

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΗΡGe ΛΟΓΩ ΤΟΥ
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ,
ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της

Θεοδώρας Βασιλοπούλου

Σπουδάστριας του ΔΠΜΣ

Φυσική & Τεχνολογικές Εφαρμογές του ΕΜΠ

Επίβλεψη : Μ.Ι.Αναγνωστάκης (Επ. Καθηγητής)

Συνεργασία : Κ.Α.Καρφόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής του ημιαγωγού ανιχνευτή Γερμανίου (Ge) του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.) καθώς και ο υπολογισμός των αντίστοιχων συντελεστών διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo και πιο συγκεκριμένα ο κώδικας PENELOPE. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις στην ανιχνευτική διάταξη. Πειράματα και προσομοιώσεις διεξήχθησαν για πλήθος σημειακών πηγών αλλά και για πηγές όγκου, οι οποίες ενδιαφέρουν ιδιαίτερα την ερευνητική δραστηριότητα του εργαστηρίου. Προσδιορίστηκαν οι ακριβείς διαστάσεις του κρυστάλλου του ανιχνευτή, οι τιμές των οποίων είτε δεν δίνονταν από τον κατασκευαστή είτε δίνονταν κατ'εκτίμηση. Υπολογίστηκε η απόδοση φωτοκορυφής, η ολική απόδοση και ο λόγος ολικής απόδοσης - απόδοσης φωτοκορυφής για μια σειρά ενεργειών-ισοτόπων. Εκτιμήθηκαν με χρήση του προγράμματος TrueCoinc οι συντελεστές διόρθωσης λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και εφαρμόστηκαν για τη διόρθωση της τιμής της ραδιενέργειας σε δείγμα ^{134}Cs .

Διερευνήθηκε η εξάρτηση της απόδοσης του ανιχνευτή από τις παραμέτρους της προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η επίδραση της ενεργειακής διαμέρισης που επιλέγεται στον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής. Μελετήθηκαν ακόμα φαινόμενα όπως αυτό της ακτινοβολίας πέδησης (bremsstrahlung) και αναπτύχθηκε μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης για περιπτώσεις όπου η επίδραση του φαινομένου είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συνέβαλλαν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σε σχέση με τη διαδικασία βαθμονόμησης ανιχνευτών και θα αξιοποιηθούν στην περαιτέρω δραστηριότητα του εργαστηρίου, ιδιαίτερα στη μελέτη και ανάλυση ραδιενεργών δειγμάτων όγκου.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the full-energy peak efficiency calibration of the semiconductor Germanium detector that is settled in the Nuclear Engineering Department of the National Technical University of Athens (N.E.D.-N.T.U.A.) and the calculation of the true coincidence correction factors.

The Monte Carlo simulation technique and the code PENELOPE were used for the calibration. Simulation results were compared to the results derived from experimental calculations. Experiments and simulations were carried out for several point sources as well as for volume sources, which are of great interest regarding the research activity of the particular Lab. The dimensions of the Germanium crystal of the detector, which were only estimated or not given at all by the manufacturer, were defined. Peak efficiency, total efficiency and peak to total ratio were calculated for a wide range of energies-isotopes. Using the TrueCoinc program, true coincidence correction factors were derived and then applied for the correction of the ^{134}Cs radioactivity in a volume sample.

The dependence of the peak efficiency on the simulation parameters was examined. Phenomena such as the Bremsstrahlung effect were studied while a method was developed and applied in order to take into account these effects. Useful conclusions regarding the calibration procedure were derived.

Results obtained will be used in the future research activity of the Nuclear Engineering Department of the National Technical University of Athens, especially in the gamma spectroscopic analysis of radioactive volume samples.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Σκοπός – Αντικείμενο της εργασίας.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο - ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Ορισμός της απόδοσης.....	4
2.3 Πειραματικός υπολογισμός απόδοσης.....	7
2.3.1 Υπολογισμός αποδόσεων.....	7
2.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων.....	11
2.3.3 Στατιστικός έλεγχος (U-test).....	13
2.4 Υπολογισμός απόδοσης μέσω προσομοίωσης.....	13
2.4.1 Η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo.....	13
2.4.2 Εκτίμηση αποδόσεων ανιχνευτών Γερμανίου με χρήση μεθόδων Monte Carlo.....	17
2.4.3 Κώδικας PENELOPE.....	17
2.4.3.1 Περιγραφή κώδικα PENELOPE.....	18
2.4.3.2 Χρήση κώδικα PENELOPE.....	18
2.4.3.2.1 Αρχεία εισόδου.....	19
2.4.3.2.2 Γραφικά προγράμματα gview.....	21
2.4.3.2.3 Εικονικοί ανιχνευτές.....	22
2.4.3.2.4 Αρχεία εξόδου.....	23
2.4.4 Υπολογισμός απόδοσης ανιχνευτή Ge με χρήση του κώδικα PENELOPE.....	27
2.4.4.1 Υπολογισμός αποδόσεων.....	27
2.4.4.2 Υπολογισμός της αβεβαιότητας κατά την εκτίμηση της απόδοσης.....	29
2.4.5 Επίδραση της ενεργειακής διαμέρισης στην εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης.....	31
2.4.5.1 Ενεργειακή διαμέριση.....	31
2.4.5.2 Μελέτη επίδρασης ενεργειακής διαμέρισης.....	33
Σχήματα και πίνακες 2 ^{ου} κεφαλαίου.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο - ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	42
3.1 Διάταξη ανίχνευσης της γ-ακτινοβολίας.....	42
3.1.1 Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	42
3.1.2 Θωράκιση ανιχνευτή Γερμανίου.....	44
3.2 Διαδικασία προσδιορισμού διαστάσεων ανιχνευτή HPGe.....	45
3.2.1 Αναγκαιότητα προσδιορισμού διαστάσεων.....	45
3.2.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού διαστάσεων.....	46
3.2.2.1 Πειράματα με σημειακές πηγές.....	48
3.2.2.2 Προσομοιώσεις με τον κώδικα PENELOPE.....	52
3.2.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων-προσομοιώσεων.....	60
3.2.3 Έλεγχος με γεωμετρίες όγκου.....	63

3.2.3.1 Πειράματα με πηγές όγκου.	64
3.2.3.2 Προσομοιώσεις με πηγές όγκου γεωμετρίας ‘2’ και ‘5’	68
3.2.4 Επανελέγχος με γεωμετρία σημειακών πηγών.	72
3.2.5 Επιλογή της τελικής γεωμετρίας του ανιχνευτή.	76
Σχήματα και πίνακες 3 ^{ου} κεφαλαίου	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο - ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΗΡGe ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE-CARLO	86
4.1 Γενικά.....	86
4.2 Εκτίμηση αποδόσεων και λόγου ολικής προς απόδοση αιχμής.	87
4.2.1 Εκτίμηση αποδόσεων και λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής για σημειακές πηγές.	88
4.2.2 Εκτίμηση αποδόσεων και λόγου ολικής προς απόδοση αιχμής για πηγές όγκου.....	91
4.3 Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου ακτινοβολίας πέδησης κατά τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης.....	94
4.3.1 Μεθοδολογία διερεύνησης.....	95
4.3.2 Προσομοίωση με προσέγγιση δέσμης μονοενεργειακών σωματιδίων-β.....	98
4.3.3 Προσομοίωση με συνεχές φάσμα σωματιδίων-β.....	100
4.3.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων-συμπεράσματα μελέτης ακτινοβολίας πεδήσεως.	104
Σχήματα και πίνακες 4 ^{ου} κεφαλαίου	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο - ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ.....	111
5.1 Πραγματική σύμπτωση.	111
5.2 Διόρθωση λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.	114
5.3 Συντελεστές διόρθωσης λόγω πραγματικής σύμπτωσης.	116
5.4 Το πρόγραμμα TrueCoinc εκτίμησης του συντελεστή διόρθωσης.....	121
5.5 Εκτίμηση συντελεστών διόρθωσης για το ισότοπο ¹³⁴ Cs.....	127
5.5.1 Πηγή ¹³⁴ Cs.	127
5.5.2 Διαδικασία διόρθωσης ραδιενέργειας ¹³⁴ Cs.	130
5.5.2.1 Πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) του ανιχνευτή ΗΡGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.	131
5.5.2.2 Προσδιορισμός της καμπύλης ολικής απόδοσης του ανιχνευτή ΗΡGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.....	132
5.5.2.3 Διόρθωση της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency).	137
5.5.2.4 Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης για την περίπτωση του ¹³⁴ Cs...	141
5.5.2.5 Τελική διόρθωση της υπολογιζόμενης ραδιενέργειας του ¹³⁴ Cs.	141
5.5.3 Διαδικασία διόρθωσης ραδιενέργειας ¹³⁴ Cs λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως.	144
5.5.3.1 Πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) του ανιχνευτή ΗΡGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.	144
5.5.3.2 Προσδιορισμός της καμπύλης ολικής απόδοσης του ανιχνευτή ΗΡGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. (λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως).	145
5.5.3.3 Διόρθωση της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως.	148
5.5.3.4 Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης για την περίπτωση του ¹³⁴ Cs...	150
5.5.3.5 Τελική διόρθωση της υπολογιζόμενης ραδιενέργειας του ¹³⁴ Cs.	150
5.5.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα.	152

5.6 Εξάρτηση του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής από τη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτικής διάταξης.	155
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	160
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΚΩΔΙΚΑΣ ΡΕΝΜΑΙΝ.....	168
Α.1 Αρχεία εξόδου του κώδικα ΡΕΝΜΑΙΝ.	168
Α.2 Πρόγραμμα γραφικής απεικόνισης Shower.....	173
Α.3 Βιβλιοθήκες δεδομένων.	174
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ.....	176
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	181
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ-ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ TrueCoinc	183
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε – ΣΥΝΕΧΕΣ ΦΑΣΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ⁴⁰ Κ.....	207

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός – Αντικείμενο της εργασίας.

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) ήταν ο προσδιορισμός συντελεστών διόρθωσης λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) το οποίο παρουσιάζεται σε ανιχνευτές γερμανίου. Το φαινόμενο παρουσιάζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων με ανιχνευτές γερμανίου, όταν προσπίπτουν στον ανιχνευτή δύο φωτόνια συγχρόνως, οπότε ο ανιχνευτής δεν είναι δυνατόν να τα διακρίνει. Η εργασία εστίασε στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό συντελεστών διόρθωσης για έναν ανιχνευτή Γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium Detector – HPGe) του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Οι συντελεστές διόρθωσης εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και του δείγματος και τη σχετική τους θέση, καθώς και από το συγκεκριμένο ισότοπο και τα φωτόνια που ανιχνεύονται. Για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης απαιτείται η γνώση της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία δείγματος-ανιχνευτή και τα συγκεκριμένα φωτόνια που ανιχνεύονται. Ενώ η απόδοση φωτοκορυφής για μία συγκεκριμένη ενέργεια μπορεί να προσδιορισθεί σχετικά εύκολα πειραματικά, ο προσδιορισμός της ολικής απόδοσης ενός ανιχνευτή για μία ενέργεια είναι πολύ δυσκολότερος ή και αδύνατος πειραματικά. Ο προσδιορισμός της ολικής απόδοσης μπορεί να γίνει με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo. Για την εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo, πρέπει να είναι γνωστά με ικανοποιητική ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτικού συστήματος, κάτι που πολύ συχνά δεν ισχύει, όπως για παράδειγμα για τον ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Στα πλαίσια της ΔΕ εφαρμόσθηκε μία μεθοδολογία η οποία συνδυάζει την τεχνική προσομοίωσης και το πείραμα, προκειμένου να οδηγήσει σε εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή που δεν ήταν γνωστά. Για την προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας PENELOPE.

Στο 2^ο Κεφάλαιο της ΔΕ περιγράφονται οι μεθοδολογίες υπολογισμού των αποδόσεων ενός ανιχνευτή. Ξεκινώντας από τον ορισμό των ζητούμενων μεγεθών της

απόδοσης αιχμής, της ολικής απόδοσης και του λόγου απόδοσης αιχμής προς ολική απόδοση, περιγράφεται η διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού των εν λόγω μεγεθών καθώς και των αντίστοιχων σφαλμάτων. Ακόμα, παρουσιάζεται αναλυτικά η τεχνική Monte Carlo και ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE. Περιγράφεται η διαδικασία των προσομοιώσεων και ο υπολογισμός της απόδοσης του ανιχνευτή με χρήση προσομοίωσης. Παρουσιάζεται ακόμα η μελέτη επίδρασης της ενεργειακής διαμέρισης, μίας παραμέτρου που επιλέγεται κατά τη διαδικασία προσομοίωσης, στην τιμή των αποδόσεων που εκτιμώνται μέσω προσομοίωσης.

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία προσδιορισμού των διαστάσεων του ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η λεπτομερής γνώση της γεωμετρίας του ανιχνευτή είναι απαραίτητη προκειμένου να είναι δυνατή η πλήρης περιγραφή του στα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης, ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα αξιόπιστα και ακριβή. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΕ είναι στην πραγματικότητα μία επαναληπτική διαδικασία, όπου επιχειρείται η ρύθμιση ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να συμπίπτουν με ικανοποιητική ακρίβεια με αντίστοιχα πειραματικά. Το στάδιο αυτό είναι το πρώτο βήμα και ταυτόχρονα αναγκαία προϋπόθεση για την εκτίμηση των αποδόσεων μέσω της τεχνικής της προσομοίωσης. Την αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού των διαστάσεων, η οποία περιλαμβάνει τόσο σημειακές όσο και πηγές όγκου, ακολουθεί η παρουσίαση των τελικών εκτιμήσεων για τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται ο προσδιορισμός της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή HPGe, με χρήση της τεχνικής προσομοίωσης. Ο πειραματικός προσδιορισμός του ολικού βαθμού απόδοσης για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων, μέσω της συνεχούς συνιστώσας του γ-φάσματος, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, αφενός λόγω της μικρής διαθεσιμότητας μονοενεργειακών πηγών και μάλιστα σε συγκεκριμένη γεωμετρία, αφετέρου εξαιτίας της ανίχνευσης στο συνεχές γ-φάσμα και ακτινοβολίας που δεν οφείλεται στα φωτόνια της υπόψη ενέργειας. Μία τέτοια ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία πεδήσεως η οποία καταγράφεται στο γ-φάσμα, η οποία όμως δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της ολικής απόδοσης. Στο Κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης μέσω της τεχνικής προσομοίωσης και διερευνάται η επίδραση του φαινομένου της ακτινοβολίας πέδησης στη διαμόρφωση του συνεχούς φάσματος της ακτινοβολίας-γ που συλλέγεται από τον ανιχνευτή HPGe.

Το 5^ο Κεφάλαιο πραγματεύεται το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τη διόρθωση λόγω του συγκεκριμένου φαινομένου. Παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) με χρήση του προγράμματος TrueCoinc. Ως εφαρμογή, υπολογίζονται οι συντελεστές διόρθωσης για τα φωτόνια του ^{134}Cs , για τον ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ και για τυποποιημένη γεωμετρία δείγματος-ανιχνευτή. Το ^{134}Cs επελέγη γιατί πρόκειται για ισότοπο με πολύπλοκο σχήμα διάσπασης, για το οποίο εν γένει απαιτούνται μεγάλες διορθώσεις λόγω πραγματικής σύμπτωσης. Οι συντελεστές διόρθωσης που υπολογίσθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας ^{134}Cs δείγματος με το οποίο το ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει συμμετάσχει σε Διεθνή Άσκηση Διαβαθμονόμησης. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και γραφήματα των λόγων peak-to-total και total-to-peak για όλες τις ενέργειες φωτονίων και γεωμετρίες που υπολογίσθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ. Από τα γραφήματα αυτά προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Τα τελικά συμπεράσματα της ΔΕ παρουσιάζονται στο 6^ο Κεφάλαιο, όπου παρατίθενται και ορισμένες σκέψεις-προτάσεις για το μέλλον.

Η ΔΕ ολοκληρώνεται με τη βιβλιογραφία και μία σειρά από πέντε Παραρτήματα, στα οποία παρατίθενται τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, συμπληρωματικοί πίνακες, πιστοποιητικά πηγών-ανιχνευτή, επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες του κώδικα PENELOPE καθώς και τα αρχεία εξόδου του προγράμματος TrueCoinc.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή.

Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενός ανιχνευτή Γερμανίου (Ge) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του, το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την χρησιμότητά του. Υπάρχουν διάφορα μεγέθη τα οποία εκφράζουν την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενός ανιχνευτή, όπως η *απόδοση φωτοκορυφής*, η *ολική απόδοση*, η *εσωτερική απόδοση*, η *σχετική απόδοση* κ.α. Δεδομένου ότι η απόδοση, ανεξαρτήτως του ορισμού της, εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων, όπως θα φανεί στη συνέχεια, αυτή δεν είναι γνωστή εξ αρχής για έναν ανιχνευτή. Η απόδοση που θα χρησιμοποιήσει ο χρήστης για την ανάλυση δειγμάτων συγκεκριμένης γεωμετρίας δεν είναι ένα χαρακτηριστικό που δίδεται και πιστοποιείται από τον κατασκευαστή. Ο χρήστης, ανάλογα με τη συγκρότηση της ανιχνευτικής διάταξης και τη γεωμετρία δείγματος-ανιχνευτή που πρόκειται να χρησιμοποιήσει, πρέπει να εκτιμά την απόδοση του ανιχνευτή, η οποία επιπλέον εξαρτάται και από την ενέργεια των φωτονίων που ανιχνεύονται. Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης διαιρούνται εν γένει σε δύο κατηγορίες: πειραματικές μεθοδολογίες και μεθοδολογίες που στηρίζονται στην προσομοίωση με χρήση τεχνικών Monte-Carlo.

2.2 Ορισμός της απόδοσης.

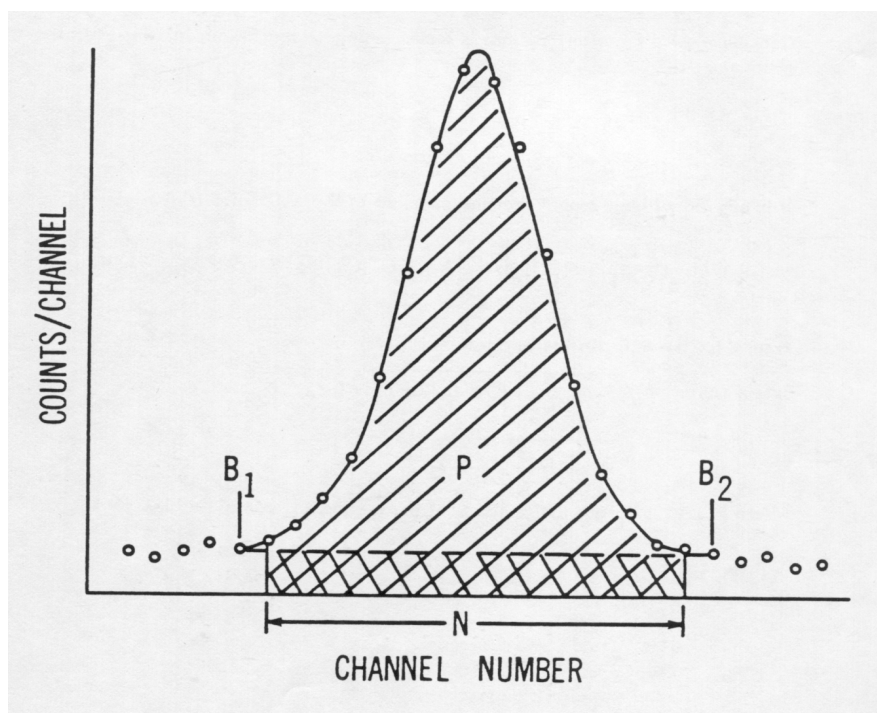
Μεταξύ των μεγεθών τα οποία εκφράζουν την απόδοση μίας διάταξης ανίχνευσης φωτονίων, δύο είναι τα σημαντικότερα:

- i. Η απόδοση φωτοκορυφής (peak efficiency)
- ii. Η συνολική απόδοση (total efficiency)

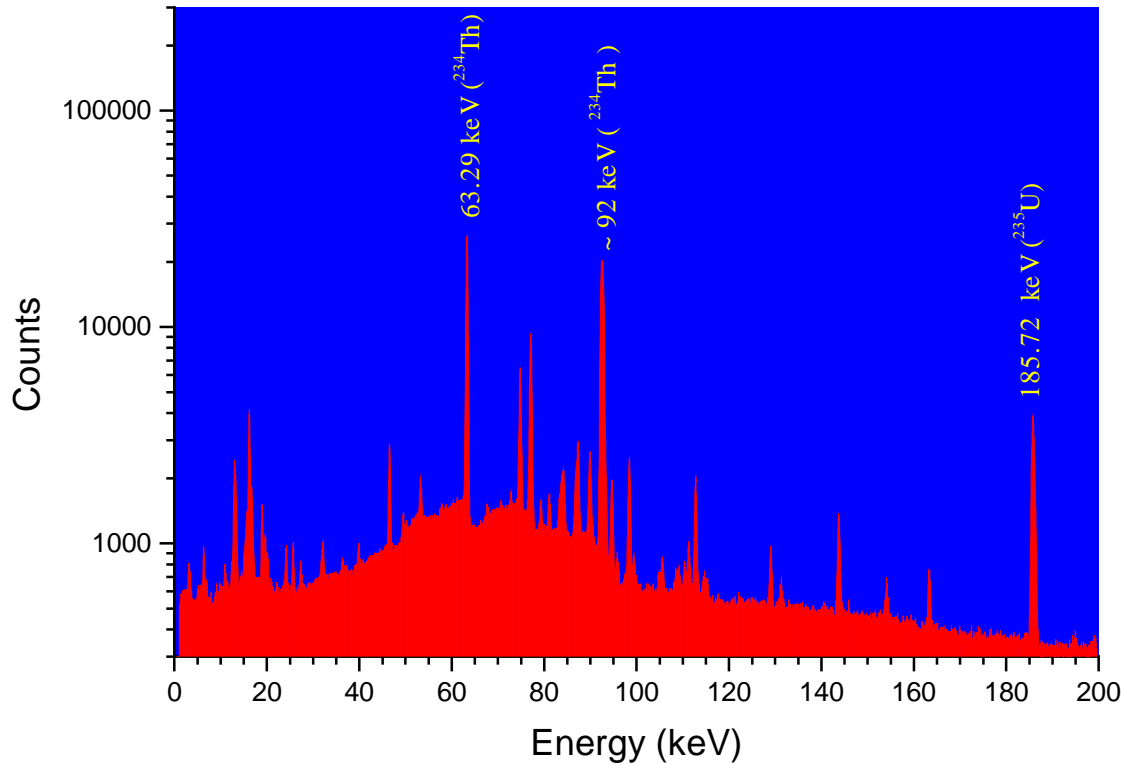
Η απόδοση φωτοκορυφής (ή απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής) εκφράζει την ικανότητα ενός ανιχνευτή να ανιχνεύει πλήρως την ενέργεια ενός φωτονίου, συγκεκριμένης αρχικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, το φωτόνιο κατά την αλληλεπίδραση με τον ανιχνευτή αποθέτει σε αυτόν ολόκληρη την ενέργειά του. Όλα

τα φωτόνια της ίδιας αρχικής ενέργειας που αποθέτουν στον ανιχνευτή όλη την ενέργειά τους καταγράφονται στο ενεργειακό φάσμα που συλλέγεται κάτω από την αντίστοιχη φωτοκορυφή (σχήμα 2.1). Ο λόγος του πλήθους των φωτονίων που αποδίδουν στον ανιχνευτή όλη την ενέργειά τους και συνεπώς καταγράφονται κάτω από τη φωτοκορυφή (επιφάνεια της φωτοκορυφής), προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή φωτονίων, ορίζεται ως απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency). Η απόδοση φωτοκορυφής είναι το μέγεθος εκείνο που επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός ραδιενεργού ισότοπου που ανιχνεύεται κατά την ανάλυση ενός δείγματος, από την ανάλυση του ενεργειακού φάσματος των ακτίνων-γ που αυτό εκπέμπει.

Στο σχήμα 2.1 απεικονίζεται μια τέτοια φωτοκορυφή. Το γραμμοσκιασμένο τμήμα είναι το εμβαδόν (επιφάνεια) της φωτοκορυφής ενώ τα σημεία B1, B2 είναι τα όρια της φωτοκορυφής, με βάση τα οποία περιγράφεται και η επιφάνειά της. Στο σχήμα 2.2 που ακολουθεί παρατίθεται ένα ενεργειακό φάσμα των ακτίνων-γ, όπως έχει αναλυθεί στη διάρκεια μετρήσεων γ-φασματοσκοπίας. Ανάμεσα στις πολλές αιχμές που διακρίνονται στο φάσμα, ξεχωρίζουν τρεις, οι οποίες έχουν ταυτοποιηθεί, έχει δηλαδή προσδιοριστεί το ισότοπο στο οποίο αντιστοιχούν (σημειώνεται με κίτρινο δίπλα ακριβώς σε κάθε φωτοκορυφή η ενέργειά της και το αντίστοιχο ισότοπο).



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση φωτοκορυφής ενεργειακού φάσματος



Σχήμα 2.2 Ενεργειακό φάσμα

Η συνολική απόδοση (ή ολική απόδοση) εκφράζει την ικανότητα ενός ανιχνευτή να ανιχνεύει έστω και ένα κλάσμα της ενέργειας ενός φωτονίου, συγκεκριμένης αρχικής ενέργειας. Το φωτόνιο κατά την αλληλεπίδραση με τον ανιχνευτή αποθέτει σε αυτόν κλάσμα της ενέργειάς του, π.χ. μετά από σκέδαση Compton. Το φωτόνιο αυτό θα καταγραφεί στο ενεργειακό φάσμα που συλλέγεται από τον ανιχνευτή σε θέση που αντιστοιχεί σε ενέργεια χαμηλότερη της αρχικής ενέργειας του φωτονίου. Ο λόγος του πλήθους των φωτονίων που αποδίδουν στον ανιχνευτή τουλάχιστον ένα κλάσμα της ενέργειάς τους και συνεπώς καταγράφονται στο φάσμα σε τυχαία θέση, προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή φωτονίων, ορίζεται ως ολική απόδοση (total efficiency). Είναι προφανές ότι για δεδομένη ανιχνευτική διάταξη, γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και ενέργεια φωτονίου, η απόδοση φωτοκορυφής είναι πάντα μικρότερη της ολικής απόδοσης.

Πέραν των δύο αποδόσεων που αναφέρθηκαν, ορίζεται επίσης, ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής προς την ολική απόδοση (peak to total ratio) καθώς και ο (αντίστροφος) λόγος της ολικής προς την απόδοση φωτοκορυφής (total to peak ratio). Πρόκειται για μεγέθη που συσχετίζουν τις δύο αποδόσεις και χρησιμοποιούνται

κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο υπολογισμός των αποδόσεων ανεξάρτητα είναι εξαιρετικά πολύπλοκος ή αδύνατος, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο.

2.3 Πειραματικός υπολογισμός απόδοσης.

2.3.1 Υπολογισμός αποδόσεων.

Ο πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης για μία συγκεκριμένη ενέργεια, στηρίζεται στη χρήση πηγής γνωστής ραδιενέργειας, η οποία εκπέμπει φωτόνια της συγκεκριμένης ενέργειας και η οποία έχει την ίδια γεωμετρία με το δείγμα που πρόκειται να αναλυθεί. Η πηγή τοποθετείται στη θέση στην οποία προβλέπεται να τοποθετηθεί το προς ανάλυση δείγμα και λαμβάνεται φάσμα, για επαρκές χρονικό διάστημα. Εν συνεχεία, η απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής (absolute photopeak efficiency) υπολογίζεται μέσω του τύπου

$$Eff_{peak} = \frac{cps}{gps} \quad (2.1)$$

όπου

Eff_{peak} : η απόδοση φωτοκορυφής (peak efficiency) του ανιχνευτή

cps : ο ρυθμός των ανιχνευόμενων κρούσεων (counts per second) και

gps : ο ρυθμός των εκπεμπόμενων από την πηγή ακτίνων-γ (gammas per second)

Σημειώνεται ότι ο όρος «ανιχνευόμενες κρούσεις» χρησιμοποιείται στη γ-φασματοσκοπία για να υποδηλώσει την καταγραφή γεγονότων, φωτονίων από τον ανιχνευτή, ισοδυναμεί δηλαδή με την έκφραση «ανιχνευόμενα φωτόνια».

Ο ρυθμός των εκπεμπόμενων από την πηγή ακτίνων-γ είναι ουσιαστικά ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου, οπότε το μέγεθος gps (gammas per second) μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

$$gps = A \times f_{\gamma} \quad (2.2)$$

όπου

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

f_{γ} : ο αριθμός των εκπεμπόμενων ακτίνων-γ ανά διάσπαση (yield)

Με δεδομένο ότι ο ρυθμός των ανιχνευόμενων κρούσεων ισούται με τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφει ο ανιχνευτής στη μονάδα του χρόνου, το μέγεθος cps γράφεται:

$$cps = \frac{N}{t} \quad (2.3)$$

όπου:

N : η καθαρή επιφάνεια / εμβαδόν της φωτοκορυφής (Area)

t : ο χρόνος μέτρησης

Συνδυάζοντας τις τρεις σχέσεις, η απόδοση φωτοκορυφής υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$Eff_{peak} = \frac{N}{(A \times f_{\gamma} \times t)} \quad (2.4)$$

Με γνωστές τις τιμές του yield και της ενεργότητας της πηγής, η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή υπολογίζεται πειραματικά καταγράφοντας από το αντίστοιχο φάσμα –με κατάλληλο πρόγραμμα επεξεργασίας- το εμβαδόν της φωτοκορυφής και το χρόνο μέτρησης του δείγματος.

Όσον αφορά την ολική απόδοση, η μεθοδολογία πειραματικού προσδιορισμού παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Η εκτίμηση του πλήθους των φωτονίων τα οποία αποθέτουν τμήμα μόνο της ενέργειάς τους στον ανιχνευτή, και κατά συνέπεια καταγράφονται σε τυχαία θέση στο φάσμα, καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη, αν όχι αδύνατη, στην περίπτωση που η πηγή που χρησιμοποιείται εκπέμπει φωτόνια σε περισσότερες από μία ενέργειες (συμπεριλαμβανομένων και των ακτίνων-X), κάτι που είναι εξαιρετικά συνηθισμένο. Για την περίπτωση μονοενεργειακής πηγής φωτονίων τα πράγματα είναι απλούστερα, καθώς μπορεί να θεωρηθεί με μεγάλη ακρίβεια ότι όλο το συνεχές φάσμα οφείλεται σε φωτόνια της αρχικής ενέργειας που έχουν αποθέσει στον ανιχνευτή τμήμα της ενέργειάς τους. Επισημαίνεται ότι αυτό ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια εφόσον το φάσμα είναι μικρής διάρκειας (δηλαδή η πηγή είναι αρκετά ισχυρή), έτσι ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η συνεισφορά του υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης. Εναλλακτικά, το συνεχές υπόστρωμα θα πρέπει να αφαιρεθεί κατάλληλα.

Για τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.4), όπου αντί για την επιφάνεια φωτοκορυφής χρησιμοποιείται η συνολική επιφάνεια του φάσματος.

Πολύ συχνά, αντί για τον ανεξάρτητο υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης, εκτιμάται ο λόγος peak to total (ptt) και ισοδύναμα ο αντίστροφος λόγος total to peak (ttp). Ο υπολογισμός αυτός έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητος από μεγέθη όπως το ποσοστό εκπομπής. Σύμφωνα με τους ορισμούς των δύο παραπάνω μεγεθών ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις:

$$ptt = \frac{Eff_{peak}}{Eff_{total}} \quad \text{και} \quad ttp = \frac{Eff_{total}}{Eff_{peak}} \quad (2.5)$$

Εκτός από τον προφανή τρόπο διαίρεσης, ο οποίος μπορεί βέβαια να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περιπτώσεις μονοενεργειακών πηγών (όπου μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή της ολικής απόδοσης), οι τιμές των λόγων μπορούν να υπολογιστούν και με μία δεύτερη μέθοδο, η οποία καλύπτει όλες τις περιπτώσεις πηγών και μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα κι αν ο προσδιορισμός της τιμής της ολικής απόδοσης είναι ανέφικτος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ανάλογοι μαθηματικοί τύποι (σχέσεις 2.6-2.7) εμπλέκουν μόνο εμβαδά, δηλαδή αριθμούς ανιχνευόμενων κρούσεων / φωτονίων, που εύκολα υπολογίζονται από το φάσμα.

$$ptt = \frac{Area_{peak}}{Area_{total}} = \frac{N}{Area_{total}} \quad (2.6)$$

και

$$ttp = \frac{Area_{total}}{Area_{peak}} = \frac{Area_{total}}{N} \quad (2.7)$$

όπου

ptt : ο λόγος της απόδοσης αιχμής προς την ολική απόδοση (peak to total ratio)

ttp : ο λόγος της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής (total to peak ratio)

$Area_{peak}$: η επιφάνεια / εμβαδόν της φωτοκορυφής (N)

$Area_{total}$: η συνολική επιφάνεια / εμβαδόν του φάσματος

Χρειάζεται στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι στις αναλύσεις των δειγμάτων πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη το υπόστρωμα (background) καθώς συνεισφέρει και αυτό στο συνολικό αριθμό κρούσεων που καταγράφονται. Ως υπόστρωμα ορίζεται ο αριθμός των φωτονίων που κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης ανιχνεύονται και καταγράφονται στο φάσμα, χωρίς να προέρχονται από την υπό μελέτη πηγή. Η “ακτινοβολία υποστρώματος” ή “ακτινοβολία υποβάθρου”, όπως

συνήθως ονομάζεται, μπορεί να είναι αποτέλεσμα ενός ή περισσότερων παραγόντων, όπως είναι η κοσμική ακτινοβολία, η ακτινοβολία του περιβάλλοντος χώρου (οικοδομικά υλικά, συσκευές κ.α.), ακόμα και η ακτινοβολία που προέρχεται από άλλα ραδιενεργά δείγματα που βρίσκονται ενδεχομένως στον ίδιο χώρο με την ανιχνευτική διάταξη. Αυτό που απεικονίζεται λοιπόν σε ένα φάσμα περιλαμβάνει όλες τις κρούσεις, δηλαδή όλα τα φωτόνια που έχουν καταγραφεί ανεξαρτήτως προέλευσης. Στους υπολογισμούς, όμως, πρέπει να χρησιμοποιείται ο «καθαρός» αριθμός κρούσεων που προέρχονται αποκλειστικά από το υλικό-πηγή, ο οποίος προκύπτει από το συνολικό αριθμό κρούσεων με αφαίρεση αυτών που οφείλονται στην ακτινοβολία υποβάθρου.

$$Area = Counts_{spectrum} - Counts_{background} \quad (2.8)$$

όπου

$Area$: η «καθαρή» επιφάνεια, που αντιστοιχεί στον «καθαρό» αριθμό κρούσεων

$Counts_{spectrum}$: ο συνολικός αριθμός κρούσεων που καταγράφονται στο φάσμα και

$Counts_{background}$: ο αριθμός των κρούσεων του υποστρώματος

Η παρατήρηση αυτή αφορά και τις δύο επιφάνειες (φωτοκορυφής και ολική) καθώς και στις δύο πρέπει να αντανακλάται ο «καθαρός» αριθμός φωτονίων, απαλλαγμένος από την ακτινοβολία υποβάθρου. Έτσι, με βάση τη σχέση (2.8) έχουμε

$$Area_{peak} = Counts_{peakspectrum} - Counts_{peakbackground} \quad (2.9)$$

και

$$Area_{total} = Counts_{totalspectrum} - Counts_{totalbackground} \quad (2.10)$$

για την επιφάνεια φωτοκορυφής και την ολική επιφάνεια αντίστοιχα.

Εφόσον, το υπόστρωμα σχηματίζεται –όπως έχει ήδη γίνει κατανοητό– ακόμα κι αν δεν «μετράται» στον ανιχνευτή κάποιο δείγμα, τα μεγέθη $Counts_{totalbackground}$ και $Counts_{peakbackground}$ μπορούν να καταγραφούν από το φάσμα μιας ισόχρονης μέτρησης που έχει γίνει χωρίς να υπάρχει πηγή στον ανιχνευτή (μέτρηση υποστρώματος). Όσον αφορά στα μεγέθη $Counts_{peakspectrum}$ και $Counts_{totalspectrum}$, αυτά εκτιμώνται κατά την ανάλυση του φάσματος της πηγής. Στη συνέχεια, με βάση τις σχέσεις (2.9)-(2.10), υπολογίζεται με «αφαίρεση» των δύο φασμάτων (για την ακρίβεια των εμβადών που έχουν καταγραφεί στα δύο φάσματα) τα ζητούμενα μεγέθη $Area_{peak}$ και $Area_{total}$.

Σημειώνεται ότι -ακόμα κι αν αυτό δεν διατυπώνεται ρητά κάθε φορά- σε όλους ανεξαιρέτως τους πειραματικούς υπολογισμούς της παρούσας εργασίας όπου εμπλέκονται τα μεγέθη $Area_{peak}$ και $Area_{total}$, χρησιμοποιούνται οι «καθαρές» τιμές που έχουν προκύψει μετά την αφαίρεση της ακτινοβολίας υποβάθρου.

2.3.2 Υπολογισμός σφαλμάτων.

Οι εκτιμήσεις των τιμών της απόδοσης (φωτοκορυφής και ολικής) που θα γίνουν στα πλαίσια της ΔΕ θα πρέπει να συνοδεύονται και από εκτίμηση της αβεβαιότητας (σφάλμα). Το σφάλμα που συνοδεύει μία τιμή επιτρέπει την αξιολόγησή της και του αντίστοιχου πειράματος. Επιπλέον, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που πρέπει να γίνεται σύγκριση μεγεθών (π.χ. μεταξύ πειραματικών και τιμών προσομοίωσης), η τιμή κάθε μεγέθους πρέπει οπωσδήποτε να συνοδεύεται από το αντίστοιχο σφάλμα, ώστε να μπορεί με τρόπο μεθοδολογικά σωστό να εκτιμηθεί αν τα μεγέθη διαφέρουν σημαντικά ή αν η απόκλισή τους βρίσκεται μέσα στα όρια του σφάλματος, δηλαδή δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Για να περιγραφεί λοιπόν πλήρως ένα μέγεθος, χρειάζεται μαζί με την τιμή που υπολογίζεται να εκτιμάται και το αντίστοιχο σφάλμα.

Στην παράγραφο αυτή κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των διαφόρων σφαλμάτων. Ως αφετηρία αξιοποιούνται οι βασικοί τύποι της θεωρίας σφαλμάτων, οι οποίοι θεωρούνται γνωστοί. Η εκκίνηση για να προσδιορισθεί το σφάλμα της πειραματικής τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής, γίνεται από τη σχέση (2.4).

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

Το πρώτο βήμα αφορά τον εντοπισμό των μεγεθών των οποίων η τιμή έχει σφάλμα. Θεωρώντας πως σφάλμα έχουν μόνο οι τιμές των μεγεθών N και A , το σχετικό σφάλμα (γνωστό και ως συντελεστής μεταβολής) της τιμής της απόδοσης αιχμής $\sigma(Eff_{peak})$ θα υπολογίζεται με βάση τον τύπο

$$\sigma(Eff_{peak}) = \sqrt{(\sigma N)^2 + (\sigma A)^2} \quad (2.11)$$

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.

Υπενθυμίζεται ότι το σχετικό σφάλμα $\sigma(Eff_{peak})$ συνδέεται με το απόλυτο σφάλμα $\delta(Eff_{peak})$ μέσω της σχέσης

$$\sigma(Eff_{peak}) = \frac{\delta(Eff_{peak})}{Eff_{peak}} \quad (2.12)$$

Με τρόπο αντίστοιχο υπολογίζεται και το σχετικό σφάλμα των λόγων peak to total $\sigma(ptt)$ και total to peak $\sigma(ttp)$, το οποίο θα είναι ίδιο και για τα δύο μεγέθη

$$\sigma(ptt) = \sigma(ttp) = \sqrt{(\sigma(Eff_{peak}))^2 + (\sigma(Eff_{total}))^2} \quad (2.13)$$

όπου

$\sigma(Eff_{total})$ είναι το σχετικό σφάλμα στην τιμή της ολικής απόδοσης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως θα φανεί στο 5^ο Κεφάλαιο, απαιτείται ο υπολογισμός του σφάλματος του μεγέθους $\ln(ttp)$. Σύμφωνα με τη θεωρία σφαλμάτων, το απόλυτο σφάλμα θα δίνεται από τον τύπο

$$\delta(\ln(ttp)) = \frac{\delta(ttp)}{ttp} = \sigma(ttp) \quad (2.14)$$

οπότε το αντίστοιχο σχετικό σφάλμα θα είναι

$$\sigma(\ln(ttp)) = \frac{\delta(\ln(ttp))}{\ln(ttp)} = \frac{\sigma(ttp)}{\ln(ttp)} \quad (2.15)$$

Για την έκφραση των σφαλμάτων χρησιμοποιείται συχνά και το % σχετικό σφάλμα, το οποίο δεν είναι τίποτα άλλο από το σχετικό σφάλμα πολλαπλασιασμένο επί εκατό. Το % σχετικό σφάλμα συνδέεται με το απόλυτο σφάλμα μέσω του τύπου

$$\% \sigma(x) = 100 \times \sigma(x) = 100 \times \frac{\delta(x)}{x} \quad (2.16)$$

Με βάση τις σχέσεις (2.11-2.16) υπολογίζονται τα σφάλματα των μελετώμενων μεγεθών. Σημειώνεται ότι όλα τα σφάλματα που αναφέρονται στη συνέχεια της εργασίας είναι τα % σχετικά σφάλματα (σε επίπεδο 1σ), εκτός αν διατυπώνεται ρητά το αντίθετο.

2.3.3 Στατιστικός έλεγχος (U-test).

Προκειμένου να ελεγχθεί αν δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά ή να εκτιμηθεί η διασπορά των τιμών σε μια ομάδα μετρήσεων χρησιμοποιείται ο στατιστικός έλεγχος, γνωστός ως “U-test”. Η τιμή “U”, δίνεται από τον τύπο

$$U = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{(\delta(x_1))^2 + (\delta(x_2))^2}} \quad (2.17)$$

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 $U \leq 1.95$ σημαίνει ότι, με βαθμό εμπιστοσύνης 95%, οι δύο τιμές δε διαφέρουν στατιστικά. Αντίθετα, τιμή του $U \geq 2.58$ υποδεικνύει στατιστική διαφορά μεταξύ των τιμών x_1 και x_2 . Για ενδιάμεσες τιμές της παραμέτρου U δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

2.4 Υπολογισμός απόδοσης μέσω προσομοίωσης.

2.4.1 Η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo.

Στην προσομοίωση της μετάδοσης της ακτινοβολίας στην ύλη με τη μέθοδο Monte Carlo, η ιστορία ενός σωματιδίου αντιμετωπίζεται ως μια τυχαία ακολουθία από ελεύθερες διαδρομές, όπου κάθε μία ολοκληρώνεται με μια αλληλεπίδραση του σωματιδίου. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή της κατεύθυνσης κίνησης του σωματιδίου, σε απώλεια μέρους της ενέργειάς του και –σε ορισμένες περιπτώσεις- σε παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων. Η επανάληψη της διαδικασίας συνεχίζεται μέχρι να χάσει το σωματίδιο όλη την ενέργειά του ή να εξέλθει των ορίων του συστήματος. Με το πέρας της ιστορίας, καταγράφονται τα διάφορα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοση-πορεία του σωματιδίου (π.χ. ενέργεια που απέθεσε σε συγκεκριμένη θέση στο χώρο, γωνία εισόδου ή εξόδου από ορισμένη επιφάνεια κ.α.). Εξυπακούεται ότι η διαδικασία προσομοίωσης μιας ιστορίας στηρίζεται σε μοντέλα αλληλεπίδρασης σωματιδίων με την ύλη, τα οποία λαμβάνουν υπ’όψιν τους

φυσικούς νόμους και μηχανισμούς που διέπουν μια αλληλεπίδραση. Υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των παραγόμενων ιστοριών είναι αρκετά μεγάλος, οι μέσες τιμές των φυσικών μεγεθών που καταγράφονται με την ολοκλήρωση κάθε ιστορίας προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια.

Η δημιουργία μίας ιστορίας στηρίζεται στη διαδικασία της στατιστικής δειγματοληψίας, η οποία υλοποιείται με την επιλογή τυχαίων αριθμών, μία διαδικασία που μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχη με τη ρίψη ενός ζαριού σε ένα καζίνο, εξ ου και η ονομασία “Monte Carlo”. Σε ότι αφορά την κίνηση των σωματιδίων, η τεχνική Monte Carlo είναι εξαιρετικά ρεαλιστική, θα μπορούσε να εκληφθεί ως ένα θεωρητικό πείραμα. Συνίσταται στην παρακολούθηση της πορείας καθενός από τα σωματίδια που προέρχονται από μια πηγή, ακολουθώντας όλη τη διαδρομή της «ζωής» ενός σωματιδίου μέσα στην ύλη έως το «θάνατό» του σε κάποια τερματική κατηγορία (απορρόφηση, διαφυγή κλπ.).

Τα ξεχωριστά πιθανά γεγονότα που αποτελούν μια διαδικασία προσομοιώνονται διαδοχικά. Με βάση προκαθορισμένες κατανομές πιθανότητας (Probability Distribution Functions) τα χαρακτηριστικά του σωματιδίου ή του φωτονίου επιλέγονται τυχαία σε κάθε βήμα «ζωής»-πορείας του σωματιδίου. Μια τέτοια «ιστορία» ενός σωματιδίου μέσα στην ύλη απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.

