{Co}$	1/2/1981	440.67	10557	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π. (V)
$^{137}\text{Cs}$	1/1/1981	36.741	7S266	Ε.Π.Τ–Ε.Μ.Π. (V)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Χαρακτηριστικά σημειακών πηγών αναφοράς

Η απόδοση φωτοκορυφής με το αντίστοιχο σφάλμα της για όλες τις ενέργειες των χρησιμοποιούμενων ισοτόπων (Πίνακας 4.9), υπολογίστηκε μέσω των σχέσεων (4.4) και (4.6), οι οποίες έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 4.1.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματική τιμή απόδοσης φωτοκορυφής	
		Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>133</sup> Ba	53.1622	8.2545E-04	0.06
<sup>133</sup> Ba	160.6121	2.1162E-03	0.08
<sup>133</sup> Ba	223.2368	1.8947E-03	0.07
<sup>133</sup> Ba	276.3992	1.6792E-03	0.03
<sup>133</sup> Ba	302.8512	1.5386E-03	0.03
<sup>133</sup> Ba	356.0134	1.3832E-03	0.03
<sup>133</sup> Ba	383.8491	1.2927E-03	0.03
<sup>60</sup> Co	1173.228	5.5633E-04	0.03
<sup>60</sup> Co	1332.492	4.9805E-04	0.03
<sup>137</sup> Cs	661.657	8.3185E-04	0.03

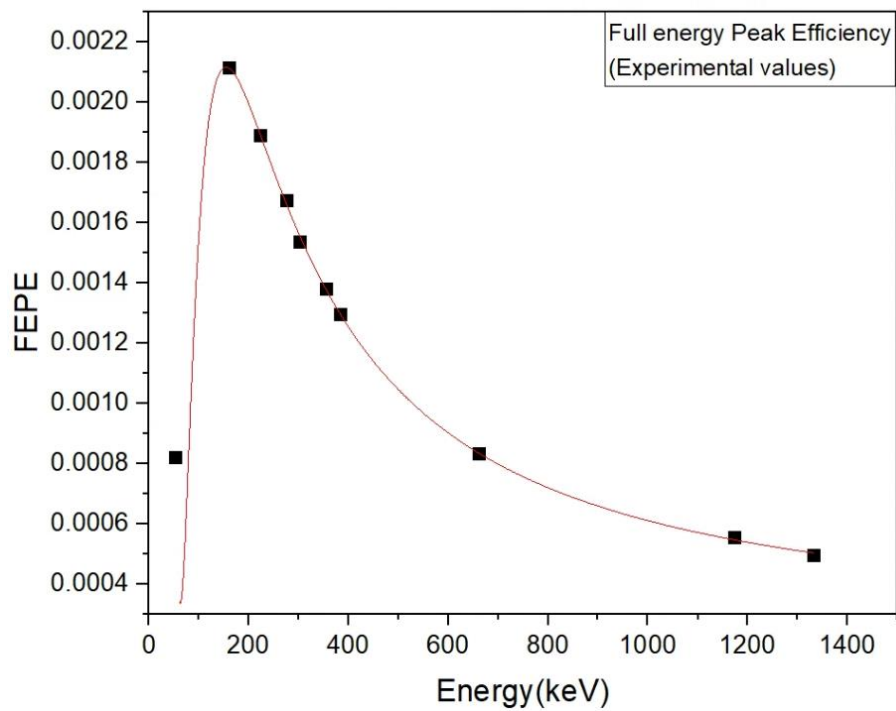
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής ανά ισότοπο και ενέργεια για απόσταση πηγής – ανιχνευτή ίση με 22.4cm, διορθωμένες για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης



ΓΡΑΦΗΜΑ 4.1: Καμπύλη απόδοσης φωτοκορυφής για την απόσταση 22.4cm πηγής – ανιχνευτή, όπως προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις, διορθωμένες για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματική τιμή απόδοσης φωτοκορυφής	
		Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>133</sup> Ba	53.1622	8.2132E-04	0.06
<sup>133</sup> Ba	160.6121	2.1141E-03	0.07
<sup>133</sup> Ba	223.2368	1.8909E-03	0.07
<sup>133</sup> Ba	276.3992	1.6758E-03	0.02
<sup>133</sup> Ba	302.8512	1.5371E-03	0.02
<sup>133</sup> Ba	356.0134	1.3818E-03	0.02
<sup>133</sup> Ba	383.8491	1.2952E-03	0.02
<sup>60</sup> Co	1173.228	5.5410E-04	0.02
<sup>60</sup> Co	1332.492	4.9606E-04	0.02
<sup>137</sup> Cs	661.657	8.3185E-04	0.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής ανά ισότοπο και ενέργεια για απόσταση πηγής – ανιχνευτή ίση με 22.4cm (μη διορθωμένες για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης)



ΓΡΑΦΗΜΑ 4.2: Καμπύλη απόδοσης φωτοκορυφής για την απόσταση 22.4cm πηγής – ανιχνευτή, όπως προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις

### 4.3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ

Πέραν των διαφοροποιήσεων ως προς το είδος του ισότοπου και της γεωμετρίας της πηγής, η μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης σε κάθε νουκλίδιο πραγματοποιείται σε ποικίλες αποστάσεις πηγής – ανιχνευτή με διαφορετική επιλογή ως προς τη γεωμετρία της θωράκισης σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα δηλαδή, στόχος είναι να μελετηθεί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης σε κοντινές αλλά και μακρινές αποστάσεις πηγής–ανιχνευτή, είτε με ανοιχτό είτε με κλειστό το κάλυμμα της θωράκισης του ανιχνευτή. Αναλυτικότερα εξετάστηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις:

– Ge33:

Ισότοπο	Απόσταση πηγής ανιχνευτή	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co	1.2 cm	Ανοιχτή	1173.228	1.8069E-02	0.02
			1332.492	1.6357E-02	0.02
		Κλειστή	1173.228	1.8362E-02	0.02
			1332.492	1.6339E-02	0.02
	9.5 cm	Ανοιχτή	1173.228	1.9299E-03	0.03
			1332.492	1.7765E-03	0.03
		Κλειστή	1173.228	1.9568E-03	0.03
			1332.492	1.7623E-03	0.03
<sup>22</sup> Na	1.2 cm	Ανοιχτή	1274.537	1.4564E-02	0.03
		Κλειστή	1274.537	1.4580E-02	0.03
	9.5 cm	Ανοιχτή	1274.537	1.8340E-03	0.03
		Κλειστή	1274.537	1.8320E-03	0.03
Mixed nuclide source	0cm	Κλειστή	53.1622	2.7996E-04	0.04
			160.6121	1.3344E-03	0.02
			223.2368	8.1154E-04	0.03
			276.3989	7.7423E-04	0.01
			302.8508	7.8043E-04	0.01
			356.0129	7.0552E-04	0.01
			383.8485	7.9134E-04	0.01
			661.657	3.7959E-05	0.01
834.848	1.5644E-07	0.06			

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Μελετώμενες γεωμετρίες στη διάταξη Ge33

– Ge40:

Ισότοπο	Απόσταση πηγής ανιχνευτή	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co	0.935 cm	Ανοιχτή	1173.228	1.8127E-02	0.02
			1332.492	1.6093E-02	0.02
		Κλειστή	1173.228	1.7996E-02	0.01
			1332.492	1.6180E-02	0.01
	9.8 cm	Ανοιχτή	1173.228	2.6256E-03	0.03
			1332.492	2.3746E-03	0.03
		Κλειστή	1173.228	2.6243E-03	0.03
			1332.492	2.3752E-03	0.03
<sup>22</sup> Na	0.935 cm	Ανοιχτή	1274.537	1.8089E-02	0.03
		Κλειστή	1274.537	1.8368E-02	0.03
	9.8 cm	Ανοιχτή	1274.537	2.4394E-03	0.03
		Κλειστή	1274.537	2.4518E-03	0.03
Mixed nuclide source	0cm	Κλειστή	53.1622	6.0314E-04	0.03
			160.6121	1.6116E-03	0.01
			223.2368	9.3319E-04	0.01
			276.3989	7.9807E-04	0.01
			302.8508	8.3097E-04	0.01
			356.0129	7.6953E-04	0.01
			383.8485	8.8094E-04	0.01
			661.657	5.3594E-04	0.01
			834.848	4.3689E-07	0.01

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: Μελετώμενες γεωμετρίες στη διάταξη Ge40

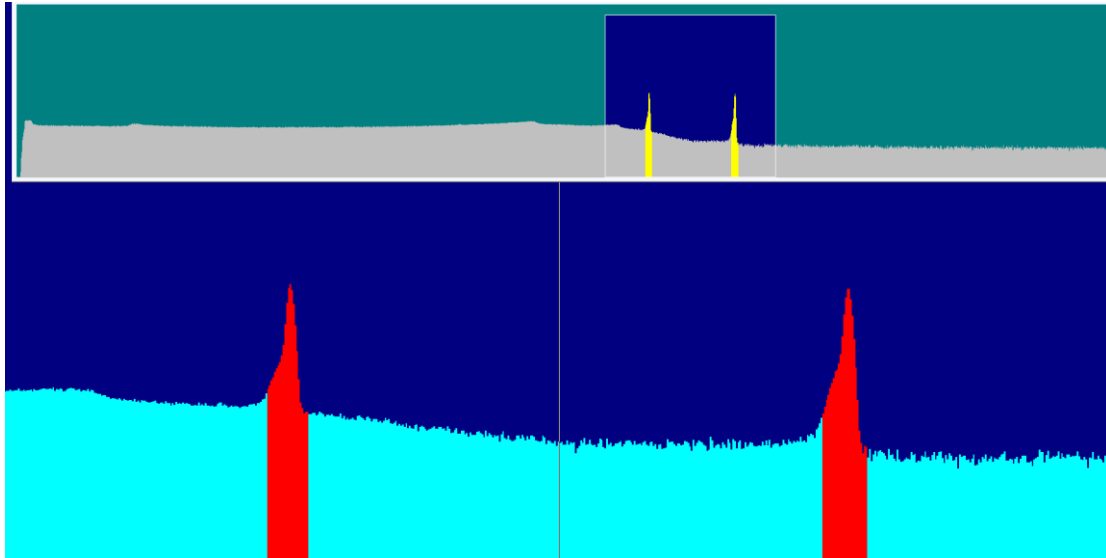


– LEGe:

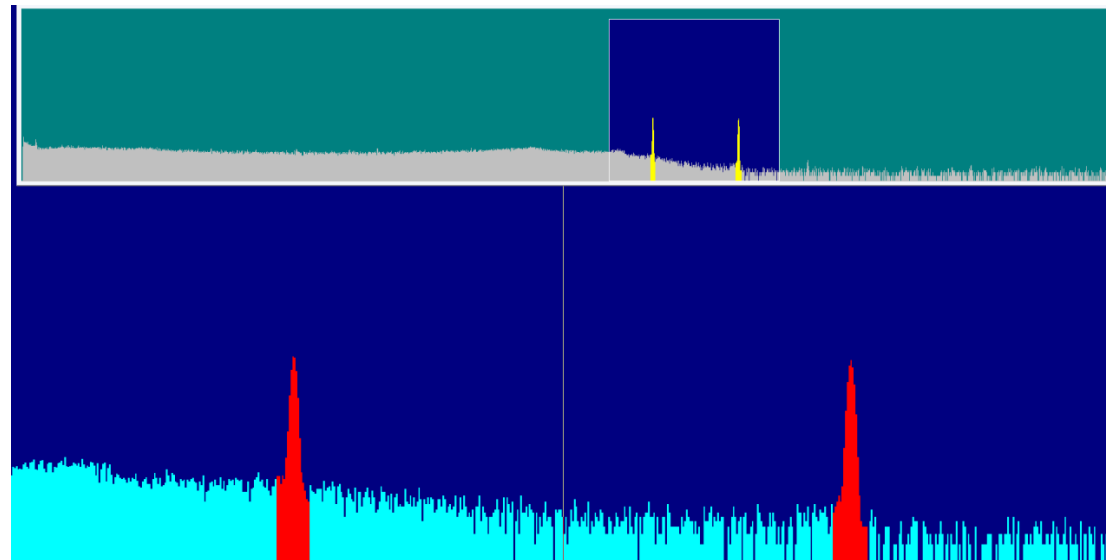
Ισότοπο	Απόσταση πηγής ανιχνευτή	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>57</sup> Co	0cm	Κλειστή	122.0606	2.2851E-03	0.03
			136.47356	2.5292E-03	0.03
	0cm (εντός θήκης plexiglass)		122.0606	2.0443E-03	0.03
			136.47356	2.2070E-03	0.03
Mixed nuclide source	0cm	Κλειστή	53.1622	7.3147E-02	0.03
			160.6121	1.4956E-01	0.01
			223.2368	3.9178E-02	0.02
			276.3989	3.9098E-02	0.01
			302.8508	2.2829E-03	0.01
			356.0129	3.9199E-03	0.01
			383.8485	3.1529E-03	0.01
			661.657	1.2674E-04	0.01
			834.848	1.4988E-07	0.03

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: Μελετώμενες γεωμετρίες στη διάταξη LEGe

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να τονιστεί, ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγιναν κατάλληλες τροποποιήσεις, προκειμένου να αντιμετωπιστούν ζητήματα που αφορούσαν τις πειραματικές διατάξεις και τα φάσματα που είχαν ληφθεί. Πιο συγκεκριμένα, οι πρώτες πειραματικές μετρήσεις που λήφθηκαν στον ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 40%, οδήγησαν στη λήψη φασμάτων με κορυφές που δεν προσιδιάζαν στην απαιτούμενη γκαουσιανή καμπύλη. Εμφάνιζαν με άλλα λόγια, μία “ουρά” στις χαμηλές ενέργειες (low energy tale), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, επομένως κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η πηγή του προβλήματος αυτού. Δεδομένου ότι η μορφή αυτή των κορυφών εμφανιζόταν στο φάσμα οποιουδήποτε δείγματος ή πηγής τοποθετούνταν στον ανιχνευτή, έγινε η υπόθεση ότι πρόκειται για πρόβλημα που αφορά τα ηλεκτρονικά της διάταξης. Για το λόγο αυτό, συνδέθηκε κατάλληλα στη διάταξη ένας παλμογράφος και διαπιστώθηκε η παραπάνω εικασία. Με μία σειρά δοκιμών το πρόβλημα αποκαταστάθηκε και πλέον οι κορυφές των φασμάτων λάμβαναν τον επιθυμητό σχηματισμό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



ΣΧΗΜΑ 4.1: Φάσμα  $^{60}\text{Co}$  στον ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 40%, σε απόσταση 0.935cm. Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται οι φωτοκορυφές του ισότοπου στα 1173.228 και 1332.492 keV, οι οποίες δεν έχουν λάβει τον επιθυμητό σχηματισμό

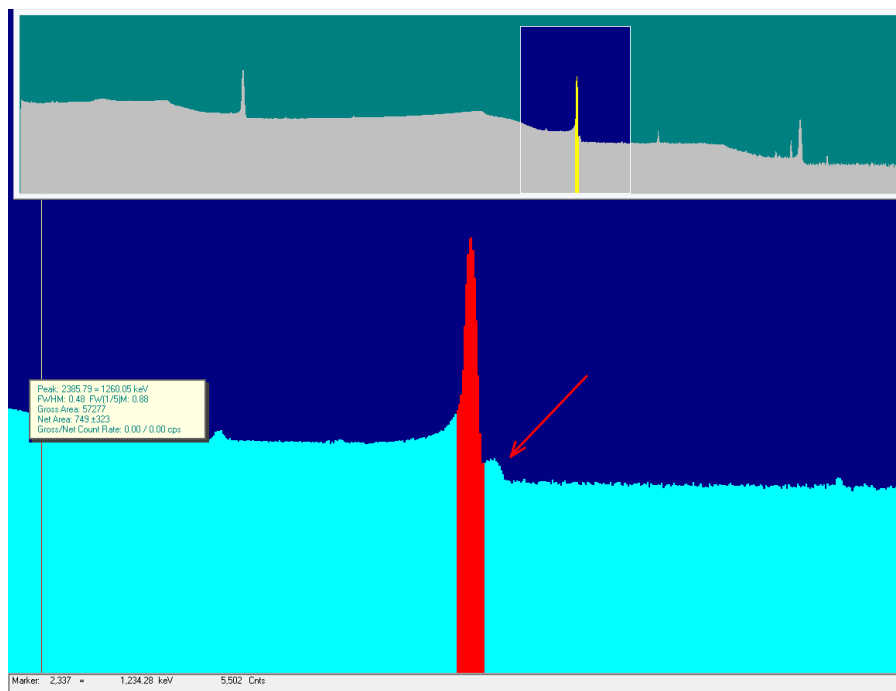


ΣΧΗΜΑ 4.2: Φάσμα  $^{60}\text{Co}$  στον ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 40%, σε απόσταση 0.935cm. Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται οι φωτοκορυφές του ισότοπου στα 1173.228 και 1332.492 keV, οι οποίες έχουν πλέον λάβει τον επιθυμητό σχηματισμό

Τονίζεται τέλος, ότι συνήθως στον εν λόγω ανιχνευτή μελετώνται στο πλαίσιο των εργασιών του ΕΠΤ–ΕΜΠ, πηγές ή δείγματα που εκπέμπουν φωτόνια χαμηλών ενεργειών, δηλαδή παρουσιάζουν φωτοκορυφές σε ενεργειακές περιοχές με υψηλό υπόστρωμα (background). Έτσι μία τέτοια παρατήρηση δε θα ήταν τόσο εύκολο να πραγματοποιηθεί. Στην παρούσα εργασία δηλαδή, το πρόβλημα αυτό διαπιστώθηκε κατά τη διάρκεια φασματοσκοπικής ανάλυσης για φωτόνια άνω των 1000keV, όπου το υπόστρωμα είναι χαμηλό συγκριτικά με το ύψος των μελετώμενων φωτοκορυφών.

## 4.4 Η περίπτωση του ισοτόπου $^{22}\text{Na}$

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων λήφθηκε ένα φάσμα  $^{22}\text{Na}$  στον ανιχνευτή Ge40 σε απόσταση 9.5cm από το παράθυρο του ανιχνευτή, που παρουσίαζε μία ιδιαιτερότητα στην περιοχή γύρω από τη χαρακτηριστική φωτοκορυφή του ισοτόπου, δηλαδή στα 1274.5keV. Το φάσμα παρουσιάζεται παρακάτω, στο σχήμα 4.3, το οποίο απεικονίζει τη μη ομαλή κατάληξη της κορυφής στις υψηλές ενέργειες.



ΣΧΗΜΑ 4.3: Φάσμα  $^{22}\text{Na}$  στον ανιχνευτή Ge40, σε απόσταση 9.5cm από το παράθυρο του ανιχνευτή.

Ουσιαστικά, γύρω από την ενέργεια των 1280 keV περίπου, όπως δείχνει το βέλος, παρατηρείται περαιτέρω καταγραφή φωτονίων από τα αναμενόμενα, εκτός δηλαδή της ακτινοβολίας του υποστρώματος. Υπογραμμίζεται, ότι ο προς διερεύνηση σχηματισμός δεν εντοπίζεται κατά την καταγραφή φωτονίων άλλου ισοτόπου από όσα μελετώνται στο συγκεκριμένο ανιχνευτή, επομένως δεν πρόκειται για κάποιο φαινόμενο που εμφανίζεται σε κάθε περίπτωση καταγραφής φάσματος στο όργανο αυτό, παρά μόνο σε αυτήν τη μεγάλης διάρκειας (6 ημέρες περίπου) μέτρηση. Ωστόσο, δε μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι πρόκειται για “high energy tale”, διότι ο σχηματισμός αυτός δεν εμφανίζεται στο φάσμα αυτό σε καμία άλλη φωτοκορυφή. Η επαναληψιμότητα της εικόνας αυτής μετά από τέσσερις διαφορετικές μετρήσεις, είτε με ανοιχτή είτε με κλειστή τη θωράκιση του ανιχνευτή και μάλιστα σε χρονικές στιγμές που απειχαν μεταξύ τους, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν πρόκειται για κάποια εσφαλμένη διαδικασία ή κάποιον εξωγενή αστάθμητο παράγοντα που επηρέασε το πείραμα.

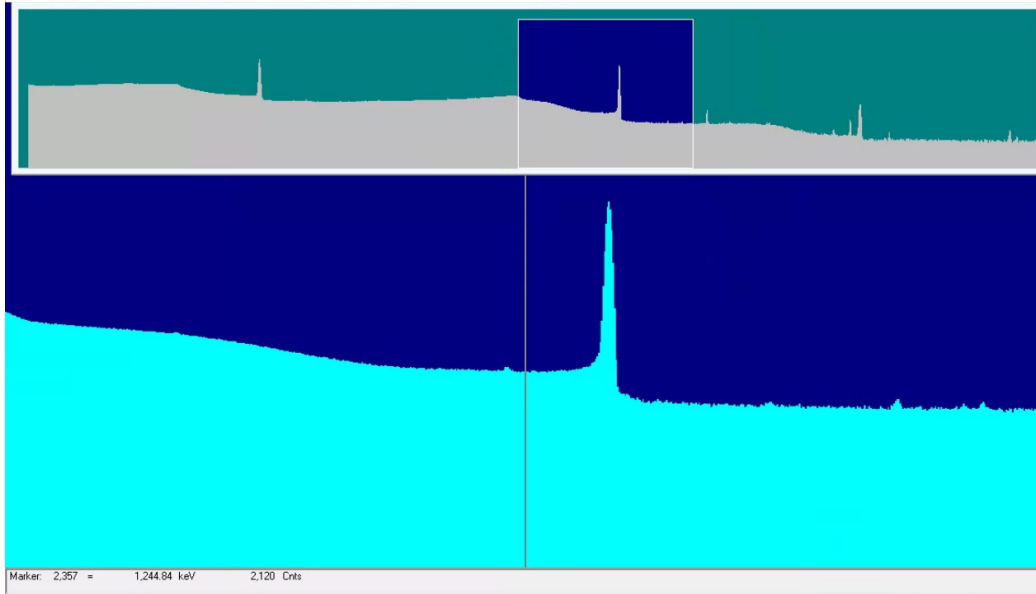
Ακόμη, εξετάσθηκε η πιθανότητα να πρόκειται για κάποια γνωστή από τη βιβλιογραφία φωτοκορυφή του φυσικού υποστρώματος, που στις περιπτώσεις μετρήσεων αρκετών ημερών είναι εμφανής στο φάσμα που λαμβάνεται. Ένα από τα ισότοπα που συναντάται συχνά, είναι

το  $^{214}\text{Bi}$ , το οποίο εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 1280.96keV με yield 1.435%, δηλαδή σε μία ενέργεια που θα μπορούσε να δικαιολογήσει το σχηματισμό αυτής της κορυφής. Ωστόσο, η υπόθεση αυτή επίσης απορρίφθηκε, διότι το συγκεκριμένο ισότοπο διαθέτει φωτόνια με χαρακτηριστικές ενέργειες που συνοδεύονται με μεγαλύτερη πιθανότητα εκπομπής, όπως η κορυφή των 609.312keV με yield 45.49% ή η κορυφή των 1238.1keV με yield 5.831%. Ως αποτέλεσμα λοιπόν, θα αναμενόταν να εμφανίζονται εντονότερα στο φάσμα, αλλά κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε. Εξάγεται συνεπώς το συμπέρασμα, ότι δεν πρόκειται για κάποια απόρροια ακτινοβολίας από φυσική ραδιενέργεια.

Εξετάσθηκε επίσης η πιθανότητα να πραγματοποιείται κάποιο φαινόμενο σύμπτωσης, σαφώς όχι πραγματικής, δηλαδή ανίχνευσης ακτινοβολίας δύο φωτονίων, των οποίων η αθροιστική ενέργεια είναι κοντά στα 1280keV. Αυτό θα προϋπέθετε την εκπομπή φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή των 6keV περίπου, ώστε μαζί με τα 1274.5keV του  $^{22}\text{Na}$  να οδηγεί στην κορυφή των 1280keV. Διερευνήθηκε λοιπόν εκτενώς η περίπτωση να υπάρχει κάποιο υλικό με χαρακτηριστικές ακτίνες-X τέτοιων ενεργειών, αλλά δεν εντοπίστηκε κάποιο βάσει των μέχρι σήμερα δοθέντων πληροφοριών για την κατασκευή και τη σύσταση των υλικών του ανιχνευτή.

Προκειμένου να εξετασθεί περαιτέρω αυτή η συμπεριφορά τοποθετήθηκε στον ίδιο ανιχνευτή και με την ίδια γεωμετρία, δηλαδή σε απόσταση 9.4cm, σημειακή πηγή  $^{65}\text{Zn}$ , με τη λογική, ότι αποτελεί ένα ισότοπο με εκπομπή φωτονίων μίας χαρακτηριστικής ενέργειας, στα 1115.5keV, ενώ παράλληλα εκπέμπεται και ποζιτρόνιο, με αποτέλεσμα παραγωγή φωτονίων εξαΰλωσης στα 511keV. Η φωτοκορυφή λοιπόν που προερχόταν από ακτίνες-γ 1115.5keV, παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά που παρατηρήθηκε και στην πηγή  $^{22}\text{Na}$ . Καταγράφεται δηλαδή όμοιος σχηματισμός στις υψηλότερες ενέργειες της κορυφής αυτής και σε καμία άλλη κορυφή του φάσματος, ούτε της εξαΰλωσης ούτε σε κάποια από αυτές του υποστρώματος. Χρειάζεται ακόμη να αναφερθεί, ότι στο συγκεκριμένο ανιχνευτή έχει πραγματοποιηθεί ξανά μέτρηση  $^{65}\text{Zn}$ , διότι αποτελεί ισότοπο που περιέχεται στην επιφανειακή πηγή. Η μέτρηση αυτή γίνεται με σε επαφή με τον ανιχνευτή, με αρκετές διαφοροποιήσεις, αρχικά ως προς τη γεωμετρία και φυσικά ως προς το πλήθος των ισοτόπων. Τονίζεται δε, ότι δεν παρατηρείται η εν λόγω συμπεριφορά στη φωτοκορυφή του συγκεκριμένου ισοτόπου στην περίπτωση αυτή.

Εφόσον όλες οι προαναφερθείσες υποθέσεις είχαν απορριφθεί κρίθηκε σκόπιμο να εξετασθεί η συγκεκριμένη πηγή σε άλλον ανιχνευτή. Επιλέχθηκε λοιπόν ο ανιχνευτής Γερμανίου υψηλής καθαρότητας και απόδοσης 80% (GEM80) του εργαστηρίου γ-φασματοσκοπίας του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών, Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας (Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος. Το φάσμα που συλλέχθηκε παρουσιάζεται παρακάτω, στο σχήμα 4.4.



ΣΧΗΜΑ 7.4: Φάσμα  $^{22}\text{Na}$  που συλλέχθηκε από τον ανιχνευτή GEM80.

Γίνεται εύκολα κατανοητό λοιπόν, ότι η ίδια πηγή, όταν εξετάζεται σε διαφορετικό ανιχνευτή, δεν παρουσιάζει τη συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στο Ge40. Το φάσμα του  $^{22}\text{Na}$  όπως συλλέγεται από τον ανιχνευτή GEM80 δεν παρουσιάζει καμία εν δυνάμει φωτοκορυφή στην περιοχή των 1280keV. Συνεπώς, το ζήτημα αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, ειδικά στο πλαίσιο εργασιών που σχετίζονται άμεσα με τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση και στις οποίες πρόκειται να γίνει χρήση του ανιχνευτή Ge40 του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Όσον αφορά την ανάλυση της κορυφής αυτής κρίθηκε ορθότερο να μη ληφθεί υπόψη ο σχηματισμός που δημιουργείται στις υψηλές ενέργειές της, συνεπώς να μη συνυπολογιστούν τα καταγραφόμενα φωτόνια στην περιοχή αυτή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE–CARLO

### 5.1 Μέθοδος Monte – Carlo

Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητηθούν μέθοδοι διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, οι οποίες βασίζονται στη χρήση κωδικών προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται δύο κώδικες βασισμένοι σε μεθόδους Monte–Carlo (M–C), δηλαδή σε αριθμητικές διαδικασίες επίλυσης προβλημάτων βάσει τεχνικών δειγματοληψίας, που στηρίζονται στη θεωρία πιθανοτήτων. Ο τρόπος λειτουργίας αυτών, μπορεί να παρομοιαστεί με την ρίψη ενός ζαριού σε ένα παιχνίδι τύχης, αφού εξάλλου και η δοσμένη ονομασία προέρχεται από το καζίνο του Monte–Carlo, στο Μονακό. Ουσιαστικά το αντικείμενο προς μελέτη, ή με άλλα λόγια το εκάστοτε φυσικό μέγεθος αποτελεί παράμετρο τυχαίων διαδικασιών που αναπαράγονται. Για το λόγο αυτό, κάθε φυσικό πρόβλημα εξελίσσεται σε μία υπολογιστική πλατφόρμα και όχι στο φυσικό κόσμο.

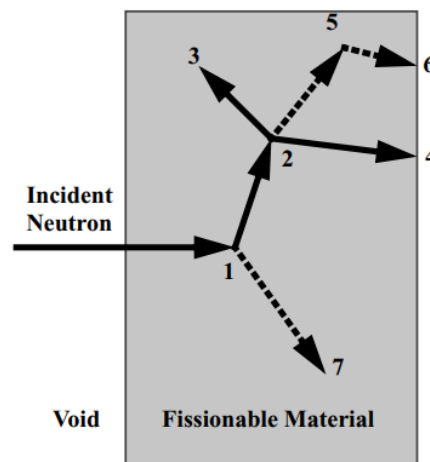
Οι πρωταρχικές ιδέες και αναφορές πάνω σε τεχνικές Monte Carlo πραγματοποιούνται από τους Laplace (1812), Raleigh (1899), Student (1908), Courant, Friedrichs και Lewy (1928), Kolmogorov (1931) και Pólya (1938). Η απόδοση της προαναφερθείσας ονομασίας, αλλά και η συστηματική χρήση τους χρονολογείται στη δεκαετία του 1940, από επιστήμονες του πυρηνικού προγράμματος του Los Alamos. Στην πορεία εξελίχθηκε σε μία πολύ δημιουργική μέθοδο αξιοποίησης των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε τομείς της έρευνας, ενώ βρίσκει εφαρμογές σε ποικίλες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται σε στοχαστικά προβλήματα ή προβλήματα τυχαίων συμπεριφορών αλλά και όταν επιδιώκεται η μελέτη διαδικασιών οι οποίες αποτελούνται από διαδοχικά στοχαστικά βήματα. Ακόμη, αποτελεί πολύτιμο εργαλείο όταν η διενέργεια πειραματικών μετρήσεων είναι κοστοβόρα ή εντελώς αδύνατη και τέλος στις περιπτώσεις που γενικότερα αναλυτικές ή άλλες τεχνικές αποτυγχάνουν. (Κ.Α. Καρφόπουλος, Νοέμβριος 2012)

Εξειδικεύοντας στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας πρέπει να τονιστεί, ότι τα προβλήματα της αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, ανήκουν στην κατηγορία στοχαστικών φαινομένων και συνεπώς μπορούν να μελετηθούν μέσω τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. (Sima, et al., 2009). Η προσομοίωση προβλημάτων τέτοιας φύσης βασίζεται στην παραγωγή και παρακολούθηση τυχαίων ιστοριών μεμονωμένων σωματιδίων, των οποίων η παραγωγή προκύπτει από κατάλληλη γεννήτρια τυχαίων αριθμών και κατόπιν στην καταγραφή των μέσω τιμών των εξεταζόμενων μεγεθών. Σε κάθε ιστορία ενός φωτονίου επιδρούν διάφορες στοχαστικές μεταβλητές, όπως το είδος της αλληλεπίδρασης, η αποτιθέμενη ενέργεια, η διεύθυνση της τροχιάς του σωματιδίου μετά την αλληλεπίδραση κ.α. Πιο συγκεκριμένα δηλαδή, βάσει των νόμων της φυσικής που διέπουν την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας–ύλης, η μέθοδος προσομοιώνει ένα σωματίδιο που ακολουθεί αρχικά μία τυχαία, ελεύθερη διαδρομή σε τρισδιάστατο χώρο, η οποία μπορεί να

διαφοροποιηθεί εξαιτίας κάποιας αλληλεπίδρασής του, με αποτέλεσμα είτε την αλλαγή κατεύθυνσης του σωματιδίου είτε την απόθεση μέρους ή ολόκληρης της ενέργειάς του. Η διαδικασία αυτή μπορεί επίσης να οδηγήσει σε παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων ή και φωτονίων, των οποίων η ιστορία με τη σειρά της θα προσομοιωθεί. Τα ξεχωριστά ενδεχόμενα που μπορεί να ακολουθήσει ένα σωματίδιο προσομοιώνονται διαδοχικά. Η επιλογή τυχαίων αριθμών μεταξύ του 0 και του 1 επηρεάζουν σε κάθε περίπτωση το είδος της αλληλεπίδρασης αλλά και το πού αυτή θα λάβει χώρα. Βάσει λοιπόν προκαθορισμένων κατανομών πιθανότητας (Probability Distribution Functions) τα εκάστοτε χαρακτηριστικά του σωματιδίου επιλέγονται τυχαία σε κάθε σημείο της πορείας του. Μια τέτοια ιστορία ενός σωματιδίου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 5.1. (MCNP5 User Manual, Version 5)

#### Event Log

1. Neutron scatter, photon production
2. Fission, photon production
3. Neutron capture
4. Neutron leakage
5. Photon scatter
6. Photon leakage
7. Photon capture



ΣΧΗΜΑ 5.1: Σχηματική αναπαράσταση αλληλεπίδρασης σωματιδίου και όλης

Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα αναπαρίσταται μία τυχαία ιστορία που αναφέρεται στην πρόσπτωση ενός νετρονίου στην πλάκα ενός υλικού. Στο συμβάν 1, φαίνεται η αλλαγή κατεύθυνσης του νετρονίου μετά τη σκέδαση, κάτι που επιλέγεται βάσει συνάρτησης για τη γωνιακή κατανομή σκέδασης. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης αυτής είναι η παραγωγή φωτονίου, το οποίο θα μελετηθεί αργότερα. Κατόπιν πραγματοποιείται η διάσπαση του προσπίπτοντος νετρονίου και η παραγωγή δύο νέων και ενός φωτονίου. Αυτό σημαίνει ότι η μελέτη του εισερχόμενου νετρονίου έχει περατωθεί και θα ακολουθήσει η προσομοίωση των υπολοίπων σωματιδίων που έχουν προκύψει. Ουσιαστικά λοιπόν, το ένα νετρόνιο και το ένα φωτόνιο αποθηκεύονται προσωρινά για μεταγενέστερη ανάλυση, ενώ το άλλο νετρόνιο δεσμεύεται (νετρονική σύλληψη), όπως διαφαίνεται από το συμβάν 3 και η πορεία του τερματίζεται. Το επόμενο νετρόνιο ανακτάται και εν προκειμένω, σύμφωνα με το συμβάν 4, διαφεύγει της πλάκας. Αντίστοιχα το προαναφερθέν φωτόνιο θα συγκρουστεί (συμβάν 5) και θα εξέλθει από την πλάκα (συμβάν 6). Χρειάζεται ωστόσο να σχολιαστεί και το αρχικά εναπομείναν φωτόνιο, το οποίο τώρα θα συλληφθεί (συμβάν 7). Εφόσον δεν εμφανίζονται περαιτέρω δευτερογενή σωματίδια και εφόσον έχουν προσομοιωθεί όσα προέκυψαν μετά την πρόσπτωση του αρχικού νετρονίου, η ιστορία τερματίζεται. Συνεπώς θα ακολουθήσει νέα ιστορία με άλλο νετρόνιο που θα προσπέσει στην πλάκα. (© Βασιλοπούλου, 2012)

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να τονιστεί, ότι ο αριθμός των ιστοριών που πρόκειται να προσομοιωθούν επιδρούν άμεσα στα αποτελέσματα των υπολογιζόμενων μέσω των τιμών.

Συγκεκριμένα δηλαδή, όσο το πλήθος των σωματιδίων που μελετώνται αυξάνεται, τόσο το αποτέλεσμα είναι πιο ικανοποιητικό και με αντίστοιχα μειωμένη τυχαία αβεβαιότητα, διότι η τιμή της είναι αντιστρόφως ανάλογη της ρίζας του πλήθους των ιστοριών.

Η τεχνική αυτή είναι αποτελεσματική για την επίλυση πολύπλοκων φυσικών προβλημάτων σε αρκετά ερευνητικά και τεχνολογικά πεδία, όπως δοσιμετρικούς υπολογισμούς, υπολογισμούς θωρακίσεων και ανιχνευτικών συστημάτων κλπ. Συνεπώς, πλήθος κωδικών έχουν αναπτυχθεί και εμπλουτίζονται διαρκώς με νέες δυνατότητες. Αναφέρονται ενδεικτικά:

- EGS4 (Nelson W.R. et al., 1985)
- GEANT3 (Brun R. et al., 1987)
- CYLTRAN (Halbleib J.A. and Mehlhorn T.A., 1986)
- ETRAN (Beger M.J. and Seltzer S.M., 1988)
- ITS3 (Halbleib J.A. et al., 1992)
- MCNP4B (Briesmeister J.F., 1997)
- EGSnrc (Kawrakow I. and Rogers D.W.O., 2000)
- EFFTRAN (Vidmar T., 2005)
- PENELOPE (Salvat F., Fernandez-Varea J.M., Sempau J., 1996)

Οι παραπάνω κώδικες λοιπόν συνιστούν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο, ιδιαιτέρως για τις περιπτώσεις όπου μελετώνται πολύπλοκες γεωμετρίες ή οι πειραματικές διαδικασίες είναι δυσχερείς ή και αδύνατες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν ο υπολογισμός του συντελεστή επαύξησης πίσω από επίπεδη πλάκα με χρήση των κωδικών EGS4 και PENELOPE (Δ.Ε. Στ. Διαμαντούρου, 2004 και Ν. Αθανασίου, 2006 αντίστοιχα), η εκτίμηση της δόσης που οφείλεται στη λειτουργία μηχανής ακτίνων-X με χρήση του κώδικα PENELOPE (Δ.Ε. Π. Μανώλακας, 2007), ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης θερμικών νετρονίων με χρήση του κώδικα MCNP (Tzika F., Stamatelatos I.E, 2004), η εκτίμηση της απόδοσης ανιχνευτών Ge (Δ.Ε. Δεληγιάννη, 2007). (Βασιλοπούλου Θεοδώρα, Αθήνα 2008)

Η κύρια πηγή αβεβαιότητας που εμφανίζεται κατά τη χρήση τέτοιων εργαλείων προσομοίωσης οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- στην αδυναμία προσομοίωσης μεγάλου πλήθους ιστοριών, εξαιτίας των αντικειμενικά περιορισμένων δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- στην πλημμελή γνώση των φυσικών σταθερών που συνοδεύουν φυσικά φαινόμενα, όπως μικροσκοπικές ή μακροσκοπικές ενεργές διατομές, χρόνοι ημιζωής κλπ. Ο συγκεκριμένος παράγοντας θα σχολιασθεί αναλυτικότερα και θα ληφθεί υπόψη στο κεφάλαιο 7.
- στη μη ακριβή επίγνωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μίας ανιχνευτικής διάταξης, παράμετρος που μέχρι στιγμής συμβάλλει ιδιαίτερα στην εισαγωγή αβεβαιότητας.
- στην ανομοιομορφία του ηλεκτρικού πεδίου που διαμορφώνεται στο εσωτερικό του κρυστάλλου, όπως επίσης και στη δημιουργία «νεκρών ζωνών» (dead layers), στις οποίες η ακτινοβολία είτε δεν ανιχνεύεται είτε εξασθενεί. Οι ακριβείς διαστάσεις των «νεκρών ζωνών» δε, δεν είναι γνωστές από τον κατασκευαστή, ενώ με το πέρασμα των ετών και τη χρήση του ανιχνευτή είναι δυνατόν να παρατηρηθεί και η μεταβολή τους. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση τους δεν είναι η ακριβέστερη δυνατή.



## 5.2 Κώδικας προσομοίωσης Penelope

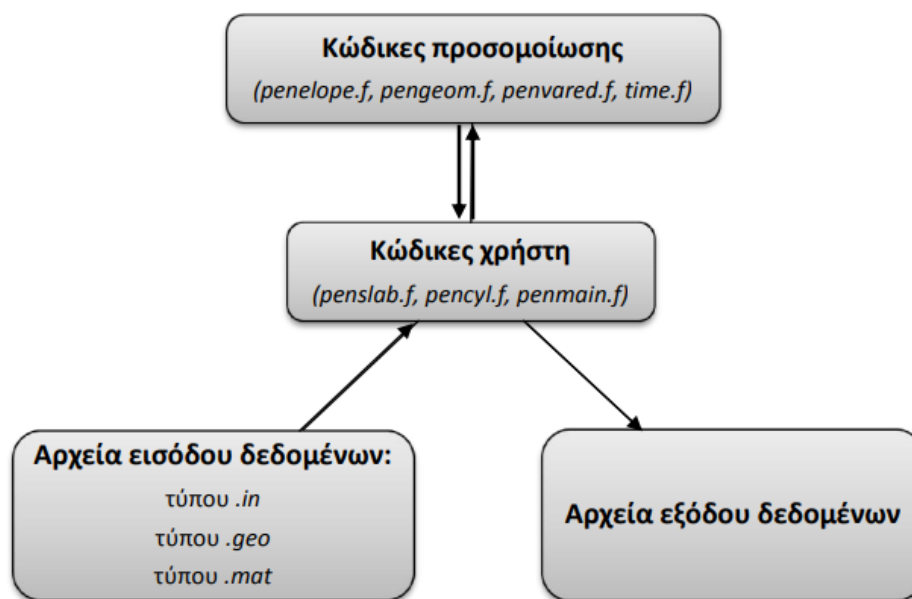
### 5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κώδικας προσομοίωσης Monte-Carlo PENELOPE, διανέμεται μέσω της NEA Data Bank του ΟΟΣΑ και ξεκίνησε να αναπτύσσεται από τους F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης το 1996 (Salvat F. et al., 1996). Ο στόχος της δημιουργίας του ήταν η μελέτη των φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά την αλληλεπίδραση σωματιδίων-β και φωτονίων με την ύλη. Στη διάρκεια των επόμενων ετών έχουν δημιουργηθεί και νεότερες εκδόσεις (π.χ. 1999, 2005, 2006, 2011, 2014, 2018) εκ των οποίων η τελευταία, δηλαδή αυτή του 2018 χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η ονομασία του προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων PENetration and Energy Loss of Positrons and Electrons και δημιουργήθηκε για την προσομοίωση ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων που αλληλεπιδρούν με την ύλη. Η δυνατότητα μελέτης ακτίνων-γ προστέθηκε αργότερα γι' αυτό και δε συγκαταλέγεται στην ονομασία του κώδικα.

Η διαδικασία της προσομοίωσης βασίζεται αρχικά στη διαμόρφωση ορισμένων αρχείων εισόδου, που δίνονται ως δεδομένα από το χρήστη και περιγράφουν το εκάστοτε πρόβλημα. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται υπόψη από τον κώδικα και σε συνδυασμό με τους αντίστοιχους φυσικούς νόμους και του μηχανισμούς κάθε αλληλεπίδρασης δημιουργεί το επιλεγμένο από το χρήστη πλήθος ιστοριών. Με το πέρας της προσομοίωσης όλων των ιστοριών παρατίθενται στο χρήστη τα αποτελέσματα για τα μεγέθη που ζητήθηκαν.

Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης βασίζεται στο μοντέλο διασκορπισμού (scattering model), το οποίο βασίζεται στη χρήση αριθμητικών βάσεων δεδομένων και στην παράλληλη αξιοποίηση αναλυτικών μοντέλων για την ενεργό διατομή διάφορων μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Οι εφαρμογές που μπορεί να φέρει εις πέρας αφορούν σε ένα ενεργειακό εύρος περίπου 50eV-1GeV. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN και διαθέτει μία σειρά από υπορουτίνες, penelope.f, pengeom.f, penvared.f, time.f, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.2), κάθε μία από τις οποίες είναι υπεύθυνη για την προσομοίωση των φυσικών φαινομένων αλληλεπίδρασης σωματιδίων και ύλης. Αναφέρονται τρεις τύποι αρχείων εισόδου: αρχεία .in, αρχεία .geo, αρχεία .mat, από τα οποία εισάγονται οι απαιτούμενες παράμετροι, όπως το είδος της ακτινοβολίας, οι ενέργειες αποιοπής, η αντίστοιχη γεωμετρία και τέλος τα κατάλληλα υλικά.



ΣΧΗΜΑ 5.2: Διάγραμμα λειτουργίας κώδικα προσομοίωσης PENELOPE

Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να ελέγξει πλήρως την προσομοίωση και να αποκτήσει πρόσβαση σε αυτή χρειάζεται να συνθέσει το δικό του Κυρίως Πρόγραμμα. Αυτό, θα είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση της εκάστοτε ιστορίας, δηλαδή της τροχιάς του προς μελέτη σωματιδίου και κατόπιν να καταγράφει σε κατάλληλα αρχεία τις απαραίτητες για το χρήστη ποσότητες. Η επικοινωνία του κυρίως προγράμματος με τις υπορουτίνες είναι αμφίδρομη, διότι παρέχει τα κατάλληλα δεδομένα σε αυτές και στη συνέχεια λαμβάνει αποτελέσματα, που καταγράφονται στα αρχεία εξόδου.

Στην έκδοση του κώδικα που αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία διατίθενται τρεις κώδικες χρήστη: penslab.f, pencyl.f, και penmain.f, οι οποίοι χρησιμοποιούν επίπεδες μεταλλικές πλάκες, σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές και πλέον σύνθετες κατασκευές, αντίστοιχα. Τμήματα των κυρίως προγραμμάτων που καλούνται εικονικοί ανιχνευτές είναι αυτά που καθορίζουν το είδος των αποτελεσμάτων. Για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης μελέτης, απαραίτητο ήταν μόνο το κυρίως πρόγραμμα penmain.f με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, όταν αυτό χρειάζεται. Συγκεκριμένα σε αυτό παρέχονται εκ κατασκευής τρεις τύποι εικονικών ανιχνευτών: ανιχνευτές αλληλεπίδρασης, ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας και ανιχνευτές δόσης. Το βασικότερο πλεονέκτημα του κώδικα συνίσταται στο γεγονός ότι όλα τα προαναφερθέντα τμήματά του, τα προγράμματα, οι υπορουτίνες παρέχονται σε πηγαία μορφή, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης τους σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη.

## 5.2.2 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ PENELOPE

Στο σημείο αυτό αναλύονται τα είδη αρχείων εισόδου, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

- Αρχείο τύπου .mat: Στο αρχείο αυτό περιέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για το σύνολο των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κάθε γεωμετρία. Αναλυτικότερα, περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες για τον προσδιορισμό ενός υλικού φυσικές σταθερές, που αξιοποιούνται για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης του με την εκάστοτε ακτινοβολία. Καθένα από αυτά δημιουργείται από το χρήστη μέσω του προγράμματος material.exe, ένα από τα προγράμματα του κώδικα PENELOPE. Εισάγεται είτε η σύσταση του υλικού από το χρήστη, είτε επιλέγεται κάποιο από μία ήδη υπάρχουσα λίστα.

- Αρχείο τύπου .geo: Μέσω του αρχείου αυτού, ο χρήστης συνθέτει τη γεωμετρία του προβλήματός του. Στο σημείο αυτό, τονίζεται ότι υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών, διότι διατίθενται μαθηματικές εκφράσεις για μία σειρά καμπύλες και επιφάνειες. Πρέπει να ακολουθηθούν τρία στάδια για την ολοκλήρωση της γεωμετρίας από το χρήστη.

Ο ορισμός των επιφανειών (surface) της γεωμετρίας.

Ο ορισμός των σωμάτων (body) της γεωμετρίας, κατά τον οποίον αξιοποιούνται οι προαναφερθείσες ορισμένες επιφάνειες.

Ο ορισμός των ομάδων σωμάτων (module), όπου χρησιμοποιούνται σώματα που έχουν ήδη οριστεί.

Για τον έλεγχο της γεωμετρίας από το χρήστη (εφόσον όλα είναι σωστά ορισμένα για να χρησιμοποιηθούν από τον κώδικα) γίνεται χρήση των προγραμμάτων gview2d και gview3d για την δισδιάστατη ή τρισδιάστατη αντίστοιχα αναπαράσταση της ορισμένης γεωμετρίας.

- Αρχείο τύπου .in: Εδώ περιέχεται μια σειρά κρίσιμων για το πρόβλημα πληροφοριών, που καθορίζονται από διάφορες παραμέτρους του αρχείου αυτού και θα συζητηθούν αναλυτικά.

Η δομή του αρχείου παρατίθεται στο σχήμα (5.3).

Αναλυτικότερη περιγραφή μπορεί να αναζητηθεί στη Διπλωματική Εργασία (Αθανασίου Ν., 2006). Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται, ότι θα αναλυθούν οι παράμετροι, άρα και οι αντίστοιχες γραμμές του αρχείου, που αξιοποιήθηκαν ή μεταβλήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

SKPAR: η παράμετρος αυτή λαμβάνει μόνο ακέραιες τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν στο είδος της ακτινοβολίας. Αριθμός (1) για την προσομοίωση ηλεκτρονίων, αριθμός (2) για την προσομοίωση φωτονίων, αριθμός (3) για την προσομοίωση ποζιτρονίων.

SENERG: στη γραμμή αυτή καθορίζεται, μέσω της παραμέτρου SE0, η αρχική ενέργεια των σωματιδίων της προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για την προσομοίωση μονοενεργειακών πηγών ή στην περίπτωση που απαιτείται η μελέτη των επιμέρους ενεργειών ενός ισότοπου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το

διάγραμμα διάσπασης του.

SPOSIT: εδώ απαιτείται η εισαγωγή τριών τιμών, μία για κάθε παράμετρο (SX0,SY0,SZ0), που αποτελούν το σημείο εκκίνησης μια ιστορίας. Πρόκειται δηλαδή για τις συντεταγμένες του σημείου αυτού.

SCONE: η αρχική κατεύθυνση των πρωτογενών σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί πλήρως μέσω της στερεάς γωνίας ενός κώνου. Οι πολικές και αζιμουθιακές γωνίες της δέσμης σε σχέση με την κατεύθυνση του άξονα, THETA και PHI και το αντίστοιχο ημίανοιγμα, ALPHA, δίνονται από το χρήστη σε μοίρες. Στην περίπτωση όπου ALPHA=0.0 ορίζεται μία πηγή που εκπέμπει ακτινοβολία συγκεκριμένης δέσμης, ενώ όταν επιλέγεται ALPHA=180.0 πρόκειται να προσομοιωθεί μία ισοτροπική πηγή.

SRNUCL: μέσω της παραμέτρου αυτής δίνεται η δυνατότητα να προσομοιωθεί ραδιενεργός πηγή, (μόνο ένα νουκλίδιο ανά προσομοίωση). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα δεδομένα κάθε διάσπασης από τη βάση δεδομένων NUCLEIDE, η οποία περιλαμβάνει πυρηνικά δεδομένα που έχουν εικτιμηθεί για μία σειρά από παραπάνω από 200 ραδιοϊσότοπα. Το πρόγραμμα penmain λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά της διάσπασης του επιλεγμένου ισοτόπου από το αρχείο nuclide.nuc μέσω της λειτουργίας του «PenNuc», το οποίο οφείλει να προμηθευτεί ο χρήστης μέσω της ιστοσελίδας που περιλαμβάνει τη βάση δεδομένων NUCLEIDE ([www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)). Προκειμένου το πρόγραμμα να «διαβάσει» το προς μελέτη νουκλίδιο χρειάζεται το αρχείο nuclide.nuc, καθώς επίσης και τα αρχεία pdrelax.p11 και pdatconf.p14 από τη βάση δεδομένων της PENELOPE, να είναι τοποθετημένα στο φάκελο PenNuc. Εδώ υπογραμμίζεται, ότι όταν χρησιμοποιείται η γραμμή SRNUCL, οι αρχικές κατευθύνσεις των πρωτογενών σωματιδίων που απελευθερώνεται από το νουκλίδιο που διασπάται λαμβάνονται υπόψη έτσι ώστε η πηγή να εκπέμπει ισοτροπικά, ανεξαρτήτως των υπολοίπων παραμέτρων τα πηγής.

SBOX: Πρόκειται για ένα ορισμένο «κουτί» με κέντρο τις συντεταγμένες (SX0,SY0,SZ0) του οποίου οι διαστάσεις ορίζονται από το χρήστη μέσω των παραμέτρων (SSX,SSY,SSZ). Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που χρειάζεται να προσομοιωθεί πηγή όγκου, η οποία θα περικλείεται στο κουτί αυτών των διαστάσεων.

SBODY: η παράμετρος αυτή αφορά τον ενεργό όγκο του σώματος που μελετάται και έχει επίσης οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας (εφόσον πρόκειται για κάποιο body). Αν ο χρήστης επιθυμεί την προσομοίωση περεταίρω ενεργών σωμάτων (bodies) η παράμετρος επαναλαμβάνεται σε επόμενη γραμμή, δηλαδή κάθε γραμμή αντιστοιχεί και σε μοναδικό ενεργό σώμα. Το πρόγραμμα δε μπορεί να ξεκινήσει τη διαδικασία της προσομοίωσης αν δεν έχει οριστεί προηγουμένως σωστά η παράμετρος SBOX.

```

TITLE Title of the job, up to 65 characters.
. (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
>>>>>>> Source definition.
SKPAR KPARP [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
KPARP=0 activates a radioactive source. Requires next line.
SRNUCL nuclide.nuc [NUCLEIDE data file]
SENERG SE0 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPECTR Ei,Pi [E bin: lower end and probability]
SLINES Ei,Pi [Line energy and probability]
SPOSIT SX0,SY0,SZ0 [Coordinates of the source]
SBOX SSX,SSY,SSZ [Source box dimensions]
SBODY KB [Active source body; one line for each body]
SCONE THETA,PHI,ALPHA [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME mat-filename.ext [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN geo-filename.ext [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC EL,EU,NBE [Energy window and no. of bins] &
EDSPC spc-enddet-##.dat [Spectrum file name, 20 chars] &
EDBODY KB [Active body] &*
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump1.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump2.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP DUMPP [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH DSHN [Desired number of simulated showers]
TIME TIMEA [Allotted simulation time, in sec]
END [Ends the reading of input data]

```

ΣΧΗΜΑ 5.3: Αρχείο εισόδου του κώδικα Penelope

Μέσω των παραπάνω γραμμών προσδιορίζονται οι αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης. Ο κώδικας παρέχει βέβαια τη δυνατότητα τροποποίησης των αρχικών συνθηκών μέσω του κυρίου προγράμματος, ώστε για κάθε ιστορία που προσομοιώνεται να χρησιμοποιούνται διαφορετικές. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι, μία από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους του προβλήματος αποτελεί ο ορισμός των ενεργειών αποκοπής (cut-off energies) σε κάθε ένα από τα διαφορετικά υλικά της προσομοίωσης. Πρόκειται ουσιαστικά για την ενέργεια, κάτω από την οποία ο κώδικας παύει να παρακολουθεί την πορεία των σωματιδίων, με την παραδοχή ότι αποθέτουν την ενέργειά τους τοπικά στο σημείο όπου αυτή αποκτήθηκε. Προκειμένου να οριστούν οι τιμές των ενεργειών αποκοπής αξιοποιούνται οι παράμετροι EABS(1:3). Αυτές ορίζονται στη γραμμή MSIMPA, κάθε μία από τις οποίες βρίσκεται κάτω από τη γραμμή MFNAME για τον ορισμό του αντίστοιχου υλικού. Ακολουθεί η γραμμή GEOMFN, όπου ορίζεται το όνομα του αρχείου που αντιστοιχεί στη γεωμετρία του προβλήματος.

### 5.2.2.1 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Υψηλής σημασίας είναι το επόμενο κομμάτι του αρχείου .in, στο οποίο προσδιορίζονται οι εικονικοί ανιχνευτές. Ο ορισμός τους θα καθορίσει την καταγραφή των επιθυμητών μεγεθών στα αρχεία εξόδου. Ανάλογα λοιπόν με το εκάστοτε φυσικό μέγεθος προς μελέτη παρέχονται τρία είδη εικονικών ανιχνευτών, από τους οποίους αναλύεται κυρίως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

- Ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector):  
χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ενέργειας που αποτίθεται σε ένα σώμα (body) ή σε ομάδα σωμάτων (module) της γεωμετρίας του προβλήματος. Ο χρήστης οφείλει να έχει ορίσει στο αρχείο γεωμετρίας (.geo) τα συγκεκριμένα σώματα ή τις ομάδες σωμάτων. Οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση αποθηκεύονται σε κατάλληλο αρχείο εξόδου, το οποίο ονομάζεται εξ ορισμού src-enddet.dat, αλλά μπορεί να τροποποιηθεί σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Ακόμη, επιλέγονται στο σημείο αυτό τα χαρακτηριστικά της ενεργειακής διαμέρισης, δηλαδή το πλήθος και το εύρος των ενεργειακών παραθύρων. Συγκεκριμένα, στη γραμμή ENDETC ορίζονται οι μεταβλητές EL, EU, NBE, δίνονται δηλαδή τιμές για την ελάχιστη ενέργεια (eV) της περιοχής μελέτης, την τελική ενέργεια και το πλήθος των ενεργειακών παραθύρων στα οποία έχει διαιρεθεί η συνολική προς εξέταση ενεργειακή περιοχή αντίστοιχα. Βάσει λοιπόν των παραπάνω καθορίζονται και τα όρια των επιμέρους ενεργειακών περιοχών, με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

$$dE = \frac{1.0000001 \cdot EU}{NBE}$$

$$E_{i,i} = EL + (i - 1) \cdot dE, \text{ με } i=1, NBE$$

$$E_{U,i} = EL + i \cdot dE, \text{ με } i=1, NBE$$

Τέλος, προσδιορίζεται ποιο σώμα από το αρχείο γεωμετρίας είναι αυτό στο οποίο μελετάται η απόθεση ενέργειας.

- Ο ανιχνευτής δόσης (dose enclosure):  
για την καταγραφή απορροφούμενης δόσης σε μια περιοχή.
- Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (impact detector):  
για την καταγραφή του ενεργειακού φάσματος των σωματιδίων όταν αυτά εισέρχονται σε ένα σώμα ή ομάδα σωμάτων που έχει οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας.

Προκειμένου να ολοκληρωθεί το αρχείο εισόδου εισάγονται οι γραμμές NSIMSH με τη μεταβλητή DSHN, που υποδεικνύει το μέγιστο πλήθος των ιστοριών που πρόκειται να προσομοιωθούν και η γραμμή TIME με τη μεταβλητή TIMEA, που δηλώνει το χρόνο διάρκειας της προσομοίωσης. Όποια συνθήκη επιτευχθεί πρώτη θα καθορίσει και τον τερματισμό της προσομοίωσης. Ο κώδικας πάει να “διαβάζει” το αρχείο .in με τη γραμμή END.

### 5.2.3 ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ PENELOPE

Τα αρχεία εξόδου που προκύπτουν από την προσομοίωση περιλαμβάνουν τις τιμές των ζητούμενων φυσικών μεγεθών και ανανεώνονται σε ορισμένο χρονικό διάστημα που μπορεί να τροποποιηθεί μέσω του αρχείου εισόδου .in. Το σύνολο των αρχείων αυτών αποθηκεύεται στο φάκελο που έχει επιλεγεί από το χρήστη. Το πλήθος τους εξαρτάται από τα μεγέθη που χρειάζεται να υπολογιστούν, παράμετρος που καθορίζεται από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης αξιοποιήθηκε το πρόγραμμα penmain.f, γι' αυτό και στη συνέχεια αναλύονται δύο αρχεία εξόδου που προκύπτουν από τη χρήση του. Αναλυτικότερη περιγραφή των υπολοίπων μπορεί να αναζητηθεί στη ΔΕ του (Αθανασίου Ν., 2006).

- **Αρχείο εξόδου penmain.dat:** Στο συγκεκριμένο αρχείο περιέχονται όλα τα δεδομένα και τα βασικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αναλυτικότερα, στο πρώτο κομμάτι εμφανίζονται τα επιλεγμένα από το χρήστη δεδομένα από τα αρχεία εισόδου, ενώ στο δεύτερο περιλαμβάνονται αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία και ανανεώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα όσο εξελίσσεται η προσομοίωση. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναζητήσει πληροφορίες σχετικές με τη διάρκεια της προσομοίωσης ή την ταχύτητα αυτής, τον αριθμό των μέχρι στιγμής γεγονότων που έχουν προσομοιωθεί, το ποσοστό των πρωτογενών ή δευτερογενών σωματιδίων που είτε εξήλθαν του συστήματος είτε απορροφήθηκαν είτε οπισθοσκεδάστηκαν, αλλά και τη μέση τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας ανά σώμα ή ομάδα σωμάτων και ανά ανιχνευτή της μελετώμενης γεωμετρίας.
- **Αρχείο εξόδου pm\_spc\_enddet\_nn.dat:** Το αρχείο αυτό εξάγεται όταν έχει χρησιμοποιηθεί στο αρχείο εισόδου ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector). Η μεταβλητή nn που εμφανίζεται στο όνομα του αρχείου υποδεικνύει τον αύξοντα αριθμό του ανιχνευτή που χρησιμοποιείται. Όπως φαίνεται και στο σχήμα(5.4), όπου παρουσιάζεται ένα κομμάτι του αρχείου αυτού, τα αποτελέσματα παρατίθενται σε τρεις στήλες, ενώ ανά γραμμή παρέχεται πληροφορία για την κάθε ενεργειακή περιοχή, της οποίας το μέγεθος έχει οριστεί από το χρήστη στο αρχείο εισόδου .in. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται η μέση ενέργεια κάθε ενεργειακής περιοχής, η οποία έχει εύρος ξεκινάει από την ενέργεια  $E_i$  και με εύρος  $dE$  καταλήγει στην ενέργεια  $E_i + dE$ . Ακολούθως, στη δεύτερη στήλη περιλαμβάνεται η πιθανότητα απόθεσης ολόκληρης της ενέργειας του σωματιδίου στη συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή που υποδεικνύεται από την πρώτη στήλη. Τέλος, στην τρίτη στήλη δίνεται η αβεβαιότητα των τιμών της δεύτερης στήλης, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ.

```

# Results from PENMAIN. Output from energy-deposition detector # 1
# Deposited energy spectrum.
# 1st column: deposited energy (eV).
# 2nd column: probability density (1/(eV*particle)).
# 3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).
1.627500E+03 9.378486E-08 8.20E-09
2.882500E+03 9.832669E-08 8.40E-09
4.137500E+03 1.015936E-07 8.54E-09
5.392500E+03 9.808765E-08 8.39E-09
6.647500E+03 9.649402E-08 8.32E-09
7.902500E+03 9.944223E-08 8.44E-09
9.157500E+03 1.000000E-07 8.47E-09
1.041250E+04 1.173705E-07 9.17E-09
1.166750E+04 1.090040E-07 8.84E-09
1.292250E+04 1.105976E-07 8.91E-09
1.417750E+04 1.143426E-07 9.05E-09
1.543250E+04 1.044622E-07 8.65E-09
1.668750E+04 1.106773E-07 8.91E-09
1.794250E+04 1.033466E-07 8.61E-09
1.919750E+04 1.065339E-07 8.74E-09
2.045250E+04 1.083665E-07 8.81E-09
2.170750E+04 1.099602E-07 8.88E-09
2.296250E+04 1.084462E-07 8.82E-09
2.421750E+04 1.083665E-07 8.81E-09
2.547250E+04 1.031076E-07 8.60E-09
2.672750E+04 1.060558E-07 8.72E-09
2.798250E+04 1.060558E-07 8.72E-09
2.923750E+04 1.033466E-07 8.61E-09
3.049250E+04 1.063745E-07 8.73E-09
3.174750E+04 1.095618E-07 8.86E-09
3.300250E+04 1.050199E-07 8.68E-09
3.425750E+04 1.056574E-07 8.70E-09
3.551250E+04 1.101195E-07 8.89E-09
3.676750E+04 1.082869E-07 8.81E-09
3.802250E+04 1.098805E-07 8.88E-09
3.927750E+04 1.056574E-07 8.70E-09
4.053250E+04 1.051793E-07 8.68E-09
4.178750E+04 1.102789E-07 8.89E-09
4.304250E+04 1.069323E-07 8.76E-09
4.429750E+04 1.078088E-07 8.79E-09
4.555250E+04 1.039044E-07 8.63E-09
4.680750E+04 1.051793E-07 8.68E-09
4.806250E+04 1.052590E-07 8.69E-09
4.931750E+04 1.105179E-07 8.90E-09
5.057250E+04 1.075697E-07 8.78E-09
5.182750E+04 1.127490E-07 8.99E-09
5.308250E+04 1.103586E-07 8.90E-09
5.433750E+04 1.083665E-07 8.81E-09
5.559250E+04 1.090040E-07 8.84E-09

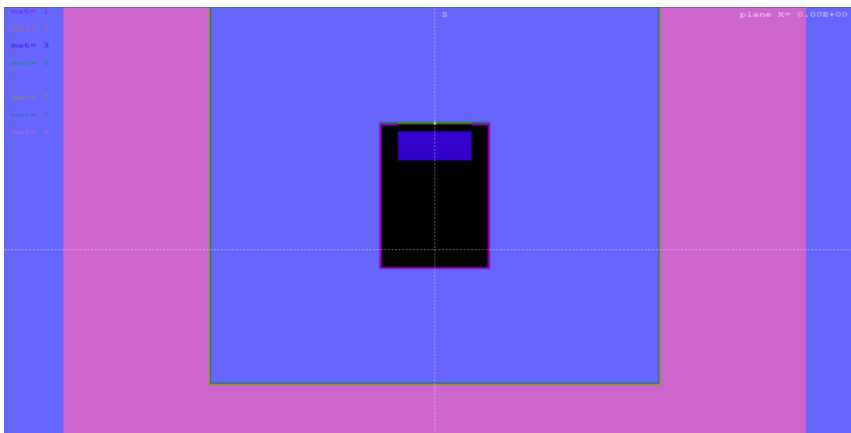
```

*ΣXHMA 5.4: Αρχείο εξόδου pm\_spc\_enddet\_nm.dat.*



## 5.2.4 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ gview

Πλην των τετριμμένων περιπτώσεων, η αναπαράσταση και η διόρθωση της γεωμετρίας του προβλήματος είναι μία απαιτητική διαδικασία, ιδιαίτερα αν τα bodies που έχουν οριστεί τέμνονται μεταξύ τους ή διεισδύουν σε γειτονικά τους. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τα προγράμματα gview2d και gview3d, με στόχο την άμεση αναπαράσταση της γεωμετρίας στην οθόνη του υπολογιστή. Στην πρώτη περίπτωση, το gview2d πραγματοποιεί μία δισδιάστατη απεικόνιση, δηλαδή παρουσιάζεται μια τομή της γεωμετρίας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μία τρισδιάστατη απεικόνιση. Η λήψη των απαραίτητων πληροφοριών για τη δημιουργία της εικόνας γίνεται μέσω του πακέτου PENGOM της PENELOPE. Για τη χρήση τους χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα γραφικά προγράμματα λογισμικών και συνεπώς δεν είναι δυνατό να μεταφερθούν και να λειτουργήσουν σε οποιοδήποτε άλλο περιβάλλον. Τα αρχεία προς εκτέλεση του συγκεκριμένου προγράμματος που εσωκλείονται στην PENELOPE μπορούν να «τρέξουν» μόνο σε υπολογιστές που διαθέτουν λογισμικό Microsoft Windows. Προκειμένου το πρόγραμμα gview2d να εκτελεστεί ζητούνται από το χρήστη: το αντίστοιχο “path” του υπολογιστή, στο οποίο βρίσκεται το αρχείο γεωμετρίας, αλλά και το όνομα του αρχείου αυτού, οι συντεταγμένες του κέντρου της γεωμετρίας και ο επιθυμητός τρόπος εμφάνισης του αποτελέσματος, δηλαδή είτε βάσει των ορισμένων bodies είτε βάσει των διαφορετικών υλικών. Το μαύρο χρώμα αναπαριστά σε κάθε περίπτωση το κενό, δηλαδή την έλλειψη υλικού. Η λειτουργία των προγραμμάτων αυτών, πέραν της εμφάνισης της ζητούμενης εικόνας οδηγεί στη δημιουργία ενός αρχείου geometry.rep στο φάκελο που είναι αποθηκευμένο το αρχείο γεωμετρίας, του οποίου το path έχει δοθεί στο πρόγραμμα από το χρήστη. Η ύπαρξη κάποιας ασάφειας ή συντακτικού λάθους στον ορισμό της γεωμετρίας, θα εμφανιστεί στο αρχείο αυτό, συνήθως στην τελευταία γραμμή του, δηλαδή στο σημείο όπου αυτό θα έχει σταματήσει να «διαβάζει» τη δοθείσα γεωμετρία. Ενδεικτικό παράδειγμα της χρήσης των προγραμμάτων αυτών παρουσιάζεται στο σχήμα (5.5), με μία δισδιάστατη απεικόνιση ανιχνευτή Γερμανίου και με την επιλογή της αναπαράστασής του βάσει του υλικού του κάθε body (κάθε διαφορετικό χρώμα συνεπάγεται και διαφορετικό υλικό). Το μαύρο χρώμα που διακρίνεται στο σχήμα υποδεικνύει την ύπαρξη κενού χώρου.