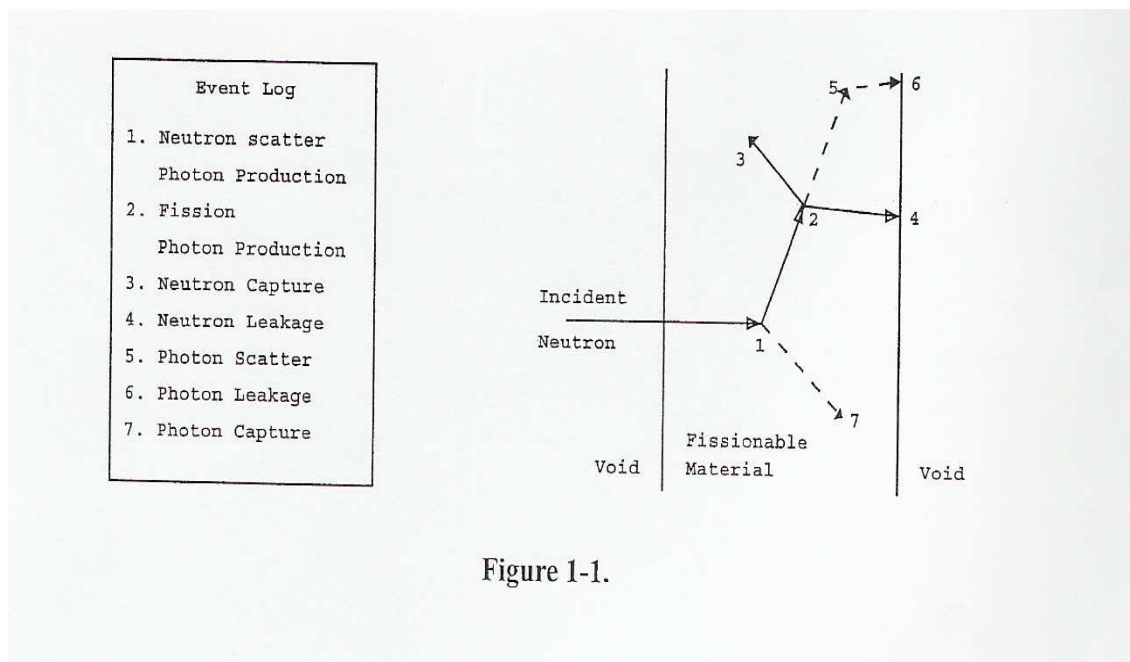


Figure 1-1.

Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση αλληλεπίδρασης σωματιδίου με την ύλη

Στο σχήμα 2.3 περιγράφεται το τυχαίο περιστατικό πρόσπτωσης ενός νετρονίου σε μία πλάκα υλικού. Επιλογή τυχαίων αριθμών μεταξύ του 0 και του 1 καθορίζουν σε κάθε βήμα που ακριβώς θα λάβει χώρα μία αλληλεπίδραση και τι είδους θα είναι αυτή, με βάση πάντα τους φυσικούς νόμους και τις πιθανότητες που χαρακτηρίζουν τις αλληλεπιδράσεις και τα υλικά που εμπλέκονται.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, περιγράφεται μία υποθετική ιστορία, η οποία αρχίζει με μια νετρονική σύγκρουση (συμβάν 1). Το νετρόνιο σκεδάζεται στην κατεύθυνση που φαίνεται, η οποία έχει επιλεγεί τυχαία από συνάρτηση που εκφράζει τη γωνιακή κατανομή σκέδασης. Λόγω της σκέδασης παράγεται και ένα φωτόνιο, το οποίο προσωρινά «αποθηκεύεται» -μένει ουσιαστικά στην άκρη- για να αναλυθεί αργότερα. Ακολούθως προκύπτει διάσπαση (συμβάν 2) με αποτέλεσμα το «θάνατο» -τερματισμό της πορείας- του εισερχόμενου νετρονίου και τη «γέννηση» δύο νέων, εξερχόμενων νετρονίων και ενός φωτονίου. Το φωτόνιο καθώς και το ένα νετρόνιο «αποθηκεύονται» για μεταγενέστερη ανάλυση. Το έτερο νετρόνιο δεσμεύεται -διαδικασία νετρονικής σύλληψης- (συμβάν 3) και η διαδρομή του τερματίζεται. Το «αποθηκευμένο» νετρόνιο τώρα ανακτάται και μετά από τυχαία, πάντα, επιλογή διαφεύγει από την πλάκα (συμβάν 4). Το παραγόμενο από τη διάσπαση φωτόνιο συγκρούεται (συμβάν 5) και εξέρχεται της πλάκας (συμβάν 6). Το εναπομείναν φωτόνιο, που είχε «γεννηθεί» από την αρχική σύγκρουση (συμβάν 1) και είχε «αποθηκευτεί», παρακολουθείται τώρα έως τη σύλληψή του (συμβάν 7). Η ιστορία του αρχικού νετρονίου ολοκληρώνεται στο σημείο αυτό. Μην έχοντας άλλα σωματίδια σε αναμονή, η ιστορία τερματίζεται. Στη συνέχεια, ξεκινάει νέα ιστορία με νέο νετρόνιο που εισέρχεται στην πλάκα. Με την παρακολούθηση και ολοκλήρωση όλο και περισσότερων τέτοιων ιστοριών, και την καταγραφή για κάθε ιστορία διαφόρων πληροφοριών που επιλέγει ο χρήστης, όπως την ενέργεια και τη γωνία του εξερχόμενου φωτονίου και νετρονίου, την ενέργεια που αποτίθεται σε μία θέση κλπ, είναι δυνατή εκτίμηση μίας σειράς μεγεθών και κατανομών για τα χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων σωματιδίων. Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν καταγράφονται μαζί με εκτιμήσεις της στατιστικής ακρίβειας (αβεβαιότητας) των αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η τεχνική Monte Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θεωρητική «επανάληψη» μιας στατιστικής διαδικασίας, όπως είναι η αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη, και είναι χρήσιμη ιδιαίτερα για σύνθετα προβλήματα που δε μπορούν να περιγραφούν με υπολογιστικούς κώδικες, οι

οποίοι κάνουν χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων και αναλυτικών σχέσεων. Η τεχνική είναι ιδανική για την επίλυση πολύπλοκων, τρισδιάστατων προβλημάτων και χρησιμοποιείται ευρέως για την επίλυση σύνθετων φυσικών προβλημάτων σε πολλά πεδία της έρευνας και της τεχνολογίας, όπως για υπολογισμούς θωρακίσεων και ανιχνευτικών συστημάτων, δοσιμετρικούς υπολογισμούς κλπ. Πληθώρα κωδίκων βασισμένων στη μέθοδο Monte Carlo, έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, οι περισσότεροι εκ των οποίων συνεχώς αναβαθμίζονται-εμπλουτίζονται με νέες εκδόσεις. Ενδεικτικά αναφέρονται οι κώδικες :

- EGS4 (Nelson W.R. et al., 1985)
- GEANT3 (Brun R. et al., 1986)
- 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 Monte Carlo χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την προσομοίωση πολύπλοκων γεωμετριών και αποτελούν μοναδικό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων όπου είναι εξαιρετικά δύσκολη ή αδύνατη η διεξαγωγή πειραμάτων. Έτσι, βρίσκουν εφαρμογή στον υπολογισμό δόσεων, στον προσδιορισμό του παράγοντα επαύξησης της έκθεσης (exposure build-up factor), στον υπολογισμό και σχεδιασμό θωρακίσεων και στη μελέτη και σχεδίαση συστημάτων στα οποία εμπλέκονται ionτίζουσες ακτινοβολίες. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες σχετικές εφαρμογές: υπολογισμός του συντελεστή επαύξησης πίσω από επίπεδη πλάκα με χρήση των κωδίκων 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.Μανώλακα, 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).

2.4.2 Εκτίμηση αποδόσεων ανιχνευτών Γερμανίου με χρήση μεθόδων Monte Carlo.

Πλήθος εφαρμογών των μεθόδων προσομοίωσης Monte Carlo αφορά στη βαθμονόμηση ανιχνευτικών διατάξεων και πιο συγκεκριμένα στον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης των ανιχνευτών. Με στόχο τον προσδιορισμό της καμπύλης απόδοσης ανιχνευτών Γερμανίου, μετρήσεις σχετικής και απόλυτης απόδοσης έχουν συνδυαστεί με υπολογισμούς διαφόρων κωδικών Monte Carlo, σε πληθώρα εργασιών. Στις περισσότερες από αυτές χρησιμοποιούνται ο κώδικας MCNP (Karamanis, 2003), (Rodenas, 2000), (Hernandez, 2003), (Saegusa, 2004) και ο κώδικας GEANT (Vidmar, 2005), (Karamanis, 2003). Ο κώδικας CYLTRAN χρησιμοποιείται στις εργασίες των Hardy (2002) και Helmer (2003) ενώ ο κώδικας EFFTRAN σε αυτή του T.Vidmar (2005). Πρέπει ακόμα να αναφερθούν και οι Διπλωματικές Εργασίες των Ν.Αθανασίου (2006) και Α.Δεληγιάνη (2007), που αφορούν στη βαθμονόμηση ανιχνευτών γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ με χρήση του κώδικα PENELOPE και MCNP αντίστοιχα.

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ, για τον υπολογισμό της απόδοσης του ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας PENELOPE και πιο συγκεκριμένα η έκδοση του 2005 (PENELOPE 2005).

2.4.3 Κώδικας PENELOPE.

Ο κώδικας PENELOPE δημιουργήθηκε για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων β-σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη. Αναπτύχθηκε από τους F.Salvat, J.M.Fernandez-Varea και J.Sempau, για πρώτη φορά το 1996, στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης. Την πρώτη αυτή έκδοση του κώδικα έχουν ακολουθήσει πολλές νέες, εμπλουτισμένες –κυρίως σε επίπεδο βιβλιοθηκών-εκδόσεις. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εκδόσεις του 1996, 2000, 2001, 2003, 2005 και 2006. Η έκδοση του 2005, η οποία έχει αρκετές βελτιώσεις και σημαντικές διαφορές από τις προγενέστερες εκδόσεις, είναι και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η ονομασία του κώδικα προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons. Πρόκειται για ένα κώδικα που είχε αρχικά σχεδιασθεί για να προσομοιώνει τη διάδοση ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων

μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από ποικίλα υλικά. Η δυνατότητα προσομοίωσης και φωτονίων προστέθηκε λίγο αργότερα και γι' αυτό δεν περιέχεται στην ονομασία του κώδικα.

2.4.3.1 Περιγραφή κώδικα PENELOPE.

Η διαδικασία της προσομοίωσης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί για εύρος ενεργειών από 50eV έως 1Gev, απαιτεί αρχικά την αναλυτική περιγραφή του προς εξέταση προβλήματος. Τα απαραίτητα για την προσομοίωση δεδομένα παρέχονται από το χρήστη μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων αρχείων εισόδου. Λαμβάνοντας υπόψη αφ' ενός τα αρχικά δεδομένα αφ' ετέρου τους φυσικούς νόμους και μηχανισμούς που διέπουν μια αλληλεπίδραση, ο κώδικας «δημιουργεί» το πλήθος ιστοριών που επιλέγει ο χρήστης. Μετά την ολοκλήρωση της σειράς των ιστοριών, το πρόγραμμα δίνει στο χρήστη τα αποτελέσματα των ζητούμενων μεγεθών.

Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης βασίζεται στο μοντέλο του διασκορπισμού (scattering model), το οποίο συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων με αναλυτικά μοντέλα της ενεργού διατομής για διάφορους μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων. Ο κώδικας –που είναι γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN- αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτινών, οι οποίες αναλαμβάνουν να πραγματοποιήσουν την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ύλη. Για τον πλήρη έλεγχο της προσομοίωσης και για την πλήρη πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες και βάσεις δεδομένων, ο χρήστης πρέπει να «γράψει» το δικό του Κυρίως Πρόγραμμα. Αυτό το Κυρίως Πρόγραμμα θα πρέπει να ελέγχει την εξέλιξη της ιστορίας-τροχιάς (track) του κάθε σωματιδίου κατά την προσομοίωση και να καταχωρεί σε αρχεία τις ποσότητες που ενδιαφέρουν το χρήστη.

2.4.3.2 Χρήση κώδικα PENELOPE.

Στο πακέτο που διανέμεται ο κώδικας (έκδοση 2005) υπάρχουν, για τη διευκόλυνση του χρήστη, τρία έτοιμα Κυρίως Προγράμματα, τα οποία μπορούν βέβαια να εφαρμοστούν για συγκεκριμένες γεωμετρίες, αλλά και να τροποποιηθούν κατάλληλα για άλλες γεωμετρίες. Το πρόγραμμα PENSLAB προσομοιώνει τη διάδοση των σωματιδίων μέσα σε μια επίπεδη πλάκα καθορισμένου υλικού για

δεδομένη αρχική ενέργεια σωματιδίων ενώ το πρόγραμμα PENCYL τη διάδοση μέσα από σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές. Το πρόγραμμα PENMAIN είναι πιο γενικής μορφής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση μιας μεγάλης ποικιλίας πρακτικών προβλημάτων καθώς δεν περιορίζεται σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία. Η διαφορά του από τα προηγούμενα προγράμματα είναι το γεγονός ότι η γεωμετρία της κατασκευής περιγράφεται σε κατάλληλο, ξεχωριστό αρχείο (αρχείο τύπου .in) και όχι μέσα στο αρχείο εισόδου του προγράμματος, κάτι που δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στο χρήστη. Το ξεχωριστό αυτό αρχείο γεωμετρίας «διαβάζει» ο PENMAIN μέσω της υπορουτίνας PENGEO. Η διαφορά αυτή είναι που επιτρέπει στον PENMAIN να προσομοιώνει εξαιρετικά πολύπλοκες κατασκευές και γεωμετρίες, δίνοντάς του πλεονέκτημα έναντι των άλλων δύο έτοιμων προγραμμάτων.

Παρ'όλα αυτά, κανένα από τα τρία έτοιμα Κυρίως Προγράμματα δε μπορεί να χειριστεί περιπτώσεις όπου η εκπομπή των σωματιδίων γίνεται από πηγή όγκου καθώς και τα τρία προβλέπουν μόνο προσομοιώσεις σημειακών πηγών. Στην περίπτωση που επιθυμείται η προσομοίωση πηγής όγκου, ο χρήστης πρέπει να συγκροτήσει το δικό του κώδικα ή να τροποποιήσει σχετικά έναν από τους παραπάνω διαθέσιμους Κώδικες Χρήστη. Στα πλαίσια της Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε ο Κώδικας PENMAIN, είτε αυτούσιος είτε τροποποιημένος.

2.4.3.2.1 Αρχεία εισόδου.

Τα αρχεία εισόδου του Κώδικα PENMAIN, τα οποία παρέχονται από το χρήστη και περιέχουν όλα τα απαραίτητα για την προσομοίωση δεδομένα, είναι τα εξής:

- Αρχείο τύπου .in. Είναι το βασικό αρχείο εισόδου δεδομένων του προβλήματος. Μέσω αυτού περιγράφονται:
 - Η πηγή ακτινοβολίας: το είδος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (φωτόνια, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια), η αρχική ενέργεια των σωματιδίων (δυνατότητα εισόδου είτε μίας ενέργειας είτε ενεργειακού φάσματος), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πηγής καθώς και η απόσταση πηγής-ανιχνευτή
 - Η γεωμετρία του προβλήματος: ορίζονται οι ονομασίες του αρχείου περιγραφής της γεωμετρίας (τύπου .geo) και του αρχείου περιγραφής

των υλικών (τύπου .mat). Τα ξεχωριστά αυτά αρχεία (που βρίσκονται εκτός αρχείου εισόδου .in) θα «αναζητήσει» και θα «διαβάσει» ο κώδικας προκειμένου να προμηθευτεί όλα τα δεδομένα που αφορούν το πρόβλημα.

- Οι παράμετροι της προσομοίωσης: ορίζεται το είδος και ο αριθμός των ανιχνευτών, η ενεργειακή διαμέριση, το κατώφλι ενέργειας. Ορίζεται επίσης από το χρήστη η επιθυμητή διάρκεια της προσομοίωσης και ο επιθυμητός αριθμός γεγονότων που θα προσομοιωθούν (προεπιλέγεται δηλαδή ο χρόνος που θα διαρκέσει η προσομοίωση και ο αριθμός των ιστοριών που θα προσομοιωθούν) καθώς και κάποιες ακόμα παράμετροι που αφορούν τα αρχεία εξόδου της προσομοίωσης (όπως το κάθε πότε θα καταγράφονται τα αποτελέσματα στα αρχεία εξόδου).
- Αρχείο τύπου .geo. Είναι το αρχείο στο οποίο περιγράφεται αναλυτικά η γεωμετρία του προβλήματος. Ορίζονται με λεπτομέρειες όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τόσο η δομή (επιφάνειες, όγκοι, ακριβείς διαστάσεις) όσο και τα υλικά από τα οποία αποτελείται κάθε τμήμα της κατασκευής. Για την περιγραφή της γεωμετρίας, ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει έτοιμες επιφάνειες και όγκους (δίνονται μαζί με τον κώδικα) ή να εκφράσει με δικές του εξισώσεις το κάθε σώμα.
- Αρχείο τύπου .mat. Πρόκειται για το αρχείο ορισμού όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή του προβλήματος. Περιέχει όλες τις απαραίτητες φυσικές σταθερές που χρειάζεται να ληφθούν υπ'όψιν στη διαδικασία προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με τα συγκεκριμένα υλικά. Το αρχείο .mat δημιουργείται με την εκτέλεση της εντολής

> tables.exe

και την επιλογή κατάλληλου υλικού από -διαθέσιμο με τον κώδικα- πίνακα υλικών (A.F. Bielajew and F. Salvat et al., 2001). Σε περίπτωση που επιθυμείται η κατασκευή μίας γεωμετρίας που περιέχει πολλά διαφορετικά υλικά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνθέσει, μέσω κατάλληλων εντολών, ένα συνολικό αρχείο, το οποίο θα περιλαμβάνει όλα τα υλικά, τοποθετημένα με τη σειρά που αναγράφονται και στο αρχείο γεωμετρίας (Αθανασίου, 2006).

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί, διαμορφώνονται κάθε φορά από το χρήστη τα αντίστοιχα αρχεία εισόδου. Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητο, για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης, να είναι αποθηκευμένα όλα τα παραπάνω αρχεία δεδομένων στο ίδιο *directory*. Παραδείγματα αρχείων τύπου *.in* και *.geo* παρουσιάζονται στους πίνακες 2.1 και 2.2 που βρίσκονται στο τέλος του κεφαλαίου.

2.4.3.2.2 Γραφικά προγράμματα *gview*.

Στο πακέτο του κώδικα PENELOPE περιλαμβάνονται και τα γραφικά προγράμματα *gview2d* και *gview3d*, τα οποία χρησιμεύουν στην απεικόνιση της κατασκευής, που περιγράφεται στα αρχεία τύπου *.geo*, σε δισδιάστατη (2d) και τρισδιάστατη (3d) μορφή αντίστοιχα. Τα προγράμματα *gview2d* και *gview3d*, τα οποία είναι βοηθητικού χαρακτήρα και τρέχουν μόνο στο λειτουργικό περιβάλλον Windows, παρέχουν πολλές δυνατότητες σχετικά με την απεικόνιση της κατασκευής. Έτσι, στη δισδιάστατη μορφή (*gview2d*) ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν στην απεικόνιση θα εμφανιστούν τα υλικά από τα οποία αποτελείται η κατασκευή ή αν θα παρουσιαστούν μόνο τα διαφορετικά τμήματα-σώματα που έχουν οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας. Στην περίπτωση της τρισδιάστατης απεικόνισης (*gview3d*), το πρόγραμμα επιτρέπει στο χρήστη να περιστρέψει την κατασκευή, να τη δει σε διάφορες αποστάσεις, σε τομή ή υπό γωνία, να επιλέξει χαμηλότερη ή υψηλότερη ανάλυση της εικόνας κλπ. Σημειώνεται ότι τυχόν λάθη ή παραλείψεις στην κατασκευή της γεωμετρίας επισημαίνονται στο χρήστη μέσω κατάλληλων μηνυμάτων, εμποδίζοντας παράλληλα την εμφάνιση εικόνας στην οθόνη, με στόχο να εντοπιστούν τα σημεία που χρήζουν διόρθωσης.

Τα συγκεκριμένα προγράμματα αποτελούν σημαντικότερα εργαλεία καθώς δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να ελέγξει όλες τις πλευρές και λεπτομέρειες της κατασκευής, ακόμα και το εσωτερικό της, πριν τρέξει τον κώδικα, επιβεβαιώνοντας ότι είναι όντως η γεωμετρία που επιθυμεί και αποφεύγοντας προσομοιώσεις με γεωμετρίες ελλειπείς ή λανθασμένες.

Παραδείγματα δισδιάστατων και τρισδιάστατων απεικονίσεων μέσω των προγραμμάτων *gview2d* και *gview3d* παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου (σχήματα 2.4 και 2.5).

2.4.3.2.3 Εικονικοί ανιχνευτές.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ο χρήστης του κώδικα χρειάζεται να καταγράψει διάφορες πληροφορίες, οι οποίες θα επιτρέψουν τελικά και την επίλυση του σχετικού φυσικού προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εικονικών ανιχνευτών. Οι εικονικοί ανιχνευτές είναι ουσιαστικά σειρές εντολών μέσα στον κώδικα χρήστη (π.χ. τον PENMAIN) με τις οποίες καταγράφονται ορισμένοι παράμετροι όταν κάποιο σωματίδιο εισέλθει στο «σώμα» που έχει καθοριστεί από το χρήστη ως ανιχνευτής ή τμήμα ενός ανιχνευτή. Τα «σώματα» που αντιστοιχούν σε ανιχνευτές ή τμήματα ανιχνευτών ορίζονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου (τύπου .in). Ο κώδικας PENELOPE περιλαμβάνει τρία είδη εικονικών ανιχνευτών: τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης, τους ανιχνευτές δόσης και τους ανιχνευτές εναποτιθέμενης ενέργειας.

- Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (impact detector) καταγράφει την ενέργεια που έχουν τα σωματίδια τη στιγμή που εισέρχονται σε αυτόν. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα αρχείο, το οποίο περιέχει το φάσμα της ενέργειας των σωματιδίων που εισήλθαν στο ορισμένο ως ανιχνευτή αλληλεπίδρασης «σώμα». Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης παρέχει επίσης τη δυνατότητα καταγραφής σε ξεχωριστό αρχείο των τιμών των χαρακτηριστικών (είδος, ενέργεια, θέση, κατεύθυνση, παράγοντα βαρύτητας και προέλευση) όλων των εισερχόμενων σωματιδίων. Τα «σώματα» ή ομάδα «σωμάτων» που αντιστοιχούν σε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, τα οποία ορίζονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου, αποτελούν τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνονται στο αρχείο που περιγράφει τη γεωμετρία (τύπου .geo).
- Ο ανιχνευτής δόσης (dose enclosure) καταγράφει την κατανομή της δόσης σε κάποιο τμήμα της κατασκευής. Είναι ουσιαστικά ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα, το οποίο έχει καθοριστεί στο αρχείο εισόδου ως ανιχνευτής δόσης από το χρήστη. Σε αντίθεση όμως με τους άλλους δύο ανιχνευτές (αλληλεπίδρασης και εναποτιθέμενης ενέργειας), ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δεν αποτελεί τμήμα της κατασκευής και γι'αυτό δεν περιέχεται στο αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo. Με την έλευση ενός σωματιδίου στον ορισμένο ως ανιχνευτή δόσης χώρο, καταγράφεται η επιπλέον δόση στη θέση που βρίσκεται το σωματίδιο. Μετά το πέρας της

προσομοίωσης η κατανομή της δόσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή που έχει υπολογιστεί δίνεται μέσα από αντίστοιχο αρχείο εξόδου.

- Ο ανιχνευτής εναποτιθέμενης ενέργειας (Energy deposition detector) καταγράφει –όπως υποδηλώνει και το όνομά του- την ενέργεια που εναποθέτουν τα εισερχόμενα σε αυτόν σωματίδια. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα επιπλέον αρχείο εξόδου, το οποίο περιέχει το φάσμα της ενέργειας που εναποτέθηκε από τα σωματίδια στον ανιχνευτή. Όμοια με την περίπτωση του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, το «σώμα» ή η ομάδα «σωμάτων» που ορίζεται στο αρχείο εισόδου ως ανιχνευτής εναποτιθέμενης ενέργειας αποτελεί τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνεται και στο αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας της (τύπου .geo). Ο χρήστης μπορεί να ορίσει στο αρχείο εισόδου έως και 5 διαφορετικούς ανιχνευτές εναποτιθέμενης ενέργειας, για κάθε έναν από τους οποίους δημιουργείται αντίστοιχο αρχείο εξόδου (τύπου pm_spc_enddet_nn.dat). Με δεδομένο ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται ανιχνευτές εναποτιθέμενης ενέργειας, τα αρχεία εξόδου αυτού του τύπου περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο που ακολουθεί.

2.4.3.2.4 Αρχεία εξόδου.

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, δημιουργείται σειρά αρχείων εξόδου, τα οποία περιέχουν όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Τα αρχεία αυτά καθορίζονται από τον κυρίως κώδικα (PENSLAB, PENCYL, PENMAIN) αλλά και από τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί από τον χρήστη στην έναρξη της διαδικασίας προσομοίωσης. Το πλήθος και το περιεχόμενο των αρχείων εξόδου ποικίλει από κώδικα σε κώδικα αλλά και από προσομοίωση σε προσομοίωση καθώς οι πληροφορίες που προκύπτουν ως αποτελέσματα εξαρτώνται από τα στοιχεία που θα οριστούν ως ζητούμενα στα αρχεία εισόδου.

Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε μόνο με τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις και κυρίως με αυτά που ενδιαφέρουν για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης ενός ανιχνευτή. Τα αρχεία αυτά είναι τα penmain.dat και pm_spc_enddet_nn.dat. Τα υπόλοιπα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN

παρουσιάζονται συνοπτικά στο Παράρτημα Α. Αναλυτική περιγραφή των αρχείων εξόδου που προκύπτουν από τη χρήση των κωδικών PENSLAB και PENCYL μπορεί να αναζητηθεί στη Δ.Ε. Ν.Αθανασίου (2006).

Τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN είναι τύπου .dat και .rep (Δ.Ε. Αθανασίου, 2006) και το περιεχόμενό τους μπορεί να διαβαστεί με τη χρήση ενός απλού επεξεργαστή κειμένου (Notepad).

➤ Αρχείο penmain.dat

Το αρχείο penmain.dat είναι το βασικό αρχείο αποτελεσμάτων, το οποίο περιέχει όλες τις σημαντικές πληροφορίες που αφορούν την προσομοίωση. Χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος του αρχείου με τίτλο “PROGRAM-PENMAIN. Input data file” είναι εκείνο που παραμένει σταθερό και περιέχει τις βασικές παραμέτρους της προσομοίωσης όπως αυτές καθορίστηκαν στο αρχείο εισόδου τύπου .in. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος αναφέρονται:

- Η ημερομηνία και η ώρα της προσομοίωσης
- Ο τίτλος της διαδικασίας
- Η περιγραφή της πηγής
- Οι παράμετροι των υλικών της κατασκευής και η ονομασία του αρχείου που περιέχει τα χαρακτηριστικά των υλικών (τύπου .mat)
- Τα αποτελέσματα της μεθόδου Gauss
- Η ονομασία του αρχείου που περιγράφει τη γεωμετρία της κατασκευής (τύπου .geo)
- Το μέγιστο μήκος του βήματος ενός σωματιδίου σε κάθε σώμα που περιγράφεται στη γεωμετρία
- Οι παράμετροι της εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης
- Οι διαστάσεις των ενεργειακών καναλιών (bins) που έχουν επιλεγεί από το χρήστη
- Τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης
- Τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών εναποτιθέμενης ενέργειας
- Τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών δόσης
- Οι ονομασίες των αρχείων dump στα οποία ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποτίθενται οι τρέχουσες αριθμητικές τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης, και η χρονική περίοδος της διαδικασίας dump
- Ο αριθμός των ιστοριών και η διάρκεια της προσομοίωσης

Το δεύτερο τμήμα του αρχείου penmain.dat με τίτλο “PROGRAM-PENMAIN. Results” είναι εκείνο που επαναλαμβάνεται μέσα στο αρχείο penmain.dat και περιλαμβάνει τις τρέχουσες τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτές καταχωρούνται στο αρχείο dump. Με τη συμπλήρωση καθορισμένης από το χρήστη χρονικής περιόδου τα αποτελέσματα καταγράφονται στο αρχείο dump και στο δεύτερο τμήμα του αρχείου penmain.dat. Όσο πιο συχνά επαναλαμβάνεται η διαδικασία dump, κάτι που -όπως αναφέρθηκε- επιλέγει ο χρήστης, τόσο περισσότερες είναι οι καταχωρήσεις τιμών στο αρχείο penmain.dat άρα τόσο μεγαλύτερο γίνεται το αρχείο αυτό.

Στο δεύτερο μέρος του αρχείου περιέχονται:

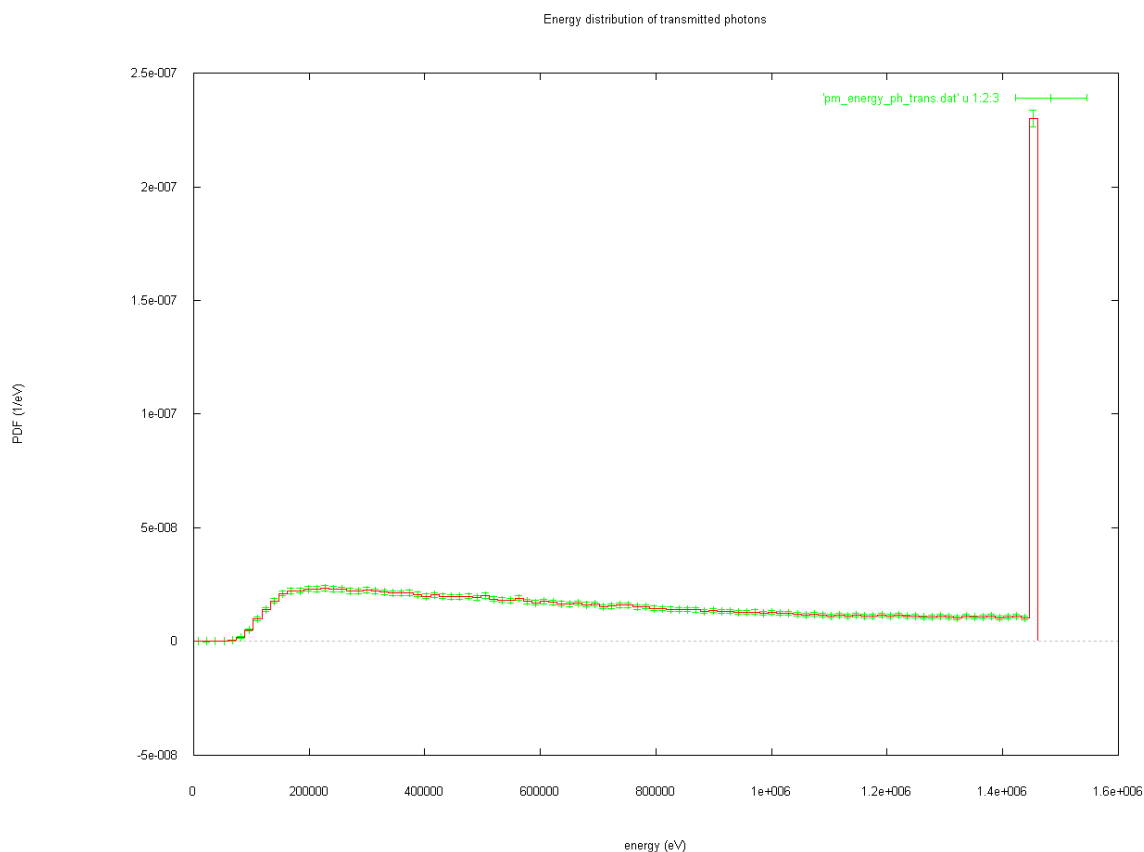
- Η διάρκεια και η ταχύτητα της προσομοίωσης
- Ο συνολικός αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που προσομοιώθηκαν
- Ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που εξήλθαν της κατασκευής, που οπισθοσκεδάστηκαν, που απορροφήθηκαν
- Οι ποσότητες fractional transmission, fractional backscattering και fractional absorption που εκφράζουν αντίστοιχα το κλάσμα των - πρωτογενών και δευτερογενών- σωματιδίων που εκπέμφθηκαν (transmission), οπισθοσκεδάστηκαν (backscattering) ή απορροφήθηκαν (absorption) δια του συνολικού αριθμού ιστοριών της προσομοίωσης
- Οι πιθανότητες εκπομπής, οπισθοσκέδασης και απορρόφησης των δευτερογενών ηλεκτρονίων / φωτονίων / ποζιτρονίων που προέκυψαν στη διαδικασία της προσομοίωσης
- Η μέση τιμή της εναποτιθέμενης ενέργειας (σε eV) στο κάθε σώμα (body) της κατασκευής
- Η μέση τιμή της ενέργειας (σε eV) που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης
- Η μέση τιμή της εναποτιθέμενης ενέργειας (σε eV) που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή εναποτιθέμενης ενέργειας
- Οι τιμές των τυχαίων αριθμών όπως προέκυψαν από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών

➤ Αρχείο `pm_spc_enddet_nn.dat`

Στο αρχείο αυτό καταγράφονται πληροφορίες σχετικές με την κατανομή ενέργειας των σωματιδίων που αποτίθεται στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, στον οποίο αναφέρεται το αρχείο (με τον κωδικό *nn*). Μπορούν να υπάρχουν έως 5 τέτοια αρχεία που αντιστοιχούν σε 5 διαφορετικούς ανιχνευτές (*nn* : 1-5). Στην πρώτη στήλη του αρχείου καταγράφεται το ενεργειακό επίπεδο (σε eV) ενώ στη δεύτερη η πιθανότητα ένα αρχικό σωματίδιο να εναποθέσει την αντίστοιχη ενέργεια στον ανιχνευτή (σε μονάδες $1/(eV \cdot \text{particle})$). Στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας (σε επίπεδο 3σ). Επισημαίνεται ότι τόσο το εύρος όσο και ο διαμερισμός των ενεργειακών επιπέδων καθορίζονται από το χρήστη στο αρχείο δεδομένων τύπου `.in`. Παραδείγματα αρχείων `penmain.dat` και `pm_spc_enddet_nn.dat` παρατίθενται στο τέλος του κεφαλαίου (πίνακες 2.3 και 2.4).

Από τα δεδομένα του αρχείου `pm_spc_enddet_nn.dat` είναι δυνατή η σχεδίαση του φάσματος των φωτονίων που συλλέγεται από τον ανιχνευτή. Αυτό γίνεται με χρήση του προγράμματος `gnuplot` και του αρχείου `pm_enddet.gnu` που βρίσκεται μέσα στον υποκατάλογο `PENMAIN`, ή και με χρήση ενός φύλλου `EXCEL`. Επισημαίνεται ότι το αρχείο `pm_enddet.gnu`, το οποίο περιέχει μια σειρά εντολών της `gnuplot` που αφορούν τη σχεδίαση γραφημάτων, πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο υποκατάλογο με το `pm_spc_enddet_nn.dat` αρχείο.

Στο σχήμα 2.6 που ακολουθεί φαίνεται ένα αρχείο `pm_enddet.gnu` που αφορά εκπεμπόμενα φωτόνια.



Σχήμα 2.6 Απεικόνιση φάσματος εκπεμπόμενων φωτονίων με το gnuplot

2.4.4 Υπολογισμός απόδοσης ανιχνευτή Ge με χρήση του κώδικα PENELOPE.

2.4.4.1 Υπολογισμός αποδόσεων.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των αποδόσεων (φωτοκορυφής και ολικής) ενός ανιχνευτή Ge, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα τα οποία καταγράφονται στο αρχείο εξόδου pm_spc_enddet_1.dat. Κατά τον ορισμό της γεωμετρίας του συστήματος, ορίζεται εικονικός ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, pm_spc_enddet_1.dat, ο οποίος συμπίπτει γεωμετρικά με τον πραγματικό ανιχνευτή Ge. Το αρχείο εξόδου pm_spc_enddet_1.dat το οποίο παράγεται, αντιστοιχεί σε φωτόνια με την αρχική ενέργεια που έχει ορισθεί στο αρχείο δεδομένων τύπου .in.

➤ Υπολογισμός απόδοσης αιχμής του ανιχνευτή

Για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής (αιχμής) χρησιμοποιείται η τιμή της πιθανότητας που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια των φωτονίων, η οποία βρίσκεται στην δεύτερη στήλη του αρχείου `pm_spc_enddet_1.dat`. Δεδομένου ότι η πιθανότητα αυτή είναι ανηγμένη ανά eV, πρέπει να πολλαπλασιασθεί (σχέση 2.18) με το εύρος της ενεργειακής διαμέρισης (bin_width) που είναι δοσμένο σε eV.

$$Eff_{peak} = row2 \times bin_width \quad (2.18)$$

Όπου

Eff_{peak} : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για την υπόψη ενέργεια

$row2$: το περιεχόμενο της δεύτερης στήλης του αρχείου, που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια των φωτονίων.

Το εύρος του καναλιού (bin_width) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ως η ενεργειακή διαφορά μεταξύ δύο ενεργειακών επιπέδων. Επισημαίνεται ότι το εύρος αυτό εξαρτάται από τις επιλογές του χρήστη στο αρχείο δεδομένων και δίνεται από τη σχέση

$$bin_width = E_{\nu} - E_{\nu-1} \quad (2.19)$$

Το αποτέλεσμα του υπολογισμού είναι η πιθανότητα ανά αρχικά εκπεμπόμενο φωτόνιο, η ενέργεια που θα αποτεθεί στον ανιχνευτή να ταυτίζεται με την αρχική ενέργεια (δηλαδή να αποτεθεί όλη η ενέργεια του φωτονίου), που στην πραγματικότητα είναι η απόδοση φωτοκορυφής για την ενέργεια αυτή.

➤ Υπολογισμός ολικής απόδοσης του ανιχνευτή

Για τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης αθροίζονται οι τιμές της δεύτερης στήλης του αρχείου `pm_spc_enddet_1.dat`. Το αποτέλεσμα είναι η πιθανότητα ανά eV να αποτεθεί οποιαδήποτε ενέργεια στον ανιχνευτή εξαιτίας ενός φωτονίου που εκπέμπεται από την πηγή. Το άθροισμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με το μέγεθος του καναλιού bin_width σύμφωνα με τη σχέση

$$Eff_{total} = \left(\sum row2\right) \times bin_width \quad (2.20)$$

Όπου

Eff_{total} : η ολική απόδοση του ανιχνευτή

$\Sigma row2$: η τιμή που προκύπτει από την άθροιση των τιμών της 2^{ης} στήλης του αρχείου εξόδου

Έχοντας προσδιορίσει τις αποδόσεις αιχμής και ολική, ο λόγος της απόδοσης αιχμής προς την ολική απόδοση υπολογίζεται ακολούθως με διαίρεση των δύο τιμών.

2.4.4.2 Υπολογισμός της αβεβαιότητας κατά την εκτίμηση της απόδοσης.

Εκτός από τις τιμές των αποδόσεων, από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο αρχείο εξόδου (τύπου `pm_spc_enddet_1.dat`) της προσομοίωσης υπολογίζονται και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

➤ Εκτίμηση της ακρίβειας της προσομοίωσης

Συχνά, με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης επιθυμείται να υπολογιστεί η ακρίβεια της διαδικασίας, η οποία συνδέεται και με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται η τιμή της αβεβαιότητας (απόλυτη τιμή) η οποία παρατίθεται στην τρίτη στήλη του αρχείου `pm_spc_enddet_1.dat`. Για το σκοπό αυτό η τιμή της αβεβαιότητας που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια των φωτονίων πρέπει να διαιρεθεί με την αντίστοιχη τιμή της δεύτερης στήλης. Πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα αυτή με τον παράγοντα 100 υπολογίζεται το επί τοις εκατό (%) σφάλμα σε επίπεδο 3σ (σχέση 2.21). Διαιρώντας την τιμή του 3σ σφάλματος με τον παράγοντα 3 υπολογίζουμε το επί τοις εκατό (%) σφάλμα 1σ (σχέση 2.22).

$$\% \sigma_{\text{φάλμα}}(3\sigma) = \left(\frac{row2}{row3} \right) \times 100 \quad (2.21)$$

και

$$\% \sigma_{\text{φάλμα}}(1\sigma) = \frac{\% \sigma_{\text{φάλμα}}(3\sigma)}{3} \quad (2.22)$$

Επισημαίνεται, βέβαια, πως η υπολογιζόμενη με τον τρόπο αυτό ακρίβεια είναι μόνο μία αδρή εκτίμηση, καθώς δεν παίρνει υπόψη τις αβεβαιότητες μιας σειράς παραμέτρων (τιμές πυρηνικών δεδομένων, ενεργές διατομές κ.α.), οι οποίες –αν και εμπλέκονται στη διαδικασία της προσομοίωσης- δεν μας είναι γνωστές, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να προσδιοριστεί και το αντίστοιχο σφάλμα τους. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι να προκύπτει σφάλμα υποεκτιμημένο σε σχέση με το «πραγματικό», το οποίο όμως δεν παύει να είναι ενδεικτικό του επιπέδου ακρίβειας που έχει προσεγγίσει η διαδικασία της προσομοίωσης.

➤ Εκτίμηση της αβεβαιότητας της απόδοσης φωτοκορυφής

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής, η οποία εκτιμάται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω της σχέσης 2.18, χρησιμοποιείται η τιμή της αβεβαιότητας (απόλυτη τιμή) η οποία παρατίθεται στην τρίτη στήλη του αρχείου `pm_src_enddet_1.dat` (σε επίπεδο 3σ). Σύμφωνα με τη βασική θεωρία σφαλμάτων και θεωρώντας πως το μέγεθος `bin_width` έχει αμελητέο σφάλμα, η αβεβαιότητα της τιμής απόδοσης φωτοκορυφής θα δίνεται από τη σχέση

$$\delta\left(Eff_{peak}\right) = \delta(row2) \times bin_width = row3 \times bin_width \quad (2.23)$$

όπου χρησιμοποιήθηκε το γεγονός ότι το περιεχόμενο της 3^{ης} στήλης (`row3`) του αρχείου `pm_src_enddet_1.dat` περιγράφει ουσιαστικά την αβεβαιότητα της τιμής της 2^{ης} στήλης (`row2`) που αντιστοιχεί στην ενέργεια της φωτοκορυφής.

➤ Εκτίμηση της αβεβαιότητας της ολικής απόδοσης

Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζεται και η αβεβαιότητα της τιμής της ολικής απόδοσης. Με βάση τη σχέση 2.20 και δεδομένου ότι το σφάλμα του `bin_width` είναι αμελητέο, η αβεβαιότητα θα υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\delta\left(Eff_{total}\right) = \delta\left(\sum row2\right) \times bin_width \quad (2.24)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία σφαλμάτων και με δεδομένο ότι το περιεχόμενο της 3^{ης} στήλης αντιστοιχεί στην αβεβαιότητα της τιμής της 2^{ης} στήλης, ισχύει:

$$\delta(\sum row2) = \sqrt{\sum row3_i^2} \quad (2.25)$$

Όπου

$row3_i$: η i-οστή τιμή της 3^{ης} στήλης του αρχείου εξόδου.

Συνεπώς, η σχέση (2.22) παίρνει τη μορφή:

$$\delta(Eff_{total}) = \sqrt{\sum (row3_i^2) \times bin_width} \quad (2.26)$$

Μέσω των σχέσεων που περιγράφηκαν (2.23-2.26) υπολογίζονται τα απόλυτα σφάλματα. Τα αντίστοιχα σχετικά % σφάλματα μπορούν ακολούθως να υπολογιστούν με χρήση της σχέσης (2.16) που συνδέει απόλυτα και σχετικά σφάλματα. Τέλος, με βάση τη σχέση (2.13) προσδιορίζεται το σχετικό σφάλμα του λόγου απόδοσης αιχμής προς ολική απόδοση.

2.4.5 Επίδραση της ενεργειακής διαμέρισης στην εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης.

2.4.5.1 Ενεργειακή διαμέριση.

Μία από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης είναι - όπως ήδη αναφέρθηκε - η ενεργειακή διαμέριση (bin_width). Ο χρήστης, αφού ορίσει το άνω και κάτω όριο της ενέργειας που καταγράφεται στον εικονικό ανιχνευτή ενέργειας, επιλέγει και τον αριθμό των καναλιών (bins) στα οποία θα διαιρεθεί αυτή η ενεργειακή περιοχή. Η διαμέριση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν όλα τα κανάλια το ίδιο εύρος, το οποίο ορίζεται σε μονάδες eV, όπως ακριβώς και η ενεργειακή περιοχή. Είναι προφανές ότι το πλάτος των καναλιών (bin_width) εξαρτάται από το συνολικό αριθμό καναλιών που θα επιλεγεί. Αν, για παράδειγμα, μια ενεργειακή περιοχή εύρους 1460 keV διαιρεθεί σε 100 bins, το κάθε ένα από αυτά θα έχει πλάτος ίσο με 14.6 keV. Αν όμως η ίδια ενεργειακή περιοχή

διαιρεθεί σε 1000 bins, τότε το κάθε bin θα έχει πλάτος 1.46 keV. Από μία απλή εποπτεία του αρχείου pm_spc_enddet_1.dat διαπιστώνεται ότι στο κανάλι το οποίο αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια των φωτονίων, καταγράφεται και η υψηλότερη πιθανότητα ανίχνευσης φωτονίου, ενώ στα επόμενα κανάλια η πιθανότητα είναι μηδενική (στην πράξη έχει τάξη μεγέθους 10^{-35}). Αυτό είναι φυσικό αφού δεν υπάρχουν φωτόνια υψηλότερης ενέργειας. Στα αμέσως προηγούμενα κανάλια, τα οποία αντιστοιχούν σε ελαφρά χαμηλότερη ενέργεια, διαπιστώνεται ότι η πιθανότητα ανίχνευσης είναι χαμηλή αλλά όχι μηδενική. Αυτό οφείλεται στο ότι υπάρχουν φωτόνια τα οποία αλληλεπιδρώντας με τον ανιχνευτή έχουν αποθέσει σε αυτόν «σχεδόν» όλη την ενέργειά τους. Είναι προφανές ότι το πλήθος των φωτονίων τα οποία καταγράφονται σε ένα κανάλι εξαρτάται άμεσα από το πλάτος του καναλιού.