ΣΧΗΜΑ 5.5: Αναπαράσταση ανιχνευτή Γερμανίου από το γραφικό πρόγραμμα gview2d

## 5.2.5 ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ PENMAIN ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ PENELOPE

Η έκδοση της PENELOPE 2018 περιλαμβάνει εκτός του κυρίως προγράμματος `penycl` (κατάλληλο για προσομοίωση ηλεκτρονίων και φωτονίων σε κυλινδρικές γεωμετρίες), το πρόγραμμα `penmain`. Με αυτό παρέχεται η δυνατότητα για την προσομοίωση ραδιενεργού πηγής και όχι μόνο μίας συγκεκριμένης ενέργειας σωματιδίων, με ένα μόνο ισότοπο μέσα σε περίπλοκες γεωμετρίες. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση της βάσης δεδομένων NUCLEIDE Table of Isotopes ([www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)), όπου περιέχεται το διάγραμμα διάσπασής του και όλη η απαιτούμενη πληροφορία για να ληφθεί υπόψη το σύνολο των φαινομένων και των αλληλεπιδράσεων που θα προκύψουν. Εξ ορισμού, με την επιλογή αυτή προσομοιώνεται ένα είδος σωματιδίων, αλλά με κατάλληλες τροποποιήσεις είναι δυνατόν ο κώδικας να παρακολουθήσει τις ιστορίες και όλων των παραγόμενων από το ραδιοϊσότοπο. Η πηγή μπορεί να επιλεγεί είτε ως σημειακή, είτε ως επιφανειακή, είτε ως πηγή όγκου. Για να είναι εφικτή λοιπόν η μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης είναι απαραίτητη η αξιοποίηση αυτής της δυνατότητας, προκειμένου να συνυπολογίζονται και οι αλληλεπιδράσεις περισσότερων από ένα φωτονίων που παράγονται από την ίδια πηγή. Τονίζεται στο σημείο αυτό, ότι αν ο χρήστης επιθυμεί να προσομοιώσει το ισότοπο χωρίς την παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων από σωματίδια που συσχετίζονται μεταξύ τους, οφείλει να τροποποιήσει το κυρίως πρόγραμμα. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή “DRTIME” που εμφανίζεται στον πηγαίο κώδικα `penncm.f` της PENELOPE και σχετίζεται με τη χρονική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή χρειάζεται να λάβει αρνητική τιμή. Στην περίπτωση αυτή προσομοιώνεται το προς μελέτη ισότοπο, με όλα τα σωματίδια που παράγονται από αυτό, με τη μόνη διαφορά ότι δεν πραγματοποιούνται συσχετίσεις μεταξύ τους. Στα σχήματα (5.6) και (5.7) παρατίθεται το τμήμα του κώδικα PENELOPE, που περιλαμβάνει την προαναφερθείσα παράμετρο, αρχικά ως έχει και στη συνέχεια τροποποιημένη.



## 5.3 Κώδικας προσομοίωσης MCNP

### 5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κώδικας προσομοίωσης MCNP άρχισε να αναπτύσσεται το 1963, σε ένα πρώιμο επίπεδο από ομάδα επιστημόνων του εργαστηρίου του Los Alamos των ΗΠΑ. Σε πρώτο στάδιο ονομαζόταν MCS και διέθετε περιορισμένες δυνατότητες. Στην πορεία των ετών ωστόσο ο κώδικας βελτιώθηκε, εμπλουτίστηκε και έφτασε στη σημερινή του μορφή. Αποτελεί πλέον ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μελέτη προβλημάτων μεταφοράς φωτονίων, ηλεκτρονίων, νετρονίων καθώς και συνδυασμών αυτών μέσα σε πολύπλοκα υλικά και γεωμετρίες. Η σημερινή του ονομασία, MCNP (Monte Carlo N-Particle) υποδηλώνει και την περαιτέρω δυνατότητά του για την προσομοίωση νετρονίων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση του MCNP5, η οποία κυκλοφόρησε το 2003 από το εργαστήριο του Los Alamos με μία σειρά από αναβαθμίσεις, όπως ενημερωμένες βιβλιοθήκες, βελτιωμένη γραφική απεικόνιση των εξεταζόμενων γεωμετριών (X-5 Monte Carlo Team (2003)). Ακόμη, αξιοποιείται μία νέα προέκταση του κώδικα, ο MCNP-CP, στην οποία θα γίνει αναλυτικότερη αναφορά στη συνέχεια.

Ο κώδικας MCNP έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα FORTRAN και έχει τη δυνατότητα να χειριστεί ηλεκτρόνια και φωτόνια με ενεργειακό εύρος από 1keV έως 1000MeV και νετρόνια στην περιοχή  $10^{-11}$ MeV-20MeV. Προκειμένου να ξεκινήσει η προσομοίωση απαιτείται από το χρήστη μία αναλυτική περιγραφή του προβλήματος, μέσω της διαμόρφωσης του αρχείου εισόδου. Ο κώδικας στη συνέχεια το “διαβάζει” και επεξεργάζεται τα δεδομένα που έχουν δοθεί, προκειμένου στη συνέχεια να προχωρήσει στην εκτέλεση των ιστοριών. Για να είναι δυνατή η δημιουργία των ιστοριών αυτών γίνεται χρήση κατάλληλων βιβλιοθηκών ενεργών διατομών με τις απαραίτητες πληροφορίες γύρω από την αλληλεπίδραση φωτονίων, ηλεκτρονίων και νετρονίων με την ύλη. Όταν ολοκληρώνεται ο ζητούμενος από το χρήστη χρόνος της προσομοίωσης ή ένας συγκεκριμένος αριθμός ιστοριών καταγράφονται τα επιθυμητά μεγέθη και παρατίθενται στο αρχείο εξόδου.

Ο κώδικας αυτός, σε αντίθεση με τον κώδικα PENELOPE που αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο δεν παρέχεται σε πηγαία μορφή και επομένως δεν είναι δυνατή η τροποποίησή του. Ως παράδειγμα αναφέρεται ενδεικτικά, ότι στην περίπτωση του MCNP η σημαντική παράμετρος των ενεργειών αποκοπής για κάθε υλικό που συμμετέχει στη γεωμετρία του προβλήματος, δε μπορεί να τροποποιηθεί από το χρήστη. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό και με άλλες παραμέτρους που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο δημιουργεί διαφοροποιήσεις στην αντιμετώπιση κάθε περίπτωσης από τους κώδικες.

## 5.3.2 ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MCNP

### 5.3.2.1 ΚΑΡΤΕΣ ΤΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ

Σε αντίθεση με τον κώδικα PENELOPE, ο MCNP απαιτεί μόνο ένα αρχείο εισόδου, το οποίο περιέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία για την έναρξη της προσομοίωσης. Αναλυτικότερα, όλα τα στοιχεία που χρειάζονται για να προσδιοριστεί πλήρως ένα πρόβλημα παρατίθενται στο αρχείο αυτό με καθορισμένη σειρά και κατηγοριοποιημένα σε ενότητες για κάθε τύπο δεδομένων. Τέτοιες ενότητες καλούνται κάρτες (cards) και διαχωρίζεται η μία από την άλλη με κενές γραμμές. Η δομή τους είναι επίσης αυστηρή και κάθε παραβίασή της ακυρώνει την εκτέλεση της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κάρτες του αρχείου εισόδου με τη σειρά που αναγράφονται σε αυτό.

- Κάρτα τίτλου: χρησιμοποιείται υποχρεωτικά και περιλαμβάνει όποια χρήσιμη πληροφορία επιλέξει ο χρήστης και σχετίζεται άμεσα με την περιγραφή του προς εξέταση φυσικού προβλήματος.
- Κάρτα κελιών: περιγράφεται η γεωμετρία του προβλήματος, μέσω στοιχειωδών όγκων που ονομάζονται κελία (cells). Προκειμένου να οριστούν οι όγκοι αυτοί γίνεται χρήση μιας σειράς επιφανειών, αλλά και ενώσεις ή τομές αυτών, με στόχο να συνθεθεί ο επιθυμητός σχηματισμός. Ο προσδιορισμός αυτών πραγματοποιείται σε επόμενη κάρτα και θα αναλυθεί στη συνέχεια. Τέλος, σε κάθε γεωμετρικό κελί, για να θεωρείται πλήρως ορισμένο, αναγράφεται απαραίτητα η πυκνότητα του αντίστοιχου υλικού. Αν η παράμετρος αυτή απουσιάζει, ο σχηματισμός του συγκεκριμένου κελιού θα είναι κενός, χωρίς δηλαδή κάποιο υλικό.
- Κάρτα επιφανειών: στο σημείο αυτό καθορίζονται οι επιφάνειες που χρησιμοποιούνται στην προαναφερθείσα κάρτα. Αρχικά, με κατάλληλο συμβολισμό αναφέρεται το είδος της επιφάνειας (π.χ. επίπεδη, ελλειψοειδής, κυλινδρική κ.α.) και στη συνέχεια η θέση αυτής στο καρτεσιανό επίπεδο και οι διαστάσεις της. Παρ' όλο που η συγκεκριμένη κάρτα είναι απαραίτητο να έχει διαμορφωθεί από το χρήστη πριν ορίσει τα γεωμετρικά κελιά της προηγούμενης κάρτας, η σειρά που παρατίθεται πρέπει να τηρείται αυστηρά. Σε κάθε άλλη περίπτωση, ο κώδικας δε θα προβεί σε εκτέλεση της προσομοίωσης, διότι δε θα έχει "διαβάσει" ορθά το αρχείο εισόδου.
- Κάρτα δεδομένων: εφόσον έχει οριστεί η κατάλληλη γεωμετρία, στην κάρτα αυτή περιέχονται και πάλι με αυστηρή ταξινόμηση τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου φυσικού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται το είδος των σωματιδίων που πρόκειται να προσομοιωθούν (π.χ. φωτόνια, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια) καθώς και η αντίστοιχη ενέργειά τους. Ακολούθως, δίνεται ο τύπος της πηγής, δηλαδή αν πρόκειται για σημειακή επιφανειακή ή πηγή όγκου, οι διαστάσεις της όταν χρειάζονται, αλλά και η διεύθυνση των σωματιδίων. Χρειάζεται ακόμη να οριστούν τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε κάθε γεωμετρικό κελί, με συγκεκριμένη δομή που υποδεικνύει την ταυτότητα και τη σύστασή τους. Όπως και στην περίπτωση του κώδικα PENELOPE, ο χρήστης οφείλει να προσδιορίσει τον προς μελέτη εικονικό ανιχνευτή (tally) (περιγράφεται στο κεφάλαιο 6), ενώ

παράλληλα καλείται να καθορίσει τη σημαντικότητα που έχουν για τον κώδικα τα σωματίδια σε κάθε κελί. Με άλλα λόγια, οφείλει να επιλέξει σε ποια κελιά ο κώδικας θα παρακολουθεί την εξέλιξη των ιστοριών και σε ποια θα την αγνοεί. Τέλος, προκειμένου να προσδιοριστεί η λήξη της προσομοίωσης δίνεται από το χρήστη το πλήθος των ιστοριών που επιθυμεί να προσομοιωθούν και ο μέγιστη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Όποια από τις δύο συνθήκες ικανοποιηθεί πρώτη θα καθορίσει και την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Στα σχήματα (5.8) και (5.9) παρατίθεται ενδεικτικά ένα αρχείο εισόδου για τον κώδικα MCNP5.

```

c NTUA DETECTOR GE33
c shielding closed, contact, Ba133, E=356.0129keV
c
c CELLS
c
11 0 (-101 8 -501 ) $hole
1 1 -5.5 (-1 5 -6 )#11 $ crystal Ge
2 1 -5.5 (-2 8 -7 )#1 #11 $ dl Ge
3 0 (-3 10 -9 )#1 #2 #11 $ dl to end cap
4 3 -2.7 (-4 12 -11 )#1 #2 #3 #11 $ Al
5 4 -0.0012 (13 -23 -19 21 -15 17 )#1 #2 #3 #4 #11 $ air
50 4 -0.0012 (-25 -13 14 ) $hole dwear
51 6 -8.96 (131 -191 211 171 -151 -231 )#11 #1 #2 #3 #4 #5 #50 $Cu
52 7 -7.287 (132 -192 212 172 -152 -232 )#51 #11 #1 #2 #3 #4 #5 #50 $Sn
6 5 -7.82 (14 -132 22 -20 18 -16) #50 $FeCz
61 5 -7.82 (232 -24 22 -20 18 -16) $FeCz
62 5 -7.82 (22 -212 -232 132 18 -16) $FeCx
63 5 -7.82 (192 -20 -232 132 18 -16) $FeCx
64 5 -7.82 (18 -172 212 -192 132 -232) $FeCy
65 5 -7.82 (-16 152 212 -192 132 -232) $FeCy
7 0 (-14 :24 :16 :-18 :20 :-22 ) $outer space

c SURFACE CARDS
101 cz 0.6 $ hole radius
1 cz 2.765 $ Ge
2 cz 2.835 $ Ge+dl
3 cz 3.335 $ Al-in
4 cz 3.485 $ Al-out
5 pz 0.07 $ dl-top-inside
501 pz 5.00 $ height of hole
6 pz 6.424 $ front dead layer-in
7 pz 6.50 $ Ge top-end of dl
8 pz 0 $ dl back
9 pz 7.00 $ Al-top-inside
10 pz 0 $ same with 8
11 pz 7.15 $ Al-top-out
12 pz -0.15 $ Al-bottom-out
13 pz -10.95 $ Cu-bottom-in
131 pz -11.1 $ Sn-bottom-in
132 pz -11.2 $ Sn-bottom-out
14 pz -21.71 $ Fe-bottom-out
15 py 15.24 $ Cu
151 py 15.39 $ Sn
152 py 15.49 $ Fe-C
16 py 25.65 $ +10.16 shielding
17 py -15.24 $ Cu
171 py -15.39 $ Sn
172 py -15.49 $ Fe-C
18 py -25.65 $ +10.16 shielding
19 px 15.24 $ Cu
191 px 15.39 $ Sn
192 px 15.49 $ Fe-C

```

ΣΧΗΜΑ 5.8: Αρχείο εισόδου MCNP5

```

20      px 25.65 $ +10.16 shielding
21      px -15.24 $ Cu
211     px -15.39 $ Sn
212     px -15.49 $ Fe-C
22      px -25.65 $ +10.16 shielding
23      pz 19.54 $ Cu-top-in
231     pz 19.69 $ Sn-top-in
232     pz 19.79 $
24      pz 29.95 $ Fe-top-out
25      cz 2.695 $(dewar hole radius)

mode p e
c
c MATERIAL CARDS
m1      32000.          -1 $Ge_32
m3      13000.          -1 $Al_13
m4      7014.           -0.755 $N_14(7)
        8016.           -0.232 18000.          -0.013
m5      26000.          -1 $Fe
m6      29000.          -1 $Cu
m7      50000.          -1 $Sn
imp:p   1 14r          0          $ 11, 7
imp:e   1 14r          0
c SOURCE SPECIFICATION
sdef pos=0 0 7.1875 axs=0 0 1 ext=0.02 rad=2.5 par=2 erg=0.3560129
c $ 7.15+0.015+0.0125+0.01 (contact+paper labels+plastic foils+thickness/2->centre)
c
f8:p 1
e8 0 1E-03 1998i 1.901 $bin
nps 1e7

```

ΣΧΗΜΑ 5.9: Αρχείο εισόδου MCNP5 (συνέχεια)

### 5.3.2.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟΙ ΑΝΙΧΕΥΤΕΣ

Οι εικονικοί ανιχνευτές, που όπως αναφέρθηκε ορίζονται στην τελευταία κάρτα του αρχείου εισόδου, αποτελούν ένα εργαλείο μέσω του οποίου υπολογίζονται τα ζητούμενα από το χρήστη μεγέθη, όπως η αποτιθέμενη ενέργεια, η ροή σωματιδίων, η ενεργειακή κατανομή παλμών κτλ. Πιο συγκεκριμένα, συνιστούν εικονικούς και όχι αληθινούς στοιχειώδεις γεωμετρικούς όγκους, στους οποίους επιλέγεται η καταγραφή των πληροφοριών της προσομοίωσης. Παρέχεται η δυνατότητα να είναι σημειακοί ή ογκώδεις, να αποτελούν τμήματα ήδη ορισμένων επιφανειών ή κελιών, ακόμη και να περιέχουν ή να ταυτίζονται με ένα ή περισσότερα κελιά της δοθείσης γεωμετρίας. Στον κώδικα MCNP διατίθενται έξι τύποι εικονικών ανιχνευτών για φωτόνια, έξι για νετρόνια και τέσσερις για ηλεκτρόνια. Η επιλογή του είδους αυτών, του μεγέθους, της γεωμετρίας και της θέσης τους επαφίεται στο χρήστη και καθορίζεται από το εκάστοτε φυσικό πρόβλημα. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα δοθούν από τον κώδικα κανονικοποιημένα ανά αρχικό σωματίδιο που εκπέμπεται από την πηγή. Ο χρησιμοποιούμενος στην παρούσα εργασία εικονικός ανιχνευτής δίνεται με τη μεταβλητή “f8”, που αντιστοιχεί στην περίπτωση: “pulse height tally”. Πρόκειται για την περίπτωση υπολογισμού της ενεργειακής κατανομής των παλμών που εμφανίζονται σε έναν ανιχνευτή από την πρόσπτωση σε αυτόν ραδιενεργής ακτινοβολίας. Ουσιαστικά με την επιλογή αυτή καταγράφεται η αποτιθέμενη σε ένα κελί ενέργεια από σωματίδιο που προέρχεται είτε απευθείας από την πηγή είτε εξαιτίας της παραγωγής δευτερευόντων σωματιδίων. Η χρήση του συγκεκριμένου ανιχνευτή συναντάται κυρίως, όταν χρειάζεται ο υπολογισμός ενεργειακών αποδόσεων φωτοκορυφής.

### 5.3.3 ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MCNP

Με το πέρας της προσομοίωσης, δηλαδή όταν επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός ιστοριών ή η μέγιστη χρονική διάρκεια που έχει επιλεχθεί από το χρήστη, παράγεται από τον κώδικα το αρχείο εξόδου. Σε αντίθεση με τον κώδικα PENELOPE, στον MCNP προκύπτει ένα μόνο αρχείο, που περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και τα ζητούμενα μεγέθη. Πιο συγκεκριμένα, στο αρχείο αυτό αρχικά παρατίθεται ξανά αυτούσιο το περιεχόμενο του δοθέντος αρχείου εισόδου (γεωμετρία, επιφάνειες, υλικά κτλ). Στη συνέχεια αναγράφονται στοιχεία για τα είδη των αλληλεπιδράσεων που προσομοιώθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση, για τις χρησιμοποιούμενες ενεργές διατομές, αλλά και τα αποτελέσματα του εικονικού ανιχνευτή, συνοδευόμενα από το αντίστοιχο στατιστικό σφάλμα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Από τις τιμές αυτές υπολογίζονται είτε με επεξεργασία αυτών είτε απευθείας (ανάλογα με την περίπτωση) τα επιθυμητά μεγέθη και εκτιμώνται οι αντίστοιχες αβεβαιότητες. Ένα παράδειγμα τμήματος αρχείου εξόδου παρουσιάζεται στο σχήμα (5.10).

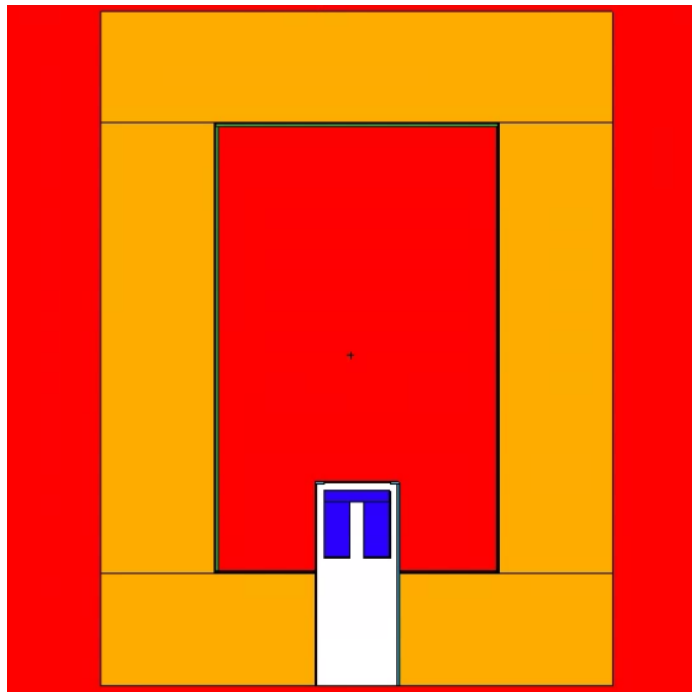
cell	tracks entering	population	substeps	substeps * weight (per history)	number weighted energy	flux weighted energy	average track weight (relative)	average track mfp (cm)
1	11	419	223	0	0.0000E+00	8.4600E-02	1.1733E-01	1.0000E+00
2	1	10320	45813947	5062363937	5.0624E+02	8.5769E-02	1.1749E-01	1.0000E+00
3	2	16836	5338498	585027694	5.8503E+01	8.9736E-02	1.2260E-01	1.0000E+00
4	3	19539	12653	0	0.0000E+00	7.7389E-02	1.0328E-01	1.0000E+00
5	4	13285	9671445	693946854	6.9395E+01	7.5323E-02	9.6759E-02	1.0000E+00
6	5	24118	221350	9896823	9.8968E-01	7.4587E-02	9.5153E-02	1.0000E+00
7	50	73	202	7557	7.5570E-04	7.6650E-02	9.9185E-02	1.0000E+00
8	51	52333	33838268	3785752496	3.7858E+02	8.0378E-02	1.0987E-01	1.0000E+00
9	52	49344	49258988	6903433677	6.9034E+02	8.6359E-02	1.2244E-01	1.0000E+00
10	6	3067	23136197	2248186810	2.2482E+02	7.1435E-02	9.7531E-02	1.0000E+00
11	61	10145	78650957	7624469961	7.6245E+02	7.2822E-02	9.9343E-02	1.0000E+00
12	62	7031	51180234	4963504894	4.9635E+02	7.2658E-02	9.9160E-02	1.0000E+00
13	63	6986	51279856	4972699460	4.9727E+02	7.2675E-02	9.9190E-02	1.0000E+00
14	64	6896	47285511	4583932364	4.5839E+02	7.2804E-02	9.9346E-02	1.0000E+00
15	65	6900	47266331	4583713302	4.5837E+02	7.2737E-02	9.9254E-02	1.0000E+00
total	227292	442954660	46016935829	4.6017E+03				
Itally	8	nps = 10000000						
tally type 8		pulse height distribution.			units	number		
tally for		photons electrons						
cell 1								
energy								
0.0000E+00	9.0000E-07	0.3333						
1.0000E-03	6.47145E-02	0.0012						
1.9505E-03	2.35800E-04	0.0206						
2.9010E-03	2.54400E-04	0.0190						
3.8514E-03	2.49400E-04	0.0200						
4.8019E-03	2.57300E-04	0.0197						
5.7524E-03	2.49800E-04	0.0200						
6.7029E-03	2.52800E-04	0.0199						
7.6533E-03	2.56400E-04	0.0197						
8.6038E-03	2.63500E-04	0.0195						
9.5543E-03	2.56800E-04	0.0197						
1.0505E-02	2.69100E-04	0.0193						
1.1455E-02	2.64100E-04	0.0195						
1.2406E-02	2.69700E-04	0.0193						
1.3356E-02	2.55500E-04	0.0198						
1.4307E-02	2.75000E-04	0.0191						
1.5257E-02	2.64500E-04	0.0194						
1.6208E-02	2.64900E-04	0.0194						
1.7158E-02	2.62800E-04	0.0195						
1.8109E-02	2.59100E-04	0.0196						
1.9059E-02	2.70600E-04	0.0192						
2.0010E-02	2.67100E-04	0.0193						
2.0960E-02	2.70800E-04	0.0192						
2.1910E-02	2.69800E-04	0.0192						

ΣΧΗΜΑ 5.10: Τμήμα αρχείου εξόδου



### 5.3.4 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Vised

Το πρόγραμμα Vised (Visual Editor), το οποίο διανέμεται μαζί με τον κώδικα MCNP, είναι ένας κειμενογράφος αρχείων εισόδου που επιτρέπει τη γραφική απεικόνιση του προβλήματος. Με τη χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος, ο χρήστης μπορεί να παράγει εικόνες της γεωμετρίας που έχει ορίσει, να δει το εσωτερικό της κατασκευής, να ελέγξει τα υλικά που αντιστοιχούν σε κάθε κελί. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται, ότι το εργαλείο αυτό αποτελεί μια χρήσιμη μέθοδο για τον εντοπισμό τυχόν σφαλμάτων στον ορισμό της γεωμετρίας ή των υλικών αυτής. Σε περίπτωση που υπάρχουν λάθη εμφανίζονται στην οθόνη κατάλληλα μηνύματα που βοηθούν στον εντοπισμό και τη διόρθωσή τους. Επιπρόσθετα, πέραν των δυνατοτήτων απεικόνισης είναι εφικτή η αναπαράσταση των τροχιών των σωματιδίων, η ομοιόμορφη ή μη εκπομπή τους ή η έκταση της πηγής. Κατά αυτόν τον τρόπο λοιπόν, είναι εύκολο να ελεγχθεί η συνέπεια του ορισμένου προβλήματος στο αρχείο εισόδου, με αυτό που είναι επιθυμητό να μελετηθεί από το χρήστη. Ενδεικτικά, στο σχήμα (5.11), παρατίθεται μία γεωμετρία ανιχνευτικής διάταξης ανιχνευτή Γερμανίου (Ge), όπως απεικονίζεται από το πρόγραμμα Vised.