Στην περίπτωση ενός ιδανικού ανιχνευτή, όπου τα φωτόνια της ίδιας ενέργειας θα έδιναν σήμα ακριβώς του ίδιου πλάτους, οπότε η φωτοκορυφή θα είχε απειροστό πλάτος, θα αρκούσε να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής μόνο το περιεχόμενο του καναλιού που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια του φωτονίου. Μάλιστα, το κανάλι αυτό θα έπρεπε να έχει και απειροστό πλάτος. Στην πράξη όμως, επειδή η φωτοκορυφή ενός πραγματικού φάσματος έχει ορισμένο πλάτος, το οποίο καθορίζεται από το εύρος ημίσεως ύψους (FWHM) της, κάτω από την φωτοκορυφή αυτή καταγράφονται και τα φωτόνια τα οποία αποδίδουν στον ανιχνευτή «ελαφρώς» μειωμένη ενέργεια, συνεισφέροντας σε κάποιο βαθμό στην επιφάνειά της (area). Για να είναι συγκρίσιμη η απόδοση που εκτιμάται μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης με την απόδοση που εκτιμάται πειραματικά από τη σχέση 2.4, πρέπει να ληφθεί υπόψη και το περιεχόμενο ορισμένων καναλιών που αντιστοιχούν σε ελαφρά χαμηλότερες ενέργειες. Τα φωτόνια τα οποία θα αποθέσουν στον πραγματικό ανιχνευτή αυτές τις ενέργειες θα καταγραφούν κάτω από την φωτοκορυφή.

Επισημαίνεται ότι, σε ότι αφορά την ολική απόδοση του ανιχνευτή, ο υπολογισμός της δεν επηρεάζεται από τον τρόπο διαμέρισης καθώς γίνεται άθροιση του περιεχομένου όλων των καναλιών (σχέση 2.20).

2.4.5.2 Μελέτη επίδρασης ενεργειακής διαμέρισης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια της Δ.Ε., προκειμένου να καταδειχθεί η επίδραση του πλάτους της ενεργειακής διαμέρισης (bin_width) στον υπολογισμό της τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης για υψηλές και χαμηλές ενέργειες φωτονίων. Με χρήση του κώδικα PENELOPE υπολογίστηκαν οι τιμές ολικής απόδοσης και απόδοσης φωτοκορυφής για σημειακές πηγές φωτονίων με ενέργειες 50 και 1250 keV και για δύο διαφορετικές επιλογές διαμέρισης (διαίρεση σε 100 και 1000 bins).

➤ Για ενέργεια 1250 keV

Και για τις δύο προσομοιώσεις (διαμέριση 100 και 1000 bins) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο αρχείο γεωμετρίας. Κατασκευάστηκαν δύο αρχεία εισόδου, τα οποία είχαν τις ίδιες ακριβώς τιμές σε όλες τις παραμέτρους πλην του αριθμού των διαμερίσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5.

Ενέργεια 1250 keV	100 bins		1000 bins		Απόκλιση 100-1000 bins
	τιμή	σ % (1σ)	τιμή	σ % (1σ)	
Απόδοση αιχμής	1,5730E-01	0,130	1,5726E-01	0,127	0,024%
Ολική απόδοση	5,7533E-01	0,066	5,7536E-01	0,062	-0,006%

Πίνακας 2.5 Τιμές απόδοσης για δύο διαμερίσεις για ενέργεια 1250 keV

➤ Για ενέργεια 50 keV

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για ενέργεια αρχικών σωματιδίων ίση με 50 keV. Και σε αυτήν τη σύγκριση τα αρχεία εισόδου διέφεραν μόνο ως προς τον αριθμό των καναλιών (100 και 1000). Οι τιμές των αποδόσεων που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6.

Ενέργεια 50 keV	100 bins		1000 bins		Απόκλιση 100-1000 bins
	τιμή	σ % (1σ)	τιμή	σ % (1σ)	
Απόδοση αιχμής	1,5526E-01	0,018	1,2565E-01	0,031	19,072%
Ολική απόδοση	1,8672E-01	0,010	1,8667E-01	0,015	-0,025%

Πίνακας 2.6 Τιμές απόδοσης για δύο διαμερίσεις για ενέργεια 50 keV

Από τους πίνακες 2.5 και 2.6 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Στην περίπτωση της ολικής απόδοσης, και για τις δύο ενέργειες, η απόκλιση μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν για τις δύο διαμερίσεις είναι μικρή και βρίσκεται μέσα στα όρια του στατιστικού σφάλματος. Συνεπώς δεν διαπιστώνεται σημαντική επίδραση του πλήθους των διαμερίσεων, όπως άλλωστε αναμένεται.
- Στην περίπτωση της απόδοσης φωτοκορυφής για την ενέργεια 1250keV δεν διαφοροποιείται το αποτέλεσμα με το πλήθος των διαμερίσεων.
- Στην περίπτωση της απόδοσης φωτοκορυφής για την ενέργεια 50keV παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση του αποτελέσματος με το πλήθος των διαμερίσεων.

Η διαφορετική επίδραση του πλήθους των bins στις δύο ενέργειες πρέπει να αναζητηθεί στο διαφορετικό ποσοστό φωτονίων τα οποία αποθέτουν στον ανιχνευτή «σχεδόν» ολόκληρη την ενέργειά τους, λόγω της φύσης και της βαρύτητας των αλληλεπιδράσεων που πραγματοποιούν τα φωτόνια των δύο ενεργειών.

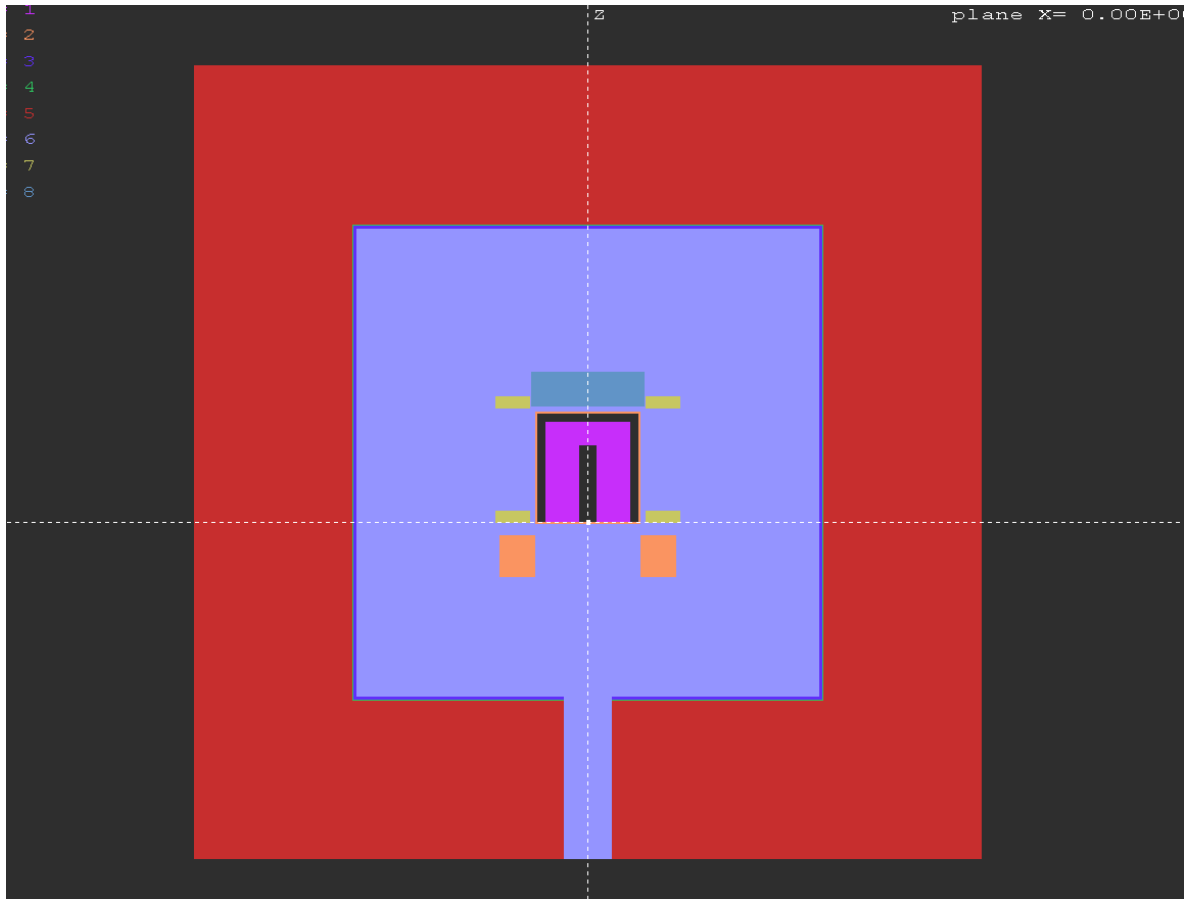
Αυτό που φαίνεται να επιβεβαιώνεται από την παραπάνω ανάλυση είναι ότι, εκτός από την καλή γνώση της γεωμετρίας του συστήματος το οποίο προσομοιώνεται, είναι εξαιρετικά σημαντική -και πρέπει να επιλέγεται με μεγάλη προσοχή από το χρήστη- η ενεργειακή διαμέριση στο αρχείο αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για φωτόνια χαμηλών ενεργειών.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος ενεργειακών διαμερίσεων (καναλιών), το πλήθος των διαμερίσεων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής εξαρτάται από το εύρος της φωτοκορυφής του πραγματικού ανιχνευτή, δηλαδή από τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, καθώς και από το εύρος της διαμερίσεως. Στην πραγματικότητα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσες διαμερίσεις (n), ώστε το συνολικό ενεργειακό εύρος στο οποίο αντιστοιχεί το άθροισμά τους, να αντιστοιχεί σε $1.5 \cdot FWHM$ της πραγματικής φωτοκορυφής του ανιχνευτή, καθώς αυτό είναι το ήμισυ του συνολικού εύρους μίας φωτοκορυφής πραγματικού φάσματος. Θα πρέπει δηλαδή να ισχύει η σχέση:

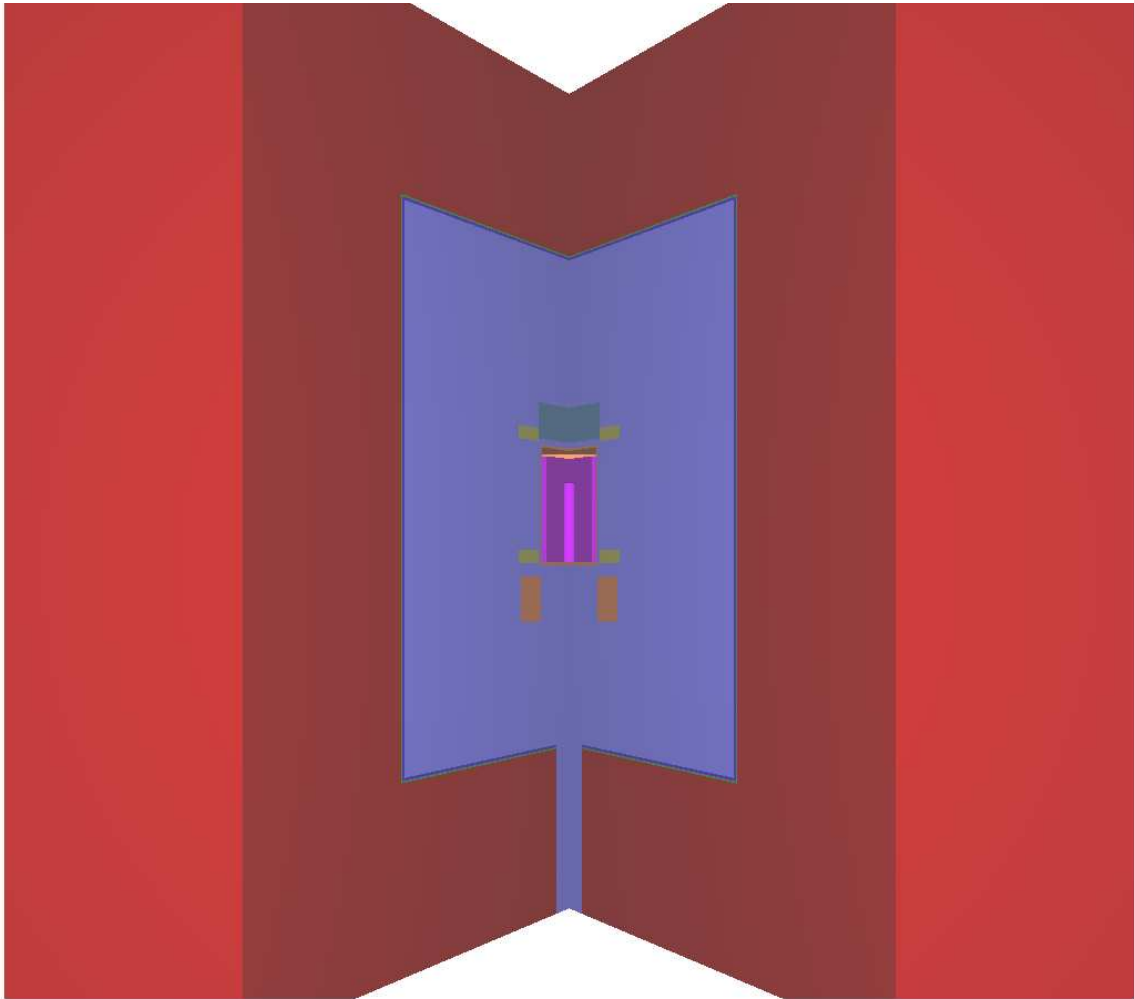
$$n = \frac{1.5 \times FWHM}{bin_width} \quad (2.27)$$

Για δεδομένο FWHM του ανιχνευτή, η παραπάνω ισότητα μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη επιλογή του `bin_width`, δηλαδή του συνολικού πλήθους των διαμερίσεων N . Στην περίπτωση αυτή, για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της απόδοσης, το άθροισμα των πιθανοτήτων που παρατίθενται στη δεύτερη στήλη του αρχείου `pm_spc_enddet_1.dat`, για το κανάλι που αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια φωτονίων και τα $n-1$ προηγούμενα κανάλια. Εξυπακούεται ότι η άθροιση των καναλιών (στις περιπτώσεις όπου κρίνεται απαραίτητη) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και στον υπολογισμό των αντίστοιχων σφαλμάτων.

Σχήματα και πίνακες 2^{ου} κεφαλαίου



Σχήμα 2.4 Δισδιάστατη απεικόνιση διάταξης ανιχνευτή-πηγής μέσα σε θωράκιση



Σχήμα 2.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση (τομή) ανιχνευτικής διάταξης μέσα σε θωράκιση

```

TITLE Ge detector-Al window-dead layer-well 50mm-Ba-133(276.4kev)source.

>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 27.64e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 29.55 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .le.10]
SIMPAT 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAT 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME germanium.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN gewell3.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 1e3 1.3e6 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 45 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 18 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 27.642e4 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 2 [Active body; one line for each body]
EDBODY 3

>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 300 [Dumping period, in sec]

TIME 5.0e15 [Allotted simulation time, in sec]

```

Πίνακας 2.1 Αρχείο εισόδου (τύπου .in)


```

*****
**   Program PENMAIN.  Input data file.  **
*****

Date and time: 28th Jan 2008. 11:17:10

Ge detector-Al window-dead layer-well 50mm-Co-60(1332.5kev)source.

-----
>>>>> Source description.
Primary particles: photons
Initial energy = 1.332500E+06 eV
Coordinates of centre:      SX0 = 0.000000E+00 cm
                           SY0 = 0.000000E+00 cm
                           SZ0 = 2.955000E+01 cm
Beam direction angles:    THETA = 0.000000E+00 deg
                           PHI   = 0.000000E+00 deg
Beam aperture:           ALPHA = 1.800000E+02 deg

-----
>>>>> Material data and simulation parameters.
Number of different materials = 2

**** 1st material
Electron absorption energy = 1.000000E+05 eV
Photon absorption energy = 1.000000E+03 eV
Positron absorption energy = 1.000000E+05 eV
Electron-positron simulation parameters:
  C1 = 1.000000E-01,    C2 = 1.000000E-01
WCC = 1.000000E+04 eV, WCR = 1.000000E+03 eV

**** 2nd material
Electron absorption energy = 1.000000E+05 eV
Photon absorption energy = 1.000000E+03 eV
Positron absorption energy = 1.000000E+05 eV
Electron-positron simulation parameters:
  C1 = 1.000000E-01,    C2 = 1.000000E-01
WCC = 1.000000E+04 eV, WCR = 1.000000E+03 eV

PENLOPE's material definition file: germanium.mat

>>> SUMGA. Gauss adaptive-bipartition quadrature.
XL = 2.154434690032E+01, XU = 2.371373705662E+01, TOL = 1.0E-10
NCALLS = 11100, SUMGA = 3.7002954336658E+00, ERR = 4.9E-04
Number of open subintervals = 256
WARNING: the required accuracy has not been attained.

```

Πίνακας 2.3 Τμήμα αρχείου penmain.dat

```

# Results from PENMAIN. Output from energy-deposition detector # 1
# WARNING: May be strongly biased if interaction forcing is used!
# 1st column: deposited energy (ev).
# 2nd column: probability density (1/(ev*particle)).
# 3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).

1.666300E+03 8.254539E-10 5.279618E-11
2.998900E+03 8.832357E-10 5.461279E-11
4.331500E+03 8.727299E-10 5.428702E-11
5.664100E+03 8.772324E-10 5.442688E-11
6.996701E+03 8.933663E-10 5.492510E-11
8.329301E+03 8.779828E-10 5.445015E-11
9.661901E+03 1.026189E-09 5.886671E-11
1.099450E+04 9.522737E-10 5.670703E-11
1.232710E+04 9.620290E-10 5.699676E-11
1.365970E+04 9.620290E-10 5.699676E-11
1.499230E+04 9.380158E-10 5.628091E-11
1.632490E+04 9.417679E-10 5.639336E-11
1.765750E+04 9.368902E-10 5.624714E-11
1.899010E+04 9.616538E-10 5.698564E-11
2.032270E+04 9.376406E-10 5.626966E-11
2.165530E+04 9.796637E-10 5.751678E-11
2.298790E+04 9.215067E-10 5.578344E-11
2.432050E+04 9.537745E-10 5.675170E-11
2.565310E+04 9.650307E-10 5.708561E-11
2.698570E+04 9.391414E-10 5.631467E-11
2.831830E+04 9.560257E-10 5.681864E-11
2.965090E+04 9.477712E-10 5.657282E-11
3.098350E+04 9.522737E-10 5.670703E-11
3.231610E+04 9.380158E-10 5.628091E-11
3.364870E+04 9.864174E-10 5.771470E-11
3.498130E+04 9.849166E-10 5.767077E-11
3.631390E+04 9.526489E-10 5.671821E-11
3.764650E+04 9.691579E-10 5.720755E-11
3.897910E+04 9.680323E-10 5.717432E-11
4.031170E+04 9.376406E-10 5.626966E-11
4.164430E+04 9.631546E-10 5.703009E-11
4.297690E+04 9.695331E-10 5.721862E-11
4.430950E+04 1.016059E-09 5.857542E-11
4.564210E+04 9.890439E-10 5.779148E-11
4.697470E+04 9.792885E-10 5.750576E-11
4.830730E+04 9.672819E-10 5.715215E-11
4.963990E+04 9.706588E-10 5.725183E-11
5.097250E+04 9.762869E-10 5.741756E-11
5.230511E+04 9.699084E-10 5.722969E-11
5.363771E+04 9.980488E-10 5.805397E-11
5.497031E+04 9.766621E-10 5.742860E-11
5.630291E+04 9.886687E-10 5.778052E-11
5.763551E+04 9.665315E-10 5.712998E-11
5.896811E+04 9.882935E-10 5.776955E-11
6.030071E+04 1.008179E-09 5.834786E-11

```

Πίνακας 2.4 Τμήμα αρχείου pm_spc_enddet_1.dat για ενέργεια 1332 keV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο- ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ

3.1 Διάταξη ανίχνευσης της γ-ακτινοβολίας.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ για την ανίχνευση των ακτίνων-γ που εκπέμπονται από ραδιενεργό δείγμα περιλαμβάνει έναν ομοαξονικό ημιαγωγό ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (Coaxial, High Purity Germanium detector - HPGe), ηλεκτρονική διάταξη ενίσχυσης και ψηφιοποίησης του σήματος του ανιχνευτή και αναλυτή ύψους παλμών (multi-channel analyzer) για τη συλλογή του αντίστοιχου φάσματος (σχήμα 3.1 στο τέλος του κεφαλαίου). Για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του, ο ανιχνευτής γερμανίου πρέπει να διατηρείται σταθερά σε χαμηλή θερμοκρασία της τάξης των 77 °K (~ -196 °C). Για την ψύξη του ο ανιχνευτής είναι σταθερά συνδεδεμένος με δοχείο υγρού αζώτου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 που βρίσκεται στο τέλος του κεφαλαίου.

3.1.1 Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Ο ανιχνευτής HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ημιαγωγός ανιχνευτής, κατασκευασμένος από υπερκαθαρό γερμάνιο (HPGe) με σχετική απόδοση 33.8%. Μολονότι οι ανιχνευτές αυτού του τύπου αποτελούνται από έναν κρύσταλλο εξολοκλήρου κατασκευασμένο από γερμάνιο, εξαιτίας του τρόπου κατασκευής τους, υπάρχουν περιοχές μέσα στον κρύσταλλο, στις οποίες αν γίνει αλληλεπίδραση ενός φωτονίου δεν δημιουργείται σήμα, το οποίο θα οδηγήσει στην καταγραφή του από το ανιχνευτικό σύστημα. Η περιοχή αυτή, η οποία είναι συνήθως ένα εξωτερικό περιμετρικό στρώμα του κρυστάλλου Γερμανίου, ονομάζεται “dead layer” (νεκρό στρώμα). Η ύπαρξη αυτής της περιοχής είναι συνέπεια της διαδικασίας κατασκευής του ανιχνευτή και του σχηματισμού της ζώνης αντιστάθμισης (intrinsic region), η οποία δημιουργείται μέσα στον ανιχνευτή κατά την αντίστροφη πόλωση του και η οποία αποτελεί την ενεργό περιοχή του. Το πάχος του dead layer εξαρτάται

από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, το είδος και το βάθος της επαφής (P+ contact ή N+ contact) και την εφαρμοζόμενη υψηλή τάση πόλωσης του ανιχνευτή (High Voltage). Πρέπει να επισημανθεί πάντως ότι το πάχος του dead layer δεν είναι γνωστό επακριβώς, ούτε και απαραίτητα σταθερό σε όλη την επιφάνεια του ανιχνευτή. Στο σχήμα 3.3 στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται η σχηματική απεικόνιση ενός τέτοιου ανιχνευτή Γερμανίου και στο σχήμα 3.4 μία φωτογραφία του HPGe ανιχνευτή του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Σύμφωνα με το πιστοποιητικό που τον συνοδεύει (Παράρτημα Β, πίνακας Β.1), ο ανιχνευτής HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει διάμετρο κρυστάλλου ίση με 55.3 mm και ύψος 65 mm. Τα εξωτερικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Διάμετρος	55.3 mm
Ύψος	65 mm
Ενεργός περιοχή που «βλέπει» το παράθυρο	24.15 cm ²
Απόσταση από το παράθυρο	5 mm

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά ανιχνευτή Γερμανίου σύμφωνα με το πιστοποιητικό του

Όπως είναι φανερό, από τον πίνακα 3.1, στο πιστοποιητικό που διατίθεται από τον κατασκευαστή δίνονται μόνο οι συνολικές διαστάσεις του ανιχνευτή, χωρίς να προσδιορίζεται ο όγκος του «καθαρού» ανιχνευτή. Είναι δηλαδή γνωστές οι διαστάσεις που περιγράφουν τον ολικό όγκο του κρυστάλλου Γερμανίου -που περιλαμβάνει τόσο τον «ενεργό» κρύσταλλο όσο και το dead layer- αλλά άγνωστα τα ακριβή όρια και οι διαστάσεις των δύο αυτών περιοχών. Επιπλέον, σημειώνεται ότι κατά τον άξονα των ανιχνευτών αυτού του τύπου προβλέπεται από την κατασκευή η ύπαρξη ομοαξονικής οπής (finger), της οποίας οι διαστάσεις επίσης δεν δίνονται (σχήμα 3.3 στο τέλος του κεφαλαίου). Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι στο πιστοποιητικό του ανιχνευτή δεν αναγράφεται το πάχος του παραθύρου Al που βρίσκεται στο άνω τμήμα του ανιχνευτή παρ'ότι δίνεται η απόσταση του παραθύρου από την επιφάνεια του κρυστάλλου.

Όπως είναι προφανές, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της απόκρισης ενός ανιχνευτή HPGe εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια

με την οποία είναι γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Το πρόβλημα της έλλειψης πληροφοριών σχετικά με τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτών HPGe αναφέρεται σχετικά συχνά στη βιβλιογραφία σε περιπτώσεις που επιχειρείται η προσομοίωσή τους (Dryak and Kovar, 2006, Vidmar et al., 2007). Στις περιπτώσεις αυτές, η λύση η οποία δίνεται είναι ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που δεν είναι γνωστά με πειραματικές μεθόδους. Τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται πειραματικά χρησιμοποιούνται εν συνεχεία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στα πλαίσια της Δ.Ε., επιχειρήθηκε να ανευρεθούν στη βιβλιογραφία, όσα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεν ήταν διαθέσιμα (όπως οι διαστάσεις της ομοαξονικής οπής, του στρώματος dead layer και του παραθύρου Al). Τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά ελέγχθηκαν εν συνεχεία πειραματικά και τροποποιήθηκαν όπου κρίθηκε απαραίτητο.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Gilmore and Hemingway, 1995) αλλά και τις πληροφορίες που δίνουν οι κατασκευαστές των συγκεκριμένων ανιχνευτικών διατάξεων (www.canberra.com), ανιχνευτές τύπου HPGe έχουν συνήθως παράθυρο Al πάχους ~1.5 mm, στρώμα dead layer με πάχος που κυμαίνεται περί τα 700μm και οπή κυλινδρικού σχήματος, ύψους ~40 mm και διαμέτρου 10mm. Αυτές οι τυπικές τιμές χρησιμοποιήθηκαν ως τιμές «εκκίνησης» στη διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού των ακριβών διαστάσεων του ανιχνευτή του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ο προσδιορισμός των ακριβών διαστάσεων του ανιχνευτή (όχι του κρυστάλλου) και ιδιαίτερος του πάχους του dead layer αποτέλεσε μάλιστα ένα από τα βασικά στάδια της διαδικασίας βαθμονόμησης του ανιχνευτή κι έναν από τους επιμέρους στόχους της Δ.Ε..

3.1.2 Θωράκιση ανιχνευτή Γερμανίου.

Οι ανιχνευτές HPGe λειτουργούν σχεδόν πάντα τοποθετημένοι μέσα σε ειδική θωράκιση που έχει στόχο να απομονώνει τον ανιχνευτή, κατά το δυνατόν, από οποιαδήποτε ακτινοβολία δεν προέρχεται από το υπό ανάλυση δείγμα, όπως είναι η κοσμική ακτινοβολία, ακτίνες-γ από άλλες πηγές που βρίσκονται στο χώρο ή ακόμα και η ραδιενέργεια από τα οικοδομικά υλικά και το περιβάλλον. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή θωράκισης από την γ-ακτινοβολία

είναι αυτά που έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό άρα και αυξημένη ικανότητα εξασθένησης φωτονίων. Ακριβώς επειδή συνδυάζουν την αποτελεσματική θωράκιση και το σχετικά χαμηλό κόστος, ο μόλυβδος και το ατσάλι είναι τα δύο υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένη η συντριπτική πλειοψηφία των θωρακίσεων που περιβάλλουν ανιχνευτές γ-ακτινοβολίας.

Η θωράκιση του ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι κυβική, με κυλιόμενο «κάλυμμα», τύπου “roll top” (σχήματα 3.5 - 3.6 στο τέλος του κεφαλαίου). Στην κάτω πλευρά της υπάρχει κυκλική οπή που επιτρέπει τη σύνδεση του ανιχνευτή με το δοχείο υγρού αζώτου. Τα τοιχώματα της θωράκισης αποτελούνται από τρία στρώματα υλικών: το πρώτο (ξεκινώντας από το εσωτερικό προς τα έξω) είναι φύλλο χαλκού, το δεύτερο φύλλο κασσίτερου και το κυρίως στρώμα είναι ατσάλι. Η ύπαρξη των εσωτερικών στρωμάτων έχει ως στόχο να θωρακίζει τον ανιχνευτή από τις χαρακτηριστικές ακτίνες-Χ που παράγονται στην κυρίως θωράκιση (ατσάλι) κατά την αλληλεπίδραση με αυτήν της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το αναλυόμενο δείγμα. Σημειώνεται ότι στο πιστοποιητικό της θωράκισης δε διευκρινίζεται αν το εξωτερικό στρώμα είναι φτιαγμένο από ατσάλι ή μόλυβι με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η εκτενής διερεύνηση σε σχέση με τα υλικά. Η αναζήτηση πληροφοριών από την κατασκευάστρια εταιρεία οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα των συγκεκριμένων διαστάσεων είναι όλα φτιαγμένα από ατσάλι, πράγμα που επιβεβαιώθηκε και από επιτόπιο (οπτικό) έλεγχο της θωράκισης. Στον πίνακα 3.2 που βρίσκεται στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της θωράκισης, όπως αυτά προέκυψαν από την προαναφερθείσα διερεύνηση.

3.2 Διαδικασία προσδιορισμού διαστάσεων ανιχνευτή HPGe.

3.2.1 Αναγκαιότητα προσδιορισμού διαστάσεων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, για την διαδικασία βαθμονόμησης του ανιχνευτή HPGe με την τεχνική της προσομοίωσης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των διαστάσεών του με ακρίβεια, ώστε να είναι δυνατή η ακριβής περιγραφή του στα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης (αρχείο γεωμετρίας). Ακόμα και στην περίπτωση που είναι γνωστές όλες οι διαστάσεις του ανιχνευτή είναι σκόπιμο να ελέγχονται και

να επαληθεύονται, αφού δεν είναι λίγες οι δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες στις οποίες διαπιστώνονται αποκλίσεις των τιμών που υπολογίζονται από τις «ονομαστικές» τιμές που αναφέρονται στα πιστοποιητικά των ανιχνευτών. Τέτοιες ασυμφωνίες μπορεί να οφείλονται, για παράδειγμα, σε ανακριβή στοιχεία που δίνονται από τους κατασκευαστές (κατ'εκτίμηση τιμές), σε διαφοροποιήσεις με την πάροδο του χρόνου κάποιων χαρακτηριστικών (π.χ. του dead layer) λόγω της χρήσης του ανιχνευτή ή σε ατελείς συγκεντρώσεις φορτίου (Le Petit et al., 2006). Πολλές εργασίες πραγματεύονται το ζήτημα αυτό, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τη σημασία της όσο το δυνατόν πληρέστερης περιγραφής της διάταξης, προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να είναι κοντά στην πραγματικότητα. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η εργασία των P. Dryak - P. Kovar (2006), που αφορά τον προσδιορισμό των διαστάσεων ομοαξονικού ανιχνευτή HPGe τύπου-p, και αυτή των Le Petit et al. (2006), η οποία προτείνει μια εμπειρική μέθοδο για τον καθορισμό του πάχους του dead layer σε ανιχνευτή BeGe.

3.2.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού διαστάσεων.

Από τις παραμέτρους που συνήθως είναι άγνωστες -ή ανεπαρκώς γνωστές- για έναν ανιχνευτή η σημαντικότερη, ίσως, είναι το dead layer του ανιχνευτή. Υποθέτοντας -με καλή προσέγγιση- ότι το στρώμα “dead layer” είναι ομοιόμορφο σε όλη την «εξωτερική» επιφάνεια του κρυστάλλου, αρκεί να προσδιοριστεί το πάχος του. Επισημαίνεται ότι, τόσο η ομοιογένεια του κρυστάλλου, όσο και το σταθερό πάχος του dead layer είναι απλώς παραδοχές, που φυσικά δεν είναι δεδομένο ότι εξασφαλίζονται. Οι παραδοχές αυτές είναι δύσκολο και εξαιρετικά χρονοβόρο να ελεγχθούν πειραματικά. Εκτός από τον όγκο του ανενεργού κρυστάλλου, για την πλήρη περιγραφή του ανιχνευτή, πρέπει ακόμα να υπολογιστούν το πάχος του παραθύρου Al και το μέγεθος της οπής (finger) στο κέντρο του κρυστάλλου (σχήμα 3.3 στο τέλος του κεφαλαίου). Ζητούμενο συνεπώς αυτού του πρώτου σταδίου της Δ.Ε. ήταν ο ακριβής καθορισμός των 4 παραμέτρων:

- Πάχος dead layer
- Πάχος παραθύρου Al
- Ύψος οπής
- Διάμετρος οπής

Ο προσδιορισμός των παραπάνω διαστάσεων πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Δ.Ε. μέσω της σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων της απόδοσης φωτοκορυφής για συγκεκριμένες ενέργειες φωτονίων, με αυτά που προέκυψαν από την προσομοίωση. Συμφωνία μεταξύ των τιμών πειράματος-προσομοίωσης υποδεικνύει ότι το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και οι διαστάσεις του ανιχνευτή ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Σημαντική (στατιστικά) διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του πειράματος και της προσομοίωσης αποδίδεται στο γεγονός ότι ορισμένες από τις διαστάσεις του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και θα πρέπει να τροποποιηθούν αναλόγως.

Πρέπει στο σημείο αυτό να διευκρινισθεί ότι οι διαστάσεις που τελικά θα προκύψουν συνοδεύονται από μία αβεβαιότητα η οποία εξαρτάται τόσο από την αβεβαιότητα λόγω της προσομοίωσης, όσο και από την αβεβαιότητα λόγω της πειραματικής διαδικασίας (π.χ. η αβεβαιότητα των πηγών που χρησιμοποιούνται στα πειράματα). Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητό από την αρχή ότι, οι διαστάσεις οι οποίες τελικά θα προκύψουν δεν είναι απαραίτητο ότι θα είναι ταυτόσημες με τις αντίστοιχες πραγματικές διαστάσεις του ανιχνευτή. Οι διαστάσεις που εκτιμώνται είναι οι διαστάσεις εκείνες οι οποίες, μέσω της συγκεκριμένης προσομοίωσης, θα δίνουν αποτελέσματα για την απόδοση που δεν θα διαφέρουν από τα πειραματικά. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση και διάφορα φαινόμενα τα οποία δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν, όπως π.χ. η ατελής συλλογή φορέων σήματος σε κάποιες θέσεις του ανιχνευτή, η οποία μπορεί να ληφθεί υπόψη με χρήση ενός αυξημένου dead-layer για τον ανιχνευτή. Έτσι, είναι πιθανόν να υπάρχουν περισσότεροι από ένας συνδυασμοί διαστάσεων του ανιχνευτή που να δίνουν αποτελέσματα που δεν διαφέρουν από τα πειραματικά. Πάντως, η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας θα πρέπει να γίνεται με εκτίμηση της απόδοσης για μία σειρά ενεργειών και να επιδιώκεται η γεωμετρία εκείνη που θα δίνει την καλύτερη σύμπτωση αποτελεσμάτων για όλες τις ενέργειες φωτονίων.

Στα πλαίσια της Δ.Ε. για τον προσδιορισμό των διαστάσεων του ανιχνευτή HPGe χρησιμοποιήθηκαν αρχικά μόνο «σημειακές» πηγές, ενώ το κάλυμμα της θωράκισης του ανιχνευτή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρέμενε ανοιχτό.

3.2.2.1 Πειράματα με σημειακές πηγές.

Οι σημειακές πηγές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των διαστάσεων του ανιχνευτή παρατίθενται στον Πίνακα 3.3. Εκτός από τις ενέργειες των αντίστοιχων φωτοκορυφών, στον πίνακα φαίνονται επίσης οι κωδικοί των πηγών, οι τιμές της ονομαστικής ενεργότητας, όπως δίνονται από τον προμηθευτή των πηγών, καθώς και της ενεργότητας που είχαν την περίοδο διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων. Τα πιστοποιητικά των πηγών παρατίθενται στο Παράρτημα Β (πίνακες Β.2-Β.4).

Πηγή-Ισότοπο (κωδικός πηγής)	Ενέργεια (keV)	Χρόνος ημιζωής	Ονομαστική ενεργότητα (μCi) (ημερομηνία)	Σημερινή ενεργότητα (μCi) (ημερομηνία)
Ba-133 (7R192)	79,621	10,80 έτη	1,149 (1/1/1981)	0,205 (12/11/2007)
	80,997			
	276,400			
	302,840			
	356,010			
	383,850			
Cs-137 (75266)	661,670	30,17 έτη	0,993 (1/1/1981)	0,535 (23/10/2007)
Co-60 (1U557)	1173,200	5,27 έτη	11,910 (1/2/1981)	0,348 (30/10/2007)
	1332,500			

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά σημειακών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν

Τα πειράματα έγιναν με τις πηγές τοποθετημένες σε απόσταση 22.4 cm, κεντρικά πάνω από το παράθυρο του ανιχνευτή. Για κάθε σημειακή πηγή-ενέργεια η απόδοση φωτοκορυφής και το αντίστοιχο σφάλμα υπολογίσθηκαν από τις σχέσεις (2.4) και (2.11) που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Στους πειραματικούς υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές βάσεις δεδομένων για τις τιμές του ποσοστού εκπομπής (yield) των διαφόρων ισοτόπων.

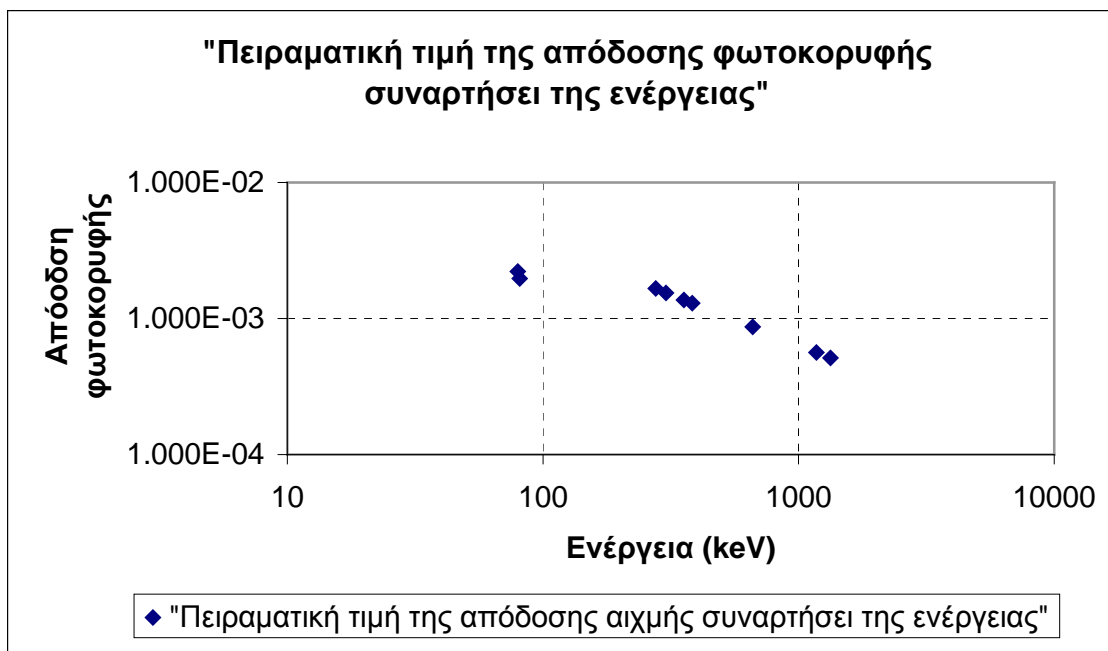
Αρχικά, για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τιμές του ποσοστού που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία (Gilmore & Hemingway, 1995). Για λόγους συντομίας, η συγκεκριμένη βιβλιογραφική πηγή θα συμβολίζεται στο εξής ως «πηγή Α». Τα αποτελέσματα των υπολογισμών της απόδοσης που έγιναν μετά τα πρώτα

πειράματα, τα οποία παρατίθενται στον πίνακα 3.4 και στο σχήμα 3.7, δημιούργησαν έντονο προβληματισμό, καθώς παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις της πειραματικής απόδοσης για γειτονικές ενέργειες φωτονίων (συγκεκριμένα για τα 79.6 και 80.9 keV του ^{133}Ba). Τόσο σημαντικές αποκλίσεις σε παραπλήσιες ενέργειες, και μάλιστα για γεωμετρία σημειακής πηγής δεν έχουν φυσική σημασία. Δημιουργήθηκε λοιπόν αμέσως προβληματισμός για το κατά πόσον αυτό μπορεί να οφείλεται στη χρήση «προβληματικών» ποσοστών εκπομπής για ορισμένες ενέργειες.

Για το λόγο αυτό αναζητήθηκαν τιμές του ποσοστού εκπομπής και σε άλλες βάσεις δεδομένων, και συγκεκριμένα στη βιβλιογραφική πηγή Monographie BIPM-5 (Be M. et al., 2004), η οποία προτείνεται από τη Διεθνή Επιτροπή Μετρολογίας Ραδιονουκλιδίων (ICRM, International Committee for Radionuclide Metrology).

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματική τιμή απόδοσης φωτοκορυφής (ποσοστά εκπομπής από πηγή A)	
		Τιμή	σφάλμα % (1σ)
Ba-133	79,621	2,213E-03	14,33
Ba-133	80,997	1,968E-03	7,12
Ba-133	276,4	1,660E-03	7,03
Ba-133	302,84	1,545E-03	7,02
Ba-133	356,01	1,369E-03	7,00
Ba-133	383,85	1,297E-03	7,01
Cs-137	661,67	8,670E-04	6,01
Co-60	1173,2	5,640E-04	2,00
Co-60	1332,5	5,140E-04	2,00

Πίνακας 3.4 Πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής ανά ισότοπο και ενέργεια για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm και ποσοστά εκπομπής από πηγή A



Σχήμα 3.7 Απόδοση αιχμής συναρτήσεϊ της ενέργειας για γεωμετρία σημειακής πηγής και απόσταση πηγής-ανιχνευτή 22.4 cm (και ποσοστά εκπομπής από πηγή Α).

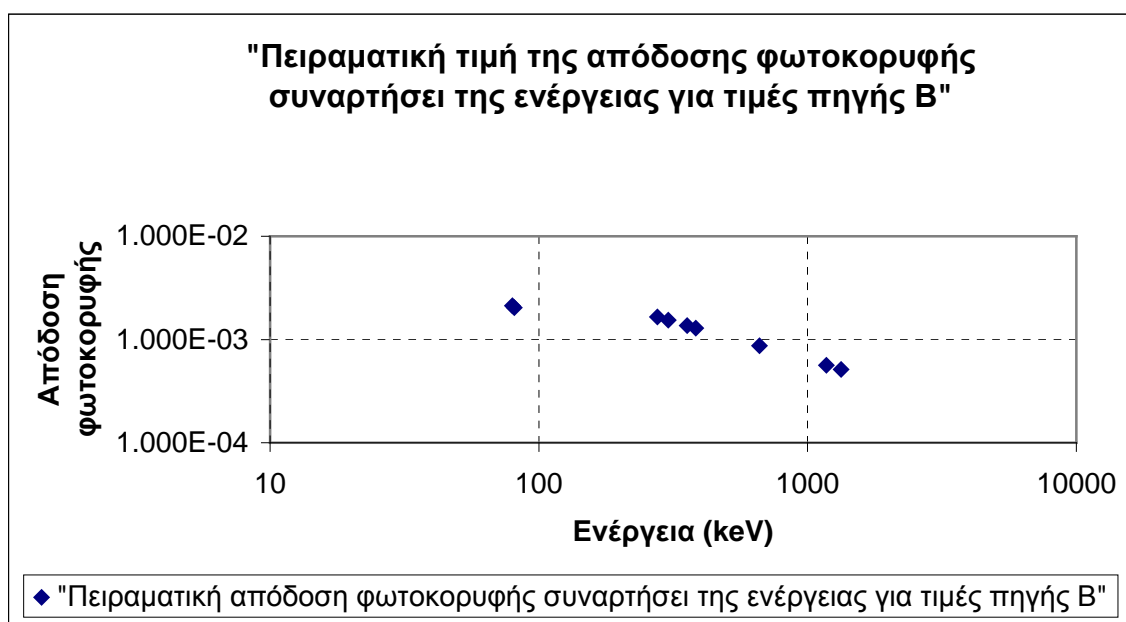
Στον πίνακα 3.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των ποσοστών εκπομπής, όπως αυτές καταγράφηκαν από τις δύο βάσεις δεδομένων, καθώς και οι μεταξύ τους αποκλίσεις. Για λόγους κωδικοποίησης, η πρώτη βιβλιογραφική πηγή (Gilmore & Hemingway, 1995) συμβολίζεται στον πίνακα ως «πηγή Α» ενώ η δεύτερη (Monographie BIPM-5) ως «πηγή Β».

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής από πηγή Α	Ποσοστό εκπομπής από πηγή Β	Απόκλιση % πηγών Α-Β
Ba-133	79,621	0,0255	0,0265	-3,92
Ba-133	80,997	0,3411	0,3290	3,55
Ba-133	276,4	0,0715	0,0716	-0,14
Ba-133	302,84	0,1830	0,1834	-0,22
Ba-133	356,01	0,6194	0,6205	-0,18
Ba-133	383,85	0,0891	0,0894	-0,34
Cs-137	661,67	0,8510	0,8499	0,13
Co-60	1173,2	0,9986	0,9985	0,01
Co-60	1332,5	0,9998	0,9998	0,00

Πίνακας 3.5 Ποσοστά εκπομπής από τις δύο πηγές δεδομένων

Όπως γίνεται φανερό από τον πίνακα 3.5, αν και σε κάποιες περιπτώσεις οι τιμές των ποσοστών πρακτικά ταυτίζονται (π.χ. για την φωτοκορυφή 1332.5 keV του ^{60}Co), υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τιμών που παρέχουν οι δύο πηγές. Μάλιστα, στην περίπτωση των φωτοκορυφών 79.6 και 80.9 του ^{133}Ba που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα, οι αποκλίσεις ανάμεσα στις δύο τιμές είναι της τάξης του 3.9 και 3.6 % αντίστοιχα.

Με στόχο τη διερεύνηση του κατά πόσο η απόκλιση της απόδοσης μεταξύ γειτονικών κορυφών-ενεργειών οφείλεται σε «προβληματικά» ποσοστά εκπομπής, οι υπολογισμοί της απόδοσης επαναλήφθηκαν με τις νέες τιμές του ποσοστού εκπομπής (από την πηγή B) για σημειακή πηγή σε απόσταση 22.4 cm από το παράθυρο του ανιχνευτή. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η απεικόνιση της απόδοσης αιχμής που υπολογίστηκε με βάση τα συγκεκριμένα ποσοστά εκπομπής συναρτήσει της ενέργειας. Ακολούθως, στον πίνακα 3.6 παρατίθενται ενδεικτικά για σύγκριση τα αποτελέσματα των υπολογισμών της απόδοσης φωτοκορυφής, που έγιναν χρησιμοποιώντας τις τιμές του ποσοστού εκπομπής από τις δύο πηγές, πάντα για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm.



Σχήμα 3.8 Απόδοση αιχμής συναρτήσει της ενέργειας για γεωμετρία σημειακής πηγής και απόσταση πηγής-ανιχνευτή 22.4 cm (και ποσοστά εκπομπής από πηγή B).

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πειραματική τιμή απόδοσης αιχμής (ποσοστό εκπομπής από πηγή A)		Πειραματική τιμή απόδοσης αιχμής (ποσοστό εκπομπής από πηγή B)	
		Τιμή	σφάλμα % (1σ)	Τιμή	σφάλμα % (1σ)
Ba-133	79,621	2,213E-03	14,33	2,129E-03	14,33
Ba-133	80,997	1,968E-03	7,12	2,040E-03	7,12
Ba-133	276,4	1,660E-03	7,03	1,658E-03	7,03
Ba-133	302,84	1,545E-03	7,02	1,541E-03	7,02
Ba-133	356,01	1,369E-03	7,00	1,367E-03	7,00
Ba-133	383,85	1,297E-03	7,01	1,293E-03	7,01
Cs-137	661,67	8,670E-04	6,01	8,670E-04	6,01
Co-60	1173,2	5,640E-04	2,00	5,642E-04	2,00
Co-60	1332,5	5,140E-04	2,00	5,138E-04	2,00

Πίνακας 3.6 Πειραματικές τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής ανά ισότοπο και ενέργεια για τις δύο περιπτώσεις ποσοστών εκπομπής και για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm

Όπως φαίνεται τόσο από τον πίνακα 3.6 όσο και από το σχήμα 3.8, με βάση τα ποσοστά εκπομπής της πηγής B προκύπτουν τιμές απόδοσης αιχμής που παρουσιάζουν αφ'ενός μικρότερες αποκλίσεις στις γειτονικές κορυφές αφ'ετέρου καλύτερη προσαρμογή στη μορφή που φαίνεται να έχει η συνάρτηση με βάση το σύνολο των τιμών. Για το λόγο αυτό, οι τιμές οι οποίες τελικά αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν στους πειραματικούς υπολογισμούς στη συνέχεια της εργασίας είναι αυτές της βιβλιογραφικής πηγής B (Monographie BIPM-5, Be M. et al., 2004).

3.2.2.2 Προσομοιώσεις με τον κώδικα PENELOPE.

Μετά την πειραματική εκτίμηση της απόδοσης, ακολούθησε η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του κώδικα PENELOPE. Η ανιχνευτική διάταξη περιγράφηκε στο αρχείο γεωμετρίας με τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια. Με εξαίρεση τις 4 υπό μελέτη παραμέτρους,

- Πάχος dead layer
- Πάχος παραθύρου Al
- Ύψος οπής
- Διάμετρος οπής

για όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία (πίνακας 3.1). Θεωρήθηκε στο σημείο αυτό ότι διαστάσεις, όπως η συνολική διάμετρος του κρυστάλλου Γερμανίου ή το ύψος του, οι οποίες δίνονται από τον κατασκευαστή, δεν θα έπρεπε να τροποποιηθούν. Όσες από τις διαστάσεις της διάταξης ήταν δυνατόν επιβεβαιώθηκαν και με ακριβείς μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο (π.χ. η διάμετρος του κρυστάτη).

Προκειμένου να καθορισθούν οι τιμές των παραπάνω τεσσάρων παραμέτρων για τις οποίες επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, έγινε μία σειρά προσομοιώσεων, στις οποίες δοκιμάστηκαν ποικίλοι συνδυασμοί των 4 παραμέτρων, που οδήγησαν σε ελαφρώς διαφορετικές 'γεωμετρίες ανιχνευτή' κάθε φορά.

Χρησιμοποιώντας ως τιμές «εκκίνησης» τις τιμές των παραμέτρων που ανευρέθηκαν από τη βιβλιογραφική έρευνα, μετά από κάθε κύκλο προσομοιώσεων τροποποιούνταν ελαφρώς ορισμένες από αυτές, με γνώμονα τη βελτίωση της σύγκλισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά για όλα τα ισότοπα-ενέργειες. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και οι διάφοροι συνδυασμοί που δοκιμάστηκαν περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Γεωμετρία ανιχνευτή A:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- χωρίς dead layer
- χωρίς οπή

Αρχικά δοκιμάστηκε προσομοίωση με γεωμετρία ανιχνευτή που λαμβάνει υπόψη μόνο το παράθυρο αλουμινίου, χωρίς να προβλέπει στρώμα dead layer ή οπή στο κέντρο του κυλινδρικού ανιχνευτή. Το πάχος του παραθύρου είναι αυτό που ορίζει η βιβλιογραφία (δηλ. 1.5 mm). Η πρώτη αυτή προσομοίωση είχε στόχο να γίνει μία αρχική εκτίμηση της απόδοσης για μία γεωμετρία που δεδομένα ήταν ελλειπής. Ακριβώς επειδή ενδιέφερε μόνο ως γενική εικόνα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για μία μόνο σημειακή πηγή, αυτή του ^{137}Cs . Η τιμή της απόδοσης που υπολογίστηκε μέσω προσομοίωσης, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από τις

πειραματικές μετρήσεις (με βάση πάντα τα ποσοστά εκπομπής από την πηγή B) φαίνονται στον πίνακα 3.7.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση-Γεωμετρία A		Απόκλιση %
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	9,810E-04	0,160	-13,144

Πίνακας 3.7 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής ^{137}Cs για γεωμετρία προσομοίωσης A

Όπως παρατηρείται, η τιμή που υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πειραματική, κάτι που είναι σχετικά αναμενόμενο καθώς στη συγκεκριμένη γεωμετρία δεν έχει συμπεριληφθεί η οπή και το dead layer. Η ύπαρξή τους θα μείωνε τον ενεργό όγκο του κρυστάλλου Γερμανίου που αλληλεπιδρά με σωματίδια, άρα και την απόδοση του ανιχνευτή. Συνεπώς, η προσθήκη οπής και dead layer στη γεωμετρία αναμένεται να μειώσει την απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Γεωμετρία ανιχνευτή B:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 700 μm, στην άνω πλευρά μόνο
- χωρίς οπή

Στην επόμενη γεωμετρία που δοκιμάστηκε προστέθηκε και το dead layer, το οποίο θεωρήθηκε ότι υπάρχει μόνο στην άνω πλευρά του ανιχνευτή και έχει πάχος 700 μm (ενδεικτική τιμή της βιβλιογραφίας για τον τύπο αυτό του ανιχνευτή). Το πάχος του παραθύρου Al παραμένει ίσο με 1.5 mm, ενώ δεν έχει συμπεριληφθεί η κυλινδρική οπή. Η γεωμετρία αυτή αποσκοπούσε κυρίως στη διερεύνηση της μεταβολή της τιμής της απόδοσης που σχετίζεται με την προσθήκη του dead layer. Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τη μονοενεργειακή πηγή του ^{137}Cs και για τις δύο ενέργειες του ^{60}Co . Οι τιμές της απόδοσης που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης φαίνονται στον πίνακα 3.8, όπου γίνεται σύγκριση και με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση-Γεωμετρία Β		Απόκλιση %
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	9,470E-04	0,150	-9,223
Co-60	1173,200	5,642E-04	2,000	6,263E-04	0,200	-11,010
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	5,698E-04	0,210	-10,890

Πίνακας 3.8 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για γεωμετρία προσομοίωσης Β

Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα για το ^{137}Cs , η τιμή της απόδοσης που υπολογίστηκε με τη γεωμετρία Β βρίσκεται πιο κοντά στην πειραματική τιμή απ'ότι η αντίστοιχη με τη γεωμετρία Α, όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.8. Διαπιστώνεται ότι με την προσθήκη του dead layer η απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη ενέργεια μειώθηκε ελαφρώς, πράγμα που ήταν αναμενόμενο, αφ'ενός γιατί μειώθηκε ελαφρώς ο όγκος του ενεργού κρυστάλλου (active body), αφ'ετέρου διότι στο dead layer παρουσιάζεται μικρή εξασθένηση των φωτονίων.

Γεωμετρία ανιχνευτή Γ:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 700 μm, γύρω από τον ανιχνευτή
- χωρίς οπή

Στη συγκεκριμένη γεωμετρία δοκιμάστηκε επέκταση του dead layer σε όλη την εξωτερική επιφάνεια του κρυστάλλου, προκειμένου να μειωθεί ακόμη πιο πολύ ο ενεργός όγκος και να πλησιάσουν περισσότερο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στα αντίστοιχα πειραματικά. Το πάχος του παραθύρου Al καθώς και αυτό του dead layer παραμένουν σταθερά. Οι προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν για τη μονοενεργειακή πηγή του ^{137}Cs και για τις δύο ενέργειες του ^{60}Co . Χρησιμοποιήθηκε ακόμα και πηγή ^{133}Ba , η οποία «δίνει» πολλές φωτοκορυφές με ποικιλία ενεργειών. Οι τιμές της απόδοσης που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης για τη γεωμετρία Γ καθώς και οι αντίστοιχες πειραματικές φαίνονται στον πίνακα 3.9.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση-Γεωμετρία Γ		Απόκλιση %
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	
Ba-133	79,621	2,129E-03	14,330	2,175E-03	0,050	-2,147
Ba-133	80,997	2,040E-03	7,120	2,204E-03	0,050	-8,040
Ba-133	276,400	1,658E-03	7,030	1,755E-03	0,050	-5,873
Ba-133	302,840	1,541E-03	7,020	1,636E-03	0,060	-6,148
Ba-133	356,010	1,367E-03	7,000	1,439E-03	0,060	-5,290
Ba-133	383,850	1,293E-03	7,010	1,355E-03	0,060	-4,819
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	8,848E-04	0,075	-2,045
Co-60	1173,200	5,642E-04	2,000	5,820E-04	0,090	-3,158
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	5,295E-04	0,097	-3,047

Πίνακας 3.9 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για γεωμετρία προσομοίωσης Γ

Με την αύξηση του όγκου του dead layer καταγράφεται, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, μικρή περαιτέρω μείωση της τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής. Αν και η βελτίωση είναι αισθητή, η απόκλιση μεταξύ αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης παραμένει σημαντική. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται βέβαια από το γεγονός ότι η γεωμετρία παραμένει ελλιπής, καθώς δεν έχει ακόμα ληφθεί υπόψη η οπή. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.9 είναι φανερό ότι η προσθήκη της οπής (finger) στη γεωμετρία του ανιχνευτή θα οδηγήσει σε αποτελέσματα προσομοίωσης που θα είναι σε καλύτερη σύμπτωση με τα πειραματικά, για το λόγο αυτό η επόμενη γεωμετρία που προσομοιώθηκε διέθετε και εσωτερική οπή.

Γεωμετρία ανιχνευτή Δ:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 700 μm, μόνο περιφερειακά του ανιχνευτή
- οπή ύψους 40 mm, διαμέτρου 10 mm, χωρίς dead layer στο εσωτερικό

Κατασκευάζεται γεωμετρία που περιλαμβάνει και κυλινδρική οπή, ομοαξονική με τον κυλινδρικό κρύσταλλο. Οι διαστάσεις που δοκιμάζονται αρχικά για την οπή είναι αυτές που προτείνονται από τους διάφορους κατασκευαστές και απαντώνται – σύμφωνα με τη βιβλιογραφία- σε πλήθος ανιχνευτών αυτού του τύπου (με finger). Το πάχος του παραθύρου Al καθώς και αυτό του dead layer παραμένουν σταθερά, όμως

αλλάζει η έκταση του dead layer. Στη συγκεκριμένη γεωμετρία, προβλέπεται dead layer μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του κρυστάλλου και όχι στην κάτω και στην εσωτερική πλευρά που σχηματίζει το finger, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται ελαφρώς ο όγκος του dead layer σε σχέση με τη γεωμετρία Γ. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τις πηγές ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba , τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.10.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση-Γεωμετρία Δ		Απόκλιση %
		Τιμή	σ % (1 σ)	Τιμή	σ % (1 σ)	
Ba-133	79,621	2,129E-03	14,330	2,175E-03	0,052	-2,147
Ba-133	80,997	2,040E-03	7,120	2,204E-03	0,048	-8,050
Ba-133	276,400	1,658E-03	7,030	1,739E-03	0,054	-4,884
Ba-133	302,840	1,541E-03	7,020	1,617E-03	0,056	-4,941
Ba-133	356,010	1,367E-03	7,000	1,419E-03	0,060	-3,849
Ba-133	383,850	1,293E-03	7,010	1,334E-03	0,061	-3,226
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	8,643E-04	0,092	0,316
Co-60	1173,200	5,642E-04	2,000	5,642E-04	0,094	-0,003
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	5,126E-04	0,099	0,242

Πίνακας 3.10 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για γεωμετρία προσομοίωσης Δ

Με την προσθήκη της οπής στη γεωμετρία, διαπιστώνεται αισθητή μείωση της τιμής της απόδοσης αιχμής που υπολογίζεται με χρήση προσομοίωσης και ικανοποιητική προσέγγισή της στην πειραματική τιμή για όλα τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια με υψηλές ενέργειες. Στην περίπτωση, μάλιστα, των φωτοκορυφών του ^{60}Co (1173.2 & 1332.5 keV) οι πειραματικές τιμές και οι τιμές προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζονται. Παρ'όλα αυτά, για τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών υπάρχουν ακόμα σημαντικά περιθώρια βελτίωσης.

Γεωμετρία ανιχνευτή E:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 700 μm , γύρω-γύρω, όχι στο εσωτερικό
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 10 mm

Στην προσπάθεια να επιτευχθεί μεγαλύτερη σύγκλιση τιμών μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, δοκιμάσθηκε μία ακόμα τροποποίηση της γεωμετρίας. Κρατώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους (σε σχέση πάντα με την προηγούμενη γεωμετρία Δ), ετέθη το ύψος του finger ίσο με 50 mm. Η αύξηση του όγκου της οπής θα οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση της απόδοσης αφού σημαίνει μείωση του όγκου του ενεργού κρυστάλλου. Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για την πηγή ^{137}Cs , για τις δύο ενέργειες του ^{60}Co καθώς και για τις 4 από τις 6 συνολικά φωτοκορυφές του ^{133}Ba . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.11.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση-Γεωμετρία Ε		Απόκλιση %
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	
Ba-133	276,400	1,658E-03	7,030	1,723E-03	0,054	-3,967
Ba-133	302,840	1,541E-03	7,020	1,602E-03	0,056	-3,968
Ba-133	356,010	1,367E-03	7,000	1,404E-03	0,060	-2,744
Ba-133	383,850	1,293E-03	7,010	1,320E-03	0,062	-2,081
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	8,522E-04	0,077	1,711
Co-60	1173,200	5,642E-04	2,000	5,553E-04	0,095	1,574
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	5,042E-04	0,104	1,876

Πίνακας 3.11 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για γεωμετρία προσομοίωσης Ε

Από τον πίνακα 3.11, φαίνεται πως με τη γεωμετρία Ε βελτιώνεται περαιτέρω η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Διαπιστώνεται επίσης ότι υπάρχει μία τάση όσον αφορά την τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής σε σχέση με την ενέργεια. Η πειραματική τιμή είναι μεγαλύτερη από την τιμή της προσομοίωσης (απόκλιση θετική) για τις υψηλές ενέργειες (^{137}Cs και ^{60}Co) ενώ το αντίστροφο (απόκλιση αρνητική) συμβαίνει στις χαμηλότερες ενέργειες (^{133}Ba). Στο σημείο αυτό ελήφθη η απόφαση να δοκιμασθεί νέα γεωμετρία, με τροποποίηση του πάχους του dead layer.

Γεωμετρία ανιχνευτή ΣΤ:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 10 mm

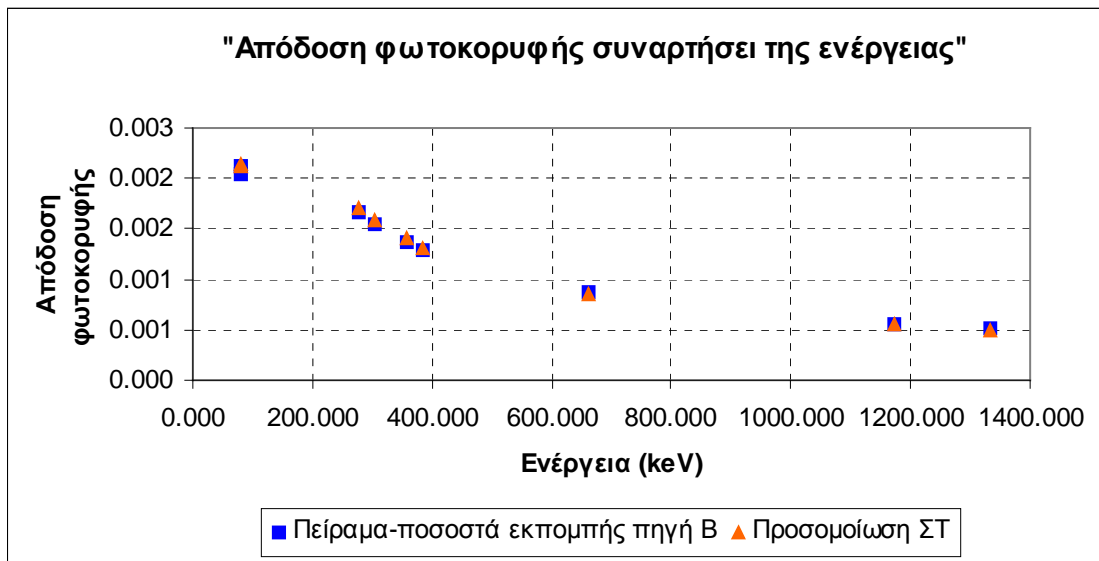
Στη γεωμετρία αυτή επελέγη η αύξηση του πάχους του dead layer στην άνω πλευρά του ανιχνευτή (760 μm) ενώ παρέμεινε ως έχει (700 μm) στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια. Η επιλογή αυτή αναμένεται να μειώσει την απόκλιση στις χαμηλές ενέργειες, χωρίς να επηρεάσει ιδιαίτερα τις υψηλές ενέργειες. Οι διαστάσεις του παραθύρου Al και της οπής παραμένουν οι ίδιες. Στον πίνακα 3.12 φαίνονται οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής για τις πηγές ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία καθώς και οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Υπενθυμίζεται ότι οι πειραματικές τιμές έχουν υπολογιστεί με χρήση των ποσοστών εκπομπής της πηγής B και αναφέρονται σε απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm.

Εκτός από τις τιμές της απόκλισης, στον πίνακα 3.12 παρατίθενται και οι τιμές του U-test, το οποίο σε αυτό το σημείο κρίθηκε σκόπιμο να γίνει, ώστε να ελεγχθεί αν οι τιμές πειράματος και προσομοίωσης που υπολογίζονται για κάθε ισότοπο-ενέργεια παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση-Γεωμετρία ΣΤ		Απόκλιση %	Τιμή U-test
		Τιμή	σ % (1 σ)	Τιμή	σ % (1 σ)		
Ba-133	79,621	2,129E-03	14,330	2,114E-03	0,049	0,737	0,051
Ba-133	80,997	2,040E-03	7,120	2,145E-03	0,044	-5,143	0,722
Ba-133	276,400	1,658E-03	7,030	1,716E-03	0,054	-3,524	0,501
Ba-133	302,840	1,541E-03	7,020	1,596E-03	0,056	-3,545	0,505
Ba-133	356,010	1,367E-03	7,000	1,399E-03	0,060	-2,352	0,336
Ba-133	383,850	1,293E-03	7,010	1,315E-03	0,062	-1,705	0,243
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	8,495E-04	0,077	2,023	0,336
Co-60	1173,200	5,642E-04	2,000	5,537E-04	0,095	1,860	0,929
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	5,029E-04	0,100	2,126	1,062

Πίνακας 3.12 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για γεωμετρία προσομοίωσης ΣΤ

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων απεικονίζεται και στο γράφημα που ακολουθεί (σχήμα 3.9), στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμών (πείραμα-μπλε τετράγωνα σημεία και προσομοίωση-κόκκινα τρίγωνα σημεία).



Σχήμα 3.9 Απόδοση φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας. Σύγκριση πειράματος (ποσοστά εκπομπής B) και προσομοίωσης (γεωμετρία ΣΤ)

Με βάση τόσο τα αποτελέσματα του πίνακα 3.12 όσο και το αντίστοιχο γράφημα, προκύπτει πως οι αποκλίσεις των τιμών πειράματος και προσομοίωσης έχουν μειωθεί αρκετά και βρίσκονται στο χαμηλότερο επίπεδο από όλες τις γεωμετρίες που έχουν δοκιμαστεί μέχρι τώρα. Επιπροσθέτως, οι τιμές του U-test, σύμφωνα πάντα με το κριτήριο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3.3 του κεφαλαίου 2, υποδεικνύουν ότι οι διαφορές που υπάρχουν δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

Με τη Γεωμετρία ΣΤ ολοκληρώθηκε ο κύκλος πειραμάτων και προσομοιώσεων για σημειακές πηγές που αποσκοπούσε στην εκτίμηση των πραγματικών διαστάσεων του ανιχνευτή HPGe. Η σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων, κρίθηκε ότι έχει φτάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα (απόκλιση μικρότερη του 5 % κατά μέσο όρο και διαφορές μη-σημαντικές).

3.2.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων-προσομοιώσεων.

Στον πίνακα 3.13 που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι τιμές των αποκλίσεων μεταξύ πειραματικών και τιμών προσομοίωσης για όλες τις γεωμετρίες που έχουν δοκιμαστεί ως τώρα.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση πειράματος - προσομοίωσης (%)					
		Γεωμετρία Α	Γεωμετρία Β	Γεωμετρία Γ	Γεωμετρία Δ	Γεωμετρία Ε	Γεωμετρία ΣΤ
Ba-133	79,621	-	-	-2,147	-2,147	-	0,737
Ba-133	80,997	-	-	-8,040	-8,050	-	-5,143
Ba-133	276,400	-	-	-5,873	-4,884	-3,967	-3,524
Ba-133	302,840	-	-	-6,148	-4,941	-3,968	-3,545
Ba-133	356,010	-	-	-5,290	-3,849	-2,744	-2,352
Ba-133	383,850	-	-	-4,819	-3,226	-2,081	-1,705
Cs-137	661,670	-13,144	-9,223	-2,045	0,316	1,711	2,023
Co-60	1173,200	-	-11,010	-3,158	-0,003	1,574	1,860
Co-60	1332,500	-	-10,890	-3,047	0,242	1,876	2,126

Πίνακας 3.13 Σύγκριση αποκλίσεων πειράματος-προσομοίωσης για μια σειρά γεωμετριών προσομοίωσης

Όπως γίνεται φανερό και από τον πίνακα 3.13, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη γεωμετρία ΣΤ είναι αυτές που δίνουν τις μικρότερες αποκλίσεις με τα πειραματικά αποτελέσματα στο σύνολο των ενεργειών. Αν και στις υψηλές ενέργειες (π.χ. 1173.2 & 1332.5 keV του ^{60}Co) οι αποκλίσεις παρουσιάζουν ελάχιστη τιμή για άλλη γεωμετρία (π.χ. γεωμετρία Δ), η τελευταία αυτή γεωμετρία ΣΤ συνδυάζει χαμηλές αποκλίσεις και σε χαμηλές και σε υψηλές ενέργειες.

Μετά την ολοκλήρωση των 6 κύκλων προσομοιώσεων και με δεδομένη την ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, αποφασίσθηκε να γίνουν αποδεκτές οι τιμές των 4 παραμέτρων-διαστάσεων που δοκιμάστηκαν στον τελευταίο κύκλο προσομοιώσεων (γεωμετρία ΣΤ):

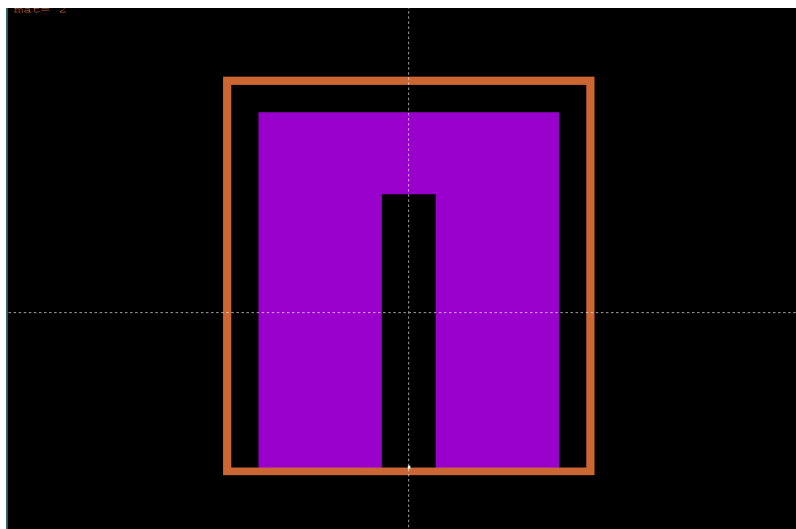
- Πάχος dead layer : 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- Πάχος παραθύρου Al : 1.5 mm
- Ύψος οπής : 50 mm
- Διάμετρος οπής : 10 mm

Η συνολική γεωμετρία του ανιχνευτή Γερμανίου, όπως έχει διαμορφωθεί μετά τη διαδικασία προσδιορισμού των διαστάσεων, περιγράφεται στον πίνακα 3.14, στον οποίο παρατίθενται και τα υπόλοιπα δεδομένα από τον κατασκευαστή γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ενώ στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η απεικόνισή της, όπως δίνεται από το πρόγραμμα gniew2d. Αυτή είναι και η γεωμετρία που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις που ακολουθούν.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι όλες οι παραπάνω δοκιμές έχουν γίνει για γεωμετρία σημειακής πηγής. Η σημασία της παρατήρησης αυτής θα φανεί στη συνέχεια.

Πάχος dead layer	760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά	Υπολογισμένες κατά τη διαδικασία προσδιορισμού διαστάσεις
Διάμετρος οπής	10 mm	
Ύψος οπής	50 mm	
Πάχος παραθύρου Al	1.5 mm	Δεδομένες από τον κατασκευαστή παράμετροι
Διάμετρος κρυστάλλου	55.3 mm	
Ύψος κρυστάλλου	65 mm	
Ενεργός περιοχή που «βλέπει» το παράθυρο	24.15 cm^2	
Απόσταση από το παράθυρο	5 mm	

Πίνακας 3.14 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή Γερμανίου ΕΠΤ-ΕΜΠ



Σχήμα 3.10 Απεικόνιση γεωμετρίας ανιχνευτή Γερμανίου ΕΠΤ-ΕΜΠ

3.2.3 Έλεγχος με γεωμετρίες όγκου.

Με στόχο την επιβεβαίωση των διαστάσεων που υπολογίστηκαν με τη χρήση σημειακών πηγών, αλλά και τη διερεύνηση του κατά πόσον αυτές οι διαστάσεις θα οδηγούσαν, μέσω προσομοίωσης, σε ικανοποιητική εκτίμηση της απόδοσης για γεωμετρία πηγής όγκου, αποφασίστηκε να ακολουθήσει μία σειρά προσομοιώσεων και πειραμάτων για πηγές όγκου. Ο έλεγχος αυτός είναι απολύτως απαραίτητος, καθώς ενδέχεται μία γεωμετρία ανιχνευτή η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για γεωμετρία σημειακής πηγής, να δίνει μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών πειράματος και προσομοίωσης για μια πηγή όγκου, ή ακόμα και για μία άλλη γεωμετρία σημειακής πηγής.

Πρέπει στο σημείο αυτό να τονισθεί ότι η ‘ακριβής’ γεωμετρία του ανιχνευτή, η οποία εκτιμήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο δεν είναι τίποτα περισσότερο από μία γεωμετρία που οδηγεί σε αποτελέσματα προσομοίωσης τα οποία δεν διαφέρουν από τις πειραματικές τιμές της απόδοσης για την υπόψη γεωμετρία πηγής ανιχνευτή, και δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στην *πραγματική* γεωμετρία του ανιχνευτή. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσε να υπάρχει και άλλη, ή άλλες ‘ακριβείς’ γεωμετρίες ανιχνευτή που να οδηγούσαν σε αποτελέσματα προσομοίωσης συμβατά με τα πειραματικά.

Επιπλέον, το γεγονός ότι μία συγκεκριμένη γεωμετρία ανιχνευτή οδηγεί σε αποτελέσματα προσομοίωσης που δεν διαφέρουν από τα πειραματικά για μία συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή (π.χ. σημειακής πηγής τοποθετημένης πάνω από τον ανιχνευτή), δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η ίδια γεωμετρία ανιχνευτή θα δίνει αποτελέσματα προσομοίωσης συμβατά με τα πειραματικά για μία άλλη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή (π.χ. γεωμετρία Marinelli). Αυτό διότι, ενώ στην περίπτωση γεωμετρίας σημειακής πηγής η απόδοση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη από το dead layer στην κορυφή του ανιχνευτή, στην περίπτωση της γεωμετρίας Marinelli η απόδοση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη από το dead layer περιφερειακά.

Στη διαδικασία ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν 2 πηγές όγκου, για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις και προσομοιώσεις. Η μεθοδολογία και σε αυτή την περίπτωση βασίζεται στη σύγκριση των πειραματικών τιμών με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται ξεχωριστά οι πειραματικοί και μέσω προσομοίωσης υπολογισμοί.

3.2.3.1 Πειράματα με πηγές όγκου.

Για τη διαδικασία ελέγχου με πηγές όγκου αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί μονοενεργειακή πηγή φωτονίων. Ένα ισότοπο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή μονοενεργειακής πηγής φωτονίων είναι το ραδιενεργό κάλιο (^{40}K), το οποίο εκπέμπει ένα μοναδικό φωτόνιο ενέργειας 1460.8 keV. Το ραδιενεργό ισότοπο ^{40}K αποτελεί το 0.0117 % (φυσική ισοτοπική σύσταση) του φυσικού καλίου (Monographie BIPM-5, Be M. et al., 2004).

Για τη δημιουργία πηγών όγκου, στα πλαίσια της ΔΕ χρησιμοποιήθηκε τυποποιημένο κυλινδρικό δοχείο, όγκου 282cm^3 , το οποίο χρησιμοποιείται για τη συσκευασία στερεών και υγρών δειγμάτων. Σημειώνεται ότι το δοχείο δεν είναι απόλυτα κυλινδρικό αλλά έχει ελαφρώς κωνικό σχήμα. Η κωνικότητα του δοχείου έχει μελετηθεί σε παλιότερες εργασίες (Αναγνωστάκης Μ., 1998), από όπου προέρχονται και τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα Δ.Ε.. Η κλίση-κωνικότητα περιγράφεται από τη συνάρτηση

$$R = 0.029h + 3.54 \quad (3.1)$$

όπου:

h : το ύψος του δοχείου και

R : η ακτίνα στο συγκεκριμένο ύψος

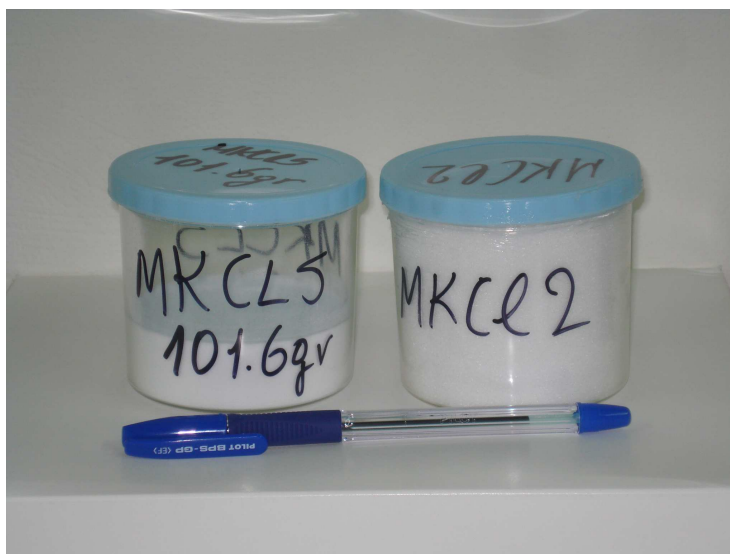
Τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου δίνονται στους πίνακες 3.15 και 3.16 στο τέλος του κεφαλαίου. Το δοχείο είναι κατασκευασμένο από πλαστικό υλικό, πάχους $\sim 1\text{mm}$, το οποίο παρουσιάζει εν γένει χαμηλή εξασθένηση για τα φωτόνια, με εξαίρεση αυτά των πολύ χαμηλών ενεργειών ($< 50\text{keV}$). Με βάση το δοχείο αυτό κατασκευάστηκαν πηγές δύο διαφορετικών γεωμετριών:

- Η πρώτη γεωμετρία πηγής αντιστοιχεί σε όγκο υλικού 282cm^3 (το δοχείο είναι γεμάτο με υλικό γνωστής συγκέντρωσης σε ^{40}K). Η γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, όταν το δοχείο όγκου 282cm^3 είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω στον ανιχνευτή, έχει την κωδική ονομασία “γεωμετρία 2”.
- Η δεύτερη γεωμετρία αντιστοιχεί σε όγκο υλικού 97.2cm^3 (το δοχείο είναι γεμάτο με υλικό γνωστής συγκέντρωσης σε ^{40}K , έως τα 2.2 cm του συνολικού ύψους του). Η γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, όταν το δοχείο όγκου 97.2cm^3 είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω στον ανιχνευτή, έχει την κωδική ονομασία “γεωμετρία 5”.

Όσον αφορά στα υλικά, για την παρασκευή των πηγών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

- Άλας KCl, το οποίο διατίθεται σε μορφή σκόνης KCl πολύ υψηλής καθαρότητας (>99.9%). Η σκόνη KCl τοποθετείται -αφού ξηρανθεί- στο δοχείο και σφραγίζεται για να αποφευχθεί η προσρόφηση υγρασίας. Από το υλικό αυτό παρασκευάστηκε μία πηγή γεωμετρίας '2' με κωδικό MKCl2 και μία πηγή γεωμετρίας '5' με κωδικό MKCl5.
- Πιστοποιημένο πρότυπο χώμα με κωδικό IAEA 327 (Reference Soil Sample) (το πιστοποιητικό της πηγής παρατίθεται στο παράρτημα Β) το οποίο έχει προμηθευτεί το ΕΠΤ-ΕΜΠ από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ). Από το υλικό αυτό είχαν παρασκευασθεί στο παρελθόν (2006-07) δύο πηγές γεωμετρίας '2', με κωδικούς ΧΙΑΕΑ3271 και ΧΙΑΕΑ3272, και δύο πηγές γεωμετρίας '5', με κωδικούς ΧΙΑΕΑ3273 και ΧΙΑΕΑ3274.
- Δείγματα χώματος με κωδικούς IAEA 01 και IAEA 444 με τα οποία συμμετείχε το ΕΠΤ-ΕΜΠ σε Ασκήσεις Διαβαθμονόμησης δικτύου ALMERA του ΔΟΑΕ (ALMERA Network) τα έτη 2006 και 2007. Από τα υλικά αυτά είχαν παρασκευασθεί πηγές γεωμετρίας '5' με κωδικούς ALMERA52006 & ALMERA52007.

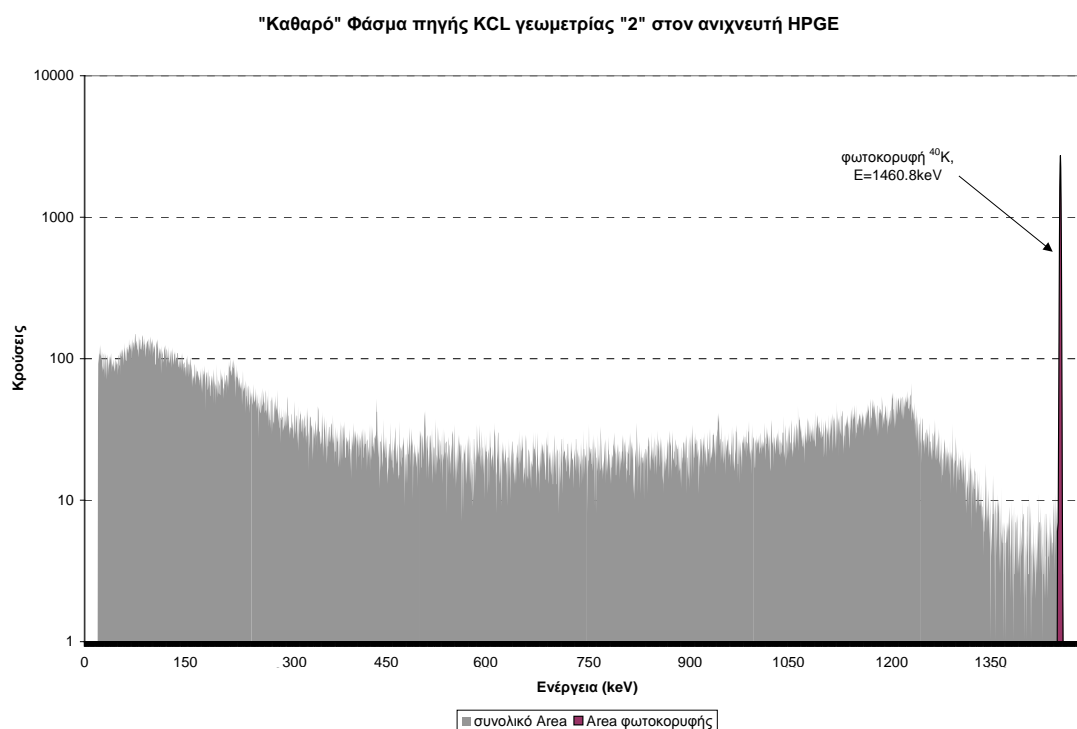
Στο σχήμα 3.11 φαίνονται οι πηγές όγκου γεωμετρίας '2' και γεωμετρίας '5' που παρασκευάστηκαν με βάση το πλαστικό δοχείο, χρησιμοποιώντας άλας KCl.



Σχήμα 3.11 Πηγές όγκου KCl γεωμετρίας '2' και '5' (κωδικοί MKCl2 και MKCl5).

Για τη λήψη φασμάτων με τις παραπάνω πηγές, τα δοχεία των πηγών τοποθετήθηκαν ακριβώς πάνω από τον ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στην περίπτωση αυτή το υλικό της πηγής βρίσκεται σε απόσταση 2.5 mm από το παράθυρο Al του ανιχνευτή. Για την τοποθέτηση του δοχείου πηγής χρησιμοποιήθηκε βάση από plexiglas, τοποθετημένη σταθερά πάνω στον ανιχνευτή. Τα σχετικά φάσματα συνελέγησαν με κλειστή θωράκιση. Σε ορισμένες περιπτώσεις πηγών ελήφθησαν περισσότερα από ένα φάσματα. Ο κωδικός κάθε φάσματος καθορίζεται από τον κωδικό του σχετικού δείγματος, με την προσθήκη στο τέλος ενός γράμματος του λατινικού αλφαβήτου (π.χ. το δεύτερο φάσμα του δείγματος ΧΙΑΕΑ3274 έχει κωδικό ΧΙΑΕΑ3274Β κ.ο.κ)

Για τον υπολογισμό της απόδοσης (ολικής και φωτοκορυφής για ενέργεια φωτονίων 1460.8keV) χρησιμοποιήθηκε ο «καθαρός» αριθμός κρούσεων, ο οποίος προκύπτει με αφαίρεση του αριθμού κρούσεων υποβάθρου από το συνολικό αριθμό κρούσεων που καταγράφονται στο φάσμα (βλ. σχέσεις 2.9-2.10). Στο σχήμα 3.12 που ακολουθεί φαίνεται ένα τέτοιο φάσμα, το οποίο προέκυψε κατά την ανάλυση πηγής όγκου KCl γεωμετρίας '2'. Στο «καθαρό» αυτό φάσμα, το οποίο έχει προκύψει με αφαίρεση του φάσματος υποβάθρου από το συνολικό φάσμα, σημειώνεται και το εμβαδόν της φωτοκορυφής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσής της.



Σχήμα 3.12 «Καθαρό» φάσμα πηγής όγκου KCl γεωμετρίας '2' σε HPGe ανιχνευτή

Προκειμένου να εξαχθεί μία τιμή για την πειραματική τιμή απόδοσης φωτοκορυφής για κάθε γεωμετρία και για την ενέργεια των 1460.8keV, με την οποία να μπορεί να συγκριθεί η αντίστοιχη τιμή της προσομοίωσης, υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος όλων των πειραματικών τιμών που εκτιμήθηκαν για κάθε γεωμετρία. Στη διαδικασία στάθμισης (παράρτημα Γ) λήφθηκαν υπόψη οι αβεβαιότητες τόσο στο πλήθος των κρούσεων που καταγράφηκαν στο φάσμα όσο και στην τιμή της ενεργότητας των πηγών όγκου. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στις σχέσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία (Gilmore G. and Hemingway J.D, 1995). Στους πίνακες 3.17 και 3.18 που ακολουθούν φαίνονται οι πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής καθώς και οι σταθμισμένοι μέσοι που έχουν υπολογιστεί με βάση το σύνολο των δειγμάτων για τις γεωμετρίες '2' και '5' αντίστοιχα.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ '2'	Απόδοση φωτοκορυφής Πειράματα	
	Τιμή	σφάλμα % (1σ)
ΧΙΑΕΑ3271C	5,496E-03	0,740
ΧΙΑΕΑ3271E	5,533E-03	0,740
ΧΙΑΕΑ3271H	5,517E-03	0,740
ΧΙΑΕΑ3272A	5,450E-03	0,740
ΧΙΑΕΑ3272G	5,443E-03	0,750
ΧΙΑΕΑ3272J	5,454E-03	0,740
ΜΚCL2 (2008)	5,755E-03	1,750
Σταθμισμένος Μέσος	5,568E-03	2,130

Πίνακας 3.17 Πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής 1460.8 keV του ⁴⁰K για πηγή όγκου γεωμετρίας '2'

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ '5'	Απόδοση φωτοκορυφής Πειράματα	
	Τιμή	σφάλμα % (1σ)
ΧΙΑΕΑ3273D	1,042E-02	0,740
ΧΙΑΕΑ3274C	1,089E-02	0,740
ΧΙΑΕΑ3273G	1,046E-02	0,750
ALMERA5 2006	1,118E-02	3,390
ALMERA5 2007C	1,168E-02	2,900
ΜΚCL5 (2008)	1,063E-02	1,530
Σταθμισμένος Μέσος	1,061E-02	2,390

Πίνακας 3.18 Πειραματικές τιμές απόδοσης φωτοκορυφής 1460.8 keV του ⁴⁰K για πηγή όγκου γεωμετρίας '5'

Αυτές οι τιμές των σταθμισμένων μέσων θεωρήθηκαν στη συνέχεια της Δ.Ε. ως πειραματικές τιμές απόδοσης αιχμής για την ενέργεια των 1460.8keV και για τις δύο γεωμετρίες και χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις που ακολουθούν.