ΣΧΗΜΑ 5.11: Αναπαράσταση ανιχνευτή Γερμανίου από το γραφικό πρόγραμμα Vised

### 5.3.5 ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ MCNP-CP ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MCNP

Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1, δηλαδή να υπολογιστούν διορθωτικοί συντελεστές για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, είναι απαραίτητη η χρήση προσομοιώσεων κατά τις οποίες θα λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο αυτό. Η δυνατότητα αυτή δόθηκε στον κώδικα MCNP, μέσω ενός νέου πακέτου, του MCNP-CP (Monte Carlo N-Particle–Correlated Particle). Πρόκειται για μία προέκταση του κώδικα, η οποία αναπτύχθηκε από τον Dr. Andrey Berlizon, στο Ινστιτούτο Πυρηνικών Ερευνών της Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών της Ουκρανίας (A. N. Berlizon, 2012). Είναι βασισμένη στην έκδοση MCNP5 και παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει στο αρχείο εισόδου ένα ισότοπο και πλέον όχι μόνο μία ενέργεια σωματιδίων. Αυτό συνεπάγεται, ότι ο κώδικας λαμβάνει υπόψη συνολικά το διάγραμμα διάσπασης του προς μελέτη νουκλιδίου και συνεπώς δύναται να παρακολουθήσει φαινόμενα όπως η πραγματική σύμπτωση μεταξύ φωτονίων από τον ίδιο κλάδο διάσπασης του ισότοπου. Τα δεδομένα που απαιτούνται, ώστε να αξιοποιούνται τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος διάσπασης ενός νουκλιδίου λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων “ENSDF” (Evaluated Nuclear Structure Data File). Προκειμένου ο κώδικας να προβεί στην προσομοίωση ενός ισότοπου συνολικά, εισάγεται η γραμμή “CPS” (Correlated Particle Source) στην κάρτα δεδομένων, δηλαδή στην τελευταία από αυτές που παρατίθενται στο αρχείο εισόδου. Η μεταβλητή αυτή, που επιτρέπει πλέον τη συσχέτιση μεταξύ σωματιδίων και εν προκειμένω φωτονίων, ακολουθείται από μία σειρά τιμών. Η θέση στην οποία εισάγεται κάθε τιμή σχετίζεται με ένα και μοναδικό φαινόμενο, του οποίου η επίδραση θα “ενεργοποιηθεί”, δηλαδή θα ληφθεί υπόψη, αν ο χρήστης θέσει την τιμή (1) σε αυτήν, ενώ θα “απενεργοποιηθεί” αν τεθεί η τιμή (0). Διαφορετικά, θα θεωρηθεί σε κάθε περίπτωση από τον κώδικα η δοθείσα εξ ορισμού τιμή για κάθε παράμετρο, όπως αυτή αναφέρεται στο εγχειρίδιο χρήσης του. Με την εισαγωγή της γραμμής CPS, προστίθεται μία σειρά νέων δυνατοτήτων, που δεν αφορά μόνο φαινόμενα πραγματικής σύμπτωσης, αλλά και γωνιακών συσχετίσεων μεταξύ φωτονίων, εκπομπή ηλεκτρονίων Auger, ακτίνων-X κ.α. Στο σημείο αυτό τονίζεται, ότι το κομμάτι του αρχείου εισόδου για τον προσδιορισμό της πηγής διαφοροποιείται και πλέον εισάγεται ο ατομικός και ο μαζικός αριθμός του προς εξέταση ισότοπου, καθώς και το αν βρίσκεται σε μετασταθή ή όχι κατάσταση. Παρατίθεται τμήμα αρχείου εισόδου του κώδικα MCNP-CP, όπου φαίνεται αυτή η τροποποίηση. Στο σχήμα (5.12), λαμβάνονται υπόψη όλα τα φαινόμενα συσχέτισης των σωματιδίων της πηγής, ενώ στο σχήμα (5.13) κανένα από αυτά.

```
sdef par=2 zam=270600 pos=0 0 8.35 axs=0 0 1 $ 7.15+1.2cm
c cps-1 $2nd run-uncorr
f8:p 1
```

ΣΧΗΜΑ: 5.12 Τμήμα αρχείου εισόδου με δυνατότητα συσχέτισης των εκπεμπόμενων σωματιδίων

```
sdef par=2 zam=270600 pos=0 0 8.35 axs=0 0 1
CPS -1 $2nd run-uncorr
f8:p 1
```

ΣΧΗΜΑ 5.13: Τμήμα αρχείου εισόδου χωρίς συσχέτιση των εκπεμπόμενων σ

## 5.4 Μοντελοποίηση ανιχνευτών

### 5.4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Πριν την έναρξη των προσομοιώσεων, που θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο κρίθηκε απαραίτητο να επιβεβαιωθούν τα υπάρχοντα ανιχνευτικά μοντέλα. Οι πληροφορίες που δίνονται από τον κατασκευαστή μέσω του αντίστοιχου πιστοποιητικού δεν εμπεριέχουν όλα τα απαιτούμενα μεγέθη για την πλήρη και ακριβή προσομοίωση του ανιχνευτή, επομένως συχνά οι πειραματιστές καλούνται να ακολουθήσουν μια διαδικασία προσδιορισμού των διαστάσεών του. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται στο ΕΠΤ – ΕΜΠ για όλους τους ανιχνευτές που διαθέτει, συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία (Rodenas J. et al, 2003), (Liu Liye, et al., 2006), (Schlager M., 2007). Στα πειράματα που διεξάγονται χρησιμοποιούνται πηγές, οι οποίες να καλύπτουν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ενεργειακό φάσμα τη λειτουργία του ανιχνευτή. Απόρροια του πειράματος είναι η επιλογή ενός από τα παραγόμενα μεγέθη, όπως η επιφάνεια φωτοκορυφής ή η απόδοση, το οποίο θα αποτελέσει το αντικείμενο σύγκρισης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η διαδικασία των προσομοιώσεων περιλαμβάνει αρχικά ορισμένες τιμές «εκκίνησης» για τα προς μελέτη γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι τιμές αυτές τροποποιούνται κατάλληλα βάσει της σύγκρισης ή απόκλισής τους από τις πειραματικές τιμές που έχουν ληφθεί, προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη σύγκλιση. Ουσιαστικά δηλαδή, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- i. Προσομοιώνεται ένα γεωμετρικό μοντέλο με ορισμένες αρχικές συνθήκες.
- ii. Ελέγχεται η απόκλιση πειράματος – προσομοίωσης.
- iii. Αν η απόκλιση αυτή είναι αποδεκτή λαμβάνονται υπόψη οι δοθείσες αυτές τιμές για το τελικό γεωμετρικό μοντέλο, διαφορετικά τα βήματα επαναλαμβάνονται με τροποποιημένες τιμές «εκκίνησης» στο βήμα i.

Στην παρούσα εργασία, ενδεικτικά αναφέρονται οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν για την επιβεβαίωση του γεωμετρικού μοντέλου του ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 33.8% (Ge).

## 5.4.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ 33.8%

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη και να προσομοιωθούν “ακριβέστερες” τιμές για τη γεωμετρία του ανιχνευτή και να θεωρηθούν ξεχωριστές οι περιοχές του ενεργού όγκου και του dead layer – όχι ως ένα ενιαίο κομμάτι – αξιοποιήθηκε προγενέστερη εργασία της Θ. Βασιλοπούλου (Θ. Βασιλοπούλου, Αθήνα 2008), στην οποία γινόταν χρήση του συγκεκριμένου ανιχνευτή. Στα πλαίσια της, προσεγγίζεται η γεωμετρία του κρυστάλλου μετά από μια σειρά από δοκιμές διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τελικά εξάγεται συμπέρασμα, βάσει της μικρότερης απόκλισης πειράματος–προσομοίωσης. Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν προσομοιώσεις με τροποποιήσεις στη γεωμετρία του ανιχνευτή και συγκεκριμένα της κυλινδρικής οπής του (finger). Κατά τις προσομοιώσεις αυτές αξιοποιήθηκε αρχικά το μοντέλο που είχε αναπτυχθεί στην προαναφερθείσα εργασία (Θ. Βασιλοπούλου, 2008) σε κώδικα Penelope και το προς εξέταση μέγεθος επιλέχθηκε να είναι η απόδοση φωτοκορυφής. Ξεκινώντας λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία ΣΤ, η οποία σύμφωνα με την κωδικοποίηση που ακολουθείται στο ΕΠΤ–ΕΜΠ περιλαμβάνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 5.1.

Παράθυρο Αλουμινίου	1.5 mm
dead layer	760μm στην άνω πλευρά
	700μm περιφερειακά
Ύψος οπής	50 mm
Διάμετρος οπής	10 mm

*ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή σύμφωνα με τη Γεωμετρία ΣΤ*

Στη συνέχεια, παρατίθεται ο Πίνακας 5.2 με τα ποσοστά των αποκλίσεων που καταγράφηκαν στην περίπτωση αυτή για την απόδοση φωτοκορυφής βάσει πειραματικών τιμών και βάσει του κώδικα Penelope. Η απόκλιση των τιμών σε κάθε ενέργεια συνοδεύεται και από το αντίστοιχο U-test που πραγματοποιείται για τον απαιτούμενο στατιστικό έλεγχο. (Παράρτημα Γ)

- Γεωμετρία ΣΤ:

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση (%) Πειράματος- PENELOPE	Τιμή U-test
<sup>133</sup> Ba	53.16	-19.6	0.443
<sup>133</sup> Ba	276.3989	-7.14	0.215
<sup>133</sup> Ba	302.8508	-8.34	0.243
<sup>133</sup> Ba	356.0129	-6.75	0.176
<sup>133</sup> Ba	383.8485	-6.66	0.181
<sup>137</sup> Cs	661.657	-8.06	0.171
<sup>60</sup> Co	1173.228	-6.65	0.115
<sup>60</sup> Co	1332.492	-8.70	0.144

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Σύγκριση αποδόσεων φωτοκορυφής για ενέργειες του <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs και <sup>60</sup>Co για τη Γεωμετρία ΣΤ με απόσταση πηγής – ανιχνευτή 22.4 cm.

Βάσει των αποτελεσμάτων του U-test παρατηρείται στατιστική συμφωνία μεταξύ των τιμών του πειράματος και της προσομοίωσης. Αιόμη, τονίζεται ότι σε όλες τις ενέργειες, η πειραματική τιμή είναι μικρότερη της αντίστοιχης που παράγεται από τον κώδικα Penelope. Διερευνάται ωστόσο και άλλη περίπτωση, με στόχο τη μείωση των αποκλίσεων.

Σε επόμενο στάδιο προσομοιώνεται η γεωμετρία Η, η οποία είναι και η βέλτιστη που διαπιστώνεται στην προγενέστερη εργασία και διαθέτει τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 5.3.

Παράθυρο Αλουμινίου	1.5 mm
dead layer	760μm στην άνω πλευρά
	700μm περιφερειακά
Ύψος οπής	50 mm
Διάμετρος οπής	12 mm

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή σύμφωνα με τη Γεωμετρία Η

Ομοίως με την προηγούμενη διαδικασία, στον Πίνακα 5.4 παρατίθεται η σύγκριση των πειραματικών τιμών απόδοσης με αυτές που παράγονται από τον κώδικα Penelope και οι αντίστοιχες αποκλίσεις τους συνοδευόμενες με το U-test για κάθε ενέργεια.

- Γεωμετρία Η:

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση (%) Πειράματος- PENELOPE	Τιμή U-test
<sup>133</sup> Ba	53.16	-18.6	0.420
<sup>133</sup> Ba	160.6121	-13.6	0.465
<sup>133</sup> Ba	223.2368	-8.63	0.274
<sup>133</sup> Ba	276.3989	-6.39	0.191
<sup>133</sup> Ba	302.8508	-7.46	0.215
<sup>133</sup> Ba	356.0129	-5.36	0.145
<sup>133</sup> Ba	383.8485	-6.00	0.157
<sup>137</sup> Cs	661.657	-6.99	0.148
<sup>60</sup> Co	1173.228	-4.80	0.082
<sup>60</sup> Co	1332.492	-6.01	0.098

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: Σύγκριση αποδόσεων φωτοκορυφής πειράματος και κώδικα PENELOPE, για ενέργειες του <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs και <sup>60</sup>Co για τη Γεωμετρία Η, με απόσταση πηγής – ανιχνευτή 22.4 cm.

Η περίπτωση αυτή παρατηρείται και στην παρούσα εργασία ως η βέλτιστη δυνατή, με στατιστική συμφωνία ανάμεσα στο πείραμα και την προσομοίωση, αλλά και με τις μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ αυτών. Εφόσον παρατηρήθηκε αυτό, επιλέχθηκε η προσομοίωση περισσότερων ενεργειών για το ισότοπο του <sup>133</sup>Ba απ' ότι στην προηγούμενη περίπτωση, για την πληρέστερη παρουσίαση αποτελεσμάτων. Συνεπώς, το μοντέλο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθεί και σε κώδικα MCNP, προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των δύο κωδίκων μεταξύ τους, αλλά και η ευθεία σύγκριση αυτών με τις πειραματικές τιμές. Παρουσιάζεται λοιπόν στον Πίνακα 5.5 η απόκλιση των τιμών απόδοσης του πειράματος με τον κώδικα MCNP και τέλος, στον Πίνακα 5.6, η σύγκριση της απόδοσης που προκύπτει από κάθε κώδικα για το ίδιο μοντέλο.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση (%) Πειράματος-MCNP	Τιμή U-test
<sup>133</sup> Ba	53.16	15.4	0.339
<sup>133</sup> Ba	160.6121	14.1	0.490
<sup>133</sup> Ba	223.2368	9.89	0.313
<sup>133</sup> Ba	276.3989	7.67	0.232
<sup>133</sup> Ba	302.8508	9.38	0.275
<sup>133</sup> Ba	356.0129	7.38	0.205
<sup>133</sup> Ba	383.8485	8.12	0.213
<sup>137</sup> Cs	661.657	11.0	0.239
<sup>60</sup> Co	1173.228	10.5	0.184
<sup>60</sup> Co	1332.492	12.6	0.213

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: Σύγκριση αποδόσεων φωτοκορυφής πειράματος και κώδικα MCNP, για ενέργειες του <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs και <sup>60</sup>Co για τη Γεωμετρία H, με απόσταση πηγής – ανιχνευτή 22.4 cm.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση (%) PENELOPE- MCNP	Τιμή U-test
<sup>133</sup> Ba	53.16	3.96	0.062
<sup>133</sup> Ba	160.6121	-0.55	0.014
<sup>133</sup> Ba	223.2368	-1.38	0.032
<sup>133</sup> Ba	276.3989	-1.37	0.029
<sup>133</sup> Ba	302.8508	-2.08	0.043
<sup>133</sup> Ba	356.0129	-2.14	0.042
<sup>133</sup> Ba	383.8485	-2.25	0.042
<sup>137</sup> Cs	661.657	-4.32	0.067
<sup>60</sup> Co	1173.228	-5.96	0.075
<sup>60</sup> Co	1332.492	-7.00	0.085

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: Σύγκριση αποδόσεων φωτοκορυφής των κωδίκων PENELOPE και MCNP, για ενέργειες του <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs και <sup>60</sup>Co για τη Γεωμετρία H, με απόσταση πηγής – ανιχνευτή 22.4 cm.

Συνεπώς, τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία αξιοποιήθηκαν στην προσομοίωση, βάσει των δοθέντων από τον κατασκευαστή τιμών, αλλά και των προσδιορισμένων από την παραπάνω διαδικασία, παρουσιάζονται ολοκληρωμένα στον Πίνακα 5.7.

Πάχος dead layer	760μm στην άνω πλευρά και 700μm περιφερειακά	Υπολογισμένες τιμές κατά τη διαδικασία προσδιορισμού διαστάσεων
Διάμετρος οπής	12mm	
Ύψος οπής	50mm	
Πάχος παραθύρου Al	1.5mm	
Διάμετρος κρυστάλλου	55.3mm	Δεδομένα από τον κατασκευαστή γεωμετρικά χαρακτηριστικά
Ύψος κρυστάλλου	65mm	
Ενεργός περιοχή που “βλέπει” το παράθυρο	24.15cm <sup>2</sup>	
Απόσταση από το παράθυρο	5mm	

*ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: Τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον ανιχνευτή Γερμανίου (Ge33) απόδοσης 33.8%*



### 5.4.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΠΤ – ΕΜΠ

Παρόμοια λοιπόν, μπορεί να επιλεγεί και για τις υπόλοιπες χρησιμοποιούμενες ανιχνευτικές διατάξεις το κατάλληλο γεωμετρικό μοντέλο. Για τον ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου Ge40 και για τον ανιχνευτή Γερμανίου LEGe, που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 3.1.3 και 3.1.4 αντίστοιχα, αξιοποιήθηκαν εργασίες που έχουν διεξαχθεί στο ΕΠΤ–ΕΜΠ (Μ. Παπαδιονυσίου, 2015) (S. Padovani, et al., 2018). Βάσει λοιπόν των αποτελεσμάτων τους παρατίθενται στους Πίνακες 5.8 και 5.9, τα προσδιορισμένα με την προαναφερθείσα διαδικασία γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, τα οποία και χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη των αντίστοιχων μοντέλων στο σύνολο των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας.

- Ge40

Εξωτερική διάμετρος ανιχνευτή	58.5 mm
Μήκος ανιχνευτή	61.0 mm
Απόσταση του κρυστάλλου από το παράθυρο	7.0 mm
Πάχος του παραθύρου	0.5 mm
Πάχος του τοιχώματος του κρυστάτη	1.5 mm
Απόσταση κρυστάλλου από το τοίχωμα	6.0 mm
Front dead layer	550 μm
Περιφερειακό dead layer	700 μm
Κάτω dead layer	700 μm
Εσωτερική διάμετρος οπής (finger)	12.6 mm
Μήκος οπής (finger)	50.0 mm

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υπερκαθαρού Γερμανίου ΕΠΤ-ΕΜΠ απόδοσης 40%

- LEGe

Ενεργή διάμετρος κρυστάλλου	47.1 mm
Ύψος κρυστάλλου	20 mm
Επιφάνεια κρυστάλλου	2000 mm <sup>2</sup>
Απόσταση από τον κρυστάτη	5 mm
Πάχος του κρυστάτη	0.5 mm
Front dead layer	0.2 mm
Περιφερειακό dead layer	17 mm
Κάτω dead layer	16 mm

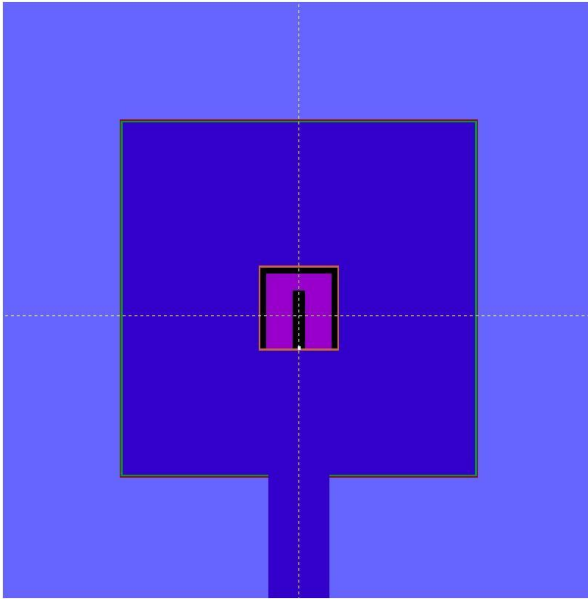
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή LEGe ΕΠΤ-ΕΜΠ

Για την προσομοίωση όλων των απαιτούμενων περιπτώσεων, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι απαραίτητα τα γεωμετρικά μοντέλα για κάθε ανιχνευτική διάταξη.

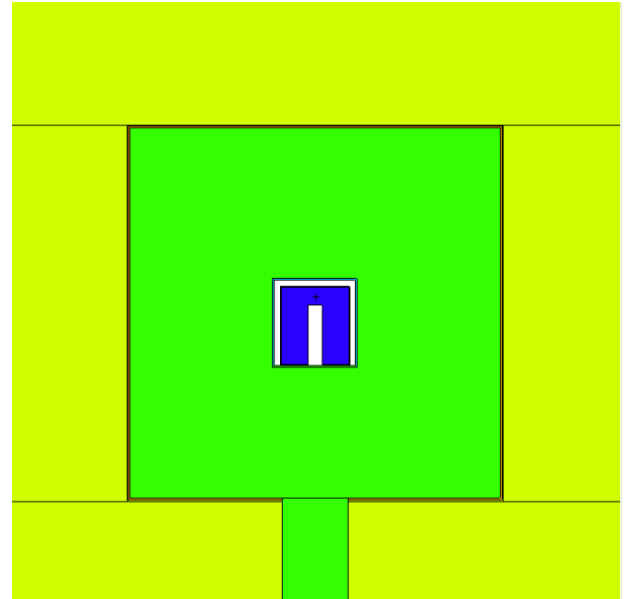
Σημειώνεται ότι τα 3 μοντέλα, που αξιοποιούνται για τις προσομοιώσεις των αντίστοιχων ανιχνευτικών διατάξεων με τον κώδικα MCNP, αναπτύχθηκαν εξ ολοκλήρου στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Αντιθέτως, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον κώδικα Penelope βασίστηκαν σε προηγούμενες εργασίες (M. Παπαδιονυσίου, 2015) (S. Padovani, et al., 2018), ωστόσο απαραίτητη κρίθηκε η τροποποίησή τους για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

Στη συνέχεια λοιπόν, παρουσιάζονται τα μοντέλα αυτά και αναφέρονται οι διαφοροποιήσεις τους, βάσει του εκάστοτε κώδικα που τα προσομοιώνει. Κάθε χρώμα που εμφανίζεται από το αντίστοιχο πρόγραμμα απεικόνισης συμβολίζει διαφορετικό υλικό από το οποίο αποτελείται το αντίστοιχο κομμάτι του γεωμετρικού μοντέλου. Ο χρήστης καλείται να ορίσει ένα συγκεκριμένο υλικό για κάθε “κελί” της γεωμετρίας που συνθέτει. Στην περίπτωση του κώδικα Penelope 2018, έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μέσα από μια σειρά υλικών της βιβλιοθήκης που διατίθεται ή και να ορίσει ένα νέο υλικό, δίνοντας ως δεδομένο στον κώδικα την πυκνότητά του, τη χημική του σύσταση και μία αντίστοιχη ονομασία για αυτό. Αντίθετα, στην περίπτωση του MCNP5, σε κάθε αρχείο εισόδου χρειάζεται ο ορισμός της σύστασης και της πυκνότητας όλων των χρησιμοποιούμενων υλικών, στις αντίστοιχες κάρτες (material & cell cards). Ο αριθμός που αντιστοιχεί στο ορισμένο υλικό τοποθετείται επίσης δίπλα από το κάθε “κελί” μαζί με την πυκνότητά του.

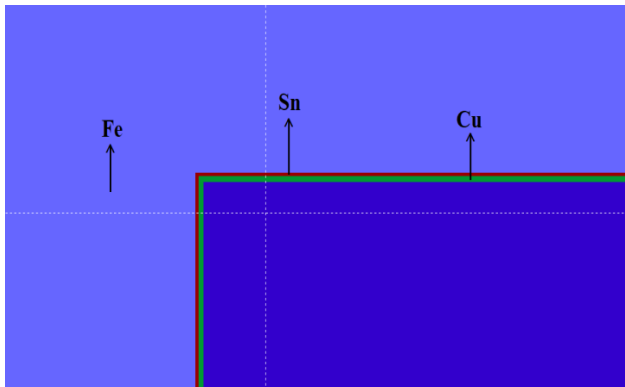
- Ge33: Το γεωμετρικό μοντέλο της διάταξης αυτής υλοποιήθηκε για την παρούσα εργασία βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.4.2 και συγκεκριμένα στον πίνακα 5.7. Αναλυτικότερα δηλαδή, λήφθηκαν υπόψη ο ενεργός όγκος, το dead layer και οι διαστάσεις του κρυστάλλου του Γερμανίου που προσδιορίστηκαν από τη διαδικασία επιβεβαίωσης του μοντέλου, όπως έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας, δηλαδή της γεωμετρίας Η. Ακόμη, η θέση του κρυστάτη και η απόστασή του από τον κρύσταλλο Γερμανίου λαμβάνονται από το πιστοποιητικό του ανιχνευτή και οι διαστάσεις της θωράκισης επιλέγονται βάσει των διαστάσεων που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.2.2 και συγκεκριμένα στον Πίνακα 4.2. Στη συνέχεια, στα σχήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζεται η διάταξη του Ge33, όπως απεικονίζεται από το γραφικό περιβάλλον κάθε κώδικα, δηλαδή από το “gview2d” του κώδικα Penelope 2018 και από το “Vised” του κώδικα MCNP5 αντίστοιχα. Απεικονίζεται εστιασμένο τμήμα της θωράκισης με την επίστρωση χαλκού (Cu), κασσίτερου (Sn) και στη συνέχεια σιδήρου (Fe) (σχήμα 5.16 και 5.17), καθώς και η τομή κατά τον άξονα y ολόκληρης της διάταξης, δηλαδή το επίπεδο xz. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, απεικονίζεται η διάταξη με κλειστή θωράκιση, ωστόσο η προσομοίωση έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλα και με ανοιχτή.



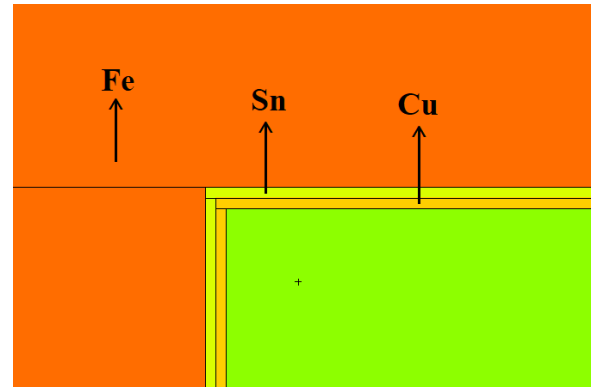
ΣΧΗΜΑ 5.14



ΣΧΗΜΑ 5.15



ΣΧΗΜΑ 5.16



ΣΧΗΜΑ 5.17

ΣΧΗΜΑ 5.14: Τομή του ανιχνευτή Ge33 – απεικόνιση του επιπέδου γχ στο πρόγραμμα gview

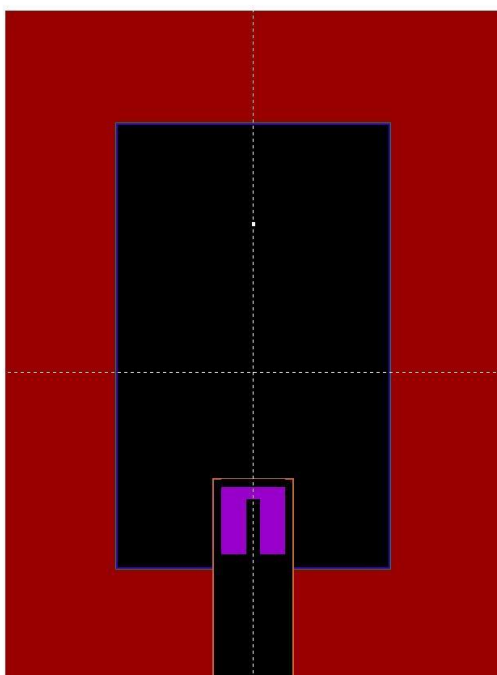
ΣΧΗΜΑ 5.15: Τομή του ανιχνευτή Ge33 – απεικόνιση του επιπέδου γχ στο πρόγραμμα VisEd

ΣΧΗΜΑ 5.16: Εστίαση στο άνω αριστερά κομμάτι της θωράκισης και απεικόνιση της επίστρωσης Cu, Sn και Fe στο πρόγραμμα gview

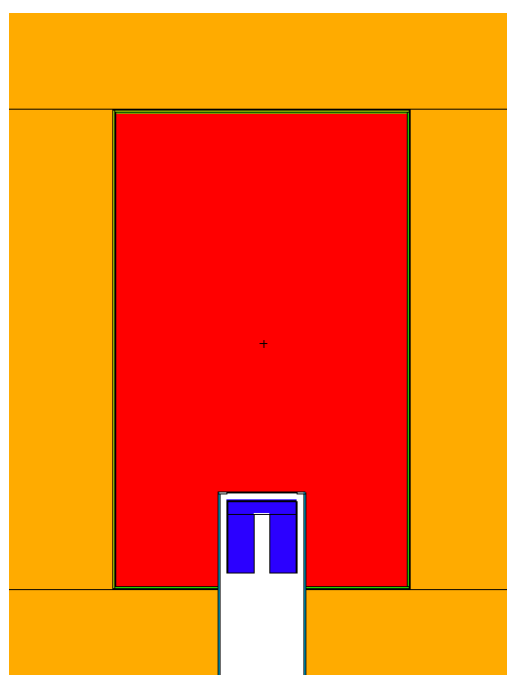
ΣΧΗΜΑ 5.17: Εστίαση στο άνω αριστερά κομμάτι της θωράκισης και απεικόνιση της επίστρωσης Cu, Sn και Fe στο πρόγραμμα VisEd

– Ge40:

Για το μοντέλο της συγκεκριμένης ανιχνευτικής διάταξης αξιοποιήθηκε προγενέστερη εργασία (Μ. Παπαδιονυσίου, 2015), στο πλαίσιο της οποίας έχει πραγματοποιηθεί επιβεβαίωση της γεωμετρίας του, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.4.3. Η αναπαράσταση της τελικής γεωμετρίας του από το πρόγραμμα gniew παρουσιάζεται στο σχήμα 5.18. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν, απαραίτητη ήταν αρχικά η τροποποίηση του αρχείου γεωμετρίας του κώδικα Penelope 2018 προκειμένου να μπορεί να προσομοιωθεί η ανιχνευτική διάταξη και με ανοιχτή θωράκιση. Το ίδιο γεωμετρικό μοντέλο και κάνοντας χρήση πανομοιότυπων υλικών με τις αντίστοιχες πυκνότητές τους, αναπτύχθηκε για τον κώδικα MCNP5 και συνεπώς και για τον κώδικα MCNP-CP (σχήμα 5.19).



ΣΧΗΜΑ 5.18

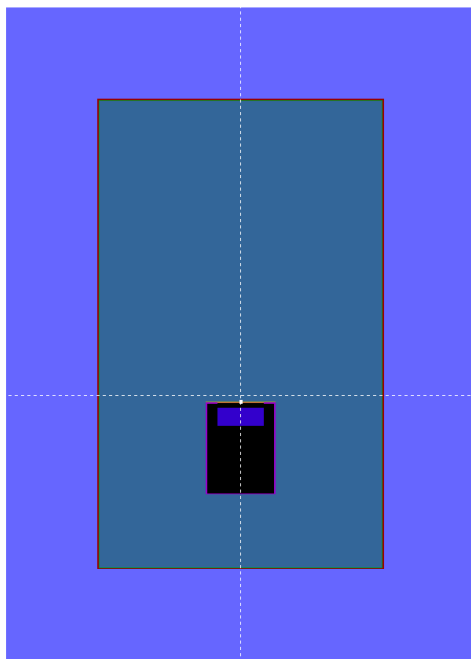


ΣΧΗΜΑ 5.19

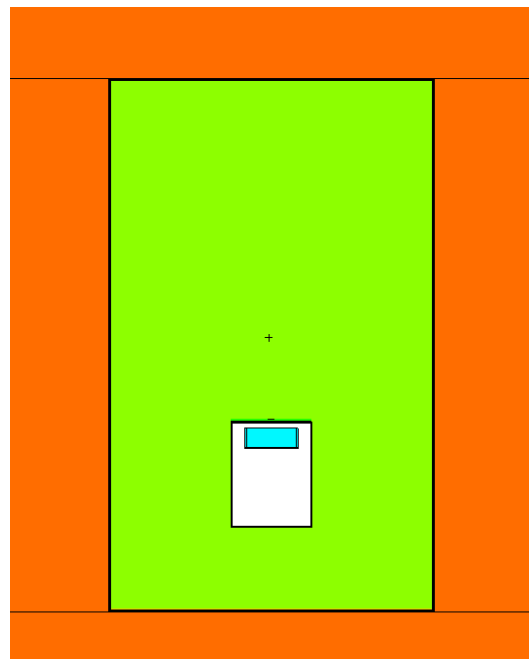
ΣΧΗΜΑ 5.18: Τομή του ανιχνευτή Ge40 – απεικόνιση του επιπέδου yz στο πρόγραμμα gniew  
ΣΧΗΜΑ 5.19: Τομή του ανιχνευτή Ge40 – απεικόνιση του επιπέδου yz στο πρόγραμμα VisEd

– LEGe:

Το μοντέλο του ανιχνευτή αυτού έχει αναπτυχθεί σε κώδικα Penelope στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και έχει χρησιμοποιηθεί σε προγενέστερες εργασίες. Επομένως, όπως και στην παραπάνω ανιχνευτική διάταξη, απαραίτητη ήταν η τροποποίηση του αρχείου γεωμετρίας του κώδικα Penelope 2018, ώστε να προσαρμοστεί κατάλληλα στους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, αφαιρέθηκε από το μοντέλο ο εξοπλισμός που δε χρησιμοποιήθηκε και έγιναν προσομοιώσεις και με ανοιχτή τη θωράκιση του ανιχνευτή. Η τομή του μοντέλου αυτό στο επίπεδο yz με κλειστή θωράκιση δίνεται στο σχήμα 5.20, από το πρόγραμμα gview. Στη συνέχεια, το μοντέλο της γεωμετρίας υλοποιήθηκε για τον κώδικα MCNP5 και επομένως και τον MCNP-CP. Όμοια με τις προαναφερθείσες διατάξεις επιλέχθηκε η χρήση ακριβώς των ίδιων υλικών σε κάθε γεωμετρικό “κελί” στους δύο κώδικες, με στόχο την εισαγωγή κατά το δυνατόν παρόμοιων συνθηκών του προβλήματος σε καθέναν απ’ αυτούς (σχήμα 5.21).



ΣΧΗΜΑ 5.20



ΣΧΗΜΑ 5.21

ΣΧΗΜΑ 5.20: Τομή του ανιχνευτή LEGe – απεικόνιση του επιπέδου yz στο πρόγραμμα gview

ΣΧΗΜΑ 5.21: Τομή του ανιχνευτή LEGe – απεικόνιση του επιπέδου yz στο πρόγραμμα VisEd

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

### 6.1 Προσομοιώσεις των πειραμάτων - εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν, με στόχο τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής. Πιο συγκεκριμένα δηλαδή, αναφέρονται οι συνθήκες του κάθε προβλήματος όπως δόθηκαν στα αρχεία εισόδου των κωδικών και τυχόν διαφοροποιήσεις μεταξύ τους όταν αυτές υπάρχουν. Σε ότι αφορά τη μοντελοποίηση των ανιχνευτών, έγινε λεπτομερής περιγραφή στην παράγραφο 5.4.3 και όλα τα απαιτούμενα για την προσομοίωση και τους υπολογισμούς μεγέθη λαμβάνονται από εκεί. Προκειμένου να καταγράφονται κατά την προσομοίωση τα εκπεμπόμενα φωτόνια επιλέγεται στο αρχείο εισόδου του κώδικα Penelope η παράμετρος SKPAR να λάβει την τιμή 2, διότι όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 5.2.2, η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε αυτό το είδος σωματιδίων. Σε συνδυασμό λοιπόν με τη χρήση της παραμέτρου “ENDETC” (παράγραφος 5.2.2.1), δίνεται στο αρχείο εξόδου το ζητούμενο μέγεθος, δηλαδή η απόδοση φωτοκορυφής. Αντίστοιχα στον κώδικα MCNP επιλέγεται ο ορισμός της μεταβλητής  $p$  δηλαδή ομοίως τα φωτόνια, στην tally “f8” (παράγραφος 5.3.2.2), για τον υπολογισμό του ίδιου μεγέθους.