3.2.3.2 Προσομοιώσεις με πηγές όγκου γεωμετρίας '2' και '5'.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ για τις γεωμετρίες όγκου '2' και '5'. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του κώδικα PENELOPE και αποσκοπούσαν στην εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής αλλά και της ολικής απόδοσης. Με δεδομένο ότι στη διαδικασία προσδιορισμού της ολικής απόδοσης ενδιαφέρει κάθε φωτόνιο το οποίο προέρχεται από την πηγή και καταγράφεται στον ανιχνευτή, ακόμα και αυτά που καταγράφονται μετά από σκέδαση στη θωράκιση, ήταν αναγκαία η λεπτομερής περιγραφή στο αρχείο γεωμετρίας (.geo), τόσο της θωράκισης του ανιχνευτή όσο και όλων των υπολοίπων συνιστωσών της ανιχνευτικής διάταξης. Θεωρώντας ότι η επίδραση της βάσης στήριξης του δείγματος είναι μεν μικρή αλλά όχι αμελητέα, συμπεριλήφθη και αυτή στην περιγραφή της διάταξης. Η συνολική διάταξη πηγής-ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται στο σχήμα 3.13 στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε και πάλι ο κώδικας χρήστη PENMAIN. Όπως ήδη αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο ο κώδικας χρήστη PENMAIN δε μπορεί να χειριστεί περιπτώσεις όπου η εκπομπή των σωματιδίων γίνεται από πηγή όγκου, καθώς προβλέπει μόνο προσομοιώσεις σημειακών πηγών. Για να γίνει δυνατή η προσομοίωση πηγής όγκου, έπρεπε να τροποποιηθεί ο κώδικας PENMAIN κατάλληλα. Ο νέος αυτός κώδικας βασίστηκε σε προηγούμενη τροποποίηση του κώδικα που είχε γίνει στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Δ.Ε. Αθανασίου, 2006) για πηγές όγκου. Οι τροποποιήσεις που έγιναν έλαβαν υπόψη την ελαφρά κωνικότητα του δοχείου δείγματος που χρησιμοποιείται και είχαν στόχο να εξασφαλίσουν ότι ο κώδικας θα προσομοίωνε σωματίδια που εκπέμπονταν από όλο τον όγκο των δύο πηγών γεωμετρίας '2' και '5'. Τα τροποποιημένα τμήματα του κώδικα PENMAIN που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στους πίνακες 3.19 και 3.20, στο τέλος του κεφαλαίου.

Προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον η κατανομή των αρχικών θέσεων των σωματιδίων μέσα στην πηγή όγκου είναι πράγματι ομοιόμορφη, απεικονίστηκαν σε διάγραμμα –με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος (Microsoft Excel)- όλα τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν από τον κώδικα. Οι συντεταγμένες X, Y, Z των σημείων αντλήθηκαν από τα αρχεία rngx.dat, rngy.dat και rngz.dat αντίστοιχα, που προκύπτουν ως αρχεία εξόδου του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN για πηγές όγκου, μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης. Από το διάγραμμα των θέσεων στους άξονες X-Y (σχήμα 3.14 στο τέλος του κεφαλαίου) επιβεβαιώνεται η πλήρης ομοιομορφία της κατανομής. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας ελέγχου τυχαιότητας της πηγής όγκου μπορεί να αναζητηθεί σε προγενέστερη εργασία (Δ.Ε. Αθανασίου, 2006).

Οι προσομοιώσεις με πηγές όγκου, όπως έχει ήδη επισημανθεί, στοχεύουν στην επιβεβαίωση των διαστάσεων που υπολογίστηκαν με τη χρήση σημειακών πηγών αλλά και τη διερεύνηση του κατά πόσον οι διαστάσεις αυτές δίνουν αποτελέσματα προσομοίωσης συμβατά με τα πειραματικά, για γεωμετρίες όγκου. Για το λόγο αυτό, στον πρώτο κύκλο προσομοιώσεων με πηγές όγκου που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο, δοκιμάζεται αρχικά η γεωμετρία η οποία προέκυψε μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτίμησης των διαστάσεων του ανιχνευτή HPGe για τις σημειακές πηγές (Γεωμετρία ΣΤ).

Γεωμετρία ΣΤ:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 10 mm

Με δεδομένες τις γεωμετρικές διαστάσεις του ανιχνευτή και ορίζοντας κλειστή τη θωράκισή του, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις –με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN- για τις δύο γεωμετρίες της πηγής όγκου KCl ('2' και '5'). Οι πηγές φωτονίων τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2.5 mm από το παράθυρο του ανιχνευτή HPGe. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.21, όπου υπάρχει και σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Σταθμισμένος μέσος Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Γεωμετρία ΣΤ Προσομοίωση		Απόκλιση (%) Πειράματος-Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)		
'2'	1460,822	5,568E-03	2,130	6,025E-03	0,258	-8,211	3,821
'5'		1,061E-02	2,390	1,117E-02	0,293	-5,263	2,190

Πίνακας 3.21 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής 1460.822 keV του ⁴⁰K για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 2.5 mm και γεωμετρία προσομοίωσης ΣΤ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις πηγές όγκου παρουσιάζουν, όπως φαίνεται, μεγάλες αποκλίσεις με τα αντίστοιχα πειραματικά και για τις δύο γεωμετρίες όγκου. Και στις δύο περιπτώσεις μάλιστα, η πειραματική τιμή είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης. Αποφασίζεται στο σημείο αυτό η δοκιμή περαιτέρω τροποποίησης της γεωμετρίας.

Γεωμετρία Z:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 15 mm

Στην προσπάθεια να επιτευχθούν αποτελέσματα προσομοίωσης που να παρουσιάζουν καλύτερη σύμπτωση με τα πειραματικά δοκιμάστηκε η αύξηση του όγκου της κυλινδρικής οπής του ανιχνευτή (finger), ώστε να μειωθεί ο όγκος του ενεργού κρυστάλλου που καταμετρά φωτόνια. Αυτό οδήγησε στην επόμενη γεωμετρία Z. Με δεδομένο το συνολικό ύψος του κρυστάλλου Γερμανίου (65 mm), εκτιμάται ότι δεν υπάρχουν πολλά περιθώρια περαιτέρω αύξησης του ύψους της οπής, οπότε επιλέχθηκε η τροποποίηση της διαμέτρου της, ορίζοντάς την ίση με 15 mm. Όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις διατηρούν τις τιμές που είχαν και στην προηγούμενη γεωμετρία (ΣΤ). Τα αποτελέσματα αυτού του δεύτερου κύκλου προσομοιώσεων, οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές καθώς και οι μεταξύ τους αποκλίσεις φαίνονται στον πίνακα 3.22.

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Σταθμισμένος μέσος Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Γεωμετρία Z Προσομοίωση		Απόκλιση (%) Πειράματος-Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)		
'2'	1460,822	5,568E-03	2,130	5,677E-03	0,350	-1,946	0,906
'5'		1,061E-02	2,390	1,056E-02	0,213	0,484	0,196

Πίνακας 3.22 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής 1460.822 keV του ⁴⁰K για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 2.5 mm και γεωμετρία προσομοίωσης Z

Με αυτή την τροποποίηση στη διάμετρο του finger, οι τιμές της απόδοσης αιχμής και οι αποκλίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειραματικών έχουν μειωθεί αισθητά και για τις δύο γεωμετρίες. Παρατηρείται ακόμα, ότι για τη γεωμετρία '5' (πηγή όγκου 97.2 cm³) η απόκλιση είναι τώρα θετική (τιμή προσομοίωσης μικρότερη από αυτή του πειράματος), ενώ για τη γεωμετρία '2' (πηγή όγκου 282 cm³) η απόκλιση εξακολουθεί να είναι αρνητική (τιμή προσομοίωσης μεγαλύτερη από την πειραματική). Εκτιμώντας ότι η μεγέθυνση του finger ήταν ενδεχομένως μεγαλύτερη από όσο θα έπρεπε, αποφασίσθηκε να δοκιμασθεί μια κάπως μικρότερη μεταβολή, επιλέγοντας μια ενδιάμεση τιμή για τη διάμετρό του.

Γεωμετρία Η:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 12 mm

Ορίζεται η διάμετρος του finger ίση με 12 mm, κρατώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπως ήταν αναμενόμενο προέκυψαν μεταξύ αυτών που έδωσαν οι προσομοιώσεις για τις δύο προηγούμενες γεωμετρίες ΣΤ και Z. Στον πίνακα 3.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη νέα γεωμετρία Η, τα οποία συγκρίνονται με τις τιμές των αντίστοιχων σταθμισμένων μέσων που υπολογίστηκαν με βάση τις πειραματικές μετρήσεις.

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Σταθμισμένος μέσος Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Γεωμετρία Η Προσομοίωση		Απόκλιση (%) Πειράματος-Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)		
'2'	1460,822	5,568E-03	2,130	5,889E-03	0,343	-5,768	2,668
'5'		1,061E-02	2,390	1,092E-02	0,186	-2,975	1,219

Πίνακας 3.23 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής 1460.822 keV του ⁴⁰K για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 2.5 mm και γεωμετρία προσομοίωσης Η

Με την επιλογή αυτής της ενδιαμέσης τιμής για τη διάμετρο της κυλινδρικής οπής (12mm) διαπιστώνεται ότι οι αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές αυξάνονται. Η αμέσως προηγούμενη γεωμετρία Z φαίνεται να δίνει την καλύτερη σύγκλιση από τις τρεις γεωμετρίες που έχουν δοκιμαστεί.

Πρέπει, όμως, στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι, καμία γεωμετρία από τις δύο τελευταίες (Z & H) δεν έχει ελεγχθεί για σημειακές πηγές, για να φανεί αν ανταποκρίνεται εξίσου καλά και σε αυτές. Απαραίτητος είναι συνεπώς ο επανέλεγχος των γεωμετριών Z και H με σημειακές πηγές.

3.2.4 Επανέλεγχος με γεωμετρία σημειακών πηγών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην παράγραφο 3.2.3, μία γεωμετρία που, με βάση τη σύγκριση προσομοίωσης και πειράματος, παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση στην περίπτωση πηγών όγκου, δεν είναι απαραίτητο ότι θα δίνει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα και για σημειακές πηγές. Γι' αυτό το λόγο, οποιαδήποτε γεωμετρία ανιχνευτή ανταποκρίνεται σε μία κατηγορία πηγών (και γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή) είναι σκόπιμο να δοκιμάζεται και στην άλλη κατηγορία. Με στόχο να εξακριβωθεί η επίδραση που έχει η αλλαγή στη διάμετρο του finger που έγινε στις γεωμετρίες Z και H, αλλά και προκειμένου να διερευνηθεί το κατά πόσον οι γεωμετρίες αυτές θα οδηγήσουν μέσω της προσομοίωσης για σημειακές πηγές σε τιμές της απόδοσης συμβατές με τις πειραματικές, προχώρησε η διαδικασία προσομοίωσης για γεωμετρία σημειακών πηγών και για γεωμετρίες ανιχνευτή Z και H. Σημειώνεται ότι - εκτός της διαμέτρου της οπής - καμία άλλη παράμετρος δε

διαφοροποιείται σε σχέση με τη γεωμετρία ανιχνευτή ΣΤ, η οποία είχε επιλεγεί ως βέλτιστη για την περίπτωση σημειακών πηγών (παράγραφος 3.2.2.3, πίνακας 3.14).

Γεωμετρία Z:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 15 mm

Πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά προσομοιώσεις για μία ενέργεια ανά ισότοπο. Οι φωτοκορυφές επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να καλύπτεται όσο το δυνατόν ευρύτερο φάσμα ενεργειών. Μελετήθηκαν οι φωτοκορυφές ενέργειας 276.40 keV του ^{133}Ba , 661.67 keV του ^{137}Cs , 1332.50 keV του ^{60}Co . Οι υπολογισμοί που έγιναν με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον πίνακα 3.24, όπου υπάρχει και σύγκριση με τους αντίστοιχους πειραματικούς υπολογισμούς. Επισημαίνεται ότι τα πειράματα δεν επαναλήφθηκαν. Οι πειραματικές τιμές που παρουσιάζονται εδώ είναι οι ίδιες με αυτές που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.2.1 (πίνακας 3.6) του παρόντος κεφαλαίου, οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τα ποσοστά εκπομπής της πηγής B και αναφέρονται σε απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα τιμές πηγής B		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση Γεωμετρία Z		Απόκλιση (%)	U-test
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)		
Ba-133	276,400	1,658E-03	7,030	1,671E-03	0,061	-0,799	0,112
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	8,043E-04	0,182	7,237	1,203
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	4,685E-04	0,174	8,820	4,395

Πίνακας 3.24 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm και γεωμετρία προσομοίωσης Z

Μελετώντας τον πίνακα 3.24, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις αποκλίσεις για τις διάφορες ενέργειες. Ανατρέχοντας στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με τη γεωμετρία ΣΤ και στον αντίστοιχο πίνακα

σύγκρισης των τιμών της απόδοσης φωτοκορυφής (πίνακας 3.13), παρατηρείται ότι η τιμή της απόκλισης παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με την ενέργεια. Ενώ στις χαμηλές ενέργειες (276.40 keV του ^{133}Ba) η απόκλιση φαίνεται να μειώνεται, στις μεγαλύτερες ενέργειες (661.67 keV του ^{137}Cs , 1332.50 keV του ^{60}Co) αυξάνεται σημαντικά, προσεγγίζοντας το 8%. Επίσης, σύμφωνα με το κριτήριο του στατιστικού ελέγχου, η διαφορά στην περίπτωση των 1332.50 keV του ^{60}Co είναι στατιστικά σημαντική.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, αν και η σύγκλιση είναι πολύ καλή για τις πηγές όγκου, στην περίπτωση των σημειακών πηγών τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφέρουν από τα πειραματικά. Εκτιμάται ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή καθώς αδυνατεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά, ταυτόχρονα σε σημειακές και πηγές όγκου, άρα απορρίπτεται ως μη ικανοποιητική.

Γεωμετρία H:

Τιμές παραμέτρων:

- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 12 mm

Για τη γεωμετρία H έγιναν προσομοιώσεις για όλες τις ενέργειες των διαθέσιμων σημειακών πηγών, εκτός της πρώτης φωτοκορυφής (79.62 keV) του ^{133}Ba . Ο λόγος της εξαίρεσης αυτής είναι το γεγονός ότι η συγκεκριμένη φωτοκορυφή αλληλεπικαλύπτεται με την πολύ κοντινή της φωτοκορυφή ενέργειας 80.99 keV, σχηματίζοντας ουσιαστικά μια «διπλή» φωτοκορυφή. Η ανάλυση μιας τέτοιας φωτοκορυφής είναι εξαιρετικά δύσκολη καθώς οι δυο κορυφές δε διακρίνονται εύκολα μεταξύ τους στο φάσμα. Συχνά η απόπειρα να αναλυθεί μια αιχμή με όχι τόσο «καθαρή» μορφή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένους υπολογισμούς και συμπεράσματα. Αυτός, εκτιμάται ότι είναι τελικά και ο λόγος που οι δύο φωτοκορυφές παρουσιάζουν τόσο διαφορετικά αποτελέσματα κατά τον πειραματικό υπολογισμό της απόδοσης, για την ίδια γεωμετρία - πολύ μικρή απόκλιση στη μία ενέργεια, τεράστια απόκλιση στην άλλη (βλ. πίνακες 3.9, 3.10, 3.12). Επισημαίνεται ότι, αυτό αρχικά είχε αποδοθεί σε ανακρίβεια των ποσοστών εκπομπής, αλλά η χρήση

διαφορετικών τιμών για τα ποσοστά εκπομπής μόνο εν μέρει αντιμετώπισε το πρόβλημα των τόσο διαφορετικών αποτελεσμάτων. Ακριβώς επειδή κατά την ανάλυση μιας τέτοιας φωτοκορυφής υπαισέρχονται ενδεχομένως σημαντικά σφάλματα τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα, αποφασίστηκε τελικά να μη συμπεριληφθούν τα σημεία αυτά στη διερεύνηση.

Στον πίνακα 3.25 παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης για τη γεωμετρία H καθώς και οι αντίστοιχες πειραματικές.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής Πείραμα		Απόδοση φωτοκορυφής Προσομοίωση Γεωμετρία H		Απόκλιση (%)	Τιμή U-test
		τιμές πηγής B		Τιμή	σ % (1σ)		
		Τιμή	σ % (1σ)				
Ba-133	80,997	2,040E-03	7,120	2,145E-03	0,083	-5,159	0,723
Ba-133	276,400	1,658E-03	7,030	1,700E-03	0,066	-2,532	0,360
Ba-133	302,840	1,541E-03	7,020	1,577E-03	0,075	-2,324	0,333
Ba-133	356,010	1,367E-03	7,000	1,384E-03	0,108	-1,232	0,178
Ba-133	383,850	1,293E-03	7,010	1,296E-03	0,111	-0,236	0,033
Cs-137	661,670	8,670E-04	6,010	8,323E-04	0,156	4,003	0,666
Co-60	1173,200	5,642E-04	2,000	5,400E-04	0,182	4,281	2,137
Co-60	1332,500	5,138E-04	2,000	4,904E-04	0,141	4,568	2,272

Πίνακας 3.25 Τιμές απόδοσης φωτοκορυφής για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm και γεωμετρία προσομοίωσης H

Αναλύοντας τα αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγαλύτερη –σε σύγκριση πάντα με την αμέσως προηγούμενη γεωμετρία Z- σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης. Η απόκλιση, αυξημένη ελαφρώς στις χαμηλές ενέργειες και μειωμένη αισθητά στις υψηλές, κυμαίνεται πλέον σε ένα «μέσο» επίπεδο για όλες τις ενέργειες. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της γεωμετρίας H με αυτά της γεωμετρίας ΣΤ (πίνακας 3.12), παρατηρείται βελτίωση της σύγκλισης των τιμών πειράματος και προσομοίωσης στις χαμηλές ενέργειες και σχετική απομάκρυνσή τους στις υψηλές ενέργειες. Η τελευταία αυτή γεωμετρία δίνει αποτελέσματα με «μέτρια» -θα μπορούσε να ειπωθεί- απόκλιση για όλες τις ενέργειες των σημειακών πηγών, πράγμα που συνέβαινε και στην περίπτωση των πηγών όγκου. Χρειάζεται βέβαια να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή, ο στατιστικός έλεγχος δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τις διαφορές στην περιοχή των υψηλών ενεργειών.

3.2.5 Επιλογή της τελικής γεωμετρίας του ανιχνευτή.

Προκειμένου να καταλήξει η παραπάνω διερεύνηση σε μία τελική γεωμετρία ανιχνευτή, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των τριών «καλύτερων» (με την έννοια της μεγαλύτερης σύγκλισης) γεωμετριών τόσο για τις σημειακές πηγές όσο και για τις πηγές όγκου. Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα στοιχεία, ομαδοποιημένα ανά γεωμετρία και πηγή. Για λόγους οικονομίας χώρου δεν αναφέρονται ξανά οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής που έχουν υπολογιστεί πειραματικά και μέσω προσομοίωσης αλλά μόνο οι αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τιμών. Ο πίνακας 3.26 αφορά τα αποτελέσματα για τις σημειακές πηγές ενώ ο πίνακας 3.27 για τις πηγές όγκου.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Γεωμετρία ΣΤ		Γεωμετρία Ζ		Γεωμετρία Η	
		Απόκλιση (%)	Τιμή U-test	Απόκλιση (%)	Τιμή U-test	Απόκλιση (%)	Τιμή U-test
Ba-133	80,997	-5,143	0,051	-	-	-5,159	0,723
Ba-133	276,400	-3,524	0,722	-0,799	0,112	-2,532	0,360
Ba-133	302,840	-3,545	0,501	-	-	-2,324	0,333
Ba-133	356,010	-2,352	0,505	-	-	-1,232	0,178
Ba-133	383,850	-1,705	0,336	-	-	-0,236	0,033
Cs-137	661,670	2,023	0,243	7,237	1,203	4,003	0,666
Co-60	1173,200	1,860	0,336	-	-	4,281	2,137
Co-60	1332,500	2,126	0,929	8,820	4,395	4,568	2,272

Πίνακας 3.26 Σύγκριση των τριών γεωμετριών προσομοίωσης για την περίπτωση σημειακών πηγών

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Γεωμετρία ΣΤ		Γεωμετρία Ζ		Γεωμετρία Η	
		Απόκλιση (%)	Τιμή U-test	Απόκλιση (%)	Τιμή U-test	Απόκλιση (%)	Τιμή U-test
'2'	1460,822	-8,211	3,821	-1,946	0,906	-5,768	2,668
'5'		-5,263	2,190	0,484	0,196	-2,975	1,219

Πίνακας 3.27 Σύγκριση των τριών γεωμετριών προσομοίωσης για την περίπτωση πηγών όγκου

Μια πρώτη διαπίστωση που μπορεί να γίνει από τη μελέτη των πινάκων 3.26 και 3.27 είναι ότι σε καμία από τις τρεις γεωμετρίες δεν έχουν επιτευχθεί πολύ μικρές αποκλίσεις ταυτόχρονα για σημειακές και για πηγές όγκου. Στη γεωμετρία ΣΤ,

παρουσιάζεται καλή σύγκλιση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης στις σημειακές πηγές και πολύ μεγάλες αποκλίσεις στην περίπτωση των πηγών όγκου. Το αντίστροφο συμβαίνει με τη γεωμετρία Z, όπου επιτυγχάνεται ικανοποιητικότερη σύγκλιση για τις πηγές όγκου και πολύ μεγάλες αποκλίσεις για τις σημειακές πηγές, ιδιαίτερα στις υψηλές ενέργειες. Στη γεωμετρία H τέλος, επιτυγχάνονται «μέτριες» αποκλίσεις τόσο για τις σημειακές όσο και για τις πηγές όγκου. Όπως φαίνεται, η τελευταία αυτή γεωμετρία συνδυάζει σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα και στις δύο «κατηγορίες» πηγών (σημειακές & όγκου), όπως δείχνουν και τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου. Σημειώνεται ότι η γεωμετρία H είναι η μόνη γεωμετρία για την οποία οι διαφορές μεταξύ των τιμών πειράματος και προσομοίωσης είτε δεν είναι στατιστικά σημαντικές είτε κυμαίνονται στην περιοχή αβεβαιότητας. Αντίθετα, στην περίπτωση των γεωμετριών ΣΤ και Z, η τιμή της μεταβλητής U δεν ικανοποιεί το κριτήριο του στατιστικού ελέγχου τουλάχιστον για μία ενέργεια.

Κριτήριο για το ποια γεωμετρία θα γίνει τελικά αποδεκτή ως «πλησιέστερη» στην πραγματική, αποτελεί και το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που μπορεί να υπάρχει για μία κατηγορία πηγών ή μία ενεργειακή περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ερευνητική δραστηριότητα του ΕΠΤ-ΕΜΠ εστιάζεται κυρίως σε φασματοσκοπικές αναλύσεις πηγών όγκου, και με δεδομένο ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μελετώνται φωτοκορυφές υψηλών ενεργειών, είναι κατανοητό ότι οι πειραματικές μετρήσεις στην υπό μελέτη ανιχνευτική διάταξη αφορούν κατά κύριο λόγο αυτές τις πλευρές. Συνεπώς, απαιτείται μία γεωμετρία που να ανταποκρίνεται καλύτερα τόσο στις πηγές όγκου όσο και στις υψηλές ενέργειες, συνδυάζοντας ταυτόχρονα ικανοποιητική συμπεριφορά και στις περιπτώσεις σημειακών πηγών ή χαμηλότερων ενεργειών.

Τα χαρακτηριστικά αυτά φαίνεται να συγκεντρώνει μόνο η γεωμετρία H, η οποία, με βάση τα παραπάνω, επιλέγεται ως η βέλτιστη ανάμεσα σε όλες όσες δοκιμάστηκαν με σημειακές και πηγές όγκου. Εκτιμάται ότι οι διαστάσεις της συγκεκριμένης γεωμετρίας προσεγγίζουν αρκετά τις πραγματικές διαστάσεις της υπό μελέτη ανιχνευτικής διάταξης και πως οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν αυτή τη γεωμετρία μπορούν να αποδώσουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις πραγματικές αλληλεπιδράσεις και συνθήκες.

Χρειάζεται ωστόσο να επισημανθεί ότι η γεωμετρία που επιλέγεται ως βέλτιστη δεν είναι η μοναδική γεωμετρία που μπορεί να δώσει τα ίδια αποτελέσματα, καθώς η λύση στο πρόβλημα του προσδιορισμού των διαστάσεων δεν είναι –όπως

έχει ήδη εξηγηθεί- μονοσήμαντη. Είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν περισσότεροι του ενός συνδυασμοί διαστάσεων που να οδηγούν μέσω της προσομοίωσης σε τιμές εξίσου κοντινές στις πειραματικές.

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στο παρόν κεφάλαιο, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός ενός –από τους ενδεχομένως πολλούς- συνδυασμούς γεωμετρικών χαρακτηριστικών που φαίνεται να αποδίδει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα και ως τέτοιος πρέπει να γίνεται αποδεκτός. Τελικά, οι διαστάσεις του ανιχνευτή οι οποίες προέκυψαν από τη μελέτη που παρουσιάστηκε και θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της εργασίας είναι οι εξής:

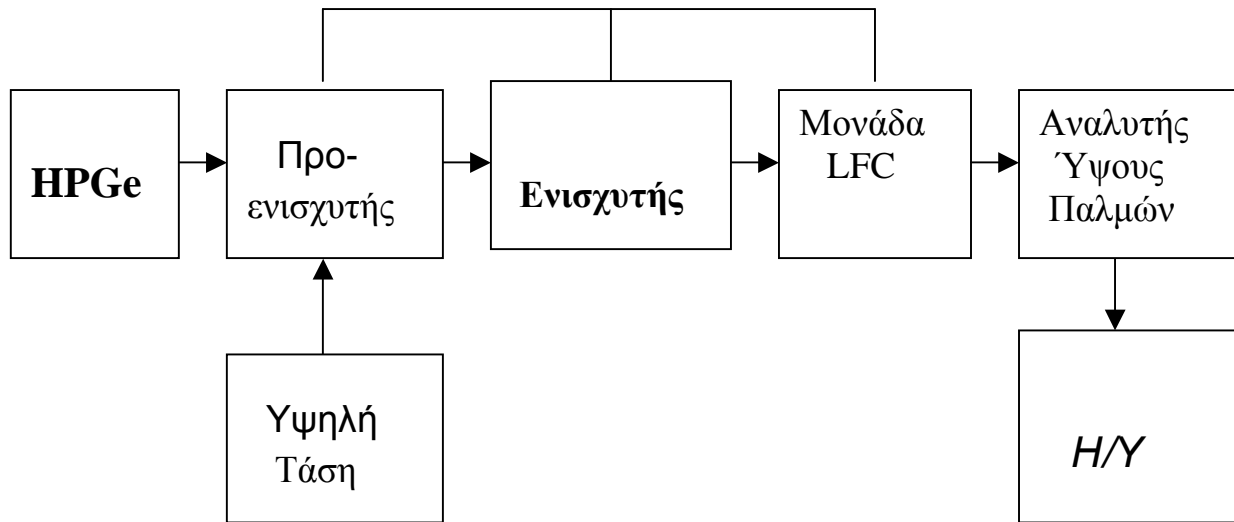
- Παράθυρο Al πάχους 1.5 mm
- dead layer πάχους 760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά
- Οπή ύψους 50 mm, διαμέτρου 12 mm

Η συνολική γεωμετρία του ανιχνευτή Γερμανίου, όπως έχει διαμορφωθεί μετά τη διαδικασία προσδιορισμού των διαστάσεων, περιγράφεται στον πίνακα 3.28, στον οποίο παρατίθενται και τα υπόλοιπα, δεδομένα από τον κατασκευαστή, γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στο σχήμα 3.13 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η απεικόνισή της, όπως δίνεται από το πρόγραμμα gview2d, στην οποία περιλαμβάνεται και η θωράκιση. Αυτή είναι και η «ακριβής», πλήρης περιγραφή της γεωμετρίας που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις που ακολουθούν στη συνέχεια της εργασίας.

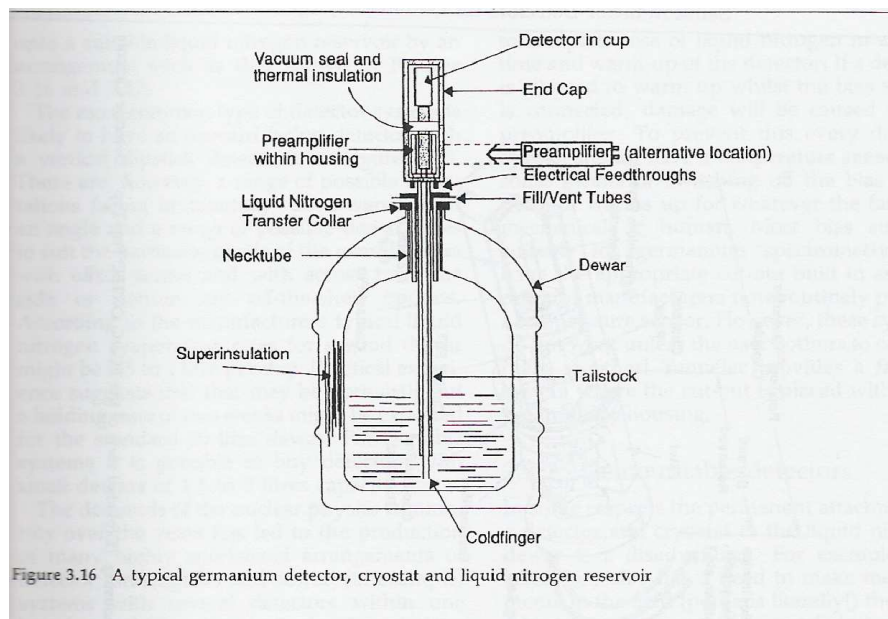
Πάχος dead layer	760 μm στην άνω πλευρά και 700 μm περιφερειακά	Υπολογισμένες κατά τη διαδικασία προσδιορισμού διαστάσεις
Διάμετρος οπής	12 mm	
Ύψος οπής	50 mm	
Πάχος παραθύρου Al	1.5 mm	
Διάμετρος κρυστάλλου	55.3 mm	Δεδομένα από τον κατασκευαστή γεωμετρικά χαρακτηριστικά
Ύψος κρυστάλλου	65 mm	
Ενεργός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

Πίνακας 3.28 Τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανιχνευτή Γερμανίου ΕΠΤ-ΕΜΠ

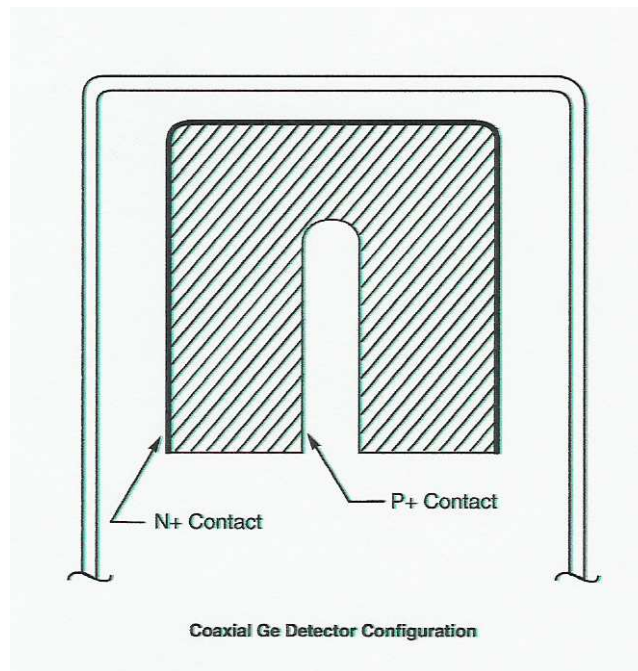
Σχήματα και πίνακες 3^{ου} κεφαλαίου



Σχήμα 3.1 Ηλεκτρονική διάταξη φασματοσκοπίας με ανιχνευτή Γερμανίου



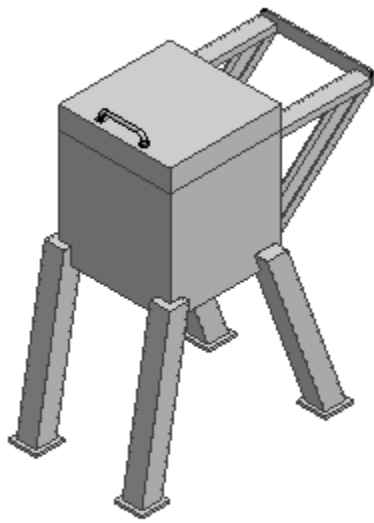
Σχήμα 3.2 Διάταξη κυλινδρικού ανιχνευτή συνδεδεμένου με δοχείο αζώτου



Σχήμα 3.3 Γεωμετρία ομοαξονικού ανιχνευτή Γερμανίου σε τομή



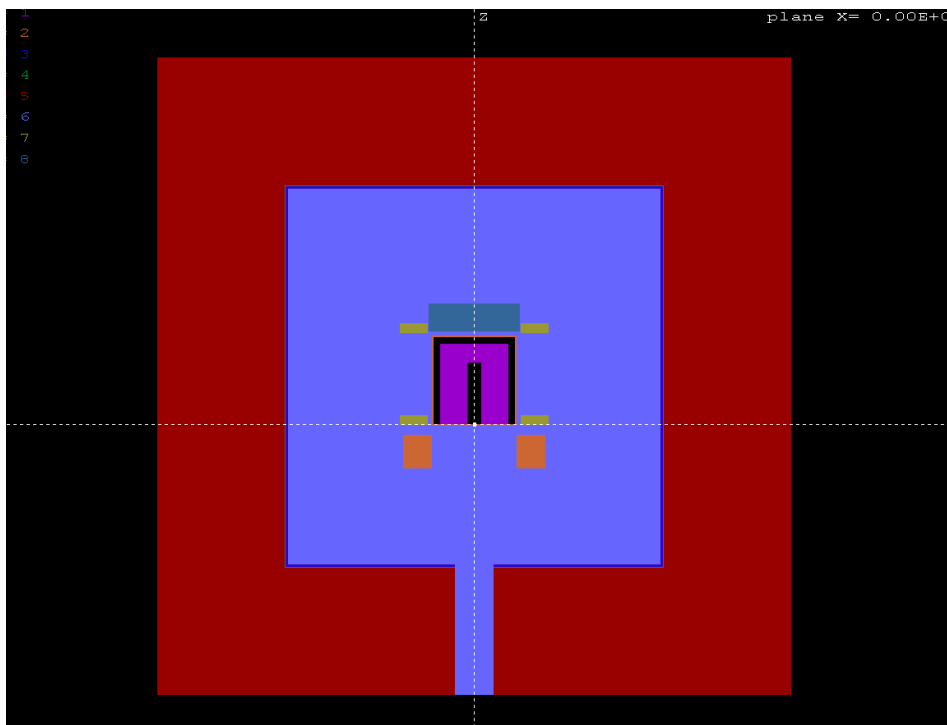
Σχήμα 3.4 Άποψη του κυλινδρικού ανιχνευτή Γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ



Σχήμα 3.5 Σκαρίφημα της θωράκισης



Σχήμα 3.6 Άποψη της θωράκισης



Σχήμα 3.13 Άποψη της διάταξης ανιχνευτή-πηγής (γεωμετρίας '5') όπως προκύπτει με χρήση του προγράμματος gview 2d

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

Πίνακας 3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυβικής θωράκισης ανιχνευτή

Διαστάσεις δοχείου	
Ύψος	6.9 cm
Όγκος	282 cm ³
Πάχος τοιχώματος	1 mm

Πίνακας 3.15 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοχείου πηγής όγκου

h (cm)	R (cm)
0	3.54
6.9	3.74

Πίνακας 3.16 Κωνικότητα δοχείου πηγής όγκου


```

*****
C ***** Set the initial state of the primary particle.
C
  IF(ISORP.EQ.0) THEN
C ***** Point source.
  SHN=SHN+1.0D0
  N=N+1
  IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
  KPAR=KPARP
  WGHT=WGHT0
C ---- Initial position ...
C ***** Modification for random sampling in a geometry 2 volume source with
C ***** varying radius {3.54-3.74cm},6.9cm height, positioned 0.36cm over the
detector window.
111  ZZ=RAND(1.0D0)
     Z=ZZ*6.9D0+7.51D0
     R=ZZ*6.9*0.029D0+3.54D0
     XX=RAND(1.0D0)
     X=XX*R
     YY=RAND(1.0D0)
     Y=YY*R
     if (X*X+Y*Y.gt.R*R) goto 111
     OPEN(40,FILE='rng_x.dat')
       OPEN(41,FILE='rng_y.dat')
       OPEN(42,FILE='rng_z.dat')
WRITE(40,*) X
     WRITE(41,*) Y
     WRITE(42,*) Z
112  FORMAT(2x, D15.13, 3x, D15.13, 3x, D15.13)
*****

```

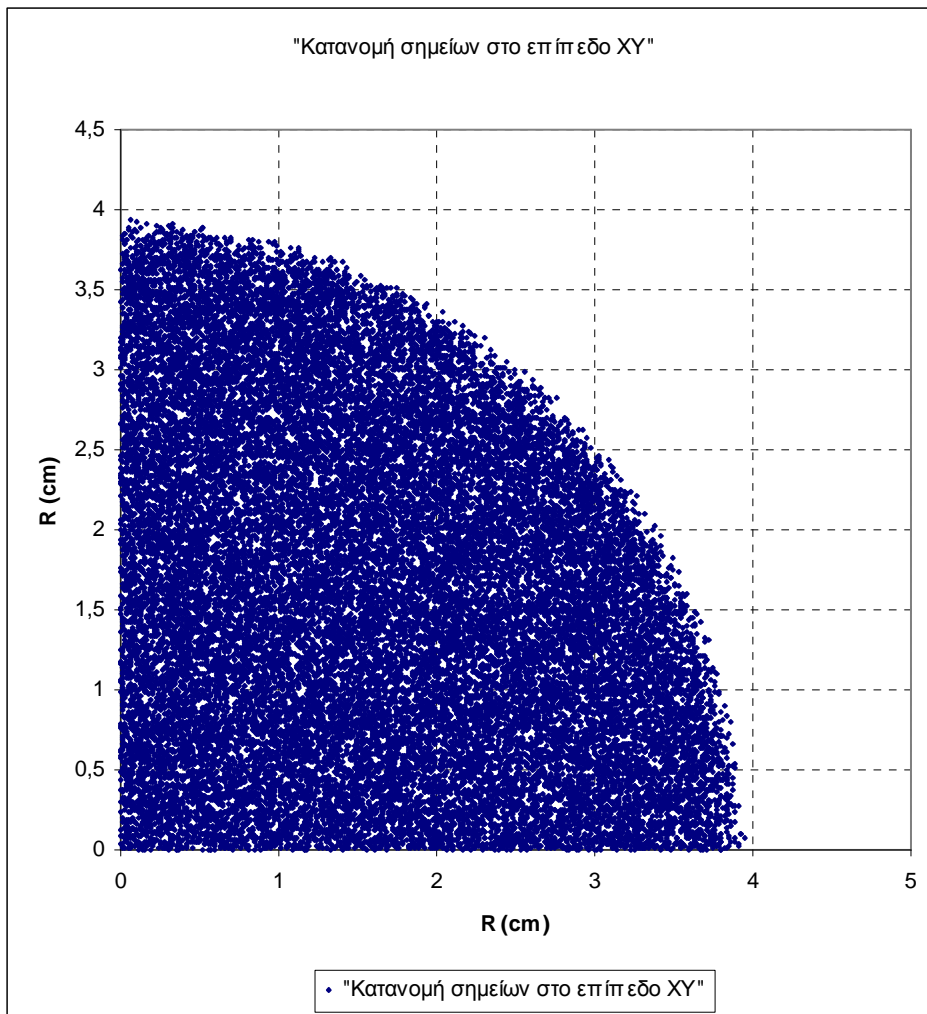
Πίνακας 3.19 Τμήμα τροποποιημένου κώδικα PENMAIN για πηγή όγκου γεωμετρίας '2'

```

*****
C ***** Set the initial state of the primary particle.
C
  IF(ISORP.EQ.0) THEN
C ***** Point source.
  SHN=SHN+1.0D0
  N=N+1
  IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
  KPAR=KPARP
  WGHT=WGHT0
C ---- Initial position ...
C ***** Modification for random sampling in a geometry 5 volume source with
C ***** varying radius{3.54-3.604cm},2.2cm height, positioned 0.36cm over the
detector window.
111  ZZ=RAND(1.0D0)
     Z=ZZ*2.2D0+7.51D0
     R=ZZ*2.2*0.029D0+3.54D0
     XX=RAND(1.0D0)
     X=XX*R
     YY=RAND(1.0D0)
     Y=YY*R
     if (X*X+Y*Y.gt.R*R) goto 111
     OPEN(40,FILE='rng_x.dat')
     OPEN(41,FILE='rng_y.dat')
     OPEN(42,FILE='rng_z.dat')
     WRITE(40,*) X
     WRITE(41,*) Y
     WRITE(42,*) Z
112  FORMAT(2x, D15.13, 3x, D15.13, 3x, D15.13)
*****

```

Πίνακας 3.20 Τμήμα τροποποιημένου κώδικα PENMAIN για πηγή όγκου γεωμετρίας '5'



Σχήμα 3.14 Τυχαίες θέσεις των σωματιδίων στο εσωτερικό της πηγής όγκου στο επίπεδο X-Y (δοκιμή για ένα τεταρτημόριο της κυκλικής επιφάνειας)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΗΡGe ΤΟΥ ΕΠΤ-ΕΜΠ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE-CARLO

4.1 Γενικά.

Για τον υπολογισμό συντελεστών διόρθωσης λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης είναι –όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο- απαραίτητη η γνώση της ολικής απόδοσης, ή του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής (total to peak ratio - ttp) για την ενέργεια των φωτονίων για τα οποία θα γίνει η διόρθωση. Ισοδύναμα, μπορεί να είναι γνωστός ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής προς την ολική απόδοση (peak to total ratio - ptt). Ο προσδιορισμός των παραπάνω μεγεθών μπορεί να γίνει είτε μέσω πειράματος είτε μέσω προσομοίωσης, σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 2. Από τις δύο τεχνικές, πιο αξιόπιστη πρέπει να θεωρείται η πειραματική, με την έννοια του ότι αφορά πραγματικές συνθήκες άρα παρέχει αποτελέσματα που ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αντιστοιχούν σε ένα «μοντέλο πηγής-ανιχνευτή», κατασκευασμένο από το χρήστη, το οποίο μπορεί να απέχει λιγότερο ή περισσότερο από την πραγματική διάταξη. Άλλωστε, όπως φαίνεται και από το προηγούμενο Κεφάλαιο, η κατασκευή του μοντέλου αυτού στηρίζεται σε κάποιο βαθμό σε πειραματικά αποτελέσματα.

Συνεπώς, ανάμεσα σε τιμές προσομοίωσης και πειραματικές τιμές, δεν τίθεται ιδιαίτερο δίλημμα σχετικά με το ποιες είναι πιο αξιόπιστες. Αβίαστα προκύπτει, από όσα αναφέρθηκαν, το συμπέρασμα ότι προτιμάται η χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων έναντι αυτών της προσομοίωσης. Η επιλογή προϋποθέτει βέβαια την ύπαρξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων και από τις δύο τεχνικές (πείραμα και προσομοίωση). Μία τυπική περίπτωση που θα πρέπει να προτιμώνται τα πειραματικά αποτελέσματα, εφόσον είναι διαθέσιμα, είναι η απόδοση φωτοκορυφής, για συγκεκριμένη ενέργεια και γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή. Για ενέργειες φωτονίων ή / και γεωμετρίες πηγής -ανιχνευτή που δεν διατίθενται πειραματικά αποτελέσματα, είναι προφανές ότι η προσομοίωση μπορεί να δώσει τη λύση.

Από όσα παρατέθηκαν στα Κεφάλαια 2 και 3, προκύπτει ότι η ολική απόδοση ενός ανιχνευτή γερμανίου είναι ένα μέγεθος το οποίο είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί πειραματικά, για πηγές που δεν είναι μονοενεργειακές, ενώ ακόμα και για μονοενεργειακές πηγές υπάρχουν αρκετές δυσκολίες. Συνεπώς, ο υπολογισμός της ολικής απόδοσης είναι προτιμότερο να γίνεται με εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης. Η μόνη προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι η λεπτομερής γνώση της γεωμετρίας του συστήματος από το χρήστη. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι ως σύστημα νοείται ο ανιχνευτής, η πηγή και η θωράκισή του. Για το λόγο αυτό κυρίως, δηλαδή για τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός των διαστάσεων του ανιχνευτή, ο οποίος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Με καθορισμένα πλέον τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή (βλ. πίνακα 3.28), είναι δυνατή η εκτίμηση μέσω προσομοίωσης της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή για μια σειρά ενεργειών και γεωμετριών πηγής-ανιχνευτή, για τις οποίες δεν ήταν δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός.

4.2 Εκτίμηση αποδόσεων και λόγου ολικής προς απόδοση αιχμής.

Στη διαδικασία βαθμονόμησης του ανιχνευτή, χρησιμοποιήθηκαν 3 σημειακές και 2 πηγές όγκου. Η ερευνητική δραστηριότητα του συγκεκριμένου εργαστηρίου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) επικεντρώνεται στην ανάλυση ραδιενεργών δειγμάτων όγκου, άρα επιθυμητή είναι η βαθμονόμηση των ανιχνευτών κατά βάση με πηγές όγκου. Παρόλα αυτά, στην παρούσα εργασία, κατά τις βαθμονομήσεις έγινε εκτενής χρήση και σημειακών πηγών, αφενός διότι υπήρχε μεγαλύτερη διαθεσιμότητά τους στο εργαστήριο, αφετέρου διότι ενδιέφερε και η διερεύνηση της εξάρτησης του λόγου (peak to total) από το είδος της πηγής.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά οι υπολογισμοί που έγιναν με χρήση σημειακών και πηγών όγκου. Για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, στην περίπτωση των σημειακών πηγών, ακόμα και των μονοενεργειακών, η ολική απόδοση εκτιμήθηκε μόνο μέσω προσομοίωσης. Αντίθετα, στα πλαίσια μελέτης των πηγών όγκου, η ολική απόδοση που προέκυψε από την προσομοίωση συγκρίθηκε και με την αντίστοιχη πειραματική. Με τον ίδιο τρόπο

υπολογίστηκε και ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής προς την ολική απόδοση (peak to total ratio), μέγεθος του οποίου οι τιμές θα χρειαστούν στη διαδικασία διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Η αναγκαιότητα γνώσης του συγκεκριμένου λόγου θα φανεί πλήρως στο 5^ο κεφάλαιο, όπου περιγράφεται αναλυτικά η χρήση του στον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης λόγω πραγματικής σύμπτωσης. Τα ισότοπα-πηγές καθώς και οι αντίστοιχες φωτοκορυφές-ενέργειες που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα 4.1.

Ισότοπο-πηγή	Ενέργεια (keV)	
Ba-133	80.997	σημειακές πηγές
Ba-133	276.400	
Ba-133	302.840	
Ba-133	356.010	
Ba-133	383.850	
Cs-137	661.670	
Co-60	1173.200	
Co-60	1332.500	
K-40 (KCl) γεωμετρίας '2'	1460.822	πηγές όγκου
K-40 (KCl) γεωμετρίας '5'	1460.822	

Πίνακας 4.1 Ισότοπα-ενέργειες που μελετήθηκαν

4.2.1 Εκτίμηση αποδόσεων και λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής για σημειακές πηγές.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 3.2.2.1), οι σημειακές πηγές ήταν τοποθετημένες σε σχετικά μεγάλη απόσταση (22.4 cm) από τον ανιχνευτή -κρατώντας τη θωράκιση ανοιχτή. Η διατήρηση ανοιχτής θωράκισης στη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων συνεπάγεται την ανίχνευση και άλλων ακτινοβολιών πλην αυτών που προέρχονται από το υπό ανάλυση δείγμα και την αλλοίωση του φάσματος, αφού καταγράφονται σε αυτό και κρούσεις από άλλες πηγές (περιβάλλον κλπ.). Πρέπει ακόμα να

επισημανθεί ότι η ύπαρξη της ανοικτής θωράκισης έχει σημαντική επίδραση και στην ακτινοβολία της πηγής, η οποία μετά από σκέδαση καταλήγει στον ανιχνευτή όπου και ανιχνεύεται. Κατά συνέπεια, η ανοικτή ή κλειστή θωράκιση αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στην συνολική εικόνα του συλλεγόμενου φάσματος. Πάντως, σε ένα τέτοιο φάσμα το εμβαδόν μιας φωτοκορυφής δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα καθώς σε αυτό αντιστοιχούν κρούσεις συγκεκριμένης ενέργειας (με την προϋπόθεση βέβαια να μην υπάρχει στο περιβάλλον άλλο ισότοπο –πέραν του δείγματος που μελετάται- που να εκπέμπει σωματίδια της ίδιας ακριβώς ενέργειας). Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι, αν και ο υπολογισμός της απόδοσης αιχμής δεν επηρεάζεται από την ανοικτή ή κλειστή θωράκιση, ο υπολογισμός της ολικής απόδοσης εξαρτάται από αυτή.

Στην περίπτωση συνεπώς των σημειακών πηγών, όπου η ανάγκη για μεγάλη απόσταση πηγής-ανιχνευτή επέβαλλε ανοικτή θωράκιση, ο πειραματικός υπολογισμός της ολικής απόδοσης, παρόλο που ήταν δυνατός για την περίπτωση μονοενεργειακών πηγών (π.χ. ^{137}Cs) δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει. Για το λόγο αυτό, η ολική απόδοση και ο λόγος ptt για σημειακές πηγές εκτιμήθηκαν μόνο μέσω προσομοίωσης.

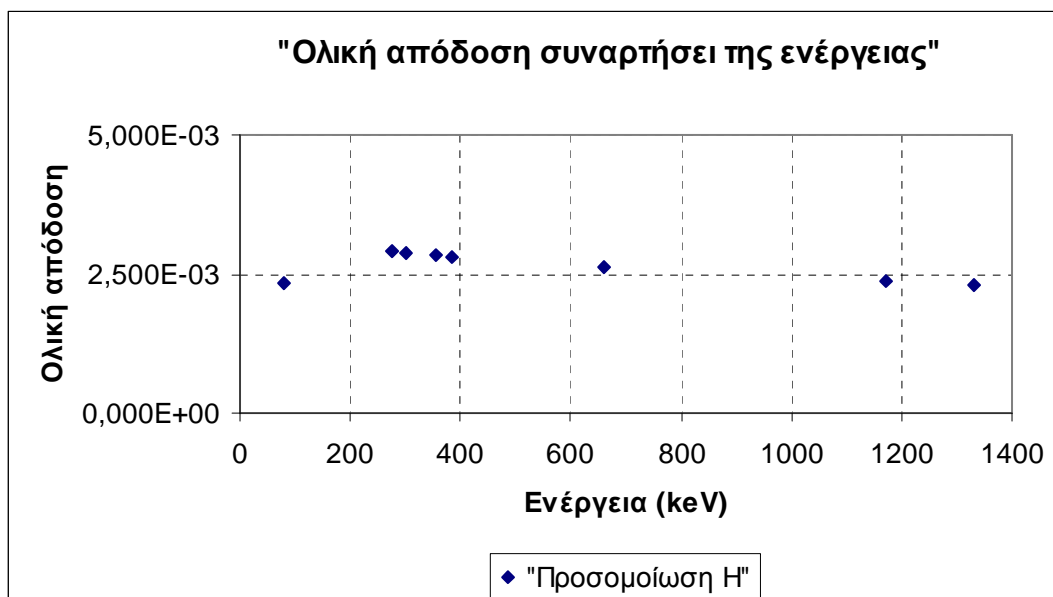
Στη διαδικασία της προσομοίωσης -ακριβέστερα στα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης- οι πηγές ορίστηκαν σημειακές, με άνοιγμα δέσμης 180° (τα σωματίδια που εκπέμπονται σε κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του ανιχνευτή δεν μας ενδιαφέρουν καθώς δεν είναι δυνατόν να ανιχνευτούν). Επισημαίνεται ότι η απόσταση της πηγής από το παράθυρο του ανιχνευτή ορίστηκε ίση με 22.4 cm και ως γεωμετρία ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε η τελική γεωμετρία Η (πίνακας 3.28).

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες μέσω προσομοίωσης τιμές των αποδόσεων σύμφωνα με τις σχέσεις που περιγράφηκαν στο 2^ο κεφάλαιο (2.18-2.20). Η τιμή του λόγου ptt προκύπτει ακολούθως με διαίρεση των τιμών αυτών ενώ το αντίστοιχο σφάλμα υπολογίζεται με βάση τη θεωρία σφαλμάτων (βλ. σχέση 2.13).

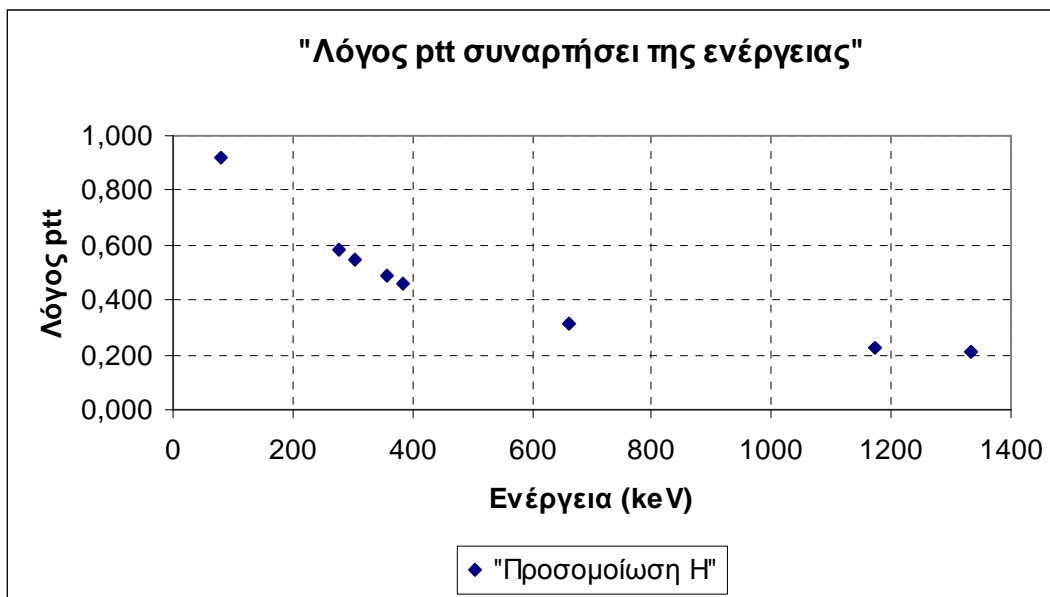
Με βάση τον πίνακα 4.2, τα αποτελέσματα δίνονται και με γραφήματα (σχήματα 4.1α και 4.1β), όπου φαίνεται καλύτερα το εύρος των ενεργειών που έχουν μελετηθεί και η κύμανση της τιμής της ολικής απόδοσης και του λόγου ptt συναρτήσει της ενέργειας.

Προσομοίωση - Γεωμετρία Η							
Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής		Ολική απόδοση		Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση	
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)
Ba-133	80,997	2,145E-03	0,083	2,336E-03	0,042	0,918	0,093
Ba-133	276,4	1,700E-03	0,066	2,918E-03	0,033	0,583	0,074
Ba-133	302,84	1,577E-03	0,075	2,890E-03	0,038	0,546	0,084
Ba-133	356,01	1,384E-03	0,108	2,843E-03	0,054	0,487	0,121
Ba-133	383,85	1,296E-03	0,111	2,816E-03	0,056	0,460	0,124
Cs-137	661,67	8,323E-04	0,156	2,626E-03	0,078	0,317	0,174
Co-60	1173,2	5,400E-04	0,182	2,371E-03	0,091	0,228	0,203
Co-60	1332,5	4,904E-04	0,141	2,315E-03	0,071	0,212	0,158

Πίνακας 4.2 Αποδόσεις και λόγος ptt για διάφορες ενέργειες σημειακών πηγών και για απόσταση πηγής-ανιχνευτή ίση με 22.4 cm



Σχήμα 4.1α Ολική απόδοση ανιχνευτή HPGe συναρτήσει της ενέργειας για σημειακές πηγές τοποθετημένες σε απόσταση 22.4 cm από τον ανιχνευτή



Σχήμα 4.1β Λόγος ολικής προς απόδοση αιχμής συναρτήσει της ενέργειας για σημειακές πηγές τοποθετημένες σε απόσταση 22.4 cm από τον ανιχνευτή

Στο πρώτο διάγραμμα (σχήμα 4.1α), όλα, σχεδόν, τα σημεία φαίνεται να σχηματίζουν καμπύλη που αντιστοιχεί σε μείωση της ολικής απόδοσης αυξανόμενης της ενέργειας. Μεγάλη είναι η διαφοροποίηση του πρώτου σημείου (αφορά την ολική απόδοση για τα 80.9 keV του ^{133}Ba), που βρίσκεται εκτός της νοητής καμπύλης και πολύ μακριά από τα υπόλοιπα σημεία. Παρ'όλα αυτά, η διαφοροποίηση δεν υπάρχει στο δεύτερο διάγραμμα (σχήμα 4.1β), το οποίο περιγράφει την καμπύλη του λόγου ptt συναρτήσει της ενέργειας. Πράγματι, όπως δείχνουν και τα αποτελέσματα του πίνακα 4.2, η τιμή του λόγου peak to total για την ενέργεια 80.9 keV του ^{133}Ba βρίσκεται σε συμφωνία με τη γενική τάση που διαμορφώνεται από τις υπόλοιπες τιμές, σε αντίθεση με τις τιμές των αποδόσεων αιχμής και ολικής.

4.2.2 Εκτίμηση αποδόσεων και λόγου ολικής προς απόδοση αιχμής για πηγές όγκου.

Η ολική απόδοση του ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ και ο λόγος peak to total υπολογίστηκαν για τις δύο διαθέσιμες γεωμετρίες ('2' και '5') της πηγής όγκου KCl τόσο μέσω πειραμάτων όσο και μέσω προσομοίωσης.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων η θωράκιση του ανιχνευτή παρέμενε κλειστή, αφενός για να μην ανιχνευθούν εξωτερικές ακτινοβολίες, αφετέρου γιατί στον υπολογισμό της ολικής απόδοσης πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι κρούσεις άρα και όλες οι αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο σύνολο της ανιχνευτικής διάταξης (σωματίδια που σκεδάζονται στη θωράκιση ή σε κάποιο τμήμα της κατασκευής κ.α.).

Στα αρχεία εισόδου των προσομοιώσεων η θωράκιση ορίστηκε κλειστή και οι διαστάσεις του ανιχνευτή όπως προσδιορίστηκαν στην τελική γεωμετρία Η (πίνακας 3.28). Υπενθυμίζεται ότι οι γεωμετρίες '2' και '5' αντιστοιχούν σε πηγή όγκου τοποθετημένη σε απόσταση 2.5mm από το παράθυρο του ανιχνευτή.

Οι τιμές των αποδόσεων και του λόγου peak to total που υπολογίστηκαν μέσω πειράματος και μέσω προσομοίωσης, καθώς και τα σφάλματά τους, παρουσιάζονται στους πίνακες 4.3 και 4.4 αντίστοιχα. Ακολουθούν συγκριτικοί πίνακες (4.5-4.7), όπου παρουσιάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών πειράματος και προσομοίωσης για το κάθε μέγεθος. Σημειώνεται ότι οι πειραματικές τιμές που παρατίθενται αφορούν πάντα το σταθμισμένο μέσο όλων των δειγμάτων που μελετήθηκαν (βλ. κεφάλαιο 3, παράγραφο 3.2.3.1).

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Πείραμα - Σταθμισμένος μέσος					
		Απόδοση αιχμής		Ολική απόδοση		Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση	
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)
'2'	1460,822	5,568E-03	2,130	5,138E-02	1,508	0,108	2,610
'5'		1,061E-02	2,390	9,482E-02	1,531	0,112	2,839

Πίνακας 4.3 Πειραματικές τιμές αποδόσεων και λόγου peak to total

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Προσομοίωση - Γεωμετρία Η					
		Απόδοση αιχμής		Ολική απόδοση		Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση	
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)
'2'	1460,822	5,889E-03	0,343	4,075E-02	0,172	0,145	0,383
'5'		1,092E-02	0,186	6,877E-02	0,093	0,159	0,208

Πίνακας 4.4 Τιμές αποδόσεων και λόγου peak to total με χρήση προσομοίωσης

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (H)			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'2'	1460,822	5,568E-03	2,130	5,889E-03	0,343	-5,768	2,67
'5'		1,061E-02	2,390	1,092E-02	0,186	-2,975	1,21

Πίνακας 4.5 Απόδοση αιχμής για τα 1460.822 keV του ⁴⁰K

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Ολική απόδοση				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (H)			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'2'	1460,822	5,138E-02	1,508	4,075E-02	0,172	20,684	13,66
'5'		9,482E-02	1,531	6,877E-02	0,093	27,476	17,93

Πίνακας 4.6 Ολική απόδοση ανιχνευτή

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (H)			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'2'	1460,822	0,108	2,610	0,145	0,383	-33,333	12,88
'5'		0,112	2,839	0,159	0,208	-42,012	14,70

Πίνακας 4.7 Λόγος απόδοσης αιχμής προς ολική απόδοση

Μελετώντας τους παραπάνω πίνακες και ιδιαίτερα τους τρεις τελευταίους (4.5-4.7), διαπιστώνουμε μεγάλη αναντιστοιχία μεταξύ των αποκλίσεων για τα διάφορα μεγέθη. Ενώ στην περίπτωση της απόδοσης αιχμής οι αποκλίσεις πειράματος - προσομοίωσης κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (~5.77 % για τη γεωμετρία '2' και ~2.98 % για τη γεωμετρία '5'), οι αποκλίσεις που αφορούν στην ολική απόδοση και το λόγο peak to total εκτινάσσονται στα ύψη, φθάνοντας το 20-27 % και το 33-42 % αντίστοιχα. Επιπλέον, ο στατιστικός έλεγχος υποδεικνύει ότι σε όλες τις περιπτώσεις –με εξαίρεση την απόδοση αιχμής για τη γεωμετρία '5'- η διαφορά των τιμών είναι στατιστικά σημαντική. Οι πολύ μεγάλες τιμές των αποκλίσεων, που προφανώς δεν είναι ικανοποιητικές και αποδεκτές, καθώς και τα αποτελέσματα του U-test, επιβάλλουν την περαιτέρω διερεύνηση των βαθύτερων αιτιών του φαινομένου, ώστε

να μπορέσει αφενός να ερμηνευθεί αφετέρου να διορθωθεί. Το ερώτημα που τίθεται είναι, γιατί διαφέρει το αποτέλεσμα της εκτίμησης της ολικής απόδοσης μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος.

Στην προσπάθεια εντοπισμού των σημείων στα οποία πιθανόν διαφοροποιείται η διαδικασία της προσομοίωσης από την πειραματική, με αποτέλεσμα και την εμφάνιση μεγάλων αποκλίσεων στις αντίστοιχες τιμές, αποφασίστηκε να μελετηθεί ο ρόλος της ακτινοβολίας πέδησης η οποία παράγεται κατά την αλληλεπίδραση των σωματιδίων-β, τα οποία εκπέμπονται από την πηγή ^{40}K , με τα υλικά του συστήματος πηγή-ανιχνευτής-θωράκιση. Στην κατεύθυνση αυτή οδηγηθήκαμε από τη σκέψη ότι, ενώ πρόκειται για ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα στην πραγματικότητα, άρα ενδεχομένως επηρεάζει τις πειραματικές μετρήσεις, η επίδρασή του δεν έχει ληφθεί υπόψη από τον κώδικα PENELOPE και δε συνυπολογίζεται κατά την προσομοίωση.

4.3 Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου ακτινοβολίας πέδησης κατά τον υπολογισμό της ολικής απόδοσης.

Η “ακτινοβολία πέδησης” (bremsstrahlung) είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ακτίνες-X με συνεχές φάσμα) η οποία εκπέμπεται από σωματίδια-β τα οποία επιβραδύνονται κατά την αλληλεπίδραση τους με άλλα άτομα εξαιτίας του πυρήνα των ατόμων αυτών. Ακτινοβολία πέδησης παράγεται κυρίως όταν σωματίδια-β μεγάλης ενέργειας προσπίπτουν πάνω σε υλικά τα οποία αποτελούνται από βαρείς πυρήνες, όπως τα μέταλλα. Τα σωματίδια αυτά, κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη, προκαλούν αφενός διεγέρσεις και ιονισμούς των ατόμων της ύλης αφετέρου ακτινοβολία πέδησης. Το φάσμα των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία αυτή είναι συνεχές με μέγιστη ενέργεια ίση με την ενέργεια των σωματιδίων-β. Αν και η απώλεια ενέργειας με τον τρόπο που περιγράφηκε αφορά και άλλα σωματίδια, η ακτινοβολία πέδησης είναι σημαντική στα ελαφρά σωματίδια, όπως είναι τα σωματίδια-β. Σε ένα φάσμα ακτίνων-γ, οι οποίες ακολουθούν τη διάσπαση-β της πηγής, η παραγωγή της ακτινοβολίας πέδησης έχει ενδεχομένως ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνεχούς υποστρώματος του φάσματος, εφόσον η ακτινοβολία πέδησης φτάνει στον ανιχνευτή.

Η ακτινοβολία πέδησης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διαδικασία βαθμονόμησης ενός ανιχνευτή και γενικότερα τα πειράματα γ-φασματοσκοπίας (ιδίως αν αυτά αφορούν χαμηλές ενέργειες), καθώς προκαλεί αύξηση των κρούσεων που καταγράφονται άρα επιδρά και στις τιμές της απόδοσης που υπολογίζονται πειραματικά (Turhan et al., 2006, Mrdja et al., 2006), ιδιαίτερα την τιμή της ολικής απόδοσης που υπολογίζεται από τη συνεχή συνιστώσα του φάσματος. Αρκετές από τις εργασίες που πραγματεύονται το ζήτημα του bremsstrahlung, επισημαίνουν την ανάγκη λήψης μέτρων για την αντιμετώπισή του κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων γ-φασματοσκοπίας, προτείνοντας μέτρα όπως η χρήση υλικών με χαμηλό ατομικό αριθμό στο περιβάλλον του ανιχνευτή, ή η εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κοντά στην πηγή που θα εκτρέψει τα ηλεκτρόνια μακριά από το παράθυρο του ανιχνευτή.

Εκτιμώντας ότι οι συνέπειες του bremsstrahlung πιθανόν να ευθύνονται –σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό- για τις αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή HPGe, αποφασίστηκε να διερευνηθεί η επίδρασή του για την περίπτωση των πηγών όγκου του KCl.

4.3.1 Μεθοδολογία διερεύνησης.

Είναι γεγονός πως ο ανιχνευτής στη διάρκεια ενός πειράματος καταγράφει όλα τα φωτόνια που φτάνουν σε αυτόν, χωρίς να «ξεχωρίζει» αν αυτά είναι «πρωτογενή» ή «δευτερογενή». Αντίθετα, στην περίπτωση της προσομοίωσης, ο κώδικας λαμβάνει υπόψη ως «αρχικά σωματίδια» στο αρχείο εισόδου μόνο τα φωτόνια που εκπέμπονται απ'ευθείας από την πηγή, αγνοώντας τα φωτόνια που έχουν προκύψει από την πέδηση των ταχέως κινουμένων ηλεκτρονίων. Προσομοιώνονται επομένως μόνο οι ιστορίες των «πρωτογενών» φωτονίων, πράγμα που δε μπορεί να μην αντανάκλαται και στα αποτελέσματα που δίνει ο κώδικας.

Προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν «όμοια» πράγματα, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και το φαινόμενο της ακτινοβολίας πέδησης. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να γίνουν δύο προσομοιώσεις. Μία προσομοίωση θα γίνει για φωτόνια και μία για ηλεκτρόνια. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα (δηλαδή τα φάσματα ακτίνων-γ που προκύπτουν από κάθε προσομοίωση) θα υπερτεθούν, για να δώσουν το συνολικό

φάσμα των ακτίνων-γ που ανιχνεύονται εξαιτίας της κάθε φύσεως ακτινοβολίας της πηγής. Έτσι, θα έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι αλληλεπιδράσεις που έχουν πραγματοποιηθεί. Η λογική της υπέρθεσης φασμάτων αναφέρεται και στην εργασία (Z. Wang et al., 2002), όπου χρησιμοποιείται για το συνδυασμό των φασμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις για τις δύο ενέργειες του ^{60}Co (1173.2 keV, 1332.5 keV).

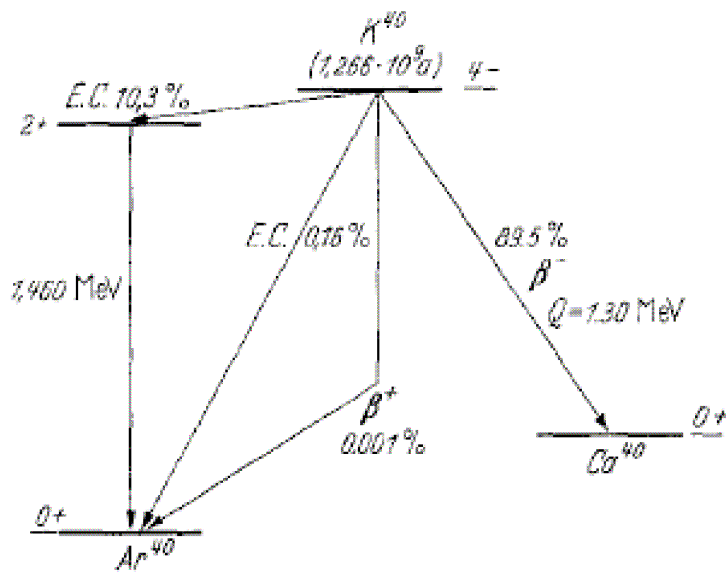
Η υπέρθεση θα γίνει ως εξής: μετά το πέρας των δύο προσομοιώσεων (η μία «τρέχει» για φωτόνια, η άλλη για ηλεκτρόνια), θα προστεθούν με κατάλληλη στάθμιση οι τιμές της δεύτερης στήλης των αρχείων εξόδου pm_spc_enddet_1.dat των δύο προσομοιώσεων. Υπενθυμίζεται ότι στη στήλη αυτή καταγράφεται η πιθανότητα ένα αρχικό σωματίδιο να εναποθέσει συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή (σε μονάδες $1/(eV \cdot \text{particle})$). Εξυπακούεται ότι η ενεργειακή διαμέριση θα είναι ακριβώς η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, οπότε είναι προφανές ότι η ν-ιοστή τιμή του ενός αρχείου θα προστεθεί με τη ν-ιοστή τιμή του δεύτερου αρχείου εξόδου, δίνοντας σαν άθροισμα τη συνολική πιθανότητα ύπαρξης σωματιδίων που θα εναποθέσουν αυτή την ενέργεια, είτε πρόκειται για «πρωτογενή» είτε για «δευτερογενή» φωτόνια. Όπως προαναφέρθηκε, η επαλληλία θα γίνει με κατάλληλη στάθμιση, καθώς δεν αντιστοιχεί ένα φωτόνιο ενέργειας 1460.8 keV σε ένα σωματίδιο-β της πηγής. Από δημοσιευμένους πίνακες (Be M. et al., 2004), λογισμικά τα οποία παρέχουν πυρηνικά δεδομένα συνεργαζόμενα με κατάλληλες βάσεις δεδομένων (Radiation Decay v3.6, Hacker Ch., 2001) και τα διαγράμματα διάσπασης του ^{40}K (σχήμα 4.2, Leutz et al., 1965) προκύπτουν τα στοιχεία των πινάκων 4.8 και 4.9 που αφορούν στη διάσπαση του ^{40}K .

Κλάδος ηλεκτρονίων	Μέγιστη ενέργεια (keV)	Μέση ενέργεια (keV)	Πιθανότητα εκπομπής	Βάση δεδομένων Radiation Decay
	1311,60	508,54	0,8933	

Πίνακας 4.8 Δεδομένα διάσπασης ^{40}K (Κλάδος ηλεκτρονίων)

Κλάδος φωτονίων	Ενέργεια (keV)	Πιθανότητα εκπομπής	Monographie BIPM-5 (Be M. et al., 2004)
	1460,85	0,1066	

Πίνακας 4.9 Δεδομένα διάσπασης ^{40}K (Κλάδος φωτονίων)



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα διάσπασης ^{40}K

Με βάση αυτήν την αναλογία (0.1066 : 0.8933) θα πρέπει να γίνει και η υπέρθεση των δύο αρχείων εξόδου. Η τιμή κάθε στήλης πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή αναλογίας (πιθανότητα) και στη συνέχεια οι «νέες» τιμές των δύο στηλών προστίθενται μεταξύ τους, για να δώσουν την «αθροισμένη» πιθανότητα να ανιχνευθεί για οποιοδήποτε λόγο στο φάσμα φωτόνιο στη συγκεκριμένη ενεργειακή διαμέριση. Η σχέση (4.1) που ακολουθεί αποτυπώνει μαθηματικά τη διαδικασία υπέρθεσης.

$$pdf_{tot} = \left[(0.1066 \times pdf_{ph}) + (0.8933 \times pdf_{el}) \right] \quad (4.1)$$

όπου

pdf_{el} : η πιθανότητα ύπαρξης φωτονίου που θα εναποθέσει συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή προερχόμενο από την πηγή

pdf_{ph} : η πιθανότητα ύπαρξης φωτονίου που θα εναποθέσει συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή προερχόμενο από bremsstrahlung

pdf_{tot} : η ολική «αθροισμένη» πιθανότητα ύπαρξης φωτονίου που θα εναποθέσει συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή ανεξαρτήτως προέλευσης

Χρησιμοποιώντας τις τιμές της τελικής «αθροισμένης» στήλης, υπολογίσθηκαν οι αποδόσεις (ολική και αιχμή) καθώς και ο λόγος peak to total, σύμφωνα πάντα με τις σχέσεις που περιγράφονται στο 2^ο κεφάλαιο. Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων της προσομοίωσης ακολουθήθηκε επίσης η λογική της υπέρθεσης, μόνο που αυτή τη φορά η διαδικασία θα αφορά στην 3^η στήλη των δύο αρχείων εξόδου, η οποία – υπενθυμίζεται- αναφέρεται στο μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας (σε 3σ).

Αν η υπόθεση περί της επίδρασης της ακτινοβολίας πέδησης στο συνολικό φάσμα των ακτίνων-γ είναι ορθή, θα πρέπει οι τιμές που υπολογίζονται από τη διαδικασία της υπέρθεσης να βρίσκονται πλησιέστερα στις πειραματικές. Η διαφοροποίηση αναμένεται να παρουσιασθεί κυρίως στην τιμή της ολικής απόδοσης, αφού το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας πέδησης, επηρεάζει πρωτίστως το συνολικό αριθμό κρούσεων που καταγράφονται και σε μικρότερο βαθμό μια συγκεκριμένη φωτοκορυφή. Η διόρθωση της τιμής της ολικής απόδοσης θα οδηγήσει προφανώς και σε διόρθωση της τιμής του λόγου peak to total.

Δεδομένου ότι η προσομοίωση για φωτόνια ενέργειας 1460.8keV έχει ήδη πραγματοποιηθεί, το επόμενο βήμα ήταν η εκτέλεση προσομοίωσης για σωματίδια-β. Αποφασίστηκε να δοκιμασθούν δύο διαφορετικές προσομοιώσεις:

- προσομοίωση με προσέγγιση δέσμης μονοενεργειακών σωματιδίων-β
- προσομοίωση δέσμης σωματιδίων-β με ενεργειακό φάσμα

4.3.2 Προσομοίωση με προσέγγιση δέσμης μονοενεργειακών σωματιδίων-β.

Θεωρήθηκε ότι τα σωματίδια-β είναι μονοενεργειακά, με αρχική ενέργεια τη μέση ενέργεια του αντίστοιχου συνεχούς φάσματος. Πρόκειται βέβαια για προσέγγιση, καθώς στην πραγματικότητα το φάσμα των ηλεκτρονίων είναι συνεχές. Στο αρχείο εισόδου ορίστηκαν ως αρχικά σωματίδια ηλεκτρόνια και η αρχική ενέργεια ίση με 508.54 keV, διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες (ενεργειακό εύρος, αριθμό καναλιών, αρχείο γεωμετρίας και αρχείο υλικών, κλπ.). Με εξαίρεση, δηλαδή, το είδος και την ενέργεια των αρχικών σωματιδίων, το αρχείο εισόδου που αφορά στα ηλεκτρόνια είναι όμοιο με αυτό των φωτονίων. Προσομοίωση πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά για τη μία από τις δύο διαθέσιμες πηγές

KCl και συγκεκριμένα για τη γεωμετρία '5' (δοχείο όγκου 97.2 cm³). Μετά το πέρας της προσομοίωσης, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε, «προστέθηκαν» τα δύο αρχεία εξόδου και υπολογίστηκαν από το «αθροισμένο» φάσμα οι αποδόσεις, ο λόγος peak to total και τα σφάλματά τους.

Σημειώνεται ότι η προσομοίωση που αφορά στα φωτόνια δεν επαναλήφθηκε, χρησιμοποιήθηκε το αρχείο εξόδου που είχε προκύψει από τις προηγούμενες προσομοιώσεις (παράγραφος 4.1.2.2). Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 4.10-4.13, όπου γίνεται και σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Προσομοίωση (Μονοενεργειακή Δέσμη ηλεκτρονίων - Γεωμετρία H)					
		Απόδοση αιχμής		Ολική απόδοση		Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση	
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)
'5'	1460,822	1,093E-02	0,175	7,899E-02	0,088	0,138	0,196

Πίνακας 4.10 Τιμές αποδόσεων και λόγου peak to total με χρήση προσομοίωσης για την περίπτωση μονοενεργειακής δέσμης ηλεκτρονίων

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής				Απόκλιση (%) Πειράματος-Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (ΜΔ-Η)*			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'5'	1460,822	1,061E-02	2,390	1,093E-02	0,175	-2,975	1,26

* ΜΔ-Η : μονοενεργειακή δέσμη ηλεκτρονίων

Πίνακας 4.11 Σύγκριση απόδοσης αιχμής για τα 1460.822 keV του ⁴⁰K

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Ολική απόδοση				Απόκλιση (%) Πειράματος-Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (ΜΔ-Η)*			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'5'	1460,822	9,482E-02	1,531	7,899E-02	0,088	16,696	10,89

* ΜΔ-Η : μονοενεργειακή δέσμη ηλεκτρονίων

Πίνακας 4.12 Σύγκριση Ολικής απόδοσης ανιχνευτή

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (ΜΔ-Η)*			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'5'	1460,822	0,112	2,839	0,138	0,196	-23,610	8,15

* ΜΔ-Η : μονοενεργειακή δέσμη ηλεκτρονίων

Πίνακας 4.13 Σύγκριση λόγου απόδοσης αιχμής προς ολική απόδοση

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες, οι τιμές διαφέρουν αρκετά από αυτές που είχαν υπολογιστεί χωρίς να συμπεριληφθεί η ακτινοβολία πέδησης (πίνακες 4.4-4.7), με εξαίρεση την απόδοση αιχμής. Στην περίπτωση, μάλιστα, της ολικής απόδοσης και του λόγου peak to total οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών προσομοίωσης και πειράματος μειώνονται αισθητά (από 27% και 42% πέφτουν σε 17% και 24% αντίστοιχα).

Εξακολουθούν, βέβαια, να είναι στατιστικά σημαντικές οι διαφορές (σύμφωνα με το κριτήριο του στατιστικού ελέγχου) μεταξύ πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης, γεγονός που εξηγείται εν μέρει από την επιλογή της μονοενεργειακής δέσμης ηλεκτρονίων. Παρόλα αυτά, η αισθητή βελτίωση που επετεύχθη σε ό,τι αφορά στις τιμές ολικής απόδοσης και peak to total ratio, υποδεικνύει ότι πράγματι η ακτινοβολία πεδήσεως έχει επίδραση στην ολική απόδοση.

Η τιμή της απόδοσης αιχμής δεν αλλάζει σημαντικά, κάτι που ήταν αναμενόμενο, καθώς η ακτινοβολία πέδησης επιδρά κυρίως στο συνολικό υπόβαθρο (συνεχές υπόστρωμα) και όχι στην επιφάνεια μιας φωτοκορυφής. Η μικρή αλλαγή (αύξηση) στην απόδοση αιχμής δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Εκτιμώντας ότι τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά, αποφασίσθηκε να μη γίνει προσομοίωση και για τη δεύτερη γεωμετρία πηγής KCl (γεωμετρία '2'), αλλά να ακολουθήσει δοκιμή εισαγωγής συνεχούς φάσματος στο αρχείο εισόδου.

4.3.3 Προσομοίωση με συνεχές φάσμα σωματιδίων-β.

Σε δεύτερο στάδιο δοκιμάστηκαν προσομοιώσεις με συνεχές ενεργειακό φάσμα ηλεκτρονίων. Ο κώδικας PENELOPE παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής συνεχούς φάσματος στο αρχείο εισόδου, όμως απαιτεί να είναι πολύ συγκεκριμένης μορφής. Τα δεδομένα του φάσματος πρέπει να είναι δομημένα σε πίνακα τριών στηλών, εκ των

οποίων η δεύτερη περιλαμβάνει τιμές ενέργειας και η τρίτη τις πιθανότητες ύπαρξης σωματιδίου αντίστοιχης ενέργειας. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται μόνο η λέξη SPECTR (από την αγγλική λέξη spectrum:φάσμα), υποδηλώνοντας ότι ο κώδικας «τρέχει» για συνεχές φάσμα κι όχι για μονοενεργειακή πηγή. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη μορφή του πίνακα και την εισαγωγή συνεχούς φάσματος, μπορούν να αναζητηθούν στο εγχειρίδιο του κώδικα PENELOPE (Salvat et al., 1996) καθώς και σε παλιότερες εργασίες (Δ.Ε. Π.Μανώλακα, 2007), όπου περιγράφονται αναλυτικά όλες οι πλευρές της προσομοίωσης στην περίπτωση συνεχούς ενεργειακού φάσματος.

Το φάσμα εκπομπής ηλεκτρονίων από το ^{40}K αναζητήθηκε στη βιβλιογραφία και μετά από εκτενή έρευνα βρέθηκε στο paper “The Decay of Potassium-40” των Leutz, Schulz, Wenninger (1965). Η συγκεκριμένη εργασία περιείχε, εκτός των άλλων, το φάσμα σε μορφή αναγνώσιμη από τον κώδικα (γεγονότα ανά ενέργεια, ταξινομημένα σε στήλες). Προκειμένου όμως να εισαχθεί ο συγκεκριμένος πίνακας στο αρχείο εισόδου της προσομοίωσης, έπρεπε να υποστεί κατάλληλη επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα έπρεπε για κάθε ενεργειακή περιοχή, αντί της μέσης ενέργειάς της, να εισάγεται το κάτω όριό της, ενώ επιπλέον έπρεπε να υπολογισθεί και η πιθανότητα εκπομπής σωματιδίων – β σε κάθε μια από αυτές τις ενεργειακές περιοχές. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται ο τροποποιημένος πίνακας καθώς και τμήμα του αρχείου εισόδου, όπου φαίνεται καθαρά το συνεχές φάσμα των ηλεκτρονίων (πίνακες 4.14-4.15), ενώ ο αρχικός πίνακας και οι τροποποιήσεις που έγιναν σε αυτόν παρατίθενται στο παράρτημα Ε της παρούσας εργασίας.

Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις δύο γεωμετρίες της πηγής όγκου KCl, με ηλεκτρόνια ως αρχικά σωματίδια και συνεχές ενεργειακό φάσμα στα αρχεία εισόδου. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων αρχείων εξόδου «υπερτέθηκαν» με αυτά που αντιστοιχούν στα φωτόνια. Οι προσομοιώσεις που αφορούν φωτόνια δεν επαναλήφθηκαν, αλλά χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία εξόδου που ήδη υπήρχαν (παράγραφος 4.1.2.2).

Οι τιμές που υπολογίστηκαν με βάση το τελικό, «αθροισμένο» φάσμα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.16. Στους πίνακες 4.17-4.19 γίνεται σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης.

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Προσομοίωση – Αθροισμένο Φάσμα (Υπέρθεση με Συνεχές Φάσμα ηλεκτρονίων - Γεωμετρία Η)					
		Απόδοση αιχμής		Ολική απόδοση		Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση	
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)
'2'	1460,822	5,889E-03	0,343	4,806E-02	0,343	0,123	0,485
'5'		1,092E-02	0,186	8,321E-02	0,186	0,131	0,263

Πίνακας 4.16 Τιμές αποδόσεων και λόγου peak to total από προσομοίωση

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (ΣΦ-Η)*			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'2'	1460,822	5,568E-03	2,130	5,889E-03	0,343	-5,768	2,67
'5'		1,061E-02	2,390	1,092E-02	0,186	-2,975	1,21

* Συνεχές Φάσμα ηλεκτρονίων - Γεωμετρία Η

Πίνακας 4.17 Σύγκριση αποτελεσμάτων απόδοση αιχμής για 1460.8keV

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Ολική απόδοση				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (ΣΦ-Η)*			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'2'	1460,822	5,138E-02	1,508	4,806E-02	0,343	6,466	4,19
'5'		9,482E-02	1,531	8,321E-02	0,186	12,249	7,95

* Συνεχές Φάσμα ηλεκτρονίων - Γεωμετρία Η

Πίνακας 4.18 Σύγκριση αποτελεσμάτων ολική απόδοση ανιχνευτή

Γεωμετρία πηγής όγκου	Ενέργεια (keV)	Απόδοση αιχμής προς ολική απόδοση				Απόκλιση (%) Πειράματος- Προσομοίωσης	Τιμή U-test
		Πείραμα		Προσομοίωση (ΣΦ-Η)*			
		Τιμή	σ %(1σ)	Τιμή	σ %(1σ)		
'2'	1460,822	0,108	2,610	0,123	0,485	-13,126	5,21
'5'		0,112	2,839	0,131	0,263	-17,345	5,94

* Συνεχές Φάσμα ηλεκτρονίων - Γεωμετρία Η

Πίνακας 4.19 Λόγος απόδοσης αιχμής προς ολική απόδοση

Οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης στην τελευταία αυτή εκδοχή με το συνεχές φάσμα ηλεκτρονίων παρουσιάζουν τις μικρότερες ως τώρα αποκλίσεις από τις πειραματικές, κάτι που φαίνεται και στον πίνακα 4.20.

Γεωμετρία πηγής όγκου	Απόκλιση πειράματος - προσομοίωσης (%)								
	Απόδοση αιχμής			Ολική απόδοση			Απόδοση αιχμής προς ολική		
	1*	2**	3***	1*	2**	3***	1*	2**	3***
'2'	-5,768	-	-5,768	20,684	-	6,466	-33,333	-	-13,126
'5'	-2,975	-2,975	-2,975	27,476	16,696	12,249	-42,012	-23,610	-17,345

* Κατά την προσομοίωση δεν έχει ληφθεί υπόψη ακτινοβολία πέδησης

** Κατά την προσομοίωση έχει ληφθεί υπόψη ακτινοβολία πέδησης, για μονοενεργειακά σωματίδια-β

***Κατά την προσομοίωση έχει ληφθεί υπόψη ακτινοβολία πέδησης για σωματίδια-β με ενεργειακό φάσμα.

Πίνακας 4.20 Απόκλιση μεταξύ πειραματικών και τιμών προσομοίωσης

Τα όσα παραπάνω παρουσιάστηκαν, περιγράφονται ποιοτικά στα σχήματα (4.3) – (4.5), που βρίσκονται στο τέλος του κεφαλαίου. Αρχικά, στο σχήμα (4.3), παρατίθεται το πειραματικό φάσμα πηγής KCl, γεωμετρίας '2', όπως έχει προκύψει από την ανάλυσή της στην ανιχνευτική διάταξη του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με ανιχνευτή HPGe καθώς και το φάσμα υποστρώματος της συγκεκριμένης διάταξης. Τονίζεται ότι η λήψη και των δύο φασμάτων είχε την ίδια διάρκεια για λόγους σύγκρισης. Ακολούθως, στο σχήμα (4.4) παρατίθεται το «καθαρό» φάσμα της πηγής KCl, γεωμετρίας '2', όπως προέκυψε από την αφαίρεση των δύο προηγούμενων φασμάτων. Στα σχήματα αυτά η επιφάνεια της φωτοκορυφής η οποία αντιστοιχεί στην ενέργεια των 1460.8keV του ^{40}K παραμένει σταθερή ενώ αλλάζει μόνο η συνολική επιφάνεια του φάσματος.

Το «καθαρό» φάσμα (βλ. σχήμα 4.4) θα πρέπει ποιοτικά να μοιάζει με το παραγόμενο από τη διαδικασία της προσομοίωσης αντίστοιχο φάσμα, στο οποίο όμως έχει ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως. Με δεδομένο όμως ότι το φάσμα της προσομοίωσης αναφέρεται στο μέγεθος της πυκνότητας πιθανότητας και καθώς επίσης για τον προσδιορισμό της έχουν χρησιμοποιηθεί 1000 ενεργειακά κανάλια (και όχι 4096 όπως στο πειραματικό φάσμα) είναι δυνατή μόνο η ποιοτική σύγκριση των δύο φασμάτων (πειραματικού – προσομοίωσης). Στο σχήμα (4.5) παρατίθεται το φάσμα της προσομοίωσης («αθροισμένο» φάσμα) μαζί με το φάσμα λόγω του φαινομένου της ακτινοβολίας πεδήσεως, πάλι όπως προκύπτει από τη διαδικασία της προσομοίωσης. Στο σχήμα αυτό κυρίως τονίζεται η έντονη επίδραση

της ακτινοβολίας πεδήσεως στη συνολική επιφάνεια του φάσματος καθώς και η μη συμμετοχή της στην επιφάνεια της φωτοκορυφής. Είναι δε εμφανές ότι η μορφή του φάσματος προσομοίωσης πράγματι προσεγγίζει το αντίστοιχο πειραματικό φάσμα.

4.3.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων-συμπεράσματα μελέτης ακτινοβολίας πεδήσεως.

Μελετώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 4.20 αλλά και τα φάσματα (σχήματα 4.3-4.5), φαίνεται ξεκάθαρα πως ο συνυπολογισμός του φαινομένου της ακτινοβολίας πέδησης στη διαδικασία της προσομοίωσης οδήγησε σε αποτελέσματα που βρίσκονται πλησιέστερα στα πειραματικά σε σχέση με αυτά που δεν λαμβάνουν υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως. Αυτό δεν ισχύει βέβαια για την απόδοση φωτοκορυφής, όπου η ακτινοβολία πεδήσεως δεν παίζει ρόλο και οι όποιες διαφορές παρατηρήθηκαν οφείλονται καθαρά σε στατιστικούς λόγους. Η ταύτιση αυτή δεν είναι δύσκολο να εξηγηθεί. Η πιθανότητα ύπαρξης σωματιδίων-β με ενέργεια κοντά σε αυτή της φωτοκορυφής του ^{40}K (δηλαδή στα 1460.822 keV) είναι μηδενική, όπως αποδεικνύει μια ματιά στον πίνακα 4.14 (στο τέλος του κεφαλαίου) ή στο αντίστοιχο συνεχές φάσμα των ηλεκτρονίων (στο παράρτημα Ε). Για την ακρίβεια, δεν υπάρχουν καθόλου σωματίδια με ενέργεια μεγαλύτερη από τα 1100 keV περίπου. Συνεπώς, είναι αδύνατο να προκύψουν φωτόνια πέδησης με ενέργεια κοντά στα 1460.822 keV που θα καταγραφούν στην περιοχή της συγκεκριμένης φωτοκορυφής. Εφ'όσον ο αριθμός των κρούσεων που θα καταγράψει ο ανιχνευτής μένει ανεπηρέαστος, είναι λογικό να μένει ανεπηρέαστη και η τιμή της απόδοσης αιχμής, που υπολογίζεται με βάση τον αριθμό αυτό.

Αντίθετα, σε ό,τι αφορά στην ολική απόδοση, η επιλογή να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση η επίδραση της ακτινοβολίας πέδησης είχε σαν αποτέλεσμα την αισθητή βελτίωση των αποτελεσμάτων, πράγμα που αναμέναμε, καθώς σε αυτήν οφείλεται σε ένα βαθμό η αύξηση του συνολικού υποβάθρου. Η αύξηση του συνολικού αριθμού κρούσεων οδηγεί στην αύξηση της τιμής της ολικής απόδοσης άρα και στην προσέγγισή της με την πειραματική τιμή που είναι υψηλότερη.