Σημειώνεται όμως, ότι ο ανιχνευτής, στη διάρκεια ενός πειράματος καταγράφει όσα φωτόνια φτάνουν σε αυτόν, χωρίς να διαχωρίζει τα “πρωτογενή” από τα “δευτερογενή”. Αντιθέτως, κατά την προσομοίωση όπως έχει περιγραφεί ως τώρα, ο κώδικας λειτουργεί με την παραδοχή ότι τα αρχικά σωματίδια στο αρχείο εισόδου είναι αποκλειστικά τα φωτόνια που εκπέμπονται απ’ ευθείας από την πηγή, αγνοώντας τις ενδεχόμενες ακτίνες- $\gamma$  από την πέδηση των ταχέως κινούμενων ηλεκτρονίων. Έτσι, χρειάστηκε να λαμβάνονται υπόψη και οι πιθανές αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων, σε περίπτωση που αυτές συνεισέφεραν στα καταγραφόμενα φωτόνια. Για το λόγο αυτό, στον κώδικα Penelope επιλέχθηκαν κατάλληλα οι τιμές για τις ενέργειες αποκοπής (cutoff energies), ενώ στον MCNP εισήχθη στην παράμετρο “imp” (importance) το γράμμα  $e$  για τα ηλεκτρόνια εκτός του γράμματος  $p$  για τα φωτόνια. Αρχικά μελετώνται περιπτώσεις εκπομπής μονοενεργειακών φωτονίων με τον ορισμό μιας ενέργειας ακτίνων- $\gamma$  μέσω της γραμμής “SENERG” (σε keV) στον κώδικα Penelope και της παραμέτρου “erg” (σε MeV) στον κώδικα MCNP. Στη συνέχεια, για τη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, εφόσον πρόκειται για ισότοπα με εκπομπή παραπάνω από ενός φωτονίου και όχι φωτόνια μίας συγκεκριμένης ενέργειας, απαιτείται ο ορισμός ολόκληρου του προς μελέτη νουκλιδίου. Αυτό επιτυγχάνεται στον κώδικα Penelope με τον ορισμό της τιμής 0 για την παράμετρο “SKPAR” και την εισαγωγή της γραμμής “SRNUCL” στο αρχείο εισόδου. Στη γραμμή αυτή ακολουθεί το αντίστοιχο αρχείο της μορφής “.nuc”, το οποίο προέρχεται από τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιεί ο συγκεκριμένος κώδικας, την ENSDF ([http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)). Αντίστοιχα στον κώδικα MCNP-CP απαιτείται η χρήση της παραμέτρου “zam”, της οποίας τα γράμματα

υποδηλώνουν τον ατομικό αριθμό ( $z$ ), τον μαζικό αριθμό ( $a$ ) και την περίπτωση που ένας πυρήνας είναι μετασταθής ( $m$ ).

Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε το μοντέλο της επιφανειακής πηγής με πλήθος ισοτόπων ( $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ). Λόγω της γεωμετρίας της (πηγή φίλτρου) επιλέγεται να τοποθετηθεί σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή, όπως δηλαδή συνηθίζεται στις περιπτώσεις όπου μελετώνται τέτοιες πηγές. Παρόλο που πρόκειται για μία επιφανειακή πηγή, το πάχος της θεωρήθηκε αμελητέο, επομένως προσομοιώθηκε ως ένας κύλινδρος ακτίνας 2.5 cm, με στοιχειώδες πάχος 0.02 cm, όπως προκύπτει από το πιστοποιητικό που τη συνοδεύει. ([https://www.ezag.com/home/products/isotope\\_products/isotrak\\_calibration\\_sources/reference\\_sources/geometry\\_sources\\_beakers\\_bottles\\_filters\\_rods/filters/](https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/reference_sources/geometry_sources_beakers_bottles_filters_rods/filters/)) Ακόμη, βάσει αυτού επιλέχθηκε το υλικό του προσομοιούμενου όγκου, το οποίο είναι πολυστυρένιο. Στο σημείο αυτό χρειάζεται να σχολιασθεί, ότι στην περίπτωση του κώδικα MCNP5 και συνεπώς και του MCNP-CP, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μία επιφανειακή πηγή, δηλαδή πηγή μηδενικού πάχους και ορισμένης ακτίνας, που εκπέμπει σωματίδια είτε προς μία κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της πηγής είτε και προς τις δύο κάθετες σε αυτό κατευθύνσεις. Ωστόσο, μία τέτοια επιλογή δεν είναι δυνατή στον κώδικα Penelope 2018, στον οποίο επιτρέπεται η προσομοίωση σημειακών και συνεπώς “αδιάστατων” πηγών ή πηγών όγκου. Για το λόγο αυτό και χάριν ομοιομορφίας στις δύο προσομοιώσεις, έγινε η επιλογή ενός στοιχειώδους κυλίνδρου, δηλαδή η επιφανειακή πηγή ορίστηκε ως πηγή όγκου, με πολύ μικρό ύψος. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται, ότι για την προσθήκη μιας πηγής όγκου απαιτείται η τροποποίηση του αρχείου γεωμετρίας για τον κώδικα Penelope και για τον κώδικα MCNP. Στην πρώτη περίπτωση, αρχικά προστίθεται στο αρχείο γεωμετρίας ο όγκος που αναπαριστά τη ραδιενεργό πηγή σαν ένα ξεχωριστό “body” με το υλικό από το οποίο αποτελείται. Στη συνέχεια, στο αρχείο εισόδου ορίζεται η θέση για το κέντρο του κυλίνδρου της ραδιενεργού πηγής και στη συνέχεια οι παράμετροι για την ακτίνα και το ύψος της. Διευκρινίζεται δε, ποιο “body” του αρχείου γεωμετρίας περιέχει την προς μελέτη πηγή. Αντιστοίχως στον MCNP, τροποποιείται κατάλληλα στο αρχείο εισόδου η γεωμετρία του προβλήματος με τον ορισμό ενός νέου “κελιού”, αυτό της πηγής, και στη συνέχεια, στην κάρτα “sdef” προσδιορίζεται ο αριθμός αυτού, με τη χρήση της παραμέτρου “cell”. Τονίζεται ωστόσο στο σημείο αυτό, ότι ο τρόπος που μία τέτοιου είδους πηγή μπορεί να οριστεί σε καθέναν από τους δύο κώδικες διαφέρει σημαντικά. Αναλυτικότερα δηλαδή, στον κώδικα Penelope, μία επιφανειακή πηγή που αποτελείται από πλήθος ισοτόπων δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθεί αυτοτελώς. Στην περίπτωση δηλαδή της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκαν πέντε αρχεία εισόδου, καθένα από τα οποία αντιστοιχούσε σε ένα ισότοπο της πηγής αυτής. Αντιθέτως, στον κώδικα MCNP-CP προσφέρεται η δυνατότητα να εισαχθούν όλα τα ισότοπα σε ένα αρχείο εισόδου συνοδευόμενα από κάποιο συντελεστή βαρύτητας και συνεπώς να προσομοιωθούν ταυτόχρονα. Τέλος, υπογραμμίζεται, ότι και στους δύο κώδικες χρησιμοποιούνται για κάθε τμήμα της διάταξης τα ίδια υλικά, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι διαφοροποιήσεις στα δεδομένα εισόδου μεταξύ τους. Διατηρώντας λοιπόν ενιαία τις προαναφερθείσες συνθήκες πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις σε όλες τις ανιχνευτικές διατάξεις. Οι διαφορές τους αναφέρονται στη συνέχεια και ποικίλλουν ανάλογα με την προς μελέτη περίπτωση.

## 6.2 Ανιχνευτής Γερμανίου απόδοσης 33.8% (Ge33)

Στην περίπτωση του ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 33.8% προσομοιώθηκαν σημειακές πηγές ενός ισότοπου και στη συνέχεια επιφανειακή πηγή, στην οποία εμπεριέχεται σειρά ισότοπων. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για σημειακές πηγές  $^{60}\text{Co}$  και  $^{22}\text{Na}$  στις αποστάσεις που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 4.17, δηλαδή σε απόσταση 1.2 cm και 9.5 cm από το παράθυρο του Αλουμινίου του ανιχνευτή. Τα ισότοπα αυτά ορίστηκαν στον κώδικα Penelope με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης ENSDF που αναφέρθηκε στην εισαγωγική παράγραφο, δηλαδή με τη βοήθεια του αντίστοιχου αρχείου που εντοπίζεται σε αυτή τη βάση δεδομένων (σχήμα 6.1). Αντίστοιχα στον κώδικα MCNP-CP τα ισότοπα ορίζονται με τις εξής παραμέτρους: zam=270600 για το  $^{60}\text{Co}$ , διότι έχει ατομικό αριθμό 27 και μαζικό αριθμό 60 και zam=110220 για το  $^{22}\text{Na}$ , με ατομικό αριθμό 11, μαζικό αριθμό 22 (σχήμα 6.2). Στις δύο αυτές περιπτώσεις, το τελευταίο ψηφίο είναι 0, εφόσον κανένα από τα ισότοπα δεν είναι μετασταθές (επομένως η παράμετρος m της παραμέτρου zam πρέπει να είναι μηδενική).

```
>>>>>> Source definition.  
SKPAR 0 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]  
SRNUCL Co60.nuc [NUCLEIDE data file]
```

ΣΧΗΜΑ 6.1: Τμήμα του αρχείου εισόδου του κώδικα Penelope για την προσομοίωση του νουκλιδίου  $^{60}\text{Co}$ , λαμβάνοντας υπόψη όλο το διάγραμμα διάσπασής του.

```
sdef par=2 zam=270600
```

ΣΧΗΜΑ 6.2: Τμήμα του αρχείου εισόδου του κώδικα MCNP για την προσομοίωση του νουκλιδίου  $^{60}\text{Co}$ , λαμβάνοντας υπόψη όλο το διάγραμμα διάσπασής του.

Στη συγκεκριμένη ανιχνευτική διάταξη προσομοιώθηκε μία ακόμη περίπτωση, κατά την οποία η σημειακή πηγή αποτελεί ένα στοιχειώδη όγκο, προκειμένου να εντοπιστούν ενδεχόμενες διαφορές, συγκριτικά με την επιλογή σημειακής πηγής. Συνεπώς, απαιτείται παράλληλα ο ορισμός συγκεκριμένου υλικού για τον όγκο αυτόν. Βάσει του πιστοποιητικού της [https://www.ezag.com/home/products/isotope\\_products/isotrak\\_calibration\\_sources/reference\\_sources/gamma\\_sources/point\\_sources/#c605](https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/reference_sources/gamma_sources/point_sources/#c605), ορίζεται ως ένας κύλινδρος ακτίνας 0.15 cm, με στοιχειώδες ύψος 0.076 cm και είναι κατασκευασμένη από τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (polyethylene terephthalate-pet ή mylar). Το υλικό αυτό εντοπίζεται στη βιβλιοθήκη των υλικών της Penelope με τον αριθμό “223”, ενώ στον MCNP ορίζεται με επιφανειακή πυκνότητα  $9\text{mg}/\text{cm}^2$ , όπως δίνεται από το πιστοποιητικό του.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις για την επιφανειακή πηγή με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.1 του κεφαλαίου. Το κέντρο της επιφανειακής πηγής τοποθετήθηκε σε απόσταση 0.0375 cm από την επιφάνεια του κρουστάτη, εφόσον αυτή είχε τοποθετηθεί σε επαφή με αυτόν και εφόσον έχει ληφθεί υπόψη



το συνολικό της πάχος (περιβάλλεται από δύο φύλλα χαρτιού και πλαστικό περιβλήμα δοσμένου από το πιστοποιητικό πάχους).

Τα αποτελέσματα από τους παραπάνω υπολογισμούς για τις τιμές απόδοσης φωτοκορυφής ανά ενέργεια με το αντίστοιχο σφάλμα τους παρουσιάζονται στους πίνακες 6.1 και 6.2 για τον κώδικα Penelope και στους πίνακες 6.3 και 6.4 για τον κώδικα MCNP-CP. Υπογραμμίζεται, ότι η εξαγωγή της απόδοσης φωτοκορυφής από ένα αρχείο εξόδου του κώδικα Penelope πραγματοποιείται μετά την εφαρμογή της σχέσης 6.1.

$$\text{eff}_{\text{peak}} = (\sum_n \text{pdf}_i) \cdot dE(6.1)$$

όπου:

- $\text{eff}_{\text{peak}}$ : η απόδοση φωτοκορυφής
- $\text{pdf}_i$ : η πιθανότητα απόθεσης ενέργειας εντός των ορίων του ενεργειακού παραθύρου
- $dE$ : το εύρος των ενεργειακών παραθύρων που χρησιμοποιούνται
- $n$ : το πλήθος των ενεργειακών παραθύρων που οφείλει να αθροίσει ο χρήστης, ώστε να προκύψει η ενεργειακή περιοχή μέσα στην οποία καταγράφονται όλα τα φωτόνια, τα οποία θα καταγράφονταν κάτω από την αντίστοιχη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης στο πραγματικό φάσμα. Δεδομένου ότι μία φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης πρακτικά οριοθετείται στην περιοχή [κεντροειδές  $\pm 1.5 \cdot \text{FWHM}$ ], η τιμή του  $n$  εξαρτάται από το εύρος ημίσειας ύψους (FWHM) της ανιχνευτικής διάταξης, για τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων και δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{1.5 \cdot \text{FWHM}}{dE} (6.2)$$

Τονίζεται επίσης, ότι η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο  $1\sigma$  υπολογίζεται με εφαρμογή του νόμου διάδοσης σφαλμάτων και τις τιμές της αβεβαιότητας της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας ( $\text{pdf}$ ) για κάθε ενεργειακό παράθυρο, από τη σχέση:

$$\text{unc}_{\text{eff}_{\text{peak}}} = \frac{\sqrt{\sum_n (\sigma_{\text{pdf}_i}^2) \cdot dE}}{3} (6.3)$$

όπου:

- $\text{unc}_{\text{eff}_{\text{peak}}}$ : η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής σε επίπεδο  $1\sigma$
- $\sigma_{\text{pdf}_i}^2$ : η απόλυτη αβεβαιότητα της πιθανότητας απόθεσης ενέργειας ( $\text{pdf}$ ) στο  $i$ - ενεργειακό παράθυρο
- $n$ : πλήθος ενεργειακών καναλιών, όπως υπολογίζεται από τη σχέση (6.2)

(Μ. Σάββα, Νοέμβριος 2017) Στους Πίνακες 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8, 6.9 που ακολουθούν ακολουθείται η παρακάτω κωδικοποίηση:

- ◆  $\sigma$ : σημειακή πηγή
- ◆  $\epsilon$ : επιφανειακή πηγή
- ◆  $o$ : πηγή όγκου
- ◆  $sdd$ : απόσταση πηγής ανιχνευτή (source to detector distance)
- ◆  $coinc$ : λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης
- ◆  $no\ coinc$ : δε λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης
- ◆ Σφάλμα ( $1\sigma$ ): τα σχετικά σφάλματα σε επίπεδο

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
				coinc		no coinc	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co (σ)	1.2	Ανοιχτή	1173.228	1.9046E-02	0.002	2.1078E-02	0.002
			1332.492	1.7098E-02	0.002	1.8917E-02	0.002
		Κλειστή	1173.228	1.9114E-02	0.002	2.1057E-02	0.002
			1332.492	1.7197E-02	0.002	1.9018E-02	0.002
	9.5	Ανοιχτή	1173.228	1.9498E-03	0.007	2.0144E-03	0.007
			1332.492	1.7766E-03	0.008	1.7895E-03	0.007
		Κλειστή	1173.228	1.9534E-03	0.007	2.0147E-03	0.007
			1332.492	1.7799E-03	0.007	1.8184E-03	0.007
<sup>22</sup> Na (σ)	1.2	Ανοιχτή	1274.537	1.7365E-02	0.002	1.9496E-02	0.002
		Κλειστή	1274.537	1.7248E-02	0.002	1.9522E-02	0.002
	9.5	Ανοιχτή	1274.537	1.8318E-03	0.007	1.8529E-03	0.007
		Κλειστή	1274.537	1.8062E-03	0.007	1.8493E-03	0.007
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	3.9481E-03	0.015	5.2657E-03	0.012
			79.6142	1.2944E-02	0.006	1.7557E-02	0.005
			80.9979	1.2062E-02	0.025	1.5086E-02	0.022
			160.6121	1.8426E-02	0.003	1.8810E-02	0.003
			223.2368	1.3179E-02	0.004	1.4246E-02	0.003
			276.3989	1.0562E-02	0.010	1.1940E-02	0.010
			302.8508	1.0445E-02	0.019	1.0979E-02	0.019
			356.0129	9.0104E-03	0.031	9.4629E-03	0.030
			383.8485	1.0314E-02	0.014	8.7818E-03	0.015
<sup>57</sup> Co (ε)	0	Κλειστή	122.0606	1.7364E-03	0.001	1.6696E-03	0.001
			136.47356	2.1551E-04	0.020	2.0681E-04	0.020
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	4.7143E-04	0.002	4.7153E-04	0.002
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	4.5444E-04	0.001	4.3355E-04	0.001
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	Κλειστή	1115.539	1.8066E-04	0.005	1.7612E-04	0.005

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής στον ανιχνευτή Ge33, όπως εξάγονται από τον κώδικα Penelope

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
				coinc		no coinc	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co (σ)	1.2	Κλειστή	1173.228	1.9004E-02	0.002	2.0967E-02	0.002
			1332.492	1.7058E-02	0.002	1.8893E-02	0.002

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής ανά ενέργεια του ισοτόπου <sup>60</sup>Co στον ανιχνευτή Ge33, όπως εξάγονται από τον κώδικα Penelope για την προσομοίωση του <sup>60</sup>Co ως πηγή όγκου

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής στην περίπτωση της σημειακής πηγής του  $^{60}\text{Co}$ , παρουσιάζει αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές στην περίπτωση πηγής όγκου (μικρών διαστάσεων) της τάξης του 0.4% έως 0.8%.

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
				coinc		no coinc	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
$^{60}\text{Co}$ (σ)	1.2	Ανοιχτή	1173.228	2.0003E-02	0.002	2.2181E-02	0.002
			1332.492	1.7885E-02	0.002	2.0000E-02	0.002
		Κλειστή	1173.228	1.9992E-02	0.002	2.2182E-02	0.002
			1332.492	1.7869E-02	0.002	2.0000E-02	0.002
	9.5	Ανοιχτή	1173.228	2.0714E-03	0.007	2.0893E-03	0.007
			1332.492	1.8611E-03	0.007	1.9010E-03	0.007
		Κλειστή	1173.228	2.0780E-03	0.007	2.0893E-03	0.007
			1332.492	1.8565E-03	0.007	1.9010E-03	0.007
$^{22}\text{Na}$ (σ)	1.2	Ανοιχτή	1274.537	1.8446E-02	0.002	2.0763E-02	0.002
		Κλειστή	1274.537	1.8327E-02	0.002	2.0763E-02	0.002
	9.5	Ανοιχτή	1274.537	1.9154E-03	0.007	1.9527E-03	0.007
		Κλειστή	1274.537	1.8936E-03	0.007	1.9527E-03	0.007
$^{133}\text{Ba}$ (ε)	0	Κλειστή	53.1622	1.3750E-04	0.079	2.0150E-04	0.058
			79.6142	5.7200E-04	0.027	8.2200E-04	0.021
			80.9979	7.3998E-03	0.005	9.3170E-03	0.047
			160.6121	2.4050E-04	0.051	2.3790E-04	0.052
			223.2368	1.02000E-04	0.098	1.3440E-04	0.075
			276.3989	1.39430E-03	0.013	1.5668E-03	0.012
			302.8508	3.5582E-03	0.008	3.8188E-03	0.008
			356.0129	1.0177E-02	0.004	1.0797E-02	0.004
			383.8485	1.6781E-03	0.012	1.4662E-03	0.013
$^{57}\text{Co}$ (ε)	0	Κλειστή	122.0606	3.1106E-02	0.003	3.0955E-02	0.003
			136.47356	3.8272E-03	0.008	3.8101E-03	0.008
$^{137}\text{Cs}$ (ε)	0	Κλειστή	661.657	8.9604E-03	0.005	8.9750E-03	0.005
$^{54}\text{Mn}$ (ε)	0	Κλειστή	834.848	8.6759E-03	0.005	8.6699E-03	0.005
$^{65}\text{Zn}$ (ε)	0	Κλειστή	1115.539	3.4616E-03	0.008	3.5046E-03	0.008

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής στον ανιχνευτή  $\text{Ge33}$ , όπως εξάγονται από τον κώδικα MCNP-CP

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
				coinc		no coinc	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co (σ)	0.935	Κλειστή	1173.228	1.9934E-02	0.002	2.2160E-02	0.002
			1332.492	1.7864E-02	0.002	2.0007E-02	0.002

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής ανά ενέργεια του ισότοπου <sup>60</sup>Co στον ανιχνευτή Ge33, μαζί με την αβεβαιότητα που αντιστοιχεί, όπως εξάγονται από τον κώδικα MCNP-CP για την προσομοίωση του <sup>60</sup>Co ως πηγή όγκου

Αντίστοιχα, οι αποκλίσεις των τιμών απόδοσης φωτοκορυφής στην περίπτωση σημειακής πηγής <sup>60</sup>Co, με τις αντίστοιχες τιμές στην περίπτωση πηγής όγκου (μικρών διαστάσεων) είναι της τάξης του 0.03% έως 0.29%.

### 6.3 Ανιχνευτής Γερμανίου απόδοσης 40% (Ge40)

Στη συγκεκριμένη ανιχνευτική διάταξη στόχος ήταν η μελέτη του φαινομένου για τις ίδιες επακριβώς πηγές με την περίπτωση του Γερμανίου απόδοσης 33.8%, προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση της παραμέτρου της απόδοσης του ανιχνευτή. Αρχικά, τα ισότοπα για τις σημειακές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν <sup>60</sup>Co και <sup>22</sup>Na και ορίστηκαν όμοια με την παραπάνω περίπτωση, δηλαδή με τη χρήση των ίδιων παραμέτρων για τους δύο κώδικες. Οι αποστάσεις στις οποίες μελετήθηκαν είναι, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3.2 (Πίνακας 4.18), 0.935 cm και 9.8 cm από το παράθυρο Αλουμινίου του ανιχνευτή. Ακολούθησε η προσομοίωση της επιφανειακής πηγής, με τα ισότοπα που προαναφέρθηκαν και εισαγωγικά σε επαφή με τον κρυστάλλη του ανιχνευτή, πρακτικά δηλαδή σε απόσταση 0.0375 cm όπως παρουσιάστηκε στην περίπτωση του Ge33. Όμοια λοιπόν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών στον πίνακα (6.5) για τον κώδικα Penelope και στον πίνακα (6.6) για τον κώδικα MCNP-CP.

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
				coinc		no coinc	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co (σ)	0.935	Ανοιχτή	1173.228	2.1688E-02	0.002	2.4212E-02	0.002
			1332.492	1.9441E-02	0.002	2.1798E-02	0.002
		Κλειστή	1173.228	2.1712E-02	0.002	2.4449E-02	0.002
			1332.492	1.9292E-02	0.002	2.1762E-02	0.002
	9.8	Ανοιχτή	1173.228	2.3514E-03	0.007	2.3847E-03	0.006
			1332.492	2.1144E-03	0.007	2.1450E-03	0.007
		Κλειστή	1173.228	2.3624E-03	0.007	2.3751E-03	0.007
			1332.492	2.1166E-03	0.007	2.1504E-03	0.007
<sup>22</sup> Na (σ)	0.935	Ανοιχτή	1274.537	1.9942E-02	0.002	2.2516E-02	0.002
		Κλειστή	1274.537	1.9984E-02	0.002	2.2428E-02	0.002
	9.8	Ανοιχτή	1274.537	2.1962E-03	0.007	2.2109E-03	0.007
		Κλειστή	1274.537	2.1551E-03	0.007	2.2004E-03	0.007
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	8.8184E-05	0.035	1.2228E-04	0.028
			79.6142	2.6701E-04	0.006	3.7604E-04	0.005
			80.9979	3.3092E-03	0.004	4.2295E-03	0.004
			160.6121	8.9994E-05	0.012	8.9106E-05	0.012
			223.2368	3.8365E-05	0.058	4.8787E-02	0.049
			276.3989	5.0929E-04	0.003	3.2624E-03	0.003
			302.8508	1.3031E-03	0.007	1.4077E-03	0.006
			356.0129	3.8290E-03	0.001	4.0816E-03	0.001
			383.8485	6.5550E-04	0.009	5.4501E-04	0.010
<sup>57</sup> Co (ε)	0	Κλειστή	122.0606	1.2711E-03	0.002	1.2229E-03	0.002
			136.47356	7.7205E-05	0.004	7.4021E-05	0.004
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	3.2279E-04	0.004	3.2274E-04	0.004
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	3.1085E-04	0.004	2.9704E-04	0.004
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	Κλειστή	1115.539	1.2249E-05	0.002	1.1991E-05	0.002

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής στον ανιχνευτή Ge40, όπως εξάγονται από τον κώδικα *Penelope*.

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
				coinc		no coinc	
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>60</sup> Co (σ)	0.935	Ανοιχτή	1173.228	1.4427E-02	0.006	1.5331E-02	0.005
			1332.492	1.2785E-02	0.006	1.3700E-02	0.006
		Κλειστή	1173.228	1.4430E-02	0.006	1.5331E-02	0.005
			1332.492	1.2816E-02	0.006	1.3700E-02	0.006
	9.8	Ανοιχτή	1173.228	1.6344E-03	0.019	1.6413E-03	0.006
			1332.492	1.4661E-03	0.021	1.4778E-03	0.006
		Κλειστή	1173.228	1.6364E-03	0.019	1.6410E-03	0.019
			1332.492	1.4660E-03	0.021	1.4778E-03	0.006
<sup>22</sup> Na (σ)	0.935	Ανοιχτή	1274.537	1.3277E-02	0.006	1.4281E-02	0.006
		Κλειστή	1274.537	1.3274E-02	0.006	1.4281E-02	0.006
	9.8	Ανοιχτή	1274.537	1.5039E-03	0.020	1.5347E-03	0.020
		Κλειστή	1274.537	1.5002E-03	0.020	1.5347E-03	0.020
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	2.8730E-04	0.122	3.5270E-04	0.109
			79.6142	6.7960E-04	0.085	9.2210E-04	0.074
			80.9979	9.9460E-03	0.044	1.1808E-02	0.044
			160.6121	2.7030E-04	0.117	2.5290E-04	0.123
			223.2368	9.5800E-05	0.247	1.1940E-04	0.200
			276.3989	1.1904E-03	0.031	1.2978E-03	0.029
			302.8508	2.8890E-03	0.018	3.0389E-03	0.018
			356.0129	8.1040E-03	0.010	8.2347E-03	0.010
<sup>57</sup> Co (ε)	0	Κλειστή	122.0606	3.4197E-02	0.010	3.4039E-02	0.010
			136.47356	4.0576E-03	0.023	4.0202E-03	0.023
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	5.9320E-03	0.012	5.9181E-03	0.012
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	5.4732E-03	0.012	5.5258E-03	0.012
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	Κλειστή	1115.539	2.1356E-03	0.020	2.1416E-03	0.020

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής στον ανιχνευτή Ge40, όπως εξάγονται από τον κώδικα MCNP-CP

## 6.4 Ανιχνευτής Γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe)

Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις που διαφέρουν σε ένα βαθμό από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, εφόσον πρόκειται για ανιχνευτή ικανό να ανιχνεύσει χαμηλότερες ενέργειες. Μελετήθηκε αρχικά σημειακή πηγή  $^{57}\text{Co}$ , όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.3.2, σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή και στη συνέχεια με την πηγή εντός της θήκης από plexiglass που τη συνοδεύει, με διαστάσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.7.

Εσωτερική διάμετρος	3.5 cm
Εξωτερική διάμετρος	4.0 cm
Πάχος παράπλευρης επιφάνειας	0.25 cm
Πάχος άνω και κάτω επιφάνειας	0.14 cm
Συνολικό ύψος	0.66 cm

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυλινδρικού περιβλήματος πηγής  $^{57}\text{Co}$  από plexiglass

Ομοίως, στην ίδια θέση τοποθετήθηκε και η επιφανειακή πηγή, με τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί εισαγωγικά. Υπογραμμίζεται ωστόσο, ότι στην περίπτωση αυτή, τοποθετήθηκε πάνω από ένα φύλλο κατασκευασμένο από plexiglass, πάχους 1mm. Η παρουσία του είναι απαραίτητη εξαιτίας της μεγαλύτερης ευαισθησίας του παραθύρου Βηρυλλίου (Be) του ανιχνευτή, σε σχέση με το αντίστοιχο παράθυρο Αλουμινίου των παραπάνω ανιχνευτών, γεγονός που έχει αναφερθεί στην Παράγραφο 3.1.4. Συνεπώς, η απόσταση της πηγής  $^{57}\text{Co}$  από το παράθυρο είναι πρακτικά 0.259 cm και 0.399 cm, όταν βρίσκεται εντός της θήκης plexiglass, ενώ η αντίστοιχη τιμή για την επιφανειακή πηγή είναι 0.1375 cm. Στον πίνακα 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την απόδοση φωτοκορυφής σε κάθε μία από τις περιπτώσεις αυτές, όπως προκύπτουν από τον κώδικα Penelope και στον πίνακα 6.9 αντίστοιχα του MCNP-CP. Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει διευκρίνιση για τη θωράκιση του ανιχνευτή στη συγκεκριμένη διάταξη, διότι σε όλες τις περιπτώσεις ήταν κλειστή.

Πηγή	Sdd (cm)	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
			coinc		no coinc	
			Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
$^{57}\text{Co}$ (ο)	0	122.06065	2.48392E-01	0.001	2.41591E-01	0.001
		136.47356	2.81318E-01	0.002	2.59282E-01	0.002
$^{57}\text{Co}$ (ο)	0 (σε θήκη plexiglass)	122.06065	2.21424E-01	0.019	2.14724E-01	0.020
		136.47356	2.66091E-02	0.019	2.47000E-02	0.020
$^{57}\text{Co}$ (σ)	0	122.06065	2.51039E-01	0.001	2.41935E-01	0.001
		136.47356	2.94036E-02	0.019	2.79515E-02	0.019
$^{133}\text{Ba}$ (ε)	0	53.1622	2.7826E-01	0.004	3.5921E-01	0.004
		79.6142	2.7425E-01	0.003	4.6927E-01	0.003

		80.9979	1.9156E-01	0.001	2.8989E-01	0.001
		160.6121	4.4865E-01	0.006	4.3368E-01	0.006
		223.2368	2.5869E-01	0.009	2.5160E-01	0.009
		276.3989	5.0076E-02	0.005	9.4410E-02	0.004
		302.8508	4.6004E-02	0.003	8.1560E-02	0.003
		356.0129	4.1927E-02	0.002	6.4434E-02	0.002
		383.8485	5.8545E-02	0.004	5.8204E-02	0.004
<sup>57</sup> Co (ε)	0	122.0606	2.4671E-01	0.001	2.4143E-01	0.001
		136.47356	2.4035E-01	0.002	2.2276E-01	0.002
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	661.657	2.9421E-02	0.002	2.9425E-02	0.002
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	834.848	2.2339E-02	0.002	2.1248E-02	0.002
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	1115.539	1.5909E-02	0.004	1.5891E-02	0.004

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής στον ανιχνευτή LEGe, όπως εξάγονται από τον κώδικα Penelope

Πηγή	Sdd (cm)	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής			
			coinc		no coinc	
			Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)
<sup>57</sup> Co (ο)	0	122.06065	1.6577E-01	0.001	1.6722E-01	0.001
		136.47356	1.9456E-02	0.002	1.8328E-02	0.002
<sup>57</sup> Co (ο)	0 (σε θήκη plexiglass)	122.06065	1.8652E-01	0.001	1.8989E-01	0.001
		136.47356	2.2414E-02	0.002	2.0818E-02	0.002
<sup>57</sup> Co (σ)	0	122.06065	1.8994E-01	0.007	1.8652E-01	0.007
		136.47356	2.2432E-02	0.002	2.0855E-02	0.002
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	53.1622	1.1274E-03	0.013	1.4302E-03	0.012
		79.6142	1.1760E-03	0.013	1.7558E-03	0.011
		80.9979	1.0540E-02	0.004	1.5143E-02	0.004
		160.6121	5.5840E-04	0.019	5.4420E-04	0.019
		223.2368	2.9720E-04	0.026	3.0640E-04	0.026
		276.3989	5.2200E-04	0.020	8.2280E-04	0.016
		302.8508	1.0436E-03	0.014	1.6442E-03	0.011
		356.0129	2.6638E-03	0.009	3.8302E-03	0.007
		383.8485	6.1300E-04	0.018	6.1960E-04	0.018
<sup>57</sup> Co (ε)	0	122.0606	1.8980E-01	0.001	1.8639E-01	0.001
		136.47356	2.0844E-02	0.002	2.2395E-02	0.002
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	661.657	2.0058E-03	0.010	2.0240E-03	0.010
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	834.848	1.6594E-03	0.011	1.6708E-03	0.011
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	1115.539	5.4860E-04	0.019	5.6520E-04	0.019

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.9: Τιμές για την απόδοση φωτοκορυφής στον ανιχνευτή LEGe, όπως εξάγονται από τον κώδικα MCNP-CP



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συντελεστές για τη διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, όπως υπολογίζονται από τους κώδικες Penelope και MCNP-CP για όλα τα ισότοπα που εξετάστηκαν στις τρεις μελετούμενες ανιχνευτικές διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα, στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται για την περίπτωση κάθε ανιχνευτή ένας πίνακας, στον οποίο αναγράφονται οι εν λόγω συντελεστές διόρθωσης για κάθε ενέργεια που επιλέχθηκε να μελετηθεί. Ουσιαστικά, ο παράγοντας αυτός υπολογίζεται ως ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής, όταν λαμβάνεται υπόψη από τον κώδικα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, προς το αντίστοιχο μέγεθος όταν δε λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο αυτό. Χρησιμοποιείται συνεπώς η σχέση:

$$f_{ic} = \frac{\text{eff}_{\text{coinc}}}{\text{eff}_{\text{no coinc}}} \quad (7.1)$$

όπου:

$f_{ic}$ : ο συντελεστής διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης

$\text{eff}_{\text{coinc}}$ : η απόδοση φωτοκορυφής όταν λαμβάνεται υπόψη από τον κώδικα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης

$\text{eff}_{\text{no coinc}}$ : η απόδοση φωτοκορυφής όταν δε λαμβάνεται υπόψη από τον κώδικα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης

Σε κάθε παράγραφο του κεφαλαίου αυτού δίνεται ο πίνακας με τις αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τους δύο κώδικες για τις ίδιες επακριβώς περιπτώσεις. Σημειώνεται δε, ότι το σφάλμα που συνοδεύει κάθε συντελεστή, έχει υπολογιστεί σύμφωνα με την αρχή διάδοσης σφαλμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα τις αβεβαιότητες των τιμών της απόδοσης ( $\text{eff}_{\text{coinc}}$  και  $\text{eff}_{\text{no coinc}}$ ), όπως αυτά προκύπτουν από τη διαδικασία της προσομοίωσης. Για τη σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών κωδίκων, εξάγεται ο λόγος των δύο συντελεστών διόρθωσης, συγκεκριμένα δηλαδή η ποσότητα:

$$\text{Ratio}_{M/P} = f_{ic\_MCNP} / f_{ic\_Pen} \quad (7.2)$$

όπου:

$f_{ic\_MCNP}$ : ο συντελεστής διόρθωσης που εξάγεται από τον κώδικα MCNP-CP

$f_{ic\_Pen}$ : ο συντελεστής διόρθωσης που εξάγεται από τον κώδικα Penelope

Ο λόγος των συντελεστών διόρθωσης όπως ορίστηκε στη σχέση 7.2, παρατίθεται στην τελευταία στήλη κάθε πίνακα, μαζί με την αντίστοιχη αβεβαιότητα.

Όμοια με το προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 6.2) ακολουθείται η κωδικοποίηση της απαιτούμενης ορολογίας για τα περιεχόμενα των πινάκων, ενώ παράλληλα αξιοποιείται ο

συμβολισμός που χρησιμοποιήθηκε στις σχέσεις 7.1 και 7.2. Για τα μονοενεργειακά ισότοπα, παρουσιάζεται ο λόγος της απόδοσης που προκύπτει από τις προσομοιώσεις στις οποίες λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης προς τις αντίστοιχες τιμές από τις προσομοιώσεις που το φαινόμενο αγνοείται ( $Eff_{ratio}$ ).

## 7.2 Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μέσω προσομοιώσεων

### 7.2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ 33.8% (Ge33)

Όπως αναφέρθηκε και εισαγωγικά, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο πίνακας 7.1(α), με τους συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης για όλες τις περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν στον ανιχνευτή Ge33 και οι αντίστοιχες αποκλίσεις τους. Αντίστοιχα, στον πίνακα 7.1(β), παρατίθενται οι λόγοι των αποδόσεων για τα προς μελέτη μονοενεργειακά ισότοπα που περιέχονται στην επιφανειακή πηγή, όπως αυτοί υπολογίστηκαν από τους δύο κώδικες προσομοίωσης. Πρόκειται δηλαδή, για το λόγο της απόδοσης ( $Eff_{ratio(Pen)}$  και  $Eff_{ratio(MCNP)}$  από τον κώδικα Penelope και MCNP αντίστοιχα) στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης προς την περίπτωση όπου το φαινόμενο αγνοείται.

Ισότοπο	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	f <sub>ic_Pen</sub>		f <sub>ic_MCNP</sub>		Ratio <sub>M/P</sub>		U-test
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	
<sup>60</sup> Co (σ)	1.2	Ανοιχτή	1173.228	0.904	0.003	0.902	0.004	0.998	0.005	0.41
			1332.492	0.904	0.003	0.894	0.005	0.989	0.006	1.76
		Κλειστή	1173.228	0.908	0.003	0.901	0.004	0.993	0.005	1.45
			1332.492	0.904	0.003	0.893	0.005	0.988	0.006	1.93
	9.5	Ανοιχτή	1173.228	0.968	0.010	0.991	0.014	1.024	0.017	1.35
			1332.492	0.993	0.011	0.979	0.015	0.986	0.018	0.75
		Κλειστή	1173.228	0.970	0.010	0.995	0.014	1.026	0.017	1.47
			1332.492	0.979	0.011	0.977	0.015	0.998	0.018	0.11
<sup>22</sup> Na (σ)	1.2	Ανοιχτή	1274.537	0.891	0.003	0.888	0.005	0.997	0.006	0.53
		Κλειστή	1274.537	0.884	0.003	0.888	0.005	0.999	0.006	0.71
	9.5	Ανοιχτή	1274.537	0.989	0.010	0.981	0.014	0.992	0.018	0.47
		Κλειστή	1274.537	0.977	0.010	0.970	0.014	0.993	0.018	0.41
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	0.750	0.019	0.682	0.098	0.910	0.100	0.69
			160.6121	0.980	0.004	1.010	0.070	1.032	0.073	0.43
			223.2368	0.925	0.005	0.759	0.123	0.820	0.124	1.35
			276.3989	0.885	0.014	0.890	0.018	1.006	0.023	0.23
			302.8508	0.951	0.027	0.931	0.011	0.979	0.029	0.72
			356.0129	0.952	0.043	0.943	0.006	0.990	0.043	0.22
			383.8485	1.174	0.020	1.144	0.017	0.974	0.027	1.03
<sup>57</sup> Co (ε)	0	Κλειστή	122.0606	1.040	0.001	1.005	0.004	0.966	0.004	8.47
			136.47356	1.042	0.028	1.005	0.011	0.964	0.030	1.19
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	Κλειστή	1115.539	1.026	0.007	0.987	0.011	0.963	0.013	2.97

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1(α): Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, για τα ισότοπα που εξετάστηκαν στον ανιχνευτή Ge33, υπολογισμένοι με τους κώδικες Penelope και MCNP-CP

Ισότοπο	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Eff <sub>ratio(Pen)</sub>		Eff <sub>ratio(MCNP)</sub>		Ratio <sub>M/P</sub>		U-test
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	1.000	0.002	0.998	0.007	0.999	0.007	0.27
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	1.048	0.002	1.00	0.007	0.955	0.007	6.57

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1(β): Λόγοι αποδόσεων όπως υπολογίστηκαν με τους κώδικες Penelope και MCNP-CP για τα μονοενεργειακά ισότοπα της επιφανειακής πηγής στον ανιχνευτή Ge33

Οι δύο κώδικες φαίνεται να συγκλίνουν ικανοποιητικά στην πλειοψηφία των περιπτώσεων των σημειακών πηγών, εκτός από την περίπτωση του  $^{60}\text{Co}$  στην μακρινή απόσταση πηγής–ανιχνευτή, όπου παρατηρείται μία απόκλιση της τάξης του 2.5%. Παρόλα αυτά, οι τιμές του U-test στην τελευταία στήλη δείχνουν στατιστική συμφωνία των δύο κωδίκων σε κάθε περίπτωση. Ακόμη, οι λόγοι που παρουσιάζονται, υποδεικνύουν ότι σε γενικές γραμμές, η τιμή του συντελεστή διόρθωσης από τον MCNP–CP απέχει περισσότερο από τη μονάδα συγκριτικά με την αντίστοιχη της Penelope, εκτός από την περίπτωση που προαναφέρθηκε. Αυτό σημαίνει, ότι οι τιμές του πρώτου κώδικα απέχουν περισσότερο από τη μονάδα, γεγονός που δείχνει υπερεκτίμηση του φαινομένου συγκριτικά με το δεύτερο. Συγκρίνοντας επίσης σε κάθε περίπτωση τους συντελεστές διόρθωσης με ανοιχτή θωράκιση και τους αντίστοιχους με κλειστή, διαπιστώνεται, ότι ο παράγοντας αυτός φαίνεται να επιδρά περισσότερο μόνο στην περίπτωση της μακρινής απόστασης. Αυτό ενδεχομένως εξηγείται από το γεγονός, ότι στις αποστάσεις αυτές η θωράκιση βρίσκεται πολύ κοντά στην προς μελέτη πηγή και ως αποτέλεσμα η παρουσία της επηρεάζει τις τιμές της απόδοσης, για παράδειγμα μέσω της πιο έντονης οπισθοσκέδασης των φωτονίων σε αυτήν. Ακόμη, για την περίπτωση της επιφανειακής πηγής, η μέγιστη απόκλιση που καταγράφεται, της τάξης του 18%, αφορά την φωτοκορυφή ενέργειας 223.24 keV, ωστόσο βάσει της τιμής του U-test παρατηρείται στατιστική συμφωνία. Πρόκειται για μία χαμηλή ενέργεια φωτονίων και πιθανώς η επιλογή της φωτοκορυφής, δηλαδή τα ενεργειακά “bins” που αθροίζονται, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το διαφορετικό υπόστρωμα που καταγράφεται στις περιπτώσεις των δύο κωδίκων, καθώς η επιφανειακή πηγή δεν είναι δυνατό να προσομοιωθεί με τον ίδιο τρόπο. Υπογραμμίζεται βέβαια ότι και το σφάλμα που συνοδεύει το λόγο των δύο συντελεστών είναι αυξημένο συγκριτικά με τις υπόλοιπες φωτοκορυφές του  $^{133}\text{Ba}$ . Παρατηρείται ακόμη, ότι οι λόγοι των αποδόσεων για τα μονοενεργειακά ισότοπα στην περίπτωση του  $^{137}\text{Cs}$  δεν διαφέρουν στατιστικά από τη μονάδα, ωστόσο για το  $^{54}\text{Mn}$  στην περίπτωση του κώδικα Penelope καταγράφεται απόκλιση από αυτήν έως και 4.8%. Το αποτέλεσμα αυτό δεν υποδηλώνει την πραγματοποίηση φαινομένων “summing in” η “summing out”, αλλά αφορά τις αποκλίσεις μεταξύ των δύο τιμών απόδοσης από κάθε προσομοίωση. Συνακόλουθα, ο στατιστικός έλεγχος U-test δεν υποδεικνύει στατιστική συμφωνία μεταξύ των κωδίκων στην περίπτωση αυτή. Όμοια, το ίδιο συμβαίνει και στο ισότοπο  $^{65}\text{Zn}$ , το οποίο ανήκει στην επιφανειακή πηγή και ενδεχομένως να επηρεάζεται από τις διαφοροποιήσεις στη μέθοδο προσομοίωσης της συγκεκριμένης πηγής.

## 7.2.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ

### ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ 40% (Ge40)

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζεται ο πίνακας 7.2(α), με τους συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης για όλες τις περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν στον ανιχνευτή Ge40 και οι αντίστοιχες αποκλίσεις τους (σχέση 7.2). Όμοια με την παράγραφο 7.2.1, στον πίνακα 7.2(β) δίνονται οι λόγοι των αποδόσεων για τα προς μελέτη μονοενεργειακά ισότοπα που περιέχονται στην επιφανειακή πηγή, όπως αυτοί υπολογίστηκαν από τους δύο κώδικες προσομοίωσης.

Ισότοπο	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	f <sub>ic_Pen</sub>		f <sub>ic_MCNP</sub>		Ratio <sub>M/P</sub>		U-test
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	
<sup>60</sup> Co (σ)	0.935	Ανοιχτή	1173.228	0.896	0.003	0.941	0.008	1.051	0.008	5.33
			1332.492	0.892	0.003	0.934	0.008	1.047	0.009	4.98
		Κλειστή	1173.228	0.888	0.003	0.941	0.008	1.060	0.008	6.29
			1332.492	0.887	0.003	0.933	0.008	1.053	0.009	5.46
	9.8	Ανοιχτή	1173.228	0.986	0.009	0.981	0.027	0.995	0.028	0.18
			1332.492	0.986	0.010	0.992	0.022	1.006	0.024	0.25
		Κλειστή	1173.228	0.995	0.009	0.982	0.027	0.988	0.028	0.46
			1332.492	0.984	0.010	0.991	0.022	1.007	0.024	0.29
<sup>22</sup> Na (σ)	0.935	Ανοιχτή	1274.537	0.886	0.003	0.931	0.008	1.051	0.009	5.34
		Κλειστή	1274.537	0.891	0.003	0.929	0.008	1.043	0.009	4.51
	9.8	Ανοιχτή	1274.537	0.993	0.010	0.979	0.028	0.986	0.030	0.47
		Κλειστή	1274.537	0.979	0.010	0.977	0.028	0.998	0.030	0.07
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	0.721	0.045	0.815	0.163	1.130	0.169	0.57
			160.6121	1.010	0.017	1.069	0.17	1.058	0.113	0.35
			223.2368	0.838	0.076	0.802	0.318	0.957	0.063	0.11
			276.3989	0.849	0.004	0.917	0.043	1.080	0.171	1.58
			302.8508	0.926	0.009	0.951	0.025	1.027	0.327	0.95
			356.0129	0.938	0.002	0.984	0.014	1.049	0.043	3.26
			383.8485	1.200	0.014	1.120	0.043	0.933	0.028	1.73
<sup>57</sup> Co (ε)	0	Κλειστή	122.0606	1.040	0.003	1.005	0.014	0.966	0.017	2.44
			136.47356	1.040	0.006	1.009	0.032	0.970	0.045	0.95
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	Κλειστή	1115.539	1.020	0.003	0.997	0.028	0.977	0.028	0.82

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2(α): Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, για τα ισότοπα που εξετάστηκαν στον ανιχνευτή Ge40, από τους κώδικες Penelope και MCNP-CP

Ισότοπο	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Eff <sub>ratio</sub> (Pen)		Eff <sub>ratio</sub> (MCNP)		Ratio <sub>M/P</sub>		U-test
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	1.000	0.006	1.002	0.017	1.002	0.018	0.11
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	1.050	0.006	0.990	0.017	0.943	0.018	3.31

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.12β): Λόγοι αποδόσεων όπως υπολογίστηκαν με τους κώδικες Penelope και MCNP-CP για τα μονοενεργειακά ισότοπα της επιφανειακής πηγής στον ανιχνευτή Ge40

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούνται μεγαλύτερες (σε σχέση με την περίπτωση του Ge33) αποκλίσεις στις τιμές των συντελεστών διόρθωσης στις κοντινές αποστάσεις για τις σημειακές πηγές, έως και 6% στην περίπτωση του <sup>60</sup>Co με κλειστή τη θωράκιση του ανιχνευτή, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται στατιστική συμφωνία βάσει του U-test. Αντιθέτως, στις μακρινές αποστάσεις που μελετώνται οι αντίστοιχες αποκλίσεις κυμαίνονται από 0.2%–1.2%. Όσον αφορά την επιφανειακή πηγή και συγκεκριμένα το ισότοπο <sup>133</sup>Ba, η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των κωδίκων είναι της τάξης του 13% για τη χαμηλή ενέργεια των 53.2 keV, γεγονός όμως που μπορεί να γίνει αποδεκτό εξαιτίας του μεγάλου σφάλματος που συνοδεύει το λόγο των συντελεστών διόρθωσης (16.9%). Η μόνη φωτοκορυφή για την οποία δεν προκύπτει συμφωνία είναι αυτή των 356.01 keV (τιμή U-test=3.26)

Η συμπεριφορά των δύο κωδίκων στην περίπτωση αυτή δεν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένας από τους δύο υπερεκτιμά ή υποεκτιμά το φαινόμενο συνολικά, καθώς παρατηρείται στην τελευταία στήλη, ότι ο λόγος των τιμών τους ποικίλει, λαμβάνοντας τιμές είτε μεγαλύτερες είτε μικρότερες από τη μονάδα.

Όμοια με την προηγούμενη ανιχνευτική διάταξη, στο μονοενεργειακό ισότοπο <sup>137</sup>Cs εξάγεται λόγος αποδόσεων πολύ κοντά στη μονάδα (με απόκλιση έως 0.2%), ωστόσο στην περίπτωση του <sup>54</sup>Mn η απόκλιση του λόγου από την τιμή 1 φτάνει το 5%, χωρίς φυσικά να λαμβάνει χώρα κάποιο φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης. Όμοια με την περίπτωση του Ge33 και για το λόγο αυτό, για τη συγκεκριμένη τιμή δεν παρουσιάζεται στατιστική συμφωνία, σε αντίθεση με τις φωτοκορυφές των υπολοίπων ισotόπων όπου οι τιμές του U-test είναι μικρότερες του 1.95.

## 7.2.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ (LEGe)

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο πίνακας 7.3(α), με τους συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης για όλες τις περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν στον ανιχνευτή LEGe και οι αντίστοιχες αποκλίσεις τους (σχέση 7.2) και στον πίνακα 7.3(β) οι λόγοι των αποδόσεων για τα προς μελέτη μονοενεργειακά ισότοπα που περιέχονται στην επιφανειακή πηγή, υπολογισμένοι από τους δύο κώδικες προσομοίωσης.

Ισότοπο	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	f <sub>Penelope</sub>		f <sub>MCNP</sub>		Ratio <sub>M/P</sub>		U-test
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	
<sup>57</sup> Co (σ)	0	Κλειστή	122.0606	1.038	0.001	1.018	0.001	0.981	0.001	13.88
			136.47356	1.052	0.03	1.076	0.003	1.023	0.026	0.76
<sup>57</sup> Co (ο)	0	Κλειστή	122.0606	1.028	0.001	0.982	0.001	0.955	0.001	32.07
			136.47356	1.085	0.003	1.077	0.003	0.993	0.004	1.81
<sup>57</sup> Co (ο)	0 (σε θήκη plexiglas)	Κλειστή	122.0606	1.031	0.001	0.991	0.001	0.961	0.001	27.85
			136.47356	1.077	0.028	1.062	0.003	0.986	0.028	0.49
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	0.775	0.008	0.788	0.018	1.017	0.021	0.68
			160.6121	1.035	0.012	1.026	0.027	0.991	0.037	0.30
			223.2368	1.028	0.019	0.970	0.036	0.944	0.036	1.42
			276.3989	0.530	0.009	0.634	0.025	1.196	0.025	4.09
			302.8508	0.564	0.006	0.635	0.018	1.126	0.019	3.88
			356.0129	0.650	0.003	0.695	0.011	1.069	0.012	4.03
			383.8485	1.006	0.009	0.989	0.025	0.983	0.032	0.64
<sup>57</sup> Co (ε)	0	Κλειστή	122.0606	1.021	0.001	1.018	0.001	0.997	0.002	2.10
			136.47356	1.079	0.004	0.931	0.003	0.863	0.005	28.16
<sup>65</sup> Zn (ε)	0	Κλειστή	1115.539	1.001	0.007	0.971	0.027	0.970	0.028	1.08

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3(α): Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, για τα ισότοπα που εξετάστηκαν στον ανιχνευτή LEGe, από τους κώδικες Penelope και MCNP-CP

Ισότοπο	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	Eff <sub>ratio</sub> (Pen)		Eff <sub>ratio</sub> (MCNP)		Ratio <sub>M/P</sub>		U-test
				Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	Τιμή	Σφάλμα (1σ)	
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	1.000	0.004	0.991	0.014	0.991	0.015	0.62
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	1.051	0.004	0.993	0.015	0.945	0.016	3.72

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1 (β): Λόγοι αποδόσεων όπως υπολογίστηκαν με τους κώδικες Penelope και MCNP-CP για τα μονοενεργειακά ισότοπα της επιφανειακής πηγής στον ανιχνευτή LEGe

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης διάταξης, εμφανίζονται κατά κύριο λόγο αποκλίσεις από 2% έως 8.7% στην περίπτωση της σημειακής πηγής <sup>57</sup>Co. Η μεγαλύτερη αυτή απόκλιση συναντάται στην προσομοίωση της πηγής ως πηγή όγκου πολύ μικρών διαστάσεων, όπου στη μία περίπτωση με τον κώδικα Penelope ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος της μονάδας (φαινόμενα “summing in”), ενώ αντίστοιχα με τον MCNP-CP είναι μικρότερος της μονάδας (φαινόμενα “summing out”), που είναι και το αναμενόμενο. Παρατηρείται δε, ότι όταν προσομοιώνεται και από τους δύο κώδικες ως σημειακή πηγή, η κορυφή των 122.06keV φαίνεται να ακολουθεί φαινόμενα “summing in”, ενώ από άποψη φυσικής σημασίας το συμπέρασμα αυτό δεν είναι ορθό. Ωστόσο, μία τέτοια παρατήρηση έχει σημειωθεί σε παλαιότερη εργασία που διεξάχθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Δ.Α. Χιώνης, 2011), όπου παρουσιάζεται συντελεστής διόρθωσης του <sup>57</sup>Co, μεγαλύτερος της μονάδας, εντός βέβαια των ορίων του σφάλματος. Μόνο στην περίπτωση της προσομοίωσης της πηγής ως πηγή όγκου, μέσω του κώδικα MCNP-CP, προκύπτουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα δηλαδή, στην περίπτωση των φωτονίων ενέργειας 122.06keV παρουσιάζονται φαινόμενα “summing out” και στην περίπτωση των φωτονίων ενέργειας 136.47keV, φαινόμενα “summing in”, από τη σύμπτωση των ακτίνων-γ 14.4 keV και 122.06 keV. Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε αυξημένες τιμές του ελέγχου U-test για την κορυφή των 122.06 keV, γεγονός που επηρεάζεται και από το πολύ μικρό σφάλμα από το οποίο συνοδεύονται οι συντελεστές διορθώσεις (επρόκειτο για πηγή σε επαφή με τον ανιχνευτή και επομένως οι προσομοιώσεις συγκλίνουν γρηγορότερα στην τελική τιμή και η αντίστοιχη αβεβαιότητα μειώνεται). Όσον αφορά την επιφανειακή πηγή, παρουσιάζονται αποκλίσεις της τάξης του 0.9% – 20% και η μέγιστη αυτή απόκλιση αφορά τη φωτοκορυφή των 276.4 keV, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί, όπως και στις προηγούμενες ανιχνευτικές διατάξεις, στη διαφορετική μέθοδο προσομοίωσης των πηγών. Στις περιπτώσεις δε των ενεργειών 276.4 keV, 302.85 keV και 356.01 keV, δεν παρατηρείται στατιστική συμφωνία μεταξύ των δύο κωδίκων. Σημειώνεται δε, ότι οι λόγοι των αποδόσεων για τα μονοενεργειακά ισότοπα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τις άλλες δύο ανιχνευτικές διατάξεις, καθώς η απόκλιση του λόγου απόδοσης του <sup>127</sup>Cs από τη μονάδα είναι κάτω από 1%, ενώ του <sup>54</sup>Mn φτάνει το 5.5%, παρόλο που δεν αναμένονται φαινόμενα σύμπτωσης. Για το λόγο αυτό, όπως και στις δύο προηγούμενες ανιχνευτικές διατάξεις η τιμή του στατιστικού ελέγχου U-test (3.72) φανερώσει αποκλίσεις μεταξύ των κωδίκων.



## 7.3 Διόρθωση πειραματικών τιμών απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του λογισμικού TrueCoinc

### 7.3.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ TrueCoinc

Στην παράγραφο αυτή, στόχος είναι η διόρθωση των πειραματικών τιμών για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης για τις περιπτώσεις των πηγών που μελετήθηκαν, αλλά και η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τους κώδικες προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το λογισμικό TrueCoinc (σύντμηση του όρου True Coincidence). Το πρόγραμμα αυτό, έχει αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Kossuth της Ουγγαρίας (S. Sudar, 2000) και έχει αξιοποιηθεί σε μια σειρά από μελέτες (El-Gharbawy et al., 2005).

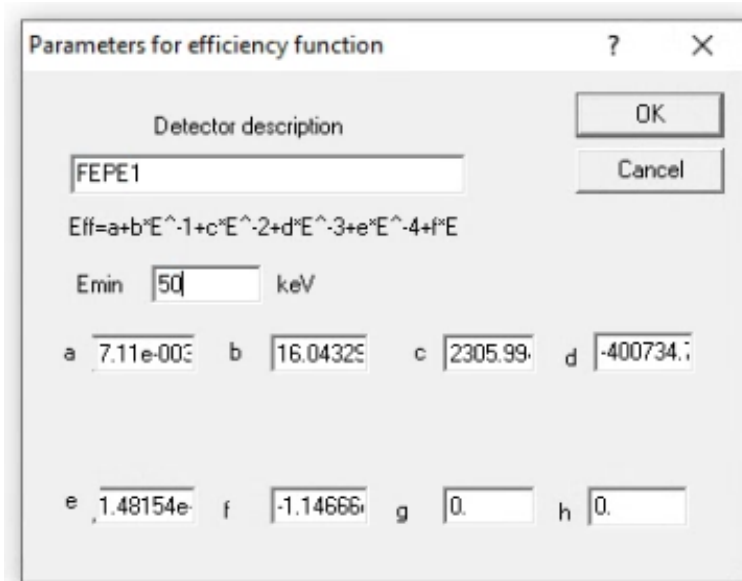
Προκειμένου να παράξει συντελεστές διόρθωσης του εν λόγω φαινομένου, χρησιμοποιεί εύκολα προσβάσιμες βάσεις δεδομένων, όπως η ευρέως γνωστή ENSDF. Από το χρήστη απαιτείται μόνο ο προσδιορισμός της προς εξέταση ανιχνευτικής διάταξης. Το βήμα αυτό πραγματοποιείται, με την εισαγωγή στο πρόγραμμα δύο μεγεθών, της απόδοσης αιχμής της ανιχνευτικής διάταξης (full energy peak efficiency) και της ολικής απόδοσής της (total efficiency). Ο ορισμός των μεγεθών αυτών πραγματοποιείται υπό τη μορφή συναρτήσεων ενεργείας, των οποίων η μορφή και οι αντίστοιχοι συντελεστές εισάγονται από το χρήστη. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της ολικής απόδοσης δίνεται η δυνατότητα να εισαχθεί αντί της συνάρτησης του μεγέθους αυτού με την ενέργεια, η συνάρτηση ως προς την ενέργεια του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοσης αιχμής (total-to-peak ratio), εφόσον σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ευκολότερος ο υπολογισμός του συγκεκριμένου λόγου. Για τη δυνατότητα αυτή, ο χρήστης οφείλει να χρησιμοποιήσει από τη γραμμή του menu επιλογών την επιλογή efficiency και στην συνέχεια την επιλογή relative to peak efficiency, η οποία και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Ο ορισμός της απαιτεί τη γνώση των παραμέτρων  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  της ακόλουθης σχέσης:

$$\frac{\text{Eff}_{\text{total}}}{\text{Eff}_{\text{peak}}} = e^{a_0 + a_1 \ln(E) + a_2 (\ln(E))^2} \quad (7.1)$$

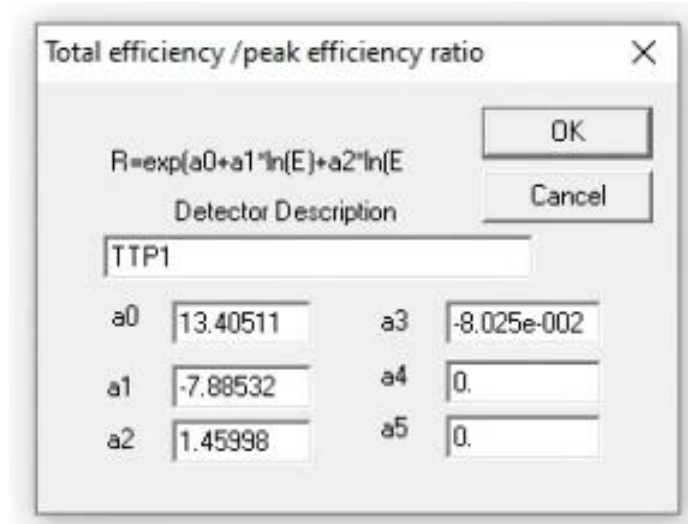
Για την εισαγωγή δε της συνάρτησης της απόδοσης φωτοκορυφής με την ενέργεια επιλέχθηκε για την παρούσα μελέτη η μορφή “negative power series”:

$$\text{Eff}_{\text{peak}} = a \cdot E^{-1} + b \cdot E^{-2} + c \cdot E^{-3} + d \cdot E^{-4} + e \cdot E^{-5} + f \cdot E^{-6} + g \cdot E^{-7} \quad (7.2)$$

όπου απαιτείται ο ορισμός των  $a, b, c, d, e, f$  και  $g$ .



ΣΧΗΜΑ 7.1: Ορισμός της συνάρτησης απόδοσης φωτοκορυφής για τον ανιχνευτή Ge33



ΣΧΗΜΑ 7.2: Ορισμός της συνάρτησης του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση φωτοκορυφής.

Μετά την ολοκλήρωση των βημάτων αυτών και την επιλογή από το χρήστη του κατάλληλου ισότοπου, παράγεται από το πρόγραμμα ένα αρχείο εξόδου (Παράρτημα Β), στο οποίο παρατίθενται οι αντίστοιχοι συντελεστές για τα φαινόμενα “summing in” και “summing out” και εν τέλει ο τελικός συντελεστής διόρθωσης για το φαινόμενο.

### 7.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας που παρατέθηκε στην παράγραφο 7.3.2, παρουσιάζονται οι συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης με τα αντίστοιχα σφάλματα που τις συνοδεύουν για κάθε περίπτωση ανιχνευτή και ισότοπου που μελετήθηκε, όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό TrueCoinc. Για την εξαγωγή των καμπυλών της απόδοσης αιχμής, αλλά και της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής, συναρτήσει της ενέργειας, που απαιτούνται για την αξιοποίηση του προγράμματος, χρησιμοποιούνται τιμές από την προσομοίωση των προς μελέτη περιπτώσεων, μέσω του κώδικα MCNP5.

■ Ανιχνευτής Ge33:

Πηγή	Sdd (cm)	Ενέργεια (keV)	f <sub>TrueCoinc</sub>	
			Τιμή	1σ
<sup>60</sup> Co (σ)	1.2	1173.228	0.785	0.02
		1332.492	0.784	0.02
	9.5	1173.228	0.981	0.02
		1332.492	0.981	0.02
<sup>22</sup> Na (σ)	1.2	1274.537	0.623	0.02
	9.5	1274.537	0.965	0.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4: Τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το λογισμικό TrueCoinc για τις σημειακές πηγές που εξετάστηκαν στον ανιχνευτή Ge33

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι συντελεστές διόρθωσης, που υπολογίζονται από το TrueCoinc για τα ισότοπα της επιφανειακής πηγής στον ίδιο ανιχνευτή. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται μόνο οι ενέργειες των οποίων η φωτοκορυφή του φάσματος που συλλέχθηκε μπορούσε να οδηγήσει σε αξιόπιστα αποτελέσματα, δηλαδή σε χαμηλές αβεβαιότητες. Τα υπόλοιπα ισότοπα παραλείπονται, εφόσον οι φωτοκορυφές τους συχνά δε διακρίνονται από το καταγραφόμενο υπόστρωμα. Ακόμη, η ανάλυση των κορυφών των 79 και 81keV δε θα ήταν αξιόπιστη καθώς πρόκειται για μία διπλή φωτοκορυφή και συνεπώς το εύρος κάθε φωτοκορυφής δεν είναι ικανοποιητικά ευκρινές.

Πηγή	Sdd (cm)	Ενέργεια (keV)	f <sub>TrueCoinc</sub>	
			Τιμή	1σ
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	53.1622	0.770	0.02
		160.6121	0.828	0.02
		223.2368	0.845	0.02
		276.3989	0.853	0.02
		302.8508	0.913	0.02
		356.0129	0.923	0.02
		383.8485	0.993	0.02
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	661.657	1.00	0.02
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	834.848	1.00	0.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.5: Τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το λογισμικό TrueCoinc για την επιφανειακή πηγή, που εξετάστηκε στον ανιχνευτή Ge33

Στην περίπτωση της επιφανειακής πηγής, εξετάζονται ισότοπα στα οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αλλά και μονοενεργειακά ισότοπα. Όπως αναμενόταν, το λογισμικό TrueCoinc εξαγεί για τις φωτοκορυφές αυτών των ισότοπων, συντελεστή ίσο με τη μονάδα. Οι αποκλίσεις των τιμών του λογισμικού, από τις αντίστοιχες των κωδίκων κυμαίνονται από 1.9% έως 18% στην περίπτωση της φωτοκορυφής 160.6keV του <sup>133</sup>Ba. Πρόκειται για μία χαμηλή ενέργεια φωτονίων, που συνοδεύεται από πιο σύνθετα φαινόμενα, διότι υφίσταται διαδικασίες “summing in” αλλά και “summing out”, γεγονός που καθιστά δυσκολότερο τον προσδιορισμό του αντίστοιχου συντελεστή.