Αναμενόμενη ήταν και η μείωση της απόκλισης στην περίπτωση του λόγου peak to total, αφού αύξηση της ολικής απόδοσης με σταθερή την τιμή της απόδοσης αιχμής σημαίνει μείωση του λόγου που υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης, άρα πλησίασμά του στη, χαμηλότερη, πειραματική τιμή.

Συνεπώς, δεδομένης της δυσκολίας προσδιορισμού με πειραματικό τρόπο της τιμής της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων, ακόμα και αν χρησιμοποιείται μονοενεργειακή πηγή φωτονίων, αναδεικνύεται η ανάγκη χρήσης της τεχνικής της προσομοίωσης. Βέβαια, και στην περίπτωση αυτή, ακόμα και όταν λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία πεδήσεως, η τιμή της ολικής απόδοσης που εκτιμάται μέσω προσομοίωσης δε συμπίπτει με την αντίστοιχη πειραματική τιμή. Αυτό πιθανόν σημαίνει ότι υπάρχουν και άλλα φαινόμενα τα οποία ενδεχομένως δεν έχουν ληφθεί επαρκώς υπόψη, ή ακόμα ότι η γεωμετρία του συστήματος δεν είναι πλήρως ορισμένη. Πράγματι, για λόγους απλότητας, αλλά και επειδή δεν είναι ακριβώς γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, δεν έχουν περιγραφεί στα αρχεία γεωμετρίας ο κρυστάτης και το εσωτερικό του, καθώς και ο προενισχυτής κλπ. Αν στην περιγραφή της γεωμετρίας του ανιχνευτή εισαχθούν και άλλα σώματα, τα οποία μάλιστα βρίσκονται κοντά στον ανιχνευτή, ενδεχομένως οι σκεδάσεις σε αυτά να οδηγήσουν σε αύξηση του συνεχούς υποστρώματος και κατά συνέπεια σε τιμή της ολικής απόδοσης πλησιέστερα στην αντίστοιχη πειραματική.

Παρ'όλη την απόκλιση της πειραματικής τιμής του λόγου peak-to-total από την τιμή προσομοίωσης, όπως θα φανεί στο 5^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί, η αβεβαιότητα που εισάγεται κατά τον υπολογισμό συντελεστών διόρθωσης λόγω πραγματικής σύμπτωσης πολύ λίγο επηρεάζεται από την αβεβαιότητα του λόγου peak-to-total. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της Δ.Ε. αποφασίσθηκε ότι ο υπολογισμός της τιμής της ολικής απόδοσης, όπου αυτή χρειάζεται, θα γίνεται μέσω προσομοίωσης.

Ένα ακόμα χρήσιμο συμπέρασμα που προκύπτει στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης είναι η ανάδειξη της αρχής της υπέρθεσης ως πολύτιμου εργαλείου για το χειρισμό ανάλογων προβλημάτων.

Σχήματα και πίνακες 4^{ου} κεφαλαίου

Ενέργεια (keV) (κάτω όριο ενεργειακής περιοχής)	Πιθανότητα εκπομπής ηλεκτρονίων
75	0,03628
125	0,04022
175	0,04405
225	0,04776
275	0,05073
325	0,05324
375	0,05496
425	0,05622
475	0,05684
525	0,05713
575	0,05690
625	0,05622
675	0,05496
725	0,05347
775	0,05142
825	0,04885
875	0,04548
925	0,04159
975	0,03668
1025	0,03136
1075	0,02565

Πίνακας 4.14 Τελικός (τροποποιημένος) πίνακας πιθανότητας εκπομπής ηλεκτρονίων
από το ⁴⁰K ανά ενέργεια


```

TITLE Ge detector-dead layer(760μm)-well(50mm high,12mm δωμ)-shielding-KCl(vol2)source-
electron spectrum

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 1 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SPECTR 250e2 0.0
SPECTR 750e2 0.03628
SPECTR 125e3 0.04022
SPECTR 175e3 0.04405
SPECTR 225e3 0.04776
SPECTR 275e3 0.05073
SPECTR 325e3 0.05324
SPECTR 375e3 0.05496
SPECTR 425e3 0.05622
SPECTR 475e3 0.05684
SPECTR 525e3 0.05713
SPECTR 575e3 0.05690
SPECTR 625e3 0.05622
SPECTR 675e3 0.05496
SPECTR 725e3 0.05347
SPECTR 775e3 0.05142
SPECTR 825e3 0.04885
SPECTR 875e3 0.04548
SPECTR 925e3 0.04159
SPECTR 975e3 0.03668
SPECTR 1025e3 0.03136
SPECTR 1075e3 0.02565
SPECTR 1125e3 -0.0
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 8 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]
SIMPAN 8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M, EABS, C1, C2, WCC, WCR]

The following material data file must be copied from directory
.. \mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME fsource.mat [Material definition file, 20 chars]

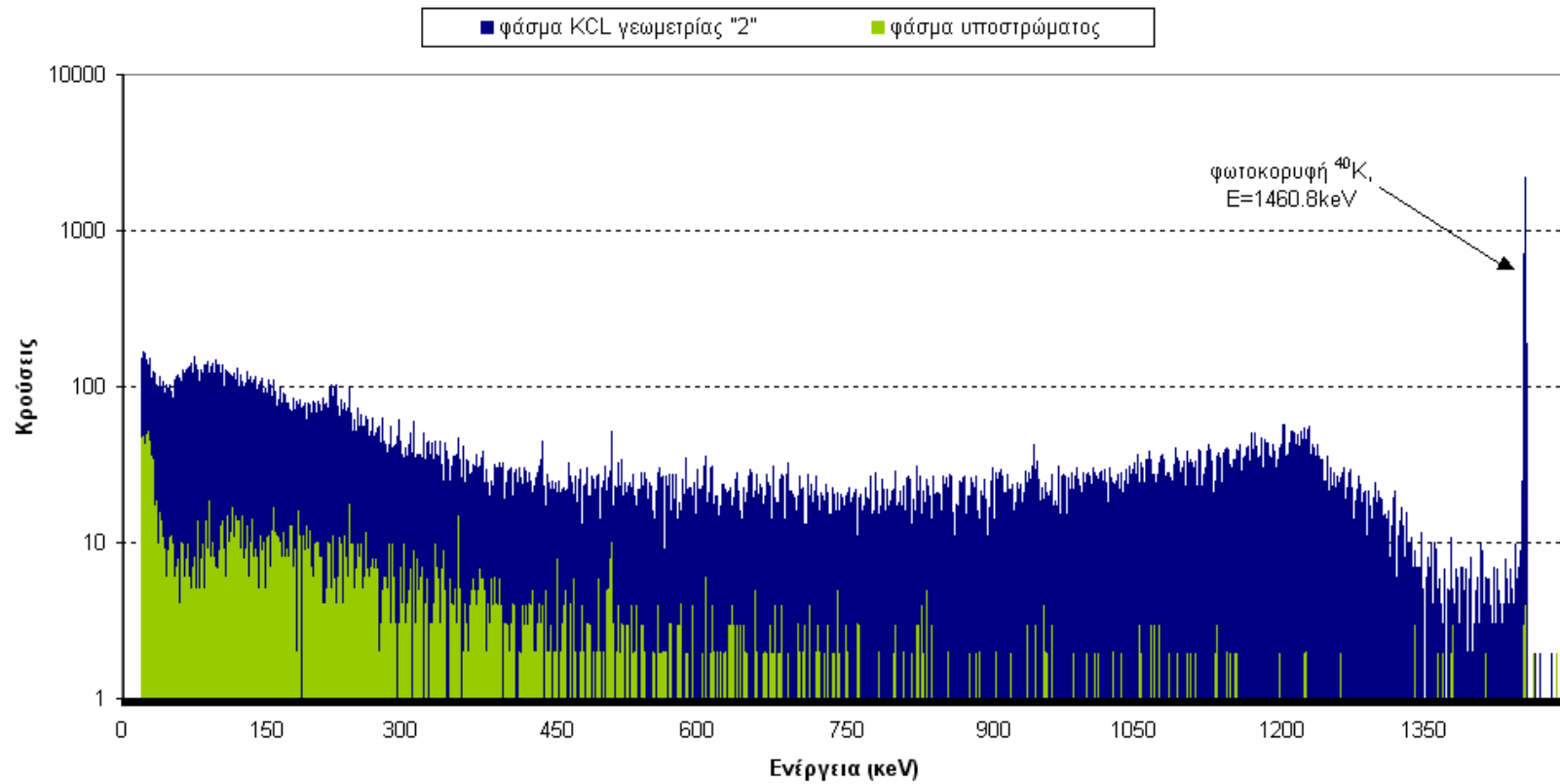
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN fing5012vol2.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.

```

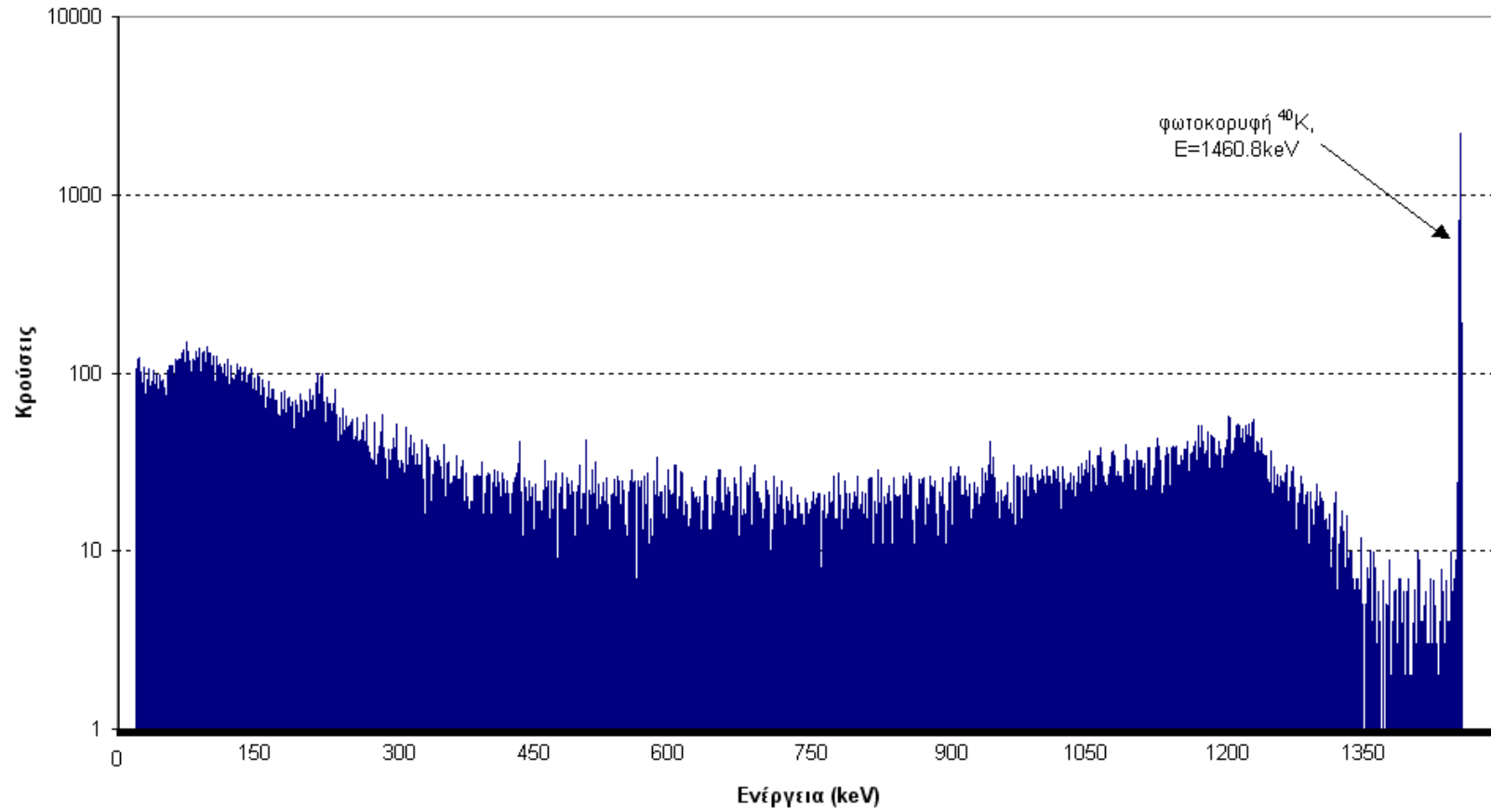
Πίνακας 4.15 Τμήμα αρχείου εισόδου με συνεχές ενεργειακό φάσμα ηλεκτρονίων.

Πειραματικό φάσμα πηγής KCl γεωμετρίας "2"
&
πειραματικό φάσμα υποστρώματος στον ανιχνευτή HPGe



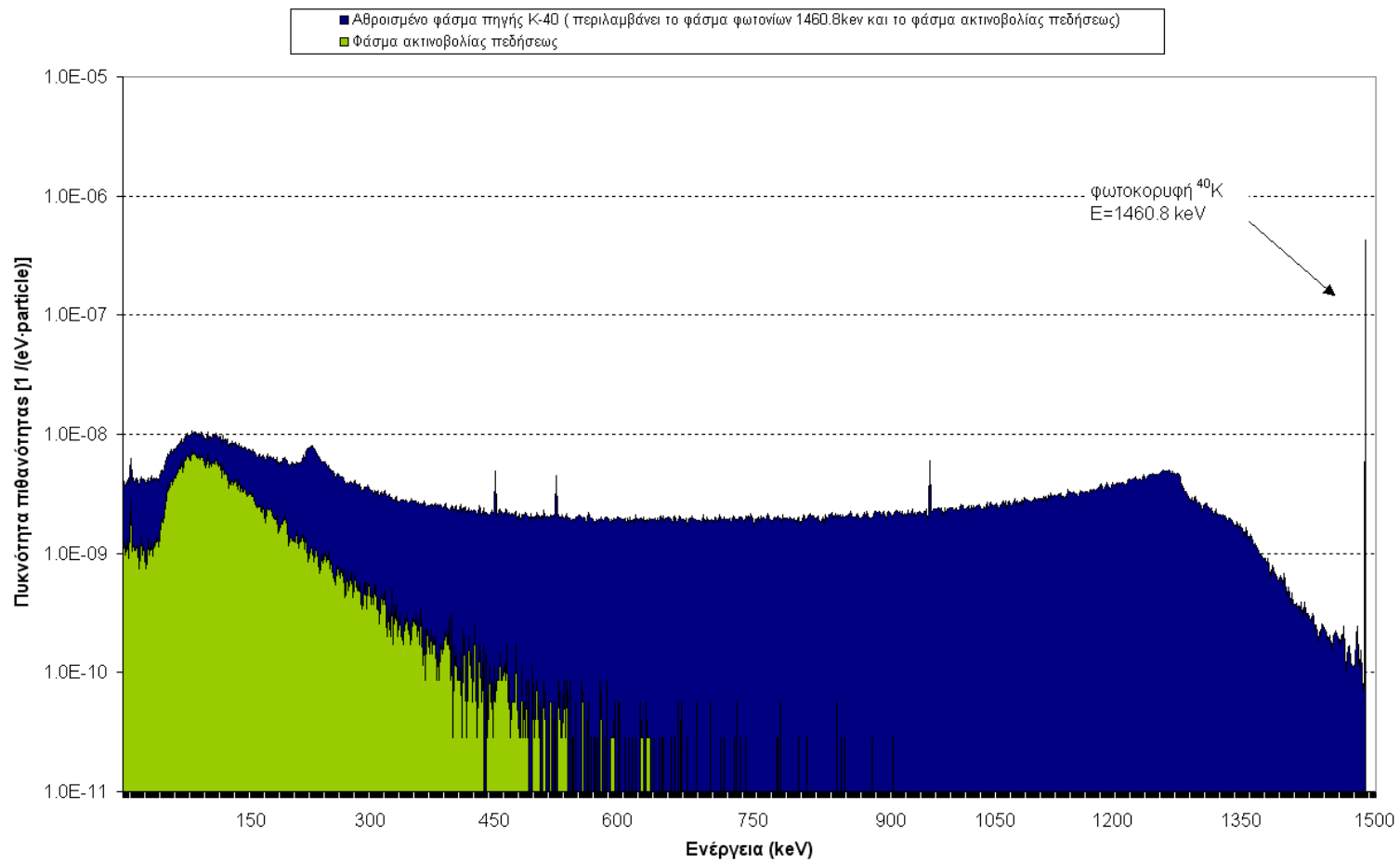
Σχήμα 4.3 Πειραματικό φάσμα πηγής KCl γεωμετρίας '2' και πειραματικό φάσμα υποστρώματος στον ανιχνευτή HPGe.

Πειραματικό "καθαρό" Φάσμα πηγής KCl γεωμετρίας "2" στον ανιχνευτή HPGe



Σχήμα 4.4 Πειραματικό «καθαρό» φάσμα πηγής KCl γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Φάσματα από προσομοιώσεις για πηγή γεωμετρίας '2'



Σχήμα 4.5 Φάσματα προσομοίωσης πηγής όγκου, γεωμετρίας '2' (^{40}K).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ

5.1 Πραγματική σύμπτωση.

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

Είναι γνωστό, ότι κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων, τα ανιχνεύσιμα φωτόνια, φωτόνια δηλαδή τα οποία αποθέτουν το σύνολο ή μέρος της ενέργειάς τους στον ανιχνευτή, αποδίδονται στο εξαγόμενο φάσμα ως κρούσεις. Οι κρούσεις αυτές είναι δυνατό να οδηγήσουν είτε στο σχηματισμό φωτοκορυφών πλήρους ενέργειας (περίπτωση φωτονίων τα οποία αποθέτουν πλήρως την ενέργειά τους στον ανιχνευτή), είτε απλά να καταγράφονται σε «τυχαίες» θέσεις του φάσματος (φωτόνια τα οποία αποθέτουν μέρος της ενέργειάς τους), προκαλώντας αύξηση του συνεχούς υποστρώματος. Συνεπώς, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, επηρεάζει το μηχανισμό ανίχνευσης φωτονίων / καταγραφής κρούσεων στην ανιχνευτική διάταξη, επιδρώντας στο μέγεθος το οποίο καλείται επιφάνεια φωτοκορυφής (Area). Με δεδομένη λοιπόν τη συμμετοχή του συγκεκριμένου μεγέθους στη σχέση (2.4) για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας δείγματος, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αποτελεί πηγή συστηματικού σφάλματος στον ποσοτικό προσδιορισμό του συγκεκριμένου δείγματος. Το σφάλμα το οποίο εισάγεται παραβλέποντας την επίδραση του προς εξέταση φαινομένου είναι συχνά μεγαλύτερο από την απαιτούμενη ακρίβεια της διαδικασίας. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται από τους De Felice et al. (2002), για ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 15% το σφάλμα μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 20-50% για γεωμετρίες πηγής τοποθετημένης κοντά στον ανιχνευτή και μεταξύ 5-10% για πηγές όγκου. Μπορεί μάλιστα να αυξηθεί εξαιρετικά (έως και 100-500%) σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται ανιχνευτές τύπου n, well detectors ή ανιχνευτές σχετικής απόδοσης 100% (De Felice et al., 2002). Με δεδομένη την αυξανόμενη χρήση ανιχνευτών υψηλής απόδοσης, η

επίδραση των φαινομένων πραγματικής σύμπτωσης μπορεί εύκολα να κάνει ακατόρθωτη την επίτευξη ακρίβειας της τάξης του 10% , ακόμα κι αν γίνονται πολύ καλές βαθμονομήσεις και άλλες σημαντικές διορθώσεις – όπως είναι αυτές της αυτοαπορρόφησης.

Η αποτύπωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση δείγματος στο εξαγόμενο φάσμα, πραγματοποιείται ταυτόχρονα με δύο τρόπους – φαινόμενα. Αρχικά, μέσω της μείωσης της επιφάνειας των φωτοκορυφών που αντιστοιχούν στα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια αλλά ταυτόχρονα και μέσω της αύξησης της επιφάνειας της φωτοκορυφής, η οποία αντιστοιχεί στην αθροισμένη ενέργεια, ή μέσω της αύξησης των κρούσεων που ανήκουν στο συνεχές υπόστρωμα. Στη βιβλιογραφία, το παραπάνω φαινόμενο της μείωσης της επιφάνειας φωτοκορυφής, σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή της, καλείται “summing out”, ενώ η αντίστοιχη αύξηση της αθροιζόμενης φωτοκορυφής “summing in”.

Στη συνέχεια της παραγράφου παρατίθενται επιγραμματικά, χάριν πληρότητας, οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ένταση εμφάνισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να διαχωριστούν σε παράγοντες οι οποίοι εξαρτώνται από τη ραδιενεργό πηγή (προς μέτρηση δείγμα) και παράγοντες οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι αυτής. Σε ό,τι αφορά στην πρώτη κατηγορία αναφέρονται οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Διάγραμμα διάσπασης του εξεταζόμενου ισοτόπου. Ισότοπα με πολύπλοκα διαγράμματα διάσπασης προκαλούν την έντονη παρουσία του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης καθώς παρέχουν περισσότερες δυνατότητες εκπομπής διαδοχικών φωτονίων (Gehrke et al., 1977).
- Ο χρόνος ημιζωής των ενδιάμεσων σταθμών ενέργειας του πυρήνα του εξεταζόμενου ισοτόπου.
- Τα ποσοστά εκπομπής των φωτονίων που προκύπτουν κατά τη διάσπαση του πυρήνα.
- Το είδος της διάσπασης του πυρήνα. Προκειμένου ο συγκεκριμένος παράγοντας να γίνει κατανοητός αναφέρεται ότι λόγω των εσωτερικών διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε ένα ισότοπο κατά τη διάσπαση του πυρήνα του, είναι δυνατή η εκπομπή ακτίνων $-X$ οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν «ταυτόχρονα» με τα εν συνεχεία διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια από τον πυρήνα του ατόμου συμβάλλοντας στην αύξηση της έντασης

του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Επιπλέον, όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 4 της παρούσας Δ.Ε., κατά τη β-διάσπαση πυρήνων είναι επίσης δυνατή η παραγωγή ακτίνων X κατά την επιβράδυνση των β-σωματιδίων στον περιβάλλοντα την ανιχνευτική διάταξη χώρο, ακτινοβολία πεδήσεως (bremsstrahlung), η οποία επίσης προκαλεί αύξηση της έντασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Σημειώνεται επιπλέον, η περίπτωση ταυτόχρονης ανίχνευσης σωματιδίων-β και φωτονίων, η οποία καταγράφεται στη βιβλιογραφία σαν μια επιπλέον περίπτωση πραγματικής σύμπτωσης (Debertin and Helmer, 1988).

Σε ό,τι αφορά στη δεύτερη κατηγορία παραγόντων αναφέρονται οι ακόλουθοι:

- Χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης.
 - Απόδοση ανιχνευτικής διάταξης
 - Παράθυρο ανιχνευτή.
- Γεωμετρία πηγής (σημειακή πηγή, επιφανειακή πηγή, πηγή όγκου).
- Στερεά γωνία πηγής – ανιχνευτή (Semkow et al., 1990). Ειδικά για την περίπτωση αυτή αναφέρεται ότι τόσο πιο έντονη είναι η παρουσία του φαινομένου της πραγματικής άθροισης όσο πιο κοντινή είναι η απόσταση πηγής (δείγματος) ανιχνευτή, όσο, με άλλα λόγια, μεγαλύτερη είναι η εξεταζόμενη στερεά γωνία (McCallum and Coote, 1975).

Η ένταση επομένως εμφάνισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης επηρεάζεται από την παράλληλη λειτουργία δύο μηχανισμών. Αρχικά, της διαδοχικής εκπομπής δύο ή περισσοτέρων φωτονίων συγκεκριμένου ισοτόπου της εξεταζόμενης πηγής και ακολούθως της ταυτόχρονης ανίχνευσής τους από την ανιχνευτική διάταξη. Ο πρώτος από τους δύο μηχανισμούς, ελέγχεται από την πρώτη ομάδα παραμέτρων και ο δεύτερος από τη δεύτερη. Τέλος, αναφέρεται και η περίπτωση ενός επιπλέον παράγοντα ο οποίος όμως καλύπτει και τις δύο παραπάνω κατηγορίες. Ο παράγοντας αυτός αφορά τη γωνία (angular correlation) των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων (Knoll G.F., 1989).

Στο σημείο αυτό πρέπει ιδιαίτερα να τονισθεί ότι η παρουσία και η ένταση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης είναι ανεξάρτητες τόσο από τη ραδιενέργεια της πηγής όσο και από τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης. Τα παραπάνω δύο χαρακτηριστικά το διαφοροποιούν από ένα άλλο παρόμοιο φαινόμενο, αυτό της τυχαίας άθροισης, της σύμπτωσης δηλαδή ακτίνων-γ

εκπεμπόμενων από διαφορετικούς πυρήνες. Η ανάλυση του συγκεκριμένου φαινομένου, ωστόσο, ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας Δ.Ε.

5.2 Διόρθωση λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω είναι εμφανής η ανάγκη εύρεσης κατάλληλης μεθόδου, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της πραγματικής άθροισης. Ο αποδοτικότερος τρόπος για να αντιμετωπισθεί το εξεταζόμενο φαινόμενο κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση συγκεκριμένου δείγματος, είναι η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης μέσω πρότυπης πηγής ακριβώς ίδιας, τόσο σε σύσταση όσο και σε γεωμετρία, με το προς εξέταση δείγμα (εννοείται ότι περιέχει και τα ίδια ισότοπα). Η διαδικασία αυτή δεν εξαλείφει το ίδιο το φαινόμενο αλλά αναιρεί την επίδρασή του στους υπολογισμούς. Η μέθοδος όμως αυτή δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη καθώς απαιτεί την ύπαρξη μεγάλου πλήθους πρότυπων πηγών, διαφορετικής σύστασης και γεωμετρίας, προκειμένου να καλύπτονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις ανάλυσης.

Μια εξίσου αποτελεσματική μέθοδος, είναι η αύξηση της απόστασης πηγής-ανιχνευτή (Semkow et al., 1990). Όπως προηγούμενα είδαμε, η μείωση της στερεάς γωνίας ανιχνευτή – πηγής μειώνει το βαθμό επίδρασης του φαινομένου στη μέτρηση. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ταυτόχρονη μείωση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του χρόνου ανάλυσης δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας (π.χ. περιβαλλοντικά δείγματα).

Στις περιπτώσεις για τις οποίες δεν είναι δυνατή η χρήση κάποιας από τις προαναφερθείσες μεθόδους απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλης διαδικασίας διόρθωσης, η οποία να στηρίζεται στον αναλυτικό υπολογισμό κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης. Με βάση τα όσα παραπάνω αναλυτικά έχουν εκτεθεί, οι συντελεστές αυτοί θα πρέπει να αναφέρονται στο μέγεθος «επιφάνεια φωτοκορυφής» το οποίο και επηρεάζεται άμεσα από την παρουσία του προς εξέταση φαινομένου. Ακολούθως, και για λόγους πληρότητας, αναλύεται η μέθοδος διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, η οποία χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Η μέθοδος, η οποία έχει αναπτυχθεί στα

πλαίσια προηγούμενης Δ.Ε. (Κ.Α. Καρφόπουλος, 2003), στηρίζεται στη χρήση κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης.

Η διαδικασία διόρθωσης οφείλει να ξεκινά από τη διαδικασία βαθμονόμησης της γ-ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται και να καταλήγει στη διαδικασία υπολογισμού της ραδιενέργειας της πηγής – δείγματος εξετάζεται που κάθε φορά. Αυτό συμβαίνει γιατί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δεν εξαρτάται μόνο από τη φωτοκορυφή-ενέργεια φωτονίου που εξετάζεται, αλλά και από τις δυνατότητες σχηματισμού summing out ή summing in effect που έχει, επομένως και από το ισότοπο που εκπέμπει το συγκεκριμένο φωτόνιο (Sima O., 2000).

Αρχικά, εντοπίζονται οι φωτοκορυφές των ισοτόπων της πρότυπης πηγής βαθμονόμησης που συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Η τιμή της απόδοσης (full energy peak efficiency) για κάθε μια από τις αντίστοιχες των φωτοκορυφών αυτών ενέργειες υπολογίζεται από τη σχέση (2.4) ως εξής:

$$eff_i = \frac{Area_i}{time_i \cdot yield_i \cdot activity_i} \quad (5.1)$$

όπου i μια από τις εξεταζόμενες φωτοκορυφές.

Η διόρθωση της τιμής αυτής ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης γίνεται με τη σχέση:

$$eff'_i = \frac{Area'_i}{time_i \cdot yield_i \cdot activity_i} \quad (5.2)$$

με

$$Area'_i = \frac{Area_i}{C_i} \quad \text{κατά συνέπεια} \quad eff'_i = \frac{eff_i}{C_i}$$

Όπου

C_i : ο συντελεστής διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης για την προς εξέταση φωτοκορυφή. Υπολογίζοντας λοιπόν, την απόδοση της γ-ανιχνευτικής διάταξης στις ενέργειες που αντιστοιχούν στα φωτόνια της πρότυπης πηγής βαθμονόμησης προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης της γ-ανιχνευτικής διάταξης, eff'_{fit} (Energy).

Κατά την ανάλυση ενός δείγματος για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας ενός ισότοπου του με χρήση ενός φωτονίου αυτού του ισότοπου, διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- Αν το προς εξέταση φωτόνιο δε συμμετέχει σε καμία περίπτωση summing in ή summing out. Στην περίπτωση αυτή η ζητούμενη ραδιενέργεια θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Activity_j = \frac{Area_j}{time_j \cdot yield_j \cdot eff'_{j\beta}} \quad (5.3)$$

- Αν το προς εξέταση φωτόνιο συμμετέχει σε κάποια περίπτωση summing in ή/και summing out effect. Στην περίπτωση αυτή αν αγνοηθεί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης η τιμή της ζητούμενης ραδιενέργειας προκύπτει από τη σχέση (5.3). Αντίθετα, αν ληφθεί υπόψη η διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης τιμή της ραδιενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$Activity'_j = \frac{Area'_j}{time_j \cdot yield_j \cdot eff'_{j\beta}} \quad (5.4)$$

με

$$Area'_j = \frac{Area}{C_j}$$

Στην ειδική περίπτωση που η φωτοκορυφή j και το ισότοπο που εξετάζονται ταυτίζονται με την φωτοκορυφή i και το αντίστοιχο ισότοπο της πρότυπης πηγής βαθμονόμησης δεν απαιτείται διόρθωση. Μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν οι άμεσα μετρούμενες (χωρίς διόρθωση) τιμές του Area τόσο για την πρότυπη πηγή βαθμονόμησης όσο και για το δείγμα που εξετάζεται.

5.3 Συντελεστές διόρθωσης λόγω πραγματικής σύμπτωσης.

Στην παράγραφο που ακολουθεί, περιγράφονται και αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων

φωτοκορυφών που έχουν αναπτυχθεί καθώς και η μέθοδος που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.

Πολλές μεθοδολογίες έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης (true coincidence factors), οι οποίες θα μπορούσαν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες:

- Θεωρητικές
- Εμπειρικές
- Πειραματικές
- Μέθοδοι με χρήση κωδίκων προσομοίωσης

Σε ό,τι αφορά στις θεωρητικές μεθόδους, μια πρώτη προσέγγιση αποτελεί η γενική μέθοδος που έχει προταθεί από τους Andreev et al. (1972, 1973) και επεξεργαστεί από τους Mc Callum and Coote (1975). Συνίσταται στην εξαγωγή μιας σειράς περιοδικά επαναλαμβανόμενων εξισώσεων που επιτρέπουν τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης για ένα οποιοδήποτε διάγραμμα β-διάσπασης. Επέκταση των παραπάνω μελετών είναι η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί από τους Semkow et al. (1990). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία – στην οποία έχουν βασιστεί και πολλές μεταγενέστερες προσεγγίσεις (D.Novkovic et al., 2007) – αξιοποιεί συστήματα πινάκων για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης. Τα διάφορα διαγράμματα διάσπασης, απεικονίζονται με πίνακες με τρόπο που να επιτρέπεται η έκφραση ακόμα και των πιο πολύπλοκων σχημάτων. Ακολουθώς, οι πίνακες συνδυάζονται σε εξισώσεις που περιγράφουν τους μετρούμενους ρυθμούς διάσπασης περιλαμβάνοντας και όλες τις δυνατές περιπτώσεις αθροιστικών φωτοκορυφών. Μέσω πινάκων ορίζονται επίσης και οι υπόλοιπες παράμετροι, όπως είναι οι ολικές αποδόσεις και οι αποδόσεις αιχμής, ο ρυθμός αποδιέγερσης της πηγής, οι ρυθμοί εκπομπής. Η μέθοδος καταλήγει σε ένα πολύπλοκο σύστημα εξισώσεων, διαφορετικό για κάθε ισότοπο (διάγραμμα διάσπασης). Το πλήθος των εξισώσεων του συστήματος ισούται με το σύνολο όλων των συνδυασμών – διαδρομών, απλών ή σύνθετων, τις οποίες μπορεί να ακολουθήσει η διάσπαση ενός πυρήνα έως την παραγωγή του θυγατρικού του. Φυσικά, οι διαδρομές αυτές καθορίζονται από το ίδιο το διάγραμμα διάσπασης του ισότοπου. Από την επίλυση του συστήματος, προκύπτουν οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης. Η μέθοδος επιτρέπει τον προσδιορισμό διορθώσεων δύο κατηγοριών: οι διορθώσεις 1^{ης} τάξης αφορούν στους συνδυασμούς δύο μόνο διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων ενώ οι πλήρεις διορθώσεις 2^{ης} τάξης περιλαμβάνουν όλες

τις περιπτώσεις δύο ή και περισσότερων διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων. Ορίζεται επίσης η 0^{ης} τάξης διόρθωση, η οποία σημαίνει αυτό ακριβώς που υποδηλώνει και το όνομά της, την έλλειψη δηλαδή οποιασδήποτε διόρθωσης. Η προτεινόμενη θεωρητική μέθοδος παρέχει ένα σημαντικό εργαλείο για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης, προβλέποντας όλα τα δυνατά ενδεχόμενα συμπτώσεων και αθροίσεων από όλες τις πιθανές μεταπτώσεις (cascades). Ως μειονεκτήματα της μεθόδου καταγράφεται το γεγονός ότι απαιτείται η διαμόρφωση και η λύση συστήματος εξισώσεων για κάθε ισότοπο ξεχωριστά.

Σε ό,τι αφορά στις εμπειρικές μεθόδους ενδεικτικά αναφέρεται η προτεινόμενη από τους B.Quintana και Fr.Fernandez (1995). Με βάση τη συγκεκριμένη προσέγγιση, οι φωτοκορυφές οι οποίες εμφανίζονται σε ένα φάσμα χαρακτηρίζονται από δύο μεγέθη:

- την «πραγματική επιφάνεια της φωτοκορυφής» πλήρους ενέργειας (full energy peak area), η οποία ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας E που εναποθέτουν όλη την ενέργειά τους στον κρύσταλλο στη μονάδα του χρόνου, και
- τη «μετρούμενη επιφάνεια της φωτοκορυφής» πλήρους ενέργειας, η οποία ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός κρούσεων που καταγράφονται στη φωτοκορυφή η οποία αντιστοιχεί στην ενέργεια E στη μονάδα του χρόνου.

Στην περίπτωση που όλα τα φαινόμενα άθροισης προκύπτουν από γεγονότα πραγματικής σύμπτωσης, και όχι τυχαίας άθροισης, ο λόγος της «πραγματικής» προς τη «μετρούμενη» επιφάνεια είναι ίσος με το ζητούμενο συντελεστή διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Προκειμένου να γίνει περισσότερο αντιληπτή η συγκεκριμένη μέθοδος, θεωρούμε την εκπομπή του i – φωτονίου κατά τη διάσπαση ενός ισότοπου περιεχόμενου σε δείγμα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο ζητούμενος συντελεστής διόρθωσης δίνεται από τη σχέση:

$$C_i = \frac{T_i}{M_i} \quad (5.5)$$

Επιπλέον, αν το ίδιο δείγμα μετρηθεί σε δύο διαφορετικές γεωμετρίες (M και P) οι «πραγματικές επιφάνειες» που αντιστοιχούν στην εκπομπή του i-φωτονίου σχετίζονται με ένα παράγοντα ο οποίος περιγράφει τη διαφορετική αυταπαρρόφηση

των φωτονίων και την επίδραση της μεταβολής της στερεάς γωνίας μεταξύ των δύο γεωμετριών:

$$C_G(E_i) = \frac{T_i^M}{T_i^P} \quad (5.6)$$

Επομένως, αν η μία γεωμετρία, έστω η P, θεωρηθεί ως γεωμετρία αναφοράς και είναι τέτοια ώστε η «μετρούμενη επιφάνεια» διαδοχικής εκπομπής γ-ακτινοβολίας να είναι ίση με την αντίστοιχη «πραγματική επιφάνεια», ο συντελεστής διόρθωσης για τη γεωμετρία M θα μπορούσε να υπολογιστεί ως εξής:

$$C_i = \frac{M_i^P}{M_i^M} \cdot C_G(E_i) \quad (5.7)$$

Μια γεωμετρία που ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις/συνθήκες είναι η σημειακή πηγή τοποθετημένη σε «μεγάλη» απόσταση d από το παράθυρο του ανιχνευτή. Σε αυτή την περίπτωση, ο όρος C_G μπορεί να εκφραστεί ως (Overwater et al., 1993) :

$$C_G(E, V, m, d) = \frac{\varepsilon_M(E, V, m)}{\varepsilon_P(E, d)} \quad (5.8)$$

όπου

$\varepsilon_M(E, V, m)$: η συνάρτηση απόδοσης φωτοκορυφής για φωτόνια που εκπέμπονται από πηγή όγκου V και μάζας m, ενώ

$\varepsilon_P(E, d)$: η συνάρτηση απόδοσης φωτοκορυφής για φωτόνια που εκπέμπονται από σημειακή πηγή σε απόσταση d από τον ανιχνευτή

Αυτό σημαίνει πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν καμπύλες $C_G(E)$, οι οποίες έχουν προκύψει πειραματικά συναρτήσει των μεγεθών V, d και m, για τον υπολογισμό του συντελεστή C_i . Η προτεινόμενη από τους Quintana και Fernandez εμπειρική μέθοδος εισάγει αυτόματα τις διορθώσεις από όλες τις “αθροίσεις σύμπτωσης”, δηλαδή τις οφειλόμενες σε:

- σύμπτωση φωτονίων (γ-γ)
- σύμπτωση ακτίνων X και γ
- σύμπτωση των παραγόμενων κατά την εξαύλωση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου φωτονίων και των ακτίνων-γ που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση του θυγατρικού πυρήνα.

Οι προτεινόμενες πειραματικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης έχουν σαν κύριο άξονα τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ πηγών που εμφανίζουν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και πηγών οι οποίες δεν το εμφανίζουν. Πολλές διαφορετικές γεωμετρίες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των φαινομένων πραγματικής άθροισης (coincidence summing). Ενδεικτικά αναφέρεται ο υπολογισμός διορθώσεων σε ανιχνευτική διάταξη Ge(Li) από τους K. Debertin και U. Schotzig (1979) και οι υπολογισμοί σε ανιχνευτές HPGe (Lepy, 2007 και Lepy et al., 2006). Κοινός τόπος όλων των πειραματικών μεθόδων είναι ο προσδιορισμός της συνάρτησης ολικής απόδοσης ή του λόγου peak to total, με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζονται οι συντελεστές διόρθωσης.

Ανάμεσα σε θεωρητικές και πειραματικές μεθόδους θα μπορούσε να ταξινομηθεί η προτεινόμενη από τους De Felice et al. μεθοδολογία, που αφορά ανιχνευτές Γερμανίου (HPGe) p και n τύπου. Τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις αυτής της μεθόδου έχουν αναπτυχθεί και συγκριθεί. Βασισμένες στην ίδια θεωρητική έκφραση των συντελεστών διόρθωσης που προτείνουν οι Semkow et al. (1990), οι τρεις εκδοχές διαφέρουν μόνο ως προς τον τρόπο υπολογισμού της ολικής απόδοσης (De Felice et al., 2000 και 2002). Η διαδικασία προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον μιας μονοενεργειακής προτύπου πηγής (single line emitter) και τη συλλογή τουλάχιστον ενός φάσματος για κάθε γεωμετρία και ανιχνευτική διάταξη που μελετάται.

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων πραγματικής άθροισης και τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης έχουν επίσης προταθεί μέθοδοι που κάνουν χρήση κωδικών Monte Carlo. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μεθόδου αναπτύχθηκε από τους O.Sima και D.Arnold (1996) σε συνέχεια προηγούμενων μελετών τους (Sima, 1990 και 1995). Οι βασισμένες στην τεχνική Monte Carlo, ρουτίνες που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού τόσο των συντελεστών διόρθωσης λόγω αυτοαπορρόφησης όσο και αυτών λόγω πραγματικής σύμπτωσης ακόμα και για την περίπτωση πολύπλοκων διαγραμμάτων διάσπασης. Στην εργασία των Decombaz et al. (1992) ο Monte Carlo κώδικας GEANT, που έχει αναπτυχθεί στο CERN, χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση των επιδράσεων coincidence summing σε πηγές όγκου ενώ στην εργασία των Wang et al. (2002) οι συντελεστές διόρθωσης για την περίπτωση σημειακής πηγής υπολογίστηκαν με χρήση του κώδικα MCNP.

Στην παρούσα Δ.Ε., ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης γίνεται μέσω του προγράμματος TrueCoinc. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε γιατί παρέχει

γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα, χωρίς να επιβαρύνει ιδιαίτερα το χρήστη. Έχοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης ενημερωμένων βάσεων δεδομένων, εντοπίζει μόνο του τις τιμές των διαφόρων μεγεθών που χρειάζεται, γεγονός που κάνει τη διαδικασία της διόρθωσης εξαιρετικά εύκολη για το χρήστη. Επιπλέον διατίθεται δωρεάν από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (Δ.Ο.Α.Ε.), παράγοντας που σε συνδυασμό με όλους τους παραπάνω, καθιστούν το συγκεκριμένο πρόγραμμα ένα ελκυστικότατο εργαλείο για τον υπολογισμό συντελεστών διόρθωσης.

5.4 Το πρόγραμμα TrueCoinc εκτίμησης του συντελεστή διόρθωσης.

Ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν έγινε με χρήση του προγράμματος TrueCoinc (σύντμηση του όρου True Coincidence) που έχει αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής του πανεπιστημίου Kossuth της Ουγγαρίας (S.Sudar, 2000). Πρόκειται για ένα πρόγραμμα ιδιαίτερος φιλικό προς το χρήστη το οποίο έχει αξιοποιηθεί σε πλήθος εργασιών (El-Gharbawy et al., 2005). Εκτενέστερη ανάλυση για το πρόγραμμα TrueCoinc, το οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια, μπορεί να αναζητηθεί σε παλιότερη Δ.Ε. (Κ.Α.Καρφόπουλος, 2003).

Στόχος του συγκεκριμένου προγράμματος, είναι ο υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ευκόλως προμηθεύσιμες εμπορικές βάσεις δεδομένων, όπως η ευρέως διαδεδομένη ENSDF. Σε αυτές, περιέχονται όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες σχετικά με τα διαγράμματα διάσπασης των ισοτόπων, γεγονός που διευκολύνει το χρήστη καθώς δεν απαιτείται η βιβλιογραφική αναζήτηση των πολλών δεδομένων που το πρόγραμμα χρησιμοποιεί. Το μόνο που ο χρήστης οφείλει να εισάγει εξωτερικά στο πρόγραμμα, είναι η περιγραφή της εξεταζόμενης ανιχνευτικής διάταξης.

Η περιγραφή της ανιχνευτικής διάταξης πραγματοποιείται με την βοήθεια δύο μεγεθών, της απόδοσης αιχμής της ανιχνευτικής διάταξης (full energy peak efficiency) και της ολικής απόδοσής της (total efficiency). Η εισαγωγή των μεγεθών αυτών γίνεται υπό τη μορφή συναρτήσεων της ενέργειας, γεγονός που προϋποθέτει την ύπαρξη βαθμονόμησης απόδοσης αιχμής και ολικής απόδοσης για συγκεκριμένη

γεωμετρία μέτρησης (διαδικασίες οι οποίες περιγράφηκαν στα κεφάλαια 3 και 4 της Δ.Ε.). Ειδικά στην περίπτωση της ολικής απόδοσης, το πρόγραμμα δίνει την επιπλέον δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει αντί της συνάρτησης του συγκεκριμένου μεγέθους με την ενέργεια, την συνάρτηση ως προς την ενέργεια του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής (total-to-peak ratio), καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ευκολότερος ο υπολογισμός του συγκεκριμένου λόγου.