■ Ανιχνευτής Ge40:

Πηγή	Sdd (cm)	Ενέργεια (keV)	f <sub>TrueCoinc</sub>	
			Τιμή	1σ
<sup>60</sup> Co (σ)	0.935	1173.228	0.785	0.02
		1332.492	0.784	0.02
	9.5	1173.228	0.981	0.02
		1332.492	0.981	0.02
<sup>22</sup> Na (σ)	0.935	1274.537	0.623	0.02
	9.5	1274.537	0.965	0.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6: Τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το λογισμικό TrueCoinc για τις σημειακές πηγές, που εξετάστηκαν στον ανιχνευτή Ge40

Στη συνέχεια, διατηρώντας το ίδιο σκεπτικό για την επιφανειακή πηγή και στον ανιχνευτή αυτό, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι αντίστοιχες φωτοκορυφές, όπως φαίνεται στον Πίνακα (7.7).

Πηγή	Sdd (cm)	Θωράκιση	Ενέργεια (keV)	f <sub>TrueCoinc</sub>	
				Τιμή	1σ
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	Κλειστή	53.1622	0.894	0.02
			160.6121	0.920	0.02
			223.2368	0.880	0.02
			276.3989	0.885	0.02
			302.8508	0.934	0.02
			356.0129	0.939	0.02
			383.8485	0.994	0.02
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	Κλειστή	661.657	1.00	0.02
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	Κλειστή	834.848	1.00	0.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.7: Τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το λογισμικό TrueCoinc για την επιφανειακή πηγή, που εξετάστηκε στον ανιχνευτή Ge40

#### ■ Ανιχνευτής LEGe:

Στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται ομοίως οι ίδιες κορυφές για την επιφανειακή πηγή.

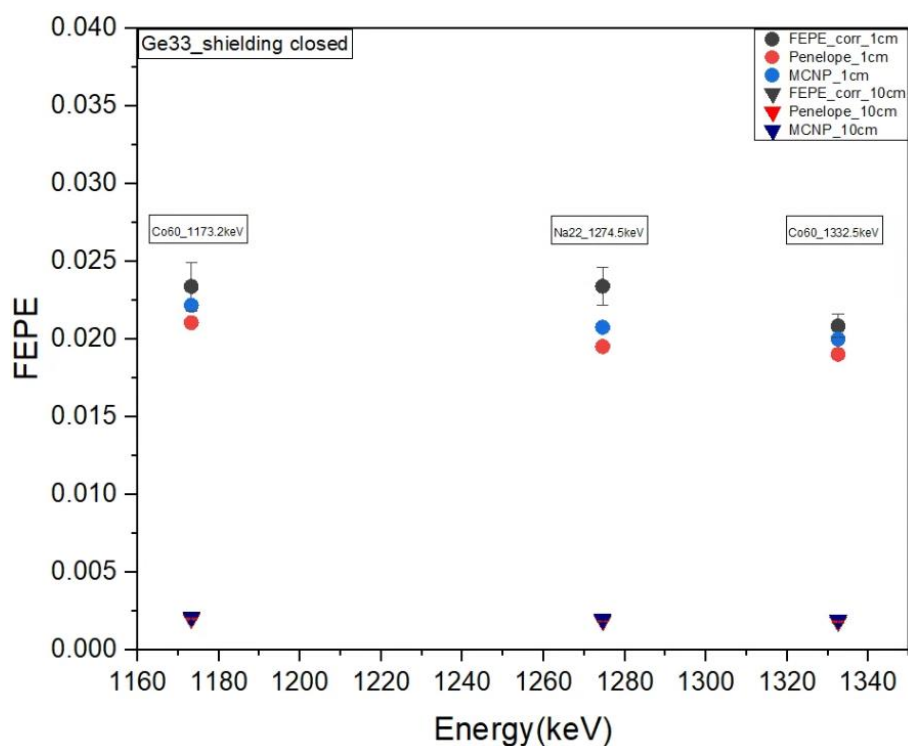
Πηγή	Sdd (cm)	Ενέργεια (keV)	f <sub>TrueCoinc</sub>	
			Τιμή	1σ
<sup>133</sup> Ba (ε)	0	53.1622	0.897	0.02
		160.6121	0.940	0.02
		223.2368	0.767	0.02
		276.3989	0.832	0.02
		302.8508	0.836	0.02
		356.0129	0.907	0.02
		383.8485	0.921	0.02
<sup>137</sup> Cs (ε)	0	661.657	1.00	0.02
<sup>54</sup> Mn (ε)	0	834.848	1.00	0.02

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.8: Τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το λογισμικό TrueCoinc για την επιφανειακή πηγή, που εξετάστηκε στον ανιχνευτή LEGe

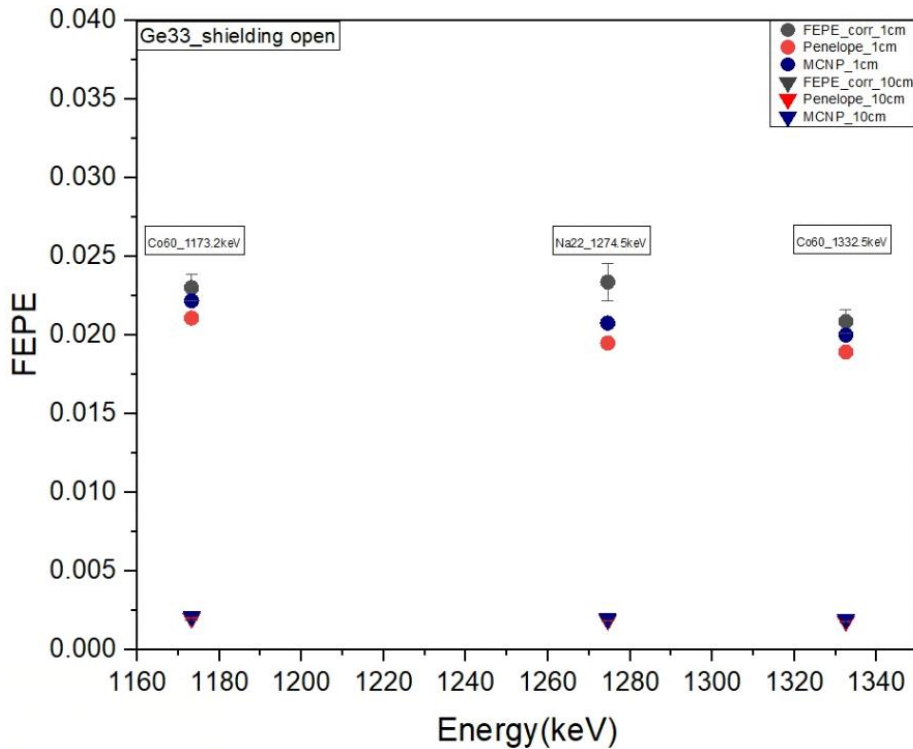
Όπως αναμενόταν και στην περίπτωση αυτή, τα μονοενεργειακά ισότοπα συνοδεύονται από συντελεστή διόρθωσης ίσο με τη μονάδα. Η μέγιστη απόκλιση με τις αντίστοιχες τιμές της προσομοίωσης εμφανίζεται στην κορυφή ενέργειας 302.9 keV του <sup>133</sup>Ba και είναι της τάξης του 30%.

### 7.3.3 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΝΤΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Για την περίπτωση των σημειακών πηγών παρουσιάζονται ενδεικτικά, με τη βοήθεια γραφημάτων, οι πειραματικές τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής συνοδευόμενες από τα αντίστοιχα σφάλματα, μετά τη διόρθωσή τους από το λογισμικό TrueCoinc. Παρατίθενται δε στο ίδιο γράφημα τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις των δύο κωδικών, στην περίπτωση που το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αγνοείται.



ΓΡΑΦΗΜΑ 7.1: Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για τον ανιχνευτή Ge33 σε κοντινή και μακρινή απόσταση πηγής-ανιχνευτή, με κλειστή θωράκιση



ΓΡΑΦΗΜΑ 7.2: Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για τον ανιχνευτή Ge33 σε κοντινή και μακρινή απόσταση πηγής-ανιχνευτή, με ανοιχτή θωράκιση

Στην περίπτωση του ανιχνευτή Ge33, παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, εκτός του ισότοπου  $^{22}\text{Na}$  στην κοντινή απόσταση και με ανοιχτή θωράκιση. Στο συγκεκριμένο ισότοπο υπολογίζεται απόκλιση της τάξης του 16% μεταξύ των τιμών απόδοσης φωτοκορυφής από την προσομοίωση και των αντίστοιχων διορθωμένων από το TrueCoinc. Συγκεκριμένα φαίνεται, το λογισμικό TrueCoinc να υπερεκτιμά το φαινόμενο έναντι των κωδίκων. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται στο Γράφημα 7.1, όπου η διορθωμένη πειραματική τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για το εν λόγω ισότοπο προκύπτει κατά τι μεγαλύτερη από την τιμή για την ενέργεια των 1173.4keV, ενώ αναμένεται η αντίστροφη συμπεριφορά. Οι αποκλίσεις δε, μεταξύ των κωδίκων και του λογισμικού για τους συντελεστές διόρθωσης, είναι της τάξης του 11-12% (πλην του  $^{22}\text{Na}$  που προαναφέρθηκε, όπου παρατηρείται απόκλιση 30% του αποτελέσματος του TrueCoinc από τον κώδικα Penelope) και από 0.04% έως 2.5% για τη μακρινή απόσταση. Είναι λοιπόν σαφές, ότι η αύξηση της απόστασης πηγής-ανιχνευτή και συνεπώς η μείωση της έντασης του φαινομένου οδήγησε σε καλύτερη σύγκλιση μεταξύ των κωδίκων και του λογισμικού TrueCoinc.

Τονίζεται, ότι στη μακρινή απόσταση πηγής-ανιχνευτή παρουσιάζεται εξαιρετική σύγκλιση των τιμών απόδοσης φωτοκορυφής, σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές, διορθωμένες από το TrueCoinc και για το λόγο αυτό, παρόλο που στα παραπάνω γραφήματα παρουσιάζονται όλα τα σημεία, δεν είναι αρκετά ευδιάκριτα.

## 7.4 Συζήτηση

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στις προηγούμενες παραγράφους υπογραμμίζεται, ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών των συντελεστών διόρθωσης που υπολογίζονται από τους δύο κώδικες μπορούν να αποδοθούν αφενός, στο διαφορετικό τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται από τον κάθε κώδικα η μεταφορά της ακτινοβολίας στην ύλη καθώς και η απόκριση του ανιχνευτή, αφετέρου στο διαφορετικό χειρισμό των αρχείων εξόδου κάθε κώδικα από το χρήστη.

Πιο συγκεκριμένα, σε ότι αφορά τις ίδιες τις προσομοιώσεις, η διαφορετική προσέγγιση που εφαρμόζει ο κάθε κώδικας για να περιγράψει τις διάφορες αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ύλη και τη διάδοσή της στα διάφορα υλικά, μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις στις υπολογιζόμενες τιμές των συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

Μια σημαντική πλευρά που επηρεάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στις αποκλίσεις μεταξύ των κωδίκων είναι η βιβλιοθήκη πυρηνικών δεδομένων που χρησιμοποιεί ο κάθε κώδικας. Για παράδειγμα, σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών βιβλιοθηκών και διαγραμμάτων διάσπασης στις υπολογιζόμενες τιμές των συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, καταγράφονται για την περίπτωση του  $^{133}\text{Ba}$  σημαντικές διαφορές στα δεδομένα διάσπασης που οδηγούν με τη σειρά τους σε αποκλίσεις στις τιμές των συντελεστών διόρθωσης που φτάνουν το 6% (Sima O., 2021). Όπως προκύπτει από τη συγκεκριμένη μελέτη, οι αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του MCNP και της Penelope κυμαίνονται από 1.5% έως ~4.0 %, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις αφορούν την φωτοκορυφή ενέργειας 223 keV. Βεβαίως, τα δεδομένα του διαγράμματος διάσπασης – πέραν της ευθείας επίδρασής τους στα αποτελέσματα των υπολογισμών που περιγράφηκε παραπάνω – εμπλέκονται επίσης στην προσομοίωση της μεταφοράς ακτινοβολίας και της απόκρισης του ανιχνευτή, επομένως τυχόν διαφορές σε αυτά υπεισέρχονται στην υπολογιστική διαδικασία και αυξάνουν συνολικά τις μεταξύ τους αποκλίσεις.

Είναι χρήσιμο να αναφερθεί δε, η συμπεριφορά των τιμών των αβεβαιοτήτων που εξάγονται από κάθε κώδικα, ανάλογα με την προς μελέτη περίπτωση. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις των ανιχνευτών Ge33 και Ge40, όπου τα διάφορα ισότοπα μελετώνται σε δύο διαφορετικές από τον ανιχνευτή αποστάσεις παρατηρείται ότι τα σφάλματα γίνονται τριπλάσια έως τετραπλάσια, όταν η τιμή της απόστασης αυτής σχεδόν δεκαπλασιάζεται. Αντίθετα, στην περίπτωση του LEGe, η μελέτη των ισοτόπων σε επαφή με τον ανιχνευτή οδηγεί, όπως αναμενόταν, σε αβεβαιότητες κάτω από 0.5%. Η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται στη μελέτη των σημειακών πηγών μεταξύ των δύο κωδίκων, αφορά το  $^{60}\text{Co}$  και είναι της τάξης του 6%, στον ανιχνευτή Ge40 σε μακρινή απόσταση πηγής – ανιχνευτή.

Τα παραπάνω βέβαια συμπεράσματα αφορούν τις πηγές που διαθέτουν ένα είδος ισοτόπου. Στην περίπτωση της επιφανειακής πηγής, όπου εμπεριέχονται και ισότοπα με πολύ χαμηλές ενέργειες, δεν παρουσιάζονται οι συντελεστές διόρθωσης όλων των ενεργειών που εμφανίζονται, καθώς συνοδεύονται από υψηλές αβεβαιότητες. Ωστόσο, είναι κρίσιμο να τονιστεί, ότι στο  $^{133}\text{Ba}$ , συνεισφέρουν παραπάνω από δύο ενέργειες φωτονίων στα φαινόμενα



πραγματικής σύμπτωσης σε ορισμένες περιπτώσεις. Αυτό λοιπόν συνεπάγεται, ότι για παράδειγμα οι ενέργειες των 79.6 και 81keV που δεν παρουσιάζονται, έχουν μελετηθεί και συνυπολογιστεί από τους κώδικες προσομοίωσης, επομένως έχουν συνεισφέρει στους υπόλοιπους συντελεστές διόρθωσης που δίνονται. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου ισότοπου επίσης, εφόσον περιλαμβάνει κορυφές χαμηλών ενεργειών, το αποτέλεσμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το υπόστρωμα και γενικότερα οι δύο κώδικες είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Επιβεβαιώνεται ακόμη στην περίπτωση της πηγής αυτής και στις τρεις ανιχνευτικές διατάξεις, ότι τα ισότοπα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{54}\text{Mn}$ , ως μονοενεργειακά, δεν παρουσιάζουν φαινόμενα σύμπτωσης και επομένως πράγματι συνοδεύονται από ένα συντελεστή διόρθωσης πολύ κοντά στη μονάδα. Ο συντελεστής δεν ισούται ακριβώς με 1 σε όλες τις περιπτώσεις, λόγω των αποκλίσεων μεταξύ των τιμών απόδοσης ανά προσομοίωση, αλλά η απόκλισή του από τη μονάδα είναι εντός των ορίων του στατιστικού σφάλματος που ακολουθεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμιστεί, ότι οι προσομοιώσεις των δύο αυτών ισωτόπων δεν παρουσιάζουν καμία διαφοροποίηση ως προς τα δεδομένα που εισάγονται από το χρήστη, παρά μόνο φυσικά ως προς την παράμετρο του διαγράμματος διάσπασης. Ορίζονται δηλαδή αμιγώς οι ίδιες παράμετροι σε κάθε περίπτωση και σαφώς σε κάθε έναν κώδικα και συνεπώς αποσοβείται σε μεγάλο βαθμό ο κίνδυνος αποκλίσεων που πηγάζουν από αυτές.

Σε ό,τι αφορά αποκλειστικά τις προσομοιώσεις, είναι κρίσιμο να τονιστεί, ότι η προσομοίωση μίας πηγής με πλήθος ισωτόπων δε μπορεί να προσομοιωθεί με την ίδια μεθοδολογία στις περιπτώσεις των δύο κωδικών που χρησιμοποιήθηκαν. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση του MCNP-CP, καθίσταται δυνατός ο ορισμός μιας σειράς ισωτόπων σε ένα αρχείο εισόδου, ενώ αντίθετα στον κώδικα Penelope, δεν παρέχεται η δυνατότητα αυτή. Η διαφοροποίηση αυτή είναι δυνατό να οδηγήσει σε διαφορές στο υπόστρωμα, όπως αυτό εμφανίζεται στο αρχείο εξόδου και συνεπώς στον τρόπο υπολογισμού τιμών απόδοσης και συντελεστών διόρθωσης αντίστοιχα. Ιδιαίτερα στις χαμηλές ενέργειες το ζήτημα αυτό οξύνεται, δεδομένου ότι στο συνολικό background συνεισφέρουν τα φωτόνια υψηλότερων ενεργειών από τα υπόλοιπα ισωτόπα της επιφανειακής πηγής.

Σημειώνεται, ότι στις περιπτώσεις των μονοενεργειακών ισωτόπων της επιφανειακής πηγής, που δεν αποτελούν “cascade emitters”, δηλαδή δεν εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά, θα αναμένονταν λόγοι ακριβώς ίσοι με τη μονάδα, εφόσον δεν προβλέπεται είτε απώλεια είτε άθροιση κρούσεων (loss ή gain) στην αντίστοιχη φωτοκορυφή. Ωστόσο, οι λόγοι των αποδόσεων που υπολογίζονται από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις, αποκλίνουν σε πολλές περιπτώσεις από τη μονάδα, υποδεικνύοντας εσφαλμένο αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στις διαφορές μεταξύ των συνιστωσών του λόγου, δηλαδή τις τιμές των αποδόσεων, και στον τρόπο που αυτές υπολογίζονται σε κάθε προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα, ενδέχεται η προσομοίωση όλων των ισωτόπων μέσω ενός μοναδικού αρχείου εισόδου στην περίπτωση του κώδικα MCNP, να μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο συνεχές υπόστρωμα και συνεπώς σε διαφοροποιήσεις κατά την αφαίρεσή του για τον υπολογισμό των τιμών απόδοσης.

Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι τα αρχεία εξόδου των δύο κωδικών παρουσιάζουν διαφορές ως προς το περιεχόμενο και τον τρόπο που δομούνται, ο χρήστης χρειάζεται να χειριστεί με διαφορετικό τρόπο την πληροφορία που περιέχεται, ώστε να τη «μεταφράσει» στο επιθυμητό μέγεθος, όπως λόγου χάριν την απόδοση φωτοκορυφής. Για παράδειγμα, στο

αρχείο εξόδου του MCNP-CP για τον υπολογισμό της απόδοσης αθροίζονται οι τιμές των “bins” τα οποία αντιστοιχούν στην επιφάνεια της προς μελέτη φωτοκορυφής και στη συνέχεια μπορεί να αφαιρεθεί το συνεχές υπόστρωμα. Αντίθετα, στο αρχείο εξόδου της Penelope, ο χρήστης προκειμένου να λάβει την τιμή της απόδοσης, ακολουθεί την ίδια αρχικά διαδικασία, αλλά στη συνέχεια οφείλει να πολλαπλασιάσει με το εύρος των “bins” (binwidth) και αν πρόκειται για προσομοίωση ισότοπου, να διαιρέσει και με το yield της αντίστοιχης φωτοκορυφής.

Εν κατακλείδι, το γεγονός ότι οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης που υπολογίζονται είναι «ευαίσθητες», εδράζεται στα δεδομένα διάσπασης που χρησιμοποιεί ο κάθε κώδικας και επομένως οι διαφορές σε αυτά οδηγούν και σε διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Σε συνδυασμό δε, με τις διαφοροποιήσεις στην προσομοίωση της μεταφοράς ακτινοβολίας και της απόκρισης του ανιχνευτή, αλλά και στην επεξεργασία από το χρήστη της πληροφορίας που περιέχεται στα αρχεία εξόδου του κάθε κώδικα, είναι δυνατό να εξηγηθούν οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στα αποτελέσματα των εν λόγω κωδίκων.

Μία άλλη πλευρά που δε θα μπορούσε να παραλειφθεί, αφορά τη σύγκριση με τις πειραματικές τιμές διορθωμένες με το λογισμικό TrueCoinc. Οι αποκλίσεις στην περίπτωση αυτή είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες μεταξύ των δύο κωδίκων. Ωστόσο χρειάζεται να σημειωθεί, ότι στη σύγκριση πειραματικών και τιμών προσομοίωσης υπεισέρχεται η εγκυρότητα ή μη του γεωμετρικού μοντέλου. Ενδεικτικά, στο κεφάλαιο 5 (παράγραφος 5.4.2), όπου γίνεται η επιβεβαίωση του μοντέλου της ανιχνευτικής διάταξης Ge33, στη βέλτιστη γεωμετρία που τελικά επιλέγεται παρουσιάζονται αποκλίσεις έως και 7%. Είναι λοιπόν αναμενόμενο, οι αποκλίσεις αυτές να συνοδεύουν και τα τελικά αποτελέσματα. Ομοίως φυσικά, μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για τις άλλες δύο ανιχνευτικές διατάξεις, από τις προηγούμενες εργασίες, στις οποίες προσδιορίστηκε το βέλτιστο για αυτές γεωμετρικό μοντέλο. Ακόμη τονίζεται, ότι για τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για το λογισμικό TrueCoinc λήφθηκαν υπόψη τιμές προσομοιώσεων και συγκεκριμένα τιμών από τον κώδικα MCNP. Παρόλα αυτά, η επιβεβαίωση του γεωμετρικού μοντέλου του Ge33 πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του κώδικα Penelope. Λόγω του ότι στόχο της εργασίας δεν αποτελούσε η επιβεβαίωση των μοντέλων, αλλά η μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μέσω κωδίκων και υπολογιστικών εργαλείων, δεν ακολουθήθηκε διαδικασία επιβεβαίωσης και με τον κώδικα MCNP. Επομένως, οι όποιες πιθανές αποκλίσεις που μπορεί να προέρχονται από αυτήν την παράμετρο, συμβάλλουν στα αποτελέσματα, αλλά δεν είναι εφικτό να ποσοτικοποιηθούν στην παρούσα εργασία. Στο σημείο αυτό τονίζεται, ότι δεν παρουσιάστηκε ξεχωριστά συντελεστής διόρθωσης από το λογισμικό TrueCoinc για την περίπτωση της σημειακής πηγής  $^{57}\text{Co}$ , διότι όπως και στην επιφανειακή πηγή, σε όλες τις περιπτώσεις των ανιχνευτικών διατάξεων, δίνεται ίσως με τη μονάδα. Τονίζεται δε, βάσει του αρχείου εξόδου του TrueCoinc, ότι για τις εν λόγω φωτοκορυφές του  $^{57}\text{Co}$ , δεν εξάγονται συντελεστές που να αντικατοπτρίζουν τα φαινόμενα μείωσης της επιφάνειας της κορυφής (loss) ούτε αντίστοιχα τα φαινόμενα αύξησης αυτής (gain) (Παράρτημα Β). Στην πραγματικότητα όμως, τέτοια φαινόμενα εμφανίζονται, διότι όπως έχει αναφερθεί ξανά, η ενέργεια των 14.4 keV αθροίζεται με την ενέργεια των 122.1 keV, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων “summing in” στην ενέργεια των 136.5 keV.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, στόχος είναι η επιγραμματική περιγραφή της Διπλωματικής Εργασίας καθώς και των βασικών συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτήν. Πραγματοποιείται αξιολόγηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, κυρίως βάσει των αρχικών σιοπών που είχαν τεθεί για τη συγκεκριμένη μελέτη και τέλος διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση ορισμένων ζητημάτων και για μελλοντικές εργασίες.

Το πρώτο στάδιο της Δ.Ε. συνίσταται στην επιβεβαίωση του γεωμετρικού μοντέλου του ανιχνευτή Ge33. Δεδομένου λοιπόν, του ότι οι “ακριβείς” διαστάσεις δε δίνονται από τον κατασκευαστή χρειάζεται κάποια διαδικασία προσδιορισμού αυτών. Τέτοια μεθοδολογία είχε προηγηθεί σε προγενέστερη εργασία (Θ. Βασιλοπούλου, Αθήνα 2008), ωστόσο διερευνήθηκε η πιθανότητα μεταβολής ενός η περισσότερων διαστάσεων που αφορούν τον κρύσταλλο γερμανίου της ανιχνευτικής διάταξης με την πάροδο του χρόνου. Το βήμα αυτό κρίθηκε απαραίτητο πριν την αξιοποίηση του μοντέλου στη διαδικασία των προσομοιώσεων, διότι απαιτείται λεπτομερής γνώση των διαστάσεων του κρυστάλλου όταν δημιουργείται ένα αρχείο εισόδου και ειδικότερα ένα αρχείο γεωμετρίας σε κάθε έναν από τους δύο κώδικες. Η διαδικασία αυτή βασίστηκε στη σύγκριση πειραματικών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, για μία σειρά διαφορετικών τιμών των παραμέτρων που μελετήθηκαν και λήφθηκε υπόψη η βέλτιστη σύγκλιση τους. Συμπέρασμα της μελέτης αυτής, μετά από τις κατάλληλες δοκιμές, αποτελεί το γεγονός, ότι ο όγκος του ενεργού κρυστάλλου δεν έχει μεταβληθεί από την τελευταία φορά που προσδιορίστηκαν ανάλογα. Καθίσταται όμως σαφές, ότι οι εν λόγω τιμές των μεγεθών που εξετάζονται, δεν αντιστοιχούν απαραίτητως στα “ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά” του ανιχνευτή, αλλά απλώς πρόκειται για εκείνα τα χαρακτηριστικά, που μέσω τη προσομοίωσης δίνουν τα πιο συμβατά με το πείραμα αποτελέσματα. Εξυπακουέται ότι, περαιτέρω μελέτη και δοκιμές θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βέλτιστη σύγκλιση πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης, ωστόσο αυτή η διερεύνηση ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας, η οποία οφείλει να εστιάσει στην αντιμετώπιση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Για το λόγο αυτό, όσον αφορά τα άλλα δύο χρησιμοποιούμενα γεωμετρικά μοντέλα των ανιχνευτών Ge40 και LGe λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν με αντίστοιχη μεθοδολογία σε προηγούμενες εργασίες, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5 (Μ. Παπαδιονυσίου, 2015) (S. Padovani, et al., 2018).

Στη συνέχεια, διεξάχθηκαν πειραματικές μετρήσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής μιας σειράς ισοτόπων σημειακών ή επιφανειακών πηγών. Εξετάστηκαν περιπτώσεις με μικρή απόσταση πηγής-ανιχνευτή, δηλαδή περίπου 1cm, πιο μακρινές αποστάσεις, περίπου 10cm, αλλά και πηγές σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή. Ακόμη, οι διαφορετικές περιπτώσεις των πηγών αυτών μελετήθηκαν σε τρεις ανιχνευτές, με χαρακτηριστικά που ποικίλλουν ως προς την απόδοση και τη γεωμετρία τους μελετήθηκε η συμπεριφορά του συντελεστή διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης σε

ποικίλες αποστάσεις, σε όργανα διαφορετικών αποδόσεων και φυσικά σε ποικιλία ισοτόπων. Σε διάφορα στάδια αυτής της πειραματικής διαδικασίας εντοπίστηκαν ζητήματα που ήταν απαραίτητο να επιλυθούν για τα επόμενα βήματα της μελέτης, όπως η τροποποίηση των ηλεκτρονικών του ανιχνευτή Ge40 (Κεφάλαιο 4), ή το υψηλό count rate ορισμένων πηγών. Γίνεται κατανοητό λοιπόν, ότι είναι πιθανό σε μία ανιχνευτική διάταξη να παρουσιάζεται με την πάροδο του χρόνου η ανάγκη εκ νέου ρύθμισης και ελέγχου ορισμένων παραμέτρων για την όσο το δυνατόν ορθότερη καταγραφή της ακτινοβολίας-γ.

Ο κυριότερος ωστόσο στόχος της παρούσας εργασίας, ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, με τη χρήση των κωδικών Penelope και MCNP-CP και στη συνέχεια η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα ενός υπολογιστικού εργαλείου, του λογισμικού TrueCoinc. Σημειώνεται αρχικά, ότι μέσω της προσομοίωσης των αμιγώς ίδιων περιπτώσεων σε κάθε έναν από τους δύο κώδικες, με πανομοιότυπες αρχικές συνθήκες μπορεί να επιτευχθεί ευθέως η σύγκριση των αποτελεσμάτων στο προς μελέτη πρόβλημα. Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν δύο κώδικες που κατά την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη, λαμβάνουν υπόψη το διάγραμμα διάσπασης της προς μελέτη πηγής, επομένως συνυπολογίζουν και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αλλά και όλες τις άλλες αλληλεπιδράσεις που ενδεχομένως μπορούν να προκύψουν. Αυτή η συνθήκη, συγκριτικά με τις προσομοιώσεις μονοενεργειακών φωτονίων, οδηγεί σε πιο σύνθετα και πολύπλοκα προβλήματα που αναπόφευκτα επηρεάζονται από μία σειρά παραμέτρων.

Οι παράμετροι αυτές φαίνεται ορισμένες φορές να λαμβάνονται υπόψη με τον ίδιο τρόπο από κάθε κώδικα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις να παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις, δηλαδή τα σύνθετα φαινόμενα που καλούνται να αντιμετωπίσουν δεν προσεγγίζονται απαραίτητα με την ίδια την ίδια μεθοδολογία. Οι αποκλίσεις που καταγράφονται σχετίζονται με τις διαφορές στην προσομοίωση μεταφοράς της ακτινοβολίας και της απόκρισης του ανιχνευτή, αλλά και στην επεξεργασία των αρχείων εξόδου από το χρήστη. Επιπρόσθετα, όπως συζητήθηκε και στο κεφάλαιο 7, οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης του προς μελέτη φαινομένου είναι ισχυρά συνδεδεμένες και συνεπώς “ευαίσθητες” στα δεδομένα διάσπασης που χρησιμοποιεί ο κάθε κώδικας, γεγονός που λειτουργεί ενισχυτικά στην αύξηση των αποκλίσεων όταν αυτά παρουσιάζουν διαφορές. Ως απόρροια λοιπόν, οι αποκλίσεις αυτές επιδρούν στα τελικά υπολογισμένα αποτελέσματα και μπορούν να οδηγήσουν σε τουλάχιστον ίσες ή και μεγαλύτερες αποκλίσεις αντίστοιχα μεταξύ αυτών. Είναι γεγονός, ότι βάσει και προηγούμενων μελετών που αφορούσαν τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής, τα δύο εργαλεία που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους της τάξης του 2% (M. C. Léry et. al, 2019) (T. Vidmar, et. al., 2010). Ωστόσο, οι μελέτες αυτές έχουν επικεντρωθεί σε προσομοιώσεις με μονοενεργειακά φωτόνια και προσομοιώσεις πιο απλών γεωμετριών. Συνεπώς, με αφετηρία αποκλίσεις τέτοιου μεγέθους, αναμένεται η αύξησή τους, εξαιτίας των πιο πολύπλοκων γεωμετριών, αλλά και των σύνθετων διαγραμμάτων διάσπασης των ισοτόπων στην παρούσα μελέτη.

Όσον αφορά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αρχικά επιβεβαιώνεται και ποσοτικοποιείται η μεταβολή του συντελεστή διόρθωσης από τις κοντινές στις μακρινές αποστάσεις. Συγκεκριμένα δηλαδή, παρατηρείται σημαντική εξασθένιση του φαινομένου της τάξης του 10% (κυμαίνεται από 6.5% έως 13%) στη σχεδόν δεκαπλάσια απόσταση στους

ανιχνευτές Ge33 και Ge40, όπως άλλωστε αναμένεται. Ομοίως παρατηρείται μεγαλύτερη σχετική αβεβαιότητα να συνοδεύει τα αποτελέσματα των υπολογισμών, όσο η απόσταση πηγής – ανιχνευτή αυξάνεται. Ακόμη, φαίνεται ότι η συνολική γεωμετρία που κάθε φορά μελετάται επηρεάζει άμεσα το φαινόμενο, καθώς πρόκειται για ανιχνευτικές διατάξεις διαφορετικής απόδοσης και φυσικά με διαφορετική σχετική θέση πηγής – ανιχνευτή, θωράκιση και υλικά. Ουσιαστικά γίνεται κατανοητό, ότι η αυξημένη απόδοση, είτε λόγω του ίδιου του ανιχνευτή είτε λόγω της απόστασής του από την πηγή, οδηγεί σε συντελεστές διόρθωσης που απέχουν πολύ από τη μονάδα, συνεπάγονται δηλαδή έντονη παρουσία του φαινομένου.

Χρειάζεται ακόμη να σχολιασθεί η παράμετρος της γεωμετρίας της ίδιας της πηγής. Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για σημειακές πηγές και στη συνέχεια για πηγές στοιχειώδους όγκου, με πανομοιότυπες παραμέτρους για τις δύο αυτές περιπτώσεις, παρατηρήθηκε διαφορά στον παραγόμενο συντελεστή διόρθωσης. Ιδιαίτερα όμως, η διαφορά αυτή ήταν εμφανής όταν επρόκειτο για πηγές, όπως το  $^{57}\text{Co}$ , που παρουσιάζει φωτοκορυφές με συντελεστή διόρθωσης κοντά στη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή, η εξαγόμενη τιμή παρουσιάζει ευαισθησία ανάμεσα στις δύο γεωμετρίες (σημειακή και όγκου) και μάλιστα δεν έχει σταθερή συμπεριφορά ως προς τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι σε ορισμένες προσομοιώσεις και στους δύο κώδικες φαίνεται σαν μία κορυφή που παρουσιάζει “summing in”, ενώ σε άλλες σαν μία που κάνει “summing out”. Παρατηρείται δε, ότι η όσο το δυνατόν λεπτομερής προσομοίωση οδηγεί σε ασφαλέστερα αποτελέσματα, επομένως εντοπίζεται η αναγκαιότητα να ορίζονται με μεγάλη ακρίβεια περιπτώσεις όπως αυτή. Βέβαια, ως πηγή όγκου προσομοιώθηκε και η πηγή  $^{60}\text{Co}$  στο Ge33, ωστόσο δεν παρουσίαζε μεγάλη απόκλιση η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής της σημειακής πηγής, από αυτήν του όγκου. Η συμπεριφορά δηλαδή του  $^{60}\text{Co}$  ενιαία επιβεβαιώνει, ότι πρόκειται για ισότοπο του οποίου οι κορυφές παρουσιάζουν “summing out”, σε όλες τις γεωμετρίες στις οποίες μελετήθηκε. Σε κάθε περίπτωση, οι δύο κώδικες παρουσιάζουν μεγαλύτερη σύγκλιση σε σχέση με τους αντίστοιχους συντελεστές του λογισμικού TrueCoinc, το οποίο φαίνεται να υπερεκτιμά το φαινόμενο σε σχέση με τα δύο εργαλεία των προσομοιώσεων. Τονίζεται δε, ότι ο τρόπος που λαμβάνεται υπόψη το background από τον κάθε κώδικα χρήζει περισσότερης διερεύνησης, διότι αν αλλάξει ο τρόπος συνυπολογισμού του δεν παρατηρούνται μεταβολές μόνο στις τιμές της απόδοσης, αλλά και στους ίδιους τους συντελεστές διόρθωσης, της τάξης 1-2%. Αυτό επηρεάζει άμεσα και τα αποτελέσματα που δίνονται από το παραπάνω λογισμικό, διότι λαμβάνει ως δεδομένα καμπύλες που προέρχονται από προσομοιώσεις μονοενεργειακών φωτονίων. Στις προσομοιώσεις αυτές παρατηρείται διαφορά από εκείνες που συμπεριλαμβάνουν ενέργειες πολλών φωτονίων, ακόμη και με περιπτώσεις που δε συνυπολογίζεται το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Ακόμη, χρειάζεται να γίνει μία αναφορά στα επίπεδα των αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν τις τιμές των κωδίκων. Σε κάθε περίπτωση που προσομοιώθηκε και στους δύο κώδικες, επιλέχθηκε να εισαχθεί ο ίδιος αριθμός ιστοριών για να μελετηθεί και η ταχύτητα σύγκλισης μεταξύ τους. Φαίνεται, ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το σχετικό σφάλμα του κώδικα MCNP-CP εμφανίζεται μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του κώδικα Penelope, με τη διαφορά, ότι ο πρώτος συμπλήρωνε τον ίδιο αριθμό των ιστοριών σε μικρότερο χρόνο σε

αμιγώς ίδια προβλήματα.

Τέλος, αναφέρεται ότι η ιδιαιτερότητα που παρουσίασε η περίπτωση του  $^{22}\text{Na}$  απαιτεί διερεύνηση. Αρχικά, χρειάζεται να γίνει μελέτη στην κατεύθυνση αιτιολόγησης του σχηματισμού που έχει αναφερθεί και στη συνέχεια να ελεγχθεί αν και πόσο ο παράγοντας που οδήγησε σε αυτόν, επηρεάζει την απόδοση φωτοκορυφής και εν γένει τις μετρήσεις για τη συγκεκριμένη ενέργεια.

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν, γίνεται κατανοητό ότι η χρήση των συγκεκριμένων εργαλείων για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης αποτελεί μία αξιόπιστη λύση, όπως συζητήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σαφώς, δεδομένου ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στον τρόπο που αντιμετωπίζει ο κάθε κώδικας το σύνθετο αυτό φαινόμενο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση και ενασχόληση με τους κώδικες προσομοίωσης, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητές των κωδίκων. Μέσα από τη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης με τη χρήση κωδίκων έχουν εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να συμβάλλουν στην περαιτέρω βελτίωση και ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθείται σε κάθε πρόβλημα και να εντοπισθούν οι όποιες αδυναμίες υπάρχουν στα εργαλεία για την αντιμετώπισή του με σκοπό την εξάλειψή τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασίου Ν., “Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονιακών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE – Εφαρμογή σε προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων και βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2006).
- Μ. Ι. Αναγνωστάκης, γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 1998
- Θ. Βασιλοπούλου, Ανάπτυξη πυρηνικών τεχνικών στοιχειακής ανάλυσης δειγμάτων μεγάλου όγκου, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π, 2012
- Θ. Βασιλοπούλου, Προσδιορισμός συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ανιχνευτή HPGe λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, μέσω προσομοίωσης Monte, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008
- Δεληγιάνης Αν., “Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ιοντιζουσών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα MCNP – Εφαρμογή σε προβλήματα βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2007).
- Διαμαντούρος Στ., “Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη με τη χρήση του κώδικα EGS4 για απλές γεωμετρίες ”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2004).
- Κ.Α. Καρφόπουλος, Ανάπτυξη και Εφαρμογή Μετρητικών Τεχνικών για την Ανάλυση της Φυσικής και Τεχνολογικά Επαγόμενης Ραδιενέργειας σε Οικοσυστήματα, Αθήνα, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2012
- Μανώλακας Π., “Εκτίμηση της δόσεως εξαιτίας της λειτουργίας μηχανής ακτίνων-X με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2007).
- Παπαδιονυσίου Μ., Μελέτη της απόκρισης ανιχνευτή Γερμανίου πειραματικά και με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2015
- Σάββα Μ., “Ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών προσδιορισμού πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων ραδιενεργών ιχνοστοιχείων σε δείγματα περιβαλλοντικής σημασίας”, Αθήνα, Νοέμβριος 2017
- Δ.Α. Χιώνης, Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte–Carlo, Αθήνα, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011
- Andreev D.S., Erokhina K.I., Zvonov V.S. and Lemberg I.Kh, Instr. Exp.Tech. USSR (English transl.) 15 (1972) 1358.
- Andreev D.S., Erokhina K.I., Zvonov V.S. and Lemberg I.Kh, Bull. Acad. Sci.USSR Phys. Ser. (English transl.) 37 (8) (1973) 41.De Felice P., Angelini P., Fazio A. and Capogni M., “A national Campaign for Coincidence-Summing Correction in  $\gamma$ -Ray spectrometry”, Applied Radiation and Isotopes 56 (2002), 117-123.
- Berger M.J., Seltzer S.M., 1988, Monte Carlo Transport of Electrons and Photons, eds. Jenkins T.M., Nelson W.R. and Rindi A. (Plenum, New York)
- A. N. Berlizon, “A correlated particle source extension of a general purpose Monte Carlo N–Particle transport code”, 2012

- Briesmeister, J.F., “A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B”, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, Technical Report LA-12625-M, (1997).
- Brun R., Bryant F., Maire M., McPherson A.C., Zanarini P, 1987, GEANT 3, Report DD/EE/84-1 (CERN, Geneva)
- G.F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement”, John Wiley and Sons, (1989).
- El-Gharbany H.A., Metwally S.M., Sharsbar T., Elnimr T., Badran H.M., “Establishment of HPGe detector efficiency for point source including true coincidence correction”, Nuclear Instruments and Methods A550, (2005) 201-211
- Halbleib J.A., Kensek R.P., Mehlhorn T.A., Valdez G.D., Seltzer S.M., 1992, ITS version 3.0: the integrated TIGER series of coupled electron / photon Monte Carlo transport codes, Report SAND91-1634 (Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM)
- Halbleib J.A. and Mehlhorn T.A., “The integrated tiger series (ITS) of coupled electron/photon Monte Carlo transport codes”, Nucl. Sci. Eng. 92, 338-339 (1986).
- Kawrakow I. And Rogers D.W.O., 2000, The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, Report PIRS-701 (National Research council of Canada, Ottawa)
- M. C. Lépy et. al, “A benchmark for Monte Carlo simulation in gamma-ray spectrometry”, 2019, Applied Radiation and Isotopes
- Liu Liye, Ma Jizeng, Didier Franck, Loic de Carlan, Zhang Binqian, 2006, Monte Carlo efficiency transfer method for full energy peak efficiency calibration of three type HPGe detectors A coaxial N-type, a coaxial P-type and four BEGe detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 564, 608-613.
- Malvino A.P., 2006, Βασική ηλεκτρονική, 4η έκδοση, TZIOAA, ISBN 978-960-7219-12-0
- Nelson W.R., Hirayama H., Rogers D.W.O., 1985, The EGS4 Code System, Report SLAC-265 (Stanfors Linear Accelerator Center, Stanford, CA)
- R. M. W. Overwater, The Physics of Big Sample Instrumental Neutron Activation Analysis, PhD thesis, Delft University of Technology, 1994
- S. Padovani, I. Mitsios, M. Anagnostakis & D. Mostacci, “Analysis of the vertical distribution and size fractionation of natural and artificial radionuclides in soils in the vicinity of hot springs”, 2018
- Quintana B. and Fernandez F., “An Empirical Method to Determine Coincidence – Summing Corrections in Gamma Spectrometry”, Applied Radiation and Isotopes 46 (1995), 961-964.
- Ródenas J., Pascual A., Zarza I., Serradell V., Ortiz J., Ballesteros L., 2003, Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 496, pp. 390–399
- Salvat F, Fernández-Varea J M, Baró J and Sempau J 1996, PENELOPE, an algorithm and computer code for Monte Carlo simulation of electronphoton showers Ciemat (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) Technical Report no 799
- Schlager M., 2007, Precise modeling of coaxial germanium detectors in preparation for a mathematical calibration, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 , 137–140
- Semkow T.M., Mehmood G., Parekh P.P. and Virgil M., “Coincidence Summing in Gamma-Ray Spectroscopy”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A290 (1990), 437-444.
- Sima O., “Comparison of the effects of different decay data on coincidence-summing corrections”, 2021, Personal communication



- Sudar S., “TRUECOINC, A program for calculation of true coincidence corrections for gamma rays”, *True Coincidence Program Version 1.01*, Institute of Experimental Physics, Kossuth University, Debrecen, Hungary (2000).
- Tzika F., Stamatiatos I. E., ‘Thermal neutron self-shielding correction factors for large sample instrumental neutron activation analysis using the MCNP code’, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 213 (2004) 177-181
- Vidmar T., “EFFTRAN- A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry”, *Nuclear Instruments and Methods A* 550 (2005), 603-608.
- Vidmar T., Aubineau-Laniese I., Anagnostakis M.J., Arnold D., Brettner-Messler R., Budjas D., Capogni M., Dias M.S., De Greer L-E., Fażio A., Gasparro J., Hult M., Hurtado S., Jurado Vargas M., Laubestein M., Lee K.B., Lee Y-K., Lepy M-C., Maringer F-J., Medina Peyres V., Mille M., Morales M., Nour S., Plenteda R., Rubio Montero M.P., Sima O., Tomei C., Vidmar G., 2008, *An intercomparison of Monte Carlo codes used in gamma-ray spectrometry*, *Applied Radiation and Isotopes* 66, pp. 764-768
- Vidmar T., et. al., “Testing efficiency transfer codes for equivalence”, *Applied Radiation and Isotopes*, 2010
- X-5 Monte Carlo Team, ‘MCNP - A general Monte Carlo N-Particle transport code, Version 5’, LA-UR-03-1987 (2003)
- [https://www.ezag.com/home/products/isotope\\_products/isotrak\\_calibration\\_sources/reference\\_sources/geometry\\_sources\\_beakers\\_bottles\\_filters\\_rods/filters/](https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/reference_sources/geometry_sources_beakers_bottles_filters_rods/filters/)
- [https://www.ezag.com/home/products/isotope\\_products/isotrak\\_calibration\\_sources/reference\\_sources/gamma\\_sources/point\\_sources/#c605](https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/reference_sources/gamma_sources/point_sources/#c605)
- [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ

Section 6  
DETECTOR SPECIFICATIONS AND PERFORMANCE DATA  
(REAR ENVELOPE)

6.1 SPECIFICATIONS Serial Number 9831018

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows:

Rel. Efficiency - 30 %  
 Resolution - 2.0 keV (FWHM) @ 1.33 MeV  
               - \_\_\_\_\_ keV (FWHM)  
               - \_\_\_\_\_ keV (FWHM) @ \_\_\_\_\_  
               - \_\_\_\_\_ keV (FWHM) @ \_\_\_\_\_  
 Peak/Compton - \_\_\_\_\_:1

Cryostat Description or Drw. No. if special 7500

6.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA

Actual performance of this detector when tested is given below. Digital printouts are also enclosed in the rear envelope of the instruction manual.

Geometry Closed End Coaxial  
 Diameter 55.3 mm  
 Length 65 mm  
 Active area facing window 24.15 cm<sup>2</sup>  
 Distance from window 5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage ±13000 Vdc.  
 Recommended Bias Voltage ±13000 Vdc.  
 Leakage Current at Recommended Bias NA Na.  
 Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias 1.48 Vdc.  
 Capacitance at Recommended Bias NA pf.

RESOLUTION AND EFFICIENCY

Isotope	Co <sup>57</sup>	Co <sup>60</sup>			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	0.85	1.78			
FWTM (keV)	1.61	3.26			
Peak/Compton		66.5:1			
Efficiency (%)		33.8%			

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.1: Πιστοποιητικό ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 33.8% (Ge33) του ΕΙΤΤ-ΕΜΠ



## DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

### Specifications

Detector Model GC4018 Serial number b 12099  
 Cryostat Model 7500SL  
 Preamplifier Model 2002CSL

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows :

Nominal volume      cc Relative efficiency 40 %  
 Resolution 1.8 keV (FWHM) at 1.33 MeV  
     keV (FWTM) at 1.33 MeV  
0.875 keV (FWHM) at 122 keV  
     keV (FWTM) at       
 Peak/Compton 63:1 Cryostat well diameter      Well depth      mm  
 Cryostat description or Drawing Number if special 7500SL

### Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window  
 Diameter 59.5 mm Active volume      cc  
 Length 61 mm Crystal well depth      mm  
 Distance from window (outside) 6 mm Crystal well diameter      mm

### Electrical Characteristics

Depletion voltage (+3000) Vdc  
 Recommended bias voltage Vdc (+3500) Vdc  
 Leakage current at recommended bias 0.01 nA  
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.1 Vdc

### Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4  $\mu$ s

Isotope	<sup>57</sup> Co	<sup>60</sup> Co		
Energy (keV)	122	1332		
FWHM (keV)	.821	1.77		
FWTM (keV)		3.28		
Peak/Compton		69.3:1		
Rel. Efficiency		40.9%		

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

Tested by:  Date: January 12, 2012

Approved by:  Date: January 12, 2012

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.2: Πιστοποιητικό ανιχνευτή Γερμανίου απόδοσης 40% (Ge40) του ΕΠΤ-ΕΜΠ

## Section 7

## DETECTOR SPECIFICATIONS AND PERFORMANCE DATA

7.1 SPECIFICATIONS Model GL2020-7500 Serial Number b 87547

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follow:

Energy	5.9 keV	122 keV	
Resolution [eV (FWHM)]	400	680	

Cryostat Description or Drw. No. if special Vertical dipstick, type 7500 + 4" CFE + PHW7.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA Date September 16th, 1988

Actual performance of this detector when tested is given below.

Active Diameter 50.5 mmActive Area 2000 mm<sup>2</sup>Thickness 20 mmDistance from Window 5 mmWindow Thickness .5 mm

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage (-)1500 Vdc.Recommended Bias Voltage (-)2000 Vdc.Reset Rate at Recommended Bias / sec. (PO Preamp only)Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias + .4 Vdc. (RC Preamp only)RESOLUTION AND EFFICIENCY - With Amp. Time Constant of 4 microseconds.

Isotope	Fe <sup>55</sup>	Co <sup>57</sup>	Co <sup>57</sup>		
Energy (keV)	5.9	6.4 *	122		
FWHM (eV)	341		530		
FWTM (eV)			996		

\* Substitutes for Fe-55 in some cases where Fe-55 peaks are not well separated.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.2: Πιστοποιητικό ανιχνευτή Γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe) του ΕΙΤΤ-ΕΜΠ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ

```
# Results from PENMAIN. Output from energy-deposition detector # 1
# Deposited energy spectrum.
# 1st column: deposited energy (eV).
# 2nd column: probability density (1/(eV*particle)).
# 3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).
1.627500E+03 9.378486E-08 8.20E-09
2.882500E+03 9.832669E-08 8.40E-09
4.137500E+03 1.015936E-07 8.54E-09
5.392500E+03 9.808765E-08 8.39E-09
6.647500E+03 9.649402E-08 8.32E-09
7.902500E+03 9.944223E-08 8.44E-09
9.157500E+03 1.000000E-07 8.47E-09
1.041250E+04 1.173705E-07 9.17E-09
1.166750E+04 1.090040E-07 8.84E-09
1.292250E+04 1.105976E-07 8.91E-09
1.417750E+04 1.143426E-07 9.05E-09
1.543250E+04 1.044622E-07 8.65E-09
1.668750E+04 1.106773E-07 8.91E-09
1.794250E+04 1.033466E-07 8.61E-09
1.919750E+04 1.065339E-07 8.74E-09
2.045250E+04 1.083665E-07 8.81E-09
2.170750E+04 1.099602E-07 8.88E-09
2.296250E+04 1.084462E-07 8.82E-09
2.421750E+04 1.083665E-07 8.81E-09
2.547250E+04 1.031076E-07 8.60E-09
2.672750E+04 1.060558E-07 8.72E-09
2.798250E+04 1.060558E-07 8.72E-09
2.923750E+04 1.033466E-07 8.61E-09
3.049250E+04 1.063745E-07 8.73E-09
3.174750E+04 1.095618E-07 8.86E-09
3.300250E+04 1.050199E-07 8.68E-09
3.425750E+04 1.056574E-07 8.70E-09
3.551250E+04 1.101195E-07 8.89E-09
3.676750E+04 1.082869E-07 8.81E-09
3.802250E+04 1.098805E-07 8.88E-09
3.927750E+04 1.056574E-07 8.70E-09
4.053250E+04 1.051793E-07 8.68E-09
4.178750E+04 1.102789E-07 8.89E-09
4.304250E+04 1.069323E-07 8.76E-09
4.429750E+04 1.078088E-07 8.79E-09
4.555250E+04 1.039044E-07 8.63E-09
4.680750E+04 1.051793E-07 8.68E-09
4.806250E+04 1.052590E-07 8.69E-09
4.931750E+04 1.105179E-07 8.90E-09
5.057250E+04 1.075697E-07 8.78E-09
5.182750E+04 1.127490E-07 8.99E-09
5.308250E+04 1.103586E-07 8.90E-09
5.433750E+04 1.083665E-07 8.81E-09
5.559250E+04 1.090040E-07 8.84E-09
5.684750E+04 1.092430E-07 8.85E-09
5.810250E+04 1.137052E-07 9.03E-09
5.935750E+04 1.085259E-07 8.82E-09
6.061250E+04 1.062948E-07 8.73E-09
6.186750E+04 1.047012E-07 8.66E-09
6.312250E+04 1.095618E-07 8.86E-09
6.437750E+04 1.070916E-07 8.76E-09
6.563250E+04 1.120319E-07 8.96E-09
6.688750E+04 1.058167E-07 8.71E-09
6.814250E+04 1.077291E-07 8.79E-09
```

ΣΧΗΜΑ Β.1: Τμήμα αρχείου εξόδου του κώδικα Penelope

```

tally type 8 pulse height dis
tally for photons electrons

cell 1
energy
0.0000E+00 5.7000E-06 0.1325
1.0000E-03 1.9363E-01 0.0006
2.2544E-03 1.0600E-04 0.0307
3.5087E-03 1.1580E-04 0.0294
4.7631E-03 1.1460E-04 0.0295
6.0175E-03 1.2410E-04 0.0284
7.2719E-03 1.2040E-04 0.0288
8.5262E-03 1.2260E-04 0.0286
9.7806E-03 1.2930E-04 0.0278
1.1035E-02 1.4430E-04 0.0263
1.2289E-02 1.3210E-04 0.0275
1.3544E-02 1.2860E-04 0.0279
1.4798E-02 1.2640E-04 0.0281
1.6052E-02 1.3820E-04 0.0269
1.7307E-02 1.3420E-04 0.0273
1.8561E-02 1.2520E-04 0.0283
1.9816E-02 1.3070E-04 0.0277
2.1070E-02 1.2780E-04 0.0280
2.2324E-02 1.2550E-04 0.0282
2.3579E-02 1.3010E-04 0.0277
2.4833E-02 1.3640E-04 0.0271
2.6087E-02 1.3450E-04 0.0273
2.7342E-02 1.3150E-04 0.0276
2.8596E-02 1.3190E-04 0.0275
2.9851E-02 1.3350E-04 0.0274
3.1105E-02 1.3420E-04 0.0273
3.2359E-02 1.3640E-04 0.0271
3.3614E-02 1.3040E-04 0.0277
3.4868E-02 1.3480E-04 0.0272
3.6122E-02 1.3660E-04 0.0271
3.7377E-02 1.2780E-04 0.0280
3.8631E-02 1.3410E-04 0.0273
3.9886E-02 1.3710E-04 0.0270
4.1140E-02 1.3850E-04 0.0269
4.2394E-02 1.3440E-04 0.0273
4.3649E-02 1.2970E-04 0.0278
4.4903E-02 1.3780E-04 0.0269
4.6157E-02 1.3850E-04 0.0269
4.7412E-02 1.3350E-04 0.0274
4.8666E-02 1.4070E-04 0.0267
4.9921E-02 1.3660E-04 0.0271
5.1175E-02 1.3010E-04 0.0277
5.2429E-02 1.4130E-04 0.0266
5.3684E-02 1.3340E-04 0.0274
5.4938E-02 1.3810E-04 0.0269
5.6192E-02 1.3180E-04 0.0275
5.7447E-02 1.3390E-04 0.0273
5.8701E-02 1.4040E-04 0.0267
5.9956E-02 1.3570E-04 0.0271
6.1210E-02 1.3240E-04 0.0275
6.2464E-02 1.3630E-04 0.0271
6.3719E-02 1.4370E-04 0.0264
6.4973E-02 1.3370E-04 0.0273
6.6227E-02 1.3080E-04 0.0276
6.7482E-02 1.4550E-04 0.0262
6.8736E-02 1.3750E-04 0.0270
6.9991E-02 1.3680E-04 0.0270
7.1245E-02 1.4040E-04 0.0267
7.2499E-02 1.3850E-04 0.0269
7.3754E-02 1.3390E-04 0.0273
7.5008E-02 1.3920E-04 0.0268
7.6262E-02 1.3450E-04 0.0273

```

ΣΧΗΜΑ Β.2: Τμήμα αρχείου εξόδου του κώδικα MCNP-CP

Ba133\_contact.txt ×

The used total efficiency: TotalPeak\_Ge33  
The used peak efficiency: fepe\_Ge33  
The parent radioactive isotope: <sup>133</sup>Ba EC 10.52 Y

E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	Eff	TotEff	TrueCloss	TrueCGain		
3.634	0.21	13.8	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
3.634	0.21	13.8	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
3.795	0.23	13.6	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
3.955	9.95E-2	10.6	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
3.955	9.95E-2	10.6	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.093	0.59	10.9	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.093	0.59	10.9	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.106	5.37	11.5	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.106	5.37	11.5	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.142	0.10	10.1	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.272	0.63	10.2	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.286	5.67	11.5	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.414	3.31	10.2	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.414	3.31	10.2	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.451	0.52	21.2	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.451	0.52	21.2	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.512	0.86	21.4	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.512	0.86	21.4	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.569	4.29E-2	11.4	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.569	4.29E-2	11.4	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.620	3.56	10.3	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.649	0.55	20.0	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.714	1.05	10.8	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.714	1.05	10.8	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
4.717	0.92	19.9	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.781	4.62E-2	10.6	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
4.934	1.15	11.1	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
5.034	0.46	10.0	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
5.034	0.46	10.0	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
5.281	0.50	11.8	0.780	0.00	0.000	0.780	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
5.307	0.13	22.2	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
5.307	0.20	20.6	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
5.307	0.13	22.2	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
5.307	0.20	20.6	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
5.542	0.14	20.1	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
5.553	0.21	20.8	0.770	0.00	0.000	0.770	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
29.112	3.42E-3	3.0	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
29.112	3.42E-3	3.0	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
29.461	33.00	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
29.461	33.00	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
29.782	60.80	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
29.782	60.80	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
30.270	3.86E-3	3.0	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
30.625	33.30	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
30.973	60.90	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
33.562	5.69	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
33.562	5.69	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
33.624	11.00	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
33.624	11.00	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
33.881	0.11	4.6	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
33.881	0.11	4.6	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.419	3.33	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.419	3.33	2.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.496	2.48E-2	47.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.496	2.48E-2	47.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.552	0.37	10.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.552	0.37	10.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Xe X	EC 10.5 Y
34.920	5.77	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
34.987	11.10	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
35.252	0.11	4.3	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
35.818	3.44	2.2	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
35.907	2.74E-2	47.6	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
35.972	0.45	11.4	0.781	0.00	0.000	0.781	1.000	Cs X	EC 10.5 Y
53.100	2.20	1.0	0.770	1.51E-3	0.130	0.770	1.000	<sup>133</sup> Ba	EC 10.5 Y g
53.100	2.20	1.0	0.770	1.51E-3	0.130	0.770	1.000	<sup>133</sup> Ba	EC 10.5 Y g

ΣΧΗΜΑ Β.3: Τμήμα αρχείου εξόδου του λογισμικού TrueCoinc για το ισότοπο <sup>133</sup>Ba

Cs137\_contact.txt ✕

The used total efficiency: TotalPeak\_Ge33  
The used peak efficiency: fepe\_Ge33  
The parent radioactive isotope: 137-Cs B- 30.07 Y

E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	Eff	TotEff	TrueCloss	TrueCGain		
3.954	1.37E-2	13.3	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.331	5.97E-3	10.1	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.451	3.78E-2	11.6	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.466	0.34	10.5	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.828	0.21	10.1	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.852	2.60E-2	20.0	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.927	4.49E-2	19.4	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
4.994	2.85E-3	12.1	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
5.156	7.06E-2	11.3	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
5.531	3.07E-2	11.0	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
5.797	7.60E-3	20.3	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
5.809	1.07E-2	21.0	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
31.452	2.56E-4	3.2	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
31.817	1.96	2.3	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
32.194	3.58	2.3	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
36.304	0.34	2.2	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
36.378	0.66	2.2	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
36.652	7.66E-3	4.0	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
37.255	0.20	2.1	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
37.349	1.76E-3	47.8	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
37.425	3.06E-2	10.0	1.000	0.00	0.000	1.000	1.000	Ba X	B- 30.1 Y
661.6	85.10	0.2	1.000	1.60E-3	0.204	1.000	1.000	137Cs	B- 30.1 Y g

ΣΧΗΜΑ Β.4: Τμήμα αρχείου εξόδου του λογισμικού TrueCoinc για το ισότοπο  $^{137}\text{Cs}$



```

Co57_contact.txt x
The used total efficiency: TotalPeak_Ge33
The used peak efficiency: fepe_Ge33
The parent radioactive isotope: 57-Co EC 271.79 D
E[keV] Rel.Int err[%] TrueCc Eff TotEff TrueCloss TrueCGain
0.615 6.79E-2 27.5 0.815 0.00 0.000 0.815 1.000 Fe X EC 272 D
0.628 4.70E-2 25.0 0.815 0.00 0.000 0.815 1.000 Fe X EC 272 D
0.704 0.56 24.4 0.815 0.00 0.000 0.815 1.000 Fe X EC 272 D
0.704 6.28E-2 24.5 0.815 0.00 0.000 0.815 1.000 Fe X EC 272 D
0.708 3.73E-3 27.2 0.815 0.00 0.000 0.815 1.000 Fe X EC 272 D
0.717 0.42 23.9 0.815 0.00 0.000 0.815 1.000 Fe X EC 272 D
0.792 3.17E-2 30.9 0.816 0.00 0.000 0.816 1.000 Fe X EC 272 D
0.792 1.99E-2 30.1 0.816 0.00 0.000 0.816 1.000 Fe X EC 272 D
6.391 16.50 4.9 0.814 0.00 0.000 0.814 1.000 Fe X EC 272 D
6.404 32.60 4.4 0.814 0.00 0.000 0.814 1.000 Fe X EC 272 D
7.058 3.87 4.5 0.814 0.00 0.000 0.814 1.000 Fe X EC 272 D
7.058 1.98 4.8 0.814 0.00 0.000 0.814 1.000 Fe X EC 272 D
7.108 2.05E-3 5.5 0.814 0.00 0.000 0.814 1.000 Fe X EC 272 D
14.400 9.16 1.6 0.799 0.00 0.000 0.799 1.000 57Co EC 272 D g
122.0 85.60 0.1 1.000 5.32E-3 0.205 1.000 1.000 57Co EC 272 D g
136.4 10.70 0.7 1.000 5.25E-3 0.203 1.000 1.000 57Co EC 272 D g
230.4 4.00E-4 10.0 0.646 3.96E-3 0.193 0.646 1.000 57Co EC 272 D g
339.6 3.90E-3 7.6 0.792 2.88E-3 0.195 0.792 1.000 57Co EC 272 D g
352.3 3.20E-3 9.3 0.806 2.79E-3 0.195 0.805 1.001 57Co EC 272 D g
366.8 1.30E-3 23.0 0.805 2.69E-3 0.196 0.805 1.000 57Co EC 272 D g
570.0 1.70E-2 5.8 0.802 1.82E-3 0.203 0.802 1.000 57Co EC 272 D g
692.4 0.15 6.0 1.001 1.54E-3 0.204 1.000 1.001 57Co EC 272 D g
706.5 5.30E-3 9.4 1.003 1.52E-3 0.204 1.000 1.003 57Co EC 272 D g

```

ΣΧΗΜΑ Β.5: Τμήμα αρχείου εξόδου του λογισμικού TrueCoinc για το ισότοπο <sup>57</sup>Co

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

### (U–test)

Προκειμένου να ελεγχθεί αν δύο τιμές διαφέρουν ή όχι στατιστικά σημαντικά ή να αξιολογηθεί η διασπορά τιμών σε μία ομάδα μετρήσεων χρησιμοποιείται ο στατιστικός έλεγχος “U-test”. Ο υπολογισμός της τιμής U, γίνεται από τη σχέση:

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

όπου:

$x_1, x_2$ : οι τιμές του μεγέθους x

$\delta(x_1), \delta(x_2)$ : τα απόλυτα σφάλματα των τιμών  $x_1, x_2$  αντίστοιχα.

Τιμή  $U \leq 1.95$  συνεπάγεται, ότι με βαθμό εμπιστοσύνης 95%, οι δύο τιμές δε διαφέρουν στατιστικά. Αντιθέτως, τιμές  $U \geq 2.58$  υποδεικνύουν στατιστική διαφορά μεταξύ των τιμών  $x_1, x_2$  του μεγέθους x. Σε περίπτωση που η παράμετρος U λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές (δηλαδή  $1.95 < U < 2.58$ ), δε μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.