Η εισαγωγή της ολικής απόδοσης πραγματοποιείται με χρήση της επιλογής efficiency από το menu επιλογών που το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει. Οι μορφές υπό τις οποίες η συνάρτηση της ολικής απόδοσης μπορεί να εισαχθεί είναι οι ακόλουθες:

- *Relative to peak efficiency.* Πρόκειται για τη σχέση που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. Στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση της απόδοσης αιχμής με την ενέργεια, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή. Ο ορισμός της γίνεται με την βοήθεια των παραμέτρων a_0, a_1, a_2 της ακόλουθης σχέσης:

$$\frac{Eff_{total}}{Eff_{peak}} = e^{a_0 + a_1 \ln(E) + a_2 (\ln(E))^2} \quad (5.9)$$

- *Power functions.* Με επιλογή αυτής της δυνατότητας απαιτείται απλά η εισαγωγή των παραμέτρων a, b, c, d, e, f, g και h της ακόλουθης σχέσης:

$$Eff_{total} = a \cdot E^b + c \cdot E^d + e \cdot E^f + g \cdot e^{h \cdot E} \quad (5.10)$$

- *Negative Power Series.* Επιλέγοντας την ακόλουθη μορφή σχέσης:

$$Eff_{total} = a \cdot E^{-1} + b \cdot E^{-2} + c \cdot E^{-3} + d \cdot E^{-4} + e \cdot E^{-5} + f \cdot E^{-6} + g \cdot E^{-7} \quad (5.11)$$

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

- *Log(E) Transformed Power Series.* Με επιλογή αυτής της δυνατότητας απαιτείται η εισαγωγή των παραμέτρων a, b, c, d, e, f και g προκειμένου να ορισθεί πλήρως η ακόλουθη σχέση:

$$Eff_{total} = \frac{1}{E} (a + b \cdot \ln(E)^{-1} + c \cdot \ln(E)^{-2} + d \cdot \ln(E)^{-3} + e \cdot \ln(E)^{-4} + f \cdot \ln(E)^{-5} + g \cdot \ln(E)^{-6}) \quad (5.12)$$

Όμοια, με την επιλογή του παραθύρου peak efficiency της επιλογής efficiency του menu επιλογών μπορεί να εισαχθεί και η απόδοση αιχμής με μια από τις ακόλουθες μορφές:

- *Power functions.* Με επιλογή αυτής της δυνατότητας απαιτείται απλά η εισαγωγή των παραμέτρων a, b, c, d, e, f, g και h της ακόλουθης σχέσης:

$$Eff_{peak} = a \cdot E^b + c \cdot E^d + e \cdot E^f + g \cdot e^{h \cdot E} \quad (5.13)$$

- *Exponential log(E) Power Series.* Με επιλογή αυτής της δυνατότητας απαιτείται απλά η εισαγωγή των παραμέτρων a_0, a_1, a_2 και a_3 της ακόλουθης σχέσης:

$$Eff_{peak} = e^{a_0 + a_1 \ln(E) + a_2 (\ln(E))^2 + a_3 (\ln(E))^3} \quad (5.14)$$

- *Negative Power Series.* Επιλέγοντας την ακόλουθη μορφή σχέσης:

$$Eff_{peak} = a \cdot E^{-1} + b \cdot E^{-2} + c \cdot E^{-3} + d \cdot E^{-4} + e \cdot E^{-5} + f \cdot E^{-6} + g \cdot E^{-7} \quad (5.15)$$

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

- *Log(E) Transformed Power Series.* Με επιλογή αυτής της δυνατότητας απαιτείται η εισαγωγή των παραμέτρων a, b, c, d, e, f και g προκειμένου να οριστεί πλήρως η ακόλουθη σχέση:

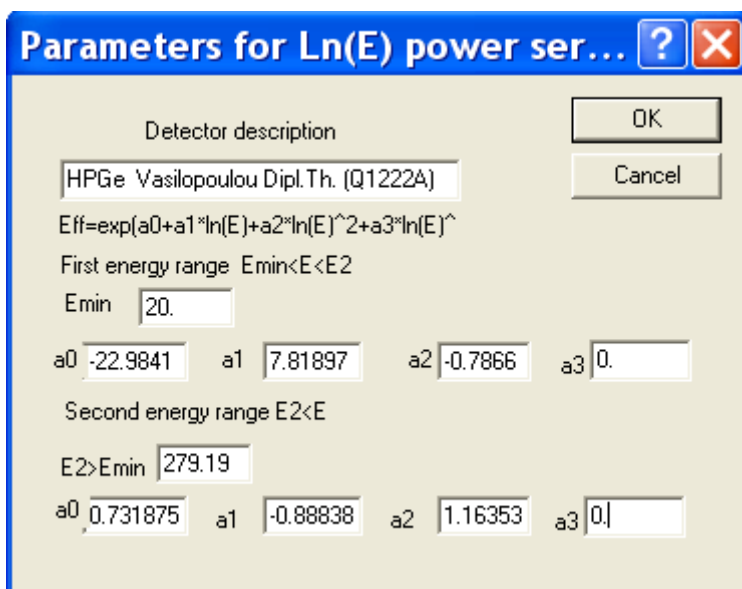
$$Eff_{peak} = \frac{1}{E} \left(a + b \cdot \ln(E)^{-1} + c \cdot \ln(E)^{-2} + d \cdot \ln(E)^{-3} + e \cdot \ln(E)^{-4} + f \cdot \ln(E)^{-5} + g \cdot \ln(E)^{-6} \right) \quad (5.16)$$

Σε κάθε περίπτωση, παρέχεται η δυνατότητα ορισμού ελάχιστης ενέργειας και ενδιάμεσης ενέργειας, σε περίπτωση πιθανής διάκρισης δύο ενεργειακών περιοχών.

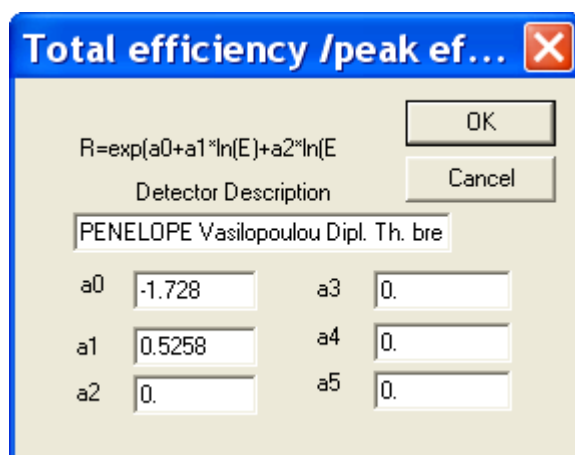
Στη παρούσα Δ.Ε., για την εισαγωγή της συνάρτησης της ολικής απόδοσης στο πρόγραμμα TrueCoinc επιλέχθηκε η μορφή που περιγράφεται στη σχέση 5.9, η οποία περιέχει όρους που σχετίζονται με το λόγο total-to-peak, μέγεθος το οποίο εύκολα μπορεί να υπολογιστεί, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 2.3.1. Για την εισαγωγή της συνάρτησης της απόδοσης αιχμής χρησιμοποιήθηκε η μορφή που

περιγράφεται στη σχέση 5.14. Η επιλογή αυτή υπαγορεύτηκε από το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μορφή ταυτίζεται με τη μορφή της καμπύλης βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης γ-ανιχνευτικής διάταξης στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στα ακόλουθα δύο σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος εισαγωγής των παραπάνω συναρτήσεων. Οι τιμές που στα δύο σχήματα έχουν δοθεί αφορούν τον ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η εισαγωγή στο πρόγραμμα της βαθμονόμησης απόδοσης αιχμής του ανιχνευτή HPGe ενώ στο σχήμα 5.2 η αντίστοιχη της ολικής απόδοσης.



Σχήμα 5.1 Ορισμός της συνάρτησης απόδοσης αιχμής για τον ανιχνευτή HPGe



Σχήμα 5.2 Ορισμός της συνάρτησης ολικής απόδοσης για τον ανιχνευτή HPGe

Σημειώνεται πως στον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc λαμβάνεται υπ' όψιν και η εκπομπή ακτίνων-X. Ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης για τις περιπτώσεις όπου υπάρχει «άθροιση», K_{tcl} , ή «απώλεια», K_{tog} , λόγω του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης γίνεται με βάση τις σχέσεις:

$$\kappa_{tcl} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} \beta_i S_i \prod_{j=1}^{n_i} \left[(1 - \varepsilon_{ij}) \Gamma_{ij} + \sum_k \Gamma_{ijk} (1 - \omega_k + \sum_l \delta_{kl} (1 - \varepsilon_l)) \right]}{\sum_{i=1}^{n_0} \beta_i \prod_{j=1}^{n_i} \left[\Gamma_{ij} + \sum_k \Gamma_{ijk} (1 - \omega_k + \sum_l \delta_{kl}) \right]}$$

και

$$\kappa_{tcg} = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i} \Gamma_{ij} \varepsilon_p(\gamma_{ij})}{\Gamma_0 \varepsilon_p(\gamma_0)} \right] \quad (5.17)$$

όπου:

n_0 : ο αριθμός των διαδοχικών γραμμών που περιέχουν τη μετάπτωση γ_0

n_i : ο αριθμός των διαδοχικών γ -μεταπτώσεων στην i -οστή αλυσίδα ($i=1,2,\dots,n_0$)

β_i : η πιθανότητα εκπομπής β^- (ή β^+ , ή α , ή διάσπασης με EC) η οποία οδηγεί στην i στάθμη του διαγράμματος διάσπασης,

Γ_{ij} : η πιθανότητα της j μετάπτωσης κατά την i -οστή αλυσίδα.

Γ_{ijk} : η πιθανότητα δημιουργίας με τη j μετάπτωση κενού σε κάποιον από τους φλοιούς του ατόμου (K,L1, L2...) κατά την i -οστή,

ω_k : η πιθανότητα φθορισμού του k φλοιού (K,L1, L2...) του ατόμου,

δ_{kl} : η πιθανότητα εκπομπής της l ακτίνας X από τον k φλοιό (K,L1, L2...) του ατόμου,

ε_l : το γινόμενο της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή και της αυταπορρόφησης για την ενέργεια της l - ακτίνας X, $\lambda = (\varepsilon_l^* \varepsilon_{sa})_l$,

ϵ_{ij} : το γινόμενο της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή και της αυταπορρόφησης για την ενέργεια της j μετάπτωσης κατά την i – οστή αλυσίδα, $\epsilon_{ij} = (\epsilon_i^* \epsilon_{sa})_{ij}$, (με $\epsilon_{ij}=0$ για τη γ_0 μετάπτωση),

S_i : το μέγεθος S_i παίρνει τις τιμές:

- 1 στις περιπτώσεις α ή β διάσπασης
- $[1-2^*(\epsilon_i^* \epsilon_{sa})_{511keV}]$ για την περίπτωση της β^+ διάσπασης και
- $\beta_i S_i = \sum_k \Delta_{ik} (1 - \omega_k + \sum_l \delta_{kl} (1 - \epsilon_l))$ για την περίπτωση της αρπαγής ηλεκτρονίου (Electron Capture EC)

Δ_{ik} : η πιθανότητα διάσπασης με αρπαγή ηλεκτρονίου μέσω της δημιουργίας κενού στον k φλοιό (K,L1, L2...) του ατόμου, κατά τη δημιουργία της i – οστής αλυσίδας.

Η συνολική διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δύο ή περισσότερων φωτονίων ή ακτίνων- γ προκύπτει τελικά από το συνδυασμό των παραπάνω διορθώσεων και βασίζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$C_{tc} = K_{tcg} \times K_{tcg} \quad (5.18)$$

όπου

C_{tc} : ο ολικός συντελεστής διόρθωσης

Η επιλογή της επιθυμητής βάσης δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς δίνεται μέσω της επιλογής Database του menu επιλογών. Σε ό,τι αφορά στις εφαρμογές της παρούσας Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε μέσω της επιλογής “TrueCoinc DataFiles” η βάση δεδομένων ENSDF.

Στα αρχεία εξόδου του προγράμματος TrueCoinc, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στις ακόλουθες στήλες:

- No : Αριθμός της ενεργειακής στάθμης που εξετάζεται.
- E[keV]: Η ενέργεια της εξεταζόμενης στάθμης.

- Rel.Int.: Η πιθανότητα εκπομπής των ακτίνων γ ή X.
- Err[%]: Το σχετικό σφάλμα του ποσοστού εκπομπής των ακτίνων γ ή X.
- TrueCC: Ο ζητούμενος συντελεστής διόρθωσης.
- Eff: Η από το πρόγραμμα υπολογιζόμενη απόδοση αιχμής του ανιχνευτή.
- TotEff: Η από το πρόγραμμα υπολογιζόμενη ολική απόδοση του ανιχνευτή.
- TrueCl: Συντελεστής διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής λόγω των απωλειών κρούσεων εξαιτίας της παρουσίας του φαινομένου. Είναι πάντοτε μικρότερος ή ίσος του 1.
- TrueCg: Συντελεστής διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής λόγω των επιπλέον κρούσεων που εμφανίζονται εξαιτίας της παρουσίας του φαινομένου. Είναι πάντοτε μεγαλύτερος ή ίσος του 1.

Στο τέλος του κεφαλαίου 5 παρουσιάζονται τέτοιοι πίνακες αποτελεσμάτων για την περίπτωση του ισοτόπου ^{134}Cs .

5.5 Εκτίμηση συντελεστών διόρθωσης για το ισότοπο ^{134}Cs .

5.5.1 Πηγή ^{134}Cs .

Η μεθοδολογία διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, που παρουσιάστηκε παραπάνω, ελέγχεται ακολούθως μέσω του προσδιορισμού της συγκέντρωσης του ισοτόπου ^{134}Cs σε δείγμα νερού. Πρόκειται για δείγμα νερού σε γεωμετρία όγκου (γεωμετρία “2”, 282cm^2) το οποίο το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. προμηθεύτηκε στα πλαίσια της συμμετοχής του στην Άσκηση Διαβαθμονόμησης που διοργανώθηκε από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας το 2007 (ALMERA Intercomparison 2007). Με βάση την κωδικοποίηση του ΕΠΤ-ΕΜΠ ο κωδικός του δείγματος είναι WTMS484E. Το δείγμα μετρήθηκε στην ανιχνευτική διάταξη του εργαστηρίου με ανιχνευτή HPGe (κωδικός φάσματος 14/5.184) και τα αποτελέσματα της ανάλυσης

συγκρίθηκαν με την τιμή αναφοράς η οποία χορηγήθηκε από τους διοργανωτές της άσκησης. Η ανάλυση των μετρήσεων έγινε με τον κώδικα SPUNAL του ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Τα αποτελέσματα της μέτρησης με τον ανιχνευτή HPGE παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Στο συγκεκριμένο πίνακα δίνονται οι τιμές της ραδιενέργειας όπως υπολογίστηκαν από πέντε φωτοκορυφές του ^{134}Cs , χωρίς διορθώσεις ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, καθώς και η σταθμισμένη μέση τιμή αυτών. Το σφάλμα το οποίο αναφέρεται στο συγκεκριμένο πίνακα αφορά μόνο στο σφάλμα της επιφάνειας της φωτοκορυφής (σφάλμα Poisson) της υπόψη ενέργειας. Για τον υπολογισμό της τιμής του σταθμισμένου μέσου καθώς και του σφάλματός του ακολουθείται η διαδικασία της βιβλιογραφικής πηγής (Gilmore et al., 1998), η οποία και περιγράφεται στο Παράρτημα Γ.

Πηγή	Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια (Bq/kg) ΕΠΤ-ΕΜΠ			
		Τιμή	Σφάλμα % (1σ)		
Cs-134	563,26	7,18	15,03	Σταθμισμένος μέσος	
	569,32	6,25	14,30		
	604,69	6,87	2,67	Τιμή	Σφάλμα % (1σ)
	795,84	7,07	3,64	6,91	2,17
	801,84	6,75	7,39		

Πίνακας 5.1 Ραδιενέργεια πηγής ^{134}Cs όπως υπολογίστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Int2007)

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει, μελετώντας τον πίνακα 5.1, αφορά στη διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή τους, η οποία υπολογίζεται σε 5.3%, πρόκειται για το λόγο της τυπικής απόκλισης των πέντε τιμών προς τη μέση τιμή τους -και όχι σταθμισμένη μέση τιμή τους-. Παρόλο που δικαιολογείται από τα σφάλματα τα οποία συνοδεύουν τις τιμές των συγκεντρώσεων, στη συνέχεια ελέγχεται το κατά πόσον η εφαρμογή των συντελεστών διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση αυτής της διασποράς. Το δεύτερο σημείο που πρέπει να εξετασθεί είναι το κατά πόσον η κάθε μια από τις τιμές αυτές αλλά και η σταθμισμένη μέση τιμή τους διαφέρει από την τιμή «αναφοράς».

Η τιμή που είχε δοθεί στα πλαίσια της άσκησης διαβαθμονόμησης ως τιμή «αναφοράς» από τους διοργανωτές, φαίνεται στον πίνακα 5.2.

Ραδιενέργεια (Bq/kg) Τιμή αναφοράς	
Τιμή	Σφάλμα % (1σ)
7,65	1,31

Πίνακας 5.2 Ραδιενέργεια πηγής ^{134}Cs (τιμή αναφοράς Intercomparison 2007)

Στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών ραδιενέργειας που υπολογίστηκαν πειραματικά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (τιμές ανά ενέργεια και σταθμισμένος μέσος) και της τιμής «αναφοράς» που δίνεται από τους διοργανωτές. Η σύγκριση και ο σχολιασμός της γίνεται μέσω της εξέτασης της απόκλισης της υπολογιζόμενης συγκέντρωσης από τη συγκέντρωση αναφοράς και μέσω ενός στατιστικού ελέγχου (U-test) για τον οποίο επιλέγεται επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Σημειώνεται ότι στον πίνακα 5.3 καθώς και σε όλους τους αντίστοιχους πίνακες που θα ακολουθήσουν, και οι οποίοι περιέχουν στατιστικούς ελέγχους, τα σφάλματα που συνοδεύουν τις τιμές των ραδιενεργειών είναι τα συνολικά σφάλματα. Δηλαδή, εκτός από το σφάλμα της επιφάνειας της φωτοκορυφής λαμβάνεται υπόψη για κάθε ενέργεια και το σφάλμα λόγω της καμπύλης βαθμονόμησης και το σφάλμα της πηγής βαθμονόμησης, ως δηλαδή κάθε φωτοκορυφή να συμμετείχε ανεξάρτητα στην Άσκηση Διαβαθμονόμησης. Για κάθε φωτοκορυφή το σφάλμα που τη συνοδεύει δίνεται από τη σχέση :

$$\Sigma.\Sigma.^2 = \Sigma.E.^2 + \Sigma.K.B.^2 + \Sigma.Π.B.^2 \quad (5.19)$$

όπου

Σ.Σ. : Το σχετικό (%) συνολικό σφάλμα της ραδιενέργειας όπως προκύπτει από κάθε φωτοκορυφή, σε επίπεδο 1σ.

Σ.Ε. : Το σχετικό (%) σφάλμα της επιφάνειας φωτοκορυφής όπως δίνεται από το πρόγραμμα γ – φασματοσκοπικής ανάλυσης, σε επίπεδο 1σ.

Σ.Κ.Β.: Το σχετικό (%) σφάλμα της καμπύλης βαθμονόμησης, σε επίπεδο 1σ. Ως τέτοιο θεωρείται το RMS (μέση τετραγωνική απόκλιση) της συγκεκριμένης καμπύλης.

Σ.Π.Β.: Το σχετικό (%) σφάλμα της πηγής βαθμονόμησης, όπως δίνεται από τον προμηθευτή της πηγής, σε επίπεδο 1σ. Δεδομένου ότι όλες οι βαθμονομήσεις έγιναν με την ίδια πηγή βαθμονόμησης η τιμή του Σ.Π.Β. είναι ίση με 3.1% για

την περιοχή χαμηλών ενεργειών ($E < 200 \text{keV}$) και 1.6% για την περιοχή υψηλών ενεργειών ($E > 200 \text{keV}$).

Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια (Bq/kg)						Απόκλιση (%)		U-test	
	ΕΠΤ		Σταθμ.μέσος ΕΠΤ		Τιμή αναφοράς		ΕΠΤ-αναφοράς	Σταθμ.μέσου-αναφοράς	ΕΠΤ-αναφοράς	Σταθμ.μέσου-αναφοράς
	Τιμή	σφάλμα % (1σ)	Τιμή	σφάλμα % (1σ)	Τιμή	σφάλμα % (1σ)				
563,26	7,18	15,2	6,91	3,2	7,65	1,31	-6,1	-9,7	0,43	3,02
569,32	6,25	14,5					-18,3		1,54	
604,69	6,87	3,6					-10,2		2,93	
795,84	7,07	4,4					-7,6		1,79	
801,84	6,75	7,8					-11,8		1,69	

Πίνακας 5.3 Σύγκριση τιμών ραδιενέργειας πηγής ^{134}Cs

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, η απόκλιση του σταθμισμένου μέσου από την τιμή αναφοράς είναι ίση με 9.7 % ενώ οι αποκλίσεις των υπολογισμένων στο ΕΠΤ τιμών από την τιμή αναφοράς είναι της τάξης του 6-18 %. Παρατηρώντας τις τιμές της μεταβλητής U του στατιστικού ελέγχου, διαπιστώνεται ότι ορισμένες από τις τιμές του ΕΠΤ-ΕΜΠ, παρά τις αποκλίσεις, δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από την τιμή αναφοράς και αιτία γι' αυτό είναι η μεγάλη τιμή της αβεβαιότητας (τυχαίο σφάλμα της μέτρησης) που συνοδεύει τις υπολογισμένες ραδιενέργειες. Αντίθετα, ο στατιστικός έλεγχος δείχνει ότι ο σταθμισμένος μέσος διαφέρει σημαντικά από την τιμή αναφοράς, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη διόρθωσης της τιμής της ραδιενέργειας όπως αυτή υπολογίστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

5.5.2 Διαδικασία διόρθωσης ραδιενέργειας ^{134}Cs .

Ακολούθως περιγράφεται, σε βήματα, η διαδικασία διόρθωσης των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν με τις διαφορετικές φωτοκορυφές του ^{134}Cs . Τα βήματα αυτά αναφέρονται επιγραμματικά:

- Πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.
- Προσδιορισμός της καμπύλης ολικής απόδοσης του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

- Διόρθωση της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής, η οποία υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα, ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.
- Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης σχηματιζόμενων φωτοκορυφών για την περίπτωση του ^{134}Cs ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.
- Τελική διόρθωση της υπολογιζόμενης ραδιενέργειας του ^{134}Cs .

Τα παραπάνω βήματα περιγράφονται αναλυτικά στις ακόλουθες παραγράφους

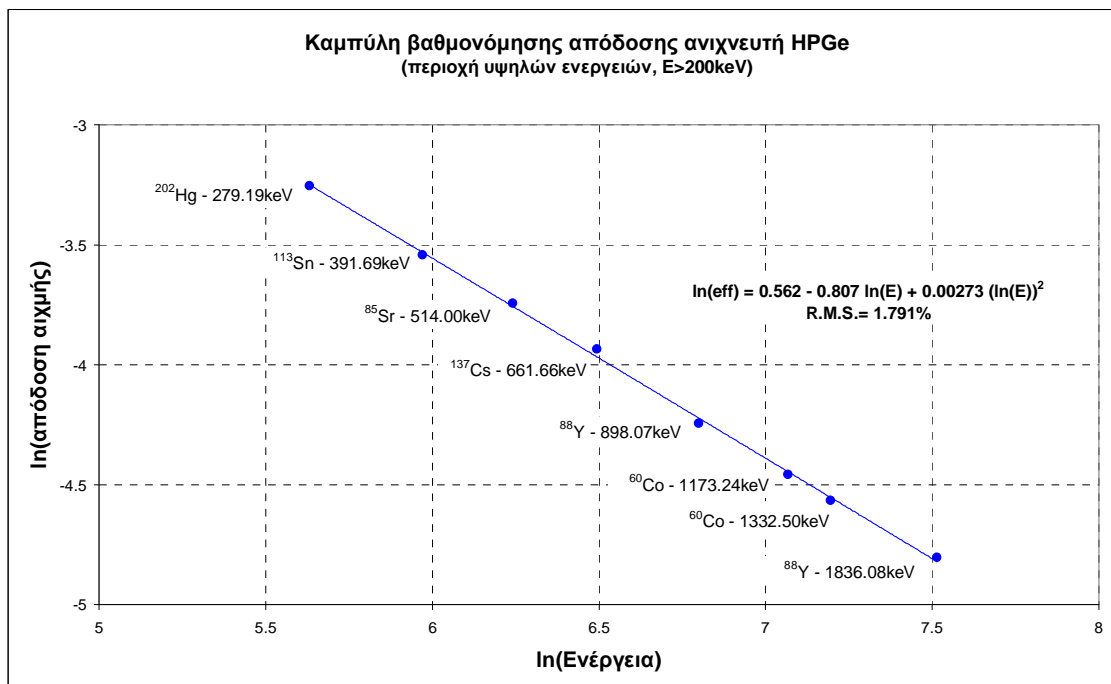
5.5.2.1 Πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Όπως ήδη εξηγήθηκε, στη διαδικασία της διόρθωσης (παράγραφος 5.2) απαραίτητη αρχικά, είναι η γνώση της εξίσωσης της καμπύλης της απόδοσης αιχμής η οποία, μαζί με την εξίσωση της καμπύλης ολικής απόδοσης (η διαδικασία υπολογισμού της οποίας περιγράφεται σε επόμενο βήμα), εισάγεται με συγκεκριμένη μορφή στο πρόγραμμα TrueCoinc προκειμένου να ληφθούν οι συντελεστές διόρθωσης.

Η καμπύλη βαθμονόμησης, θεωρήθηκε ήδη γνωστή από τη διαδικασία βαθμονόμησης που ακολουθείται και η οποία ελέγχεται περιοδικά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η καμπύλη βαθμονόμησης για δείγματα γεωμετρίας “2”, όπως αυτό το οποίο εξετάζεται, για την περιοχή των υψηλών ενεργειών ($E > 200\text{keV}$) περιγράφεται από τη συνάρτηση:

$$\ln(\text{eff}) = 0.562 - 0.807 \ln(E) + 0.00273 [\ln(E)]^2 \quad (5.20)$$

και έχει R.M.S.: 1.791 %. Γίνεται αναφορά μόνο στην περιοχή υψηλών ενεργειών, διότι οι φωτοκορυφές του ^{134}Cs , στις οποίες αφορούν οι διορθώσεις που θα πραγματοποιηθούν, «ανήκουν» σ’ αυτή την ενεργειακή περιοχή. Το αντίστοιχο αρχείο στο οποίο περιγράφεται η εν λόγω καμπύλη βαθμονόμησης παρατίθεται στο παράρτημα Δ της παρούσας εργασίας (πίνακας Δ.1). Εκεί δίνονται όλες οι πειραματικές τιμές αποδόσεων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της καμπύλης 5.20, ενώ η γραφική απεικόνιση της παραπάνω καμπύλης δίνεται στο σχήμα 5.3



Σχήμα 5.3 Η καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή HPGe για την περιοχή υψηλών ενεργειών ($E > 200\text{keV}$).

5.5.2.2 Προσδιορισμός της καμπύλης ολικής απόδοσης του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Ήδη από την παράγραφο 5.4 στην οποία περιγράφεται η χρήση του προγράμματος TrueCoinc, προκειμένου για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης της επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών, έχει φανεί η ανάγκη προσδιορισμού της καμπύλης της ολικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται. Καθώς ο τρόπος εισαγωγής της στο πρόγραμμα TrueCoinc γίνεται μέσω του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση φωτοκορυφής (ttp) στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού του συγκεκριμένου λόγου.

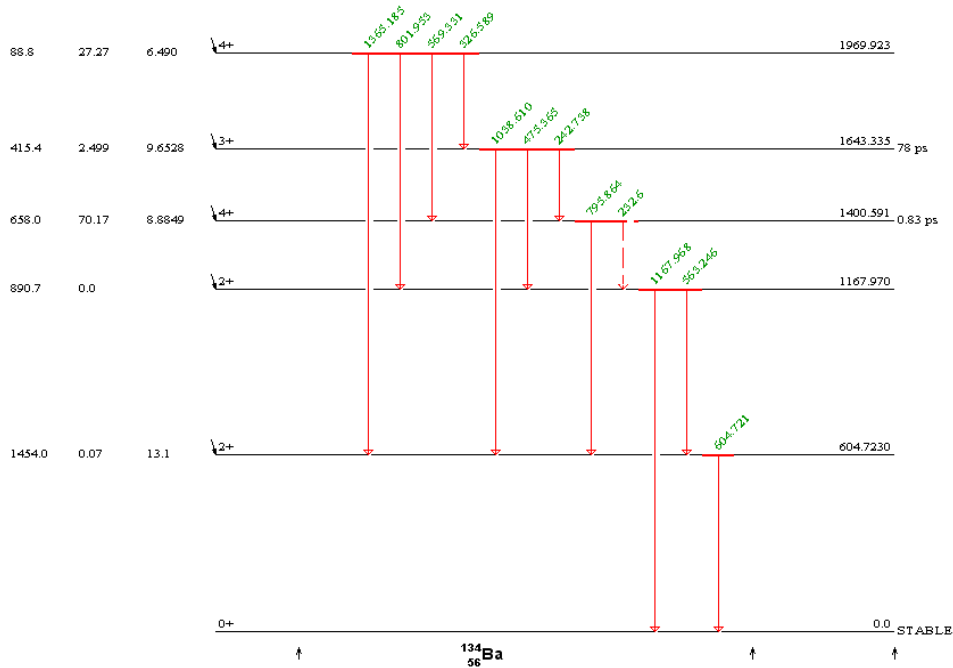
Η ακριβής μορφή της καμπύλης $ttp=f(E)$, η οποία περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4 του παρόντος κεφαλαίου (σχέση 5.9), περιέχει τους όρους $\ln(ttp)$ και $\ln(E)$. Πρώτο βήμα, επομένως, στην κατασκευή της είναι ο υπολογισμός των λόγων total to peak (ή peak to total ισοδύναμα) για μια σειρά ενεργειών, με τη βοήθεια των οποίων θα υπολογιστούν οι τιμές $\ln(ttp)$ συναρτήσει του $\ln(E)$.

Από τη μέχρι τώρα διαδικασία, διατίθενται ήδη δύο τιμές του λόγου peak to total, μία υπολογισμένη μέσω πειράματος και μία μέσω προσομοίωσης, οι οποίες όμως αφορούν στην ίδια ενέργεια, 1460.822 keV της πηγής ^{40}K γεωμετρίας “2”. Προκειμένου να αυξηθεί το πλήθος των διαθέσιμων σημείων, υπολογίζεται ο λόγος peak to total για τις πέντε ενέργειες του ^{134}Cs . Για το συγκεκριμένο ισότοπο πραγματοποιούνται μόνο προσομοιώσεις, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη πηγή ^{134}Cs , γεωμετρίας όγκου, στο εργαστήριο για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. Οι φωτοκορυφές-ενέργειες που μελετήθηκαν μέσω προσομοίωσης φαίνονται στον πίνακα 5.4.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)
Cs-134	563,26
Cs-134	569,32
Cs-134	604,69
Cs-134	795,84
Cs-134	801,84

Πίνακας 5.4 Φωτόνια της πηγής ^{134}Cs τα οποία εξετάστηκαν

Ορίζοντας πηγή όγκου γεωμετρίας “2” (δοχείο όγκου 282 cm³), ο κώδικας PENELOPE «τρέχει» για τις πέντε ενέργειες του ^{134}Cs , με τις ίδιες φυσικά παραμέτρους σε ό,τι αφορά στην ανιχνευτική διάταξη (χρησιμοποιείται και εδώ η τελική γεωμετρία “H” που περιγράφηκε στο 3^ο κεφάλαιο, πίνακας 3.28). Αν και αναδείχθηκε καθαρά η σημασία της επίδρασής της, η ακτινοβολία πέδησης δεν ήταν δυνατόν να συνυπολογιστεί στην περίπτωση του ^{134}Cs , καθώς πρόκειται για ένα ισότοπο με πολλές φωτοκορυφές και εξαιρετικά πολύπλοκο διάγραμμα διάσπασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα διάσπασης ^{134}Cs (πηγή: πρόγραμμα Isotope Explorer)

Από τα αρχεία εξόδου των προσομοιώσεων υπολογίζονται, ακολουθώντας τη διαδικασία της παραγράφου 2.4.4, οι τιμές της απόδοσης αιχμής, της ολικής απόδοσης, του λόγου peak to total, καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα, σύμφωνα πάντα με τις σχέσεις που περιγράφονται στο 2^ο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5. Η ένδειξη “XB” υποδηλώνει πως στους υπολογισμούς δεν έχει συμπεριληφθεί το φαινόμενο της ακτινοβολίας πείδησης (Bremsstrahlung).

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Προσομοίωση - Γεωμετρία H (XB)*					
		Απόδοση Αιχμής		Ολική Απόδοση		Απόδοση Αιχμής προς Ολική Απόδοση	
		Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)
Cs-134	563,26	1,189E-02	0,380	4,971E-02	0,190	0,239	0,425
	569,32	1,175E-02	0,312	4,956E-02	0,156	0,237	0,349
	604,69	1,118E-02	0,524	4,903E-02	0,262	0,228	0,586
	795,84	9,224E-03	0,365	4,677E-02	0,183	0,197	0,408
	801,84	9,144E-03	0,359	4,659E-02	0,180	0,196	0,401

* Στους υπολογισμούς δεν έχει συμπεριληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πείδησης

Πίνακας 5.5 Τιμές αποδόσεων και λόγου peak to total με χρήση προσομοίωσης

Όλες οι τιμές του λόγου peak to total (ptt) που έχουν υπολογιστεί, είτε μέσω πειράματος είτε μέσω προσομοίωσης, για πηγές όγκου γεωμετρίας “2” παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6, όπου σημειώνονται και τα αντίστοιχα σφάλματα. Οι τιμές που αφορούν στο ^{40}K είναι αυτές που προσδιορίστηκαν στο κεφάλαιο 4.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση Αιχμής προς Ολική Απόδοση		
		Τιμή	Σφάλμα % (1σ)	
Cs-134	563,26	0,239	0,425	Προσομοίωση Γεωμετρία Η (XB)*
Cs-134	569,32	0,237	0,349	
Cs-134	604,69	0,228	0,586	
Cs-134	795,84	0,197	0,408	
Cs-134	801,84	0,196	0,401	
K-40	1460,822	0,145	0,383	
K-40	1460,822	0,108	2,610	Πείραμα

* Στους υπολογισμούς δεν έχει συμπεριληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

Πίνακας 5.6 Λόγοι peak to total για μια σειρά ισοτόπων-ενεργειών

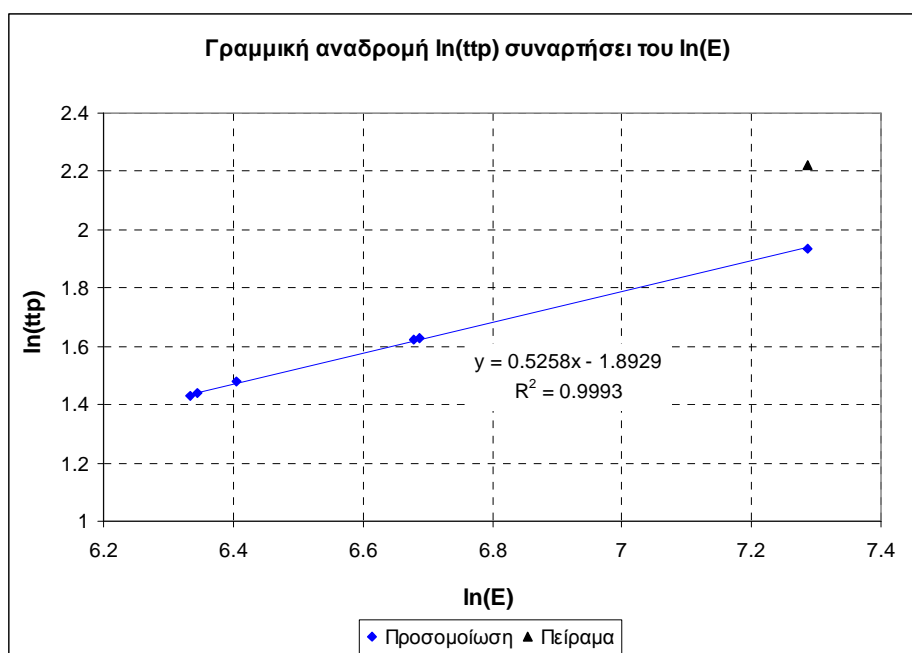
Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του αντίστροφου λόγου total to peak (tpr) και των μεγεθών $\ln(E)$ και $\ln(tpr)$. Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι τιμές των παραπάνω μεγεθών και τα αντίστοιχα σφάλματα για κάθε ενέργεια-ισότοπο. Σημειώνεται ότι τα σφάλματα, τα οποία και στην περίπτωση αυτή είναι τα σχετικά % σφάλματα, έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τις σχέσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	$\ln(E)$	Total to peak ratio		$\ln(tpr)$		
			Τιμή	Σφάλμα % (1σ)	Τιμή	Σφάλμα % (1σ)	
Cs-134	563,26	6,334	4,181	0,425	1,431	0,297	Προσομοίωση Γεωμ. Η (XB) *
Cs-134	569,32	6,344	4,219	0,349	1,440	0,242	
Cs-134	604,69	6,405	4,385	0,586	1,478	0,396	
Cs-134	795,84	6,679	5,071	0,408	1,623	0,251	
Cs-134	801,84	6,687	5,095	0,401	1,628	0,246	
K-40	1460,822	7,287	6,919	0,383	1,934	0,198	
K-40	1460,822	7,287	9,227	2,610	2,222	1,175	Πείραμα

* Στους υπολογισμούς δεν έχει συμπεριληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

Πίνακας 5.7 Τιμές μεγεθών tpr, $\ln(E)$, $\ln(tpr)$ για μια σειρά ισοτόπων-ενεργειών

Με βάση τις τιμές της 3^{ης} και 6^{ης} στήλης του πίνακα 5.7 (μεγέθη $\ln(E)$ και $\ln(ttp)$ αντίστοιχα), κατασκευάζεται η καμπύλη $\ln(ttp)=f(\ln(E))$.



Σχήμα 5.5 Γραμμική αναδρομή του μεγέθους $\ln(ttp)$ συναρτήσει του $\ln(E)$

Εκτός από τα σημεία που έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Monte Carlo (μπλε ρόμβοι), έχει τοποθετηθεί, για λόγους σύγκρισης, και το σημείο που αντιστοιχεί στους πειραματικούς υπολογισμούς (μαύρο τρίγωνο). Το σημείο αυτό δεν χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της συνάρτησης. Η τιμή R πολύ κοντά στο 1 υποδηλώνει ότι όλα τα σημεία της προσομοίωσης κείνται επί της ευθείας αναδρομής. Η συνάρτηση

$$\ln(ttp) = 0.5258 \cdot \ln(E) - 1.8929 \quad (5.21)$$

που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ευθεία είναι η ζητούμενη συνάρτηση του λόγου ttp στην μορφή με την οποία εισάγεται στο πρόγραμμα TrueCoinc για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης. Σημειώνεται άλλη μια φορά πως η χρήση της συγκεκριμένης καμπύλης δε λαμβάνει υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως, όπως θα συνέβαινε αν είχε προσδιορισθεί πειραματικά.

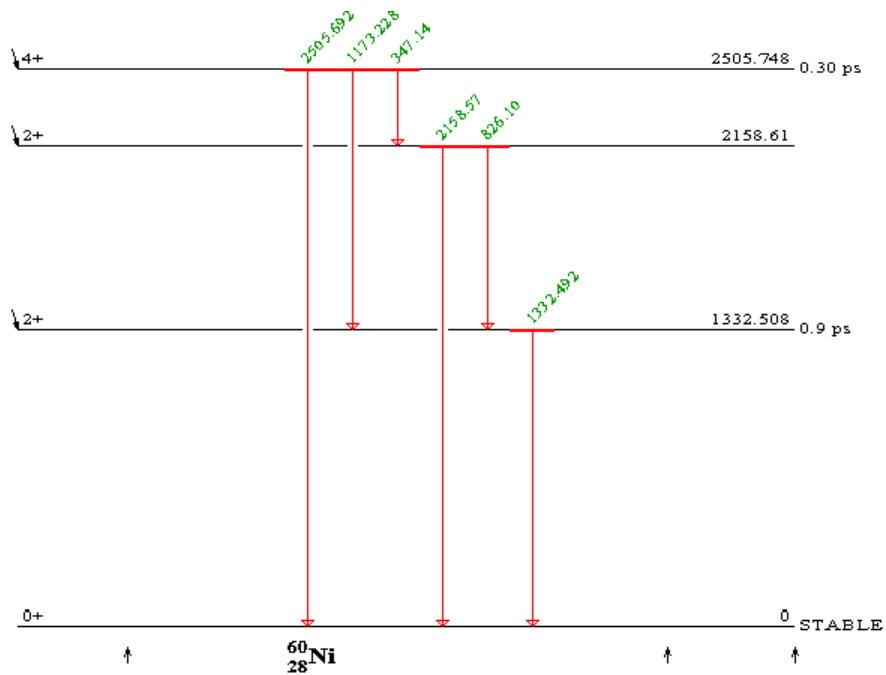
5.5.2.3 Διόρθωση της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency).

Σύμφωνα με τα όσα έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 5.2 και πριν την τελική διόρθωση της ραδιενέργειας του ^{134}Cs , όπως υπολογίζεται από τις πέντε φωτοκορυφές του, απαιτείται η διόρθωση της καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής (βλ. σχέση 5.20). Αυτό συμβαίνει γιατί η συγκεκριμένη καμπύλη έχει προκύψει πειραματικά από πηγή που περιέχει ισότοπα, οι φωτοκορυφές των οποίων συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Επιβάλλεται λοιπόν, να διορθωθεί και η καμπύλη απόδοσης αιχμής πριν την εισαγωγή της στο πρόγραμμα, διαδικασία που απαιτεί τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης για κάθε μία από τις φωτοκορυφές των ισοτόπων που χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Τα ισότοπα και οι αντίστοιχες φωτοκορυφές οι οποίες χρησιμοποιούνται στη διαδικασία βαθμονόμησης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8. Στον πίνακα, για λόγους πληρότητας δίνονται και οι φωτοκορυφές οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση και της περιοχής χαμηλών ($E < 200\text{keV}$) ενεργειών.

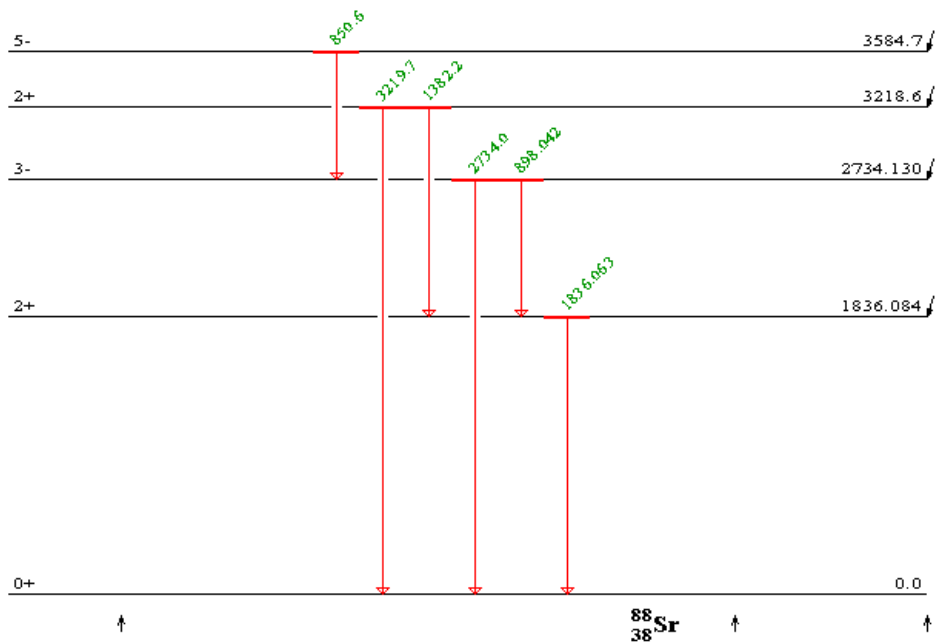
Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)
Cd-109	88,03
Co-57	122,06
Ce-139	165,85
Hg-203	279,19
Sn-113	391,69
Sr-85	514,00
Cs-137	661,66
Y-88	898,07
Co-60	1173,24
Co-60	1332,50
Y-88	1836,08

Πίνακας 5.8 Ισότοπα-φωτοκορυφές που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία βαθμονόμησης του ανιχνευτή

Σημειώνεται ότι οι δύο φωτοκορυφές του ^{60}Co και του ^{88}Y είναι εκείνες οι οποίες, στην περιοχή των υψηλών ενεργειών ($E > 200\text{keV}$), συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα διάσπασης τους στα σχήματα 5.6-5.7. Τα υπόλοιπα ισότοπα, πάντα στην περιοχή των υψηλών ενεργειών, είναι μονοενεργειακά.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα διάσπασης ^{60}Co . Είναι εμφανής η διαδοχική εκπομπή των φωτονίων 1173.228 και 1332.5 keV (πηγή: πρόγραμμα Isotope Explorer)



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα διάσπασης ^{88}Y . Είναι εμφανής η διαδοχική εκπομπή των φωτονίων 898.042 και 1836.063 keV (πηγή: πρόγραμμα Isotope Explorer)

Προκειμένου να γίνει η διόρθωση της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής είναι αναγκαία η χρήση του προγράμματος TrueCoinc. Για τη λειτουργία όμως του προγράμματος TrueCoinc απαιτείται η εισαγωγή της μη διορθωμένης καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (σχέση 5.20) και της καμπύλης ολικής απόδοσης (σχέση 5.21) του ανιχνευτή.

Εισάγοντας στο πρόγραμμα TrueCoinc τους όρους των παραπάνω συναρτήσεων υπολογίζουμε τους συντελεστές C_i για τις ενέργειες-φωτοκορυφές των ισοτόπων που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης. Τα αποτελέσματα για αυτές τις φωτοκορυφές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9. Στο παράρτημα Δ της παρούσας εργασίας (πίνακες Δ.2-Δ.10) παρατίθενται τα αρχεία εξόδου του προγράμματος TrueCoinc που περιέχουν τους συντελεστές για όλες τις φωτοκορυφές των ισοτόπων. Για λόγους πληρότητας στους πίνακες αναφέρονται και διορθώσεις που αφορούν στα φωτόνια της περιοχής χαμηλών ενεργειών, τα οποία όμως δεν επηρεάζουν την ανάλυση των φωτοκορυφών του ^{134}Cs .

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστής C_i
Cd-109	88,03	0,999
Co-57	122,06	1,000
Ce-139	165,85	0,996
Hg-203	279,19	1,000
Sn-113	391,69	0,998
Sr-85	514,00	1,000
Cs-137	661,66	1,000
Y-88	898,07	0,962
Co-60	1173,24	0,959
Co-60	1332,50	0,958
Y-88	1836,08	0,957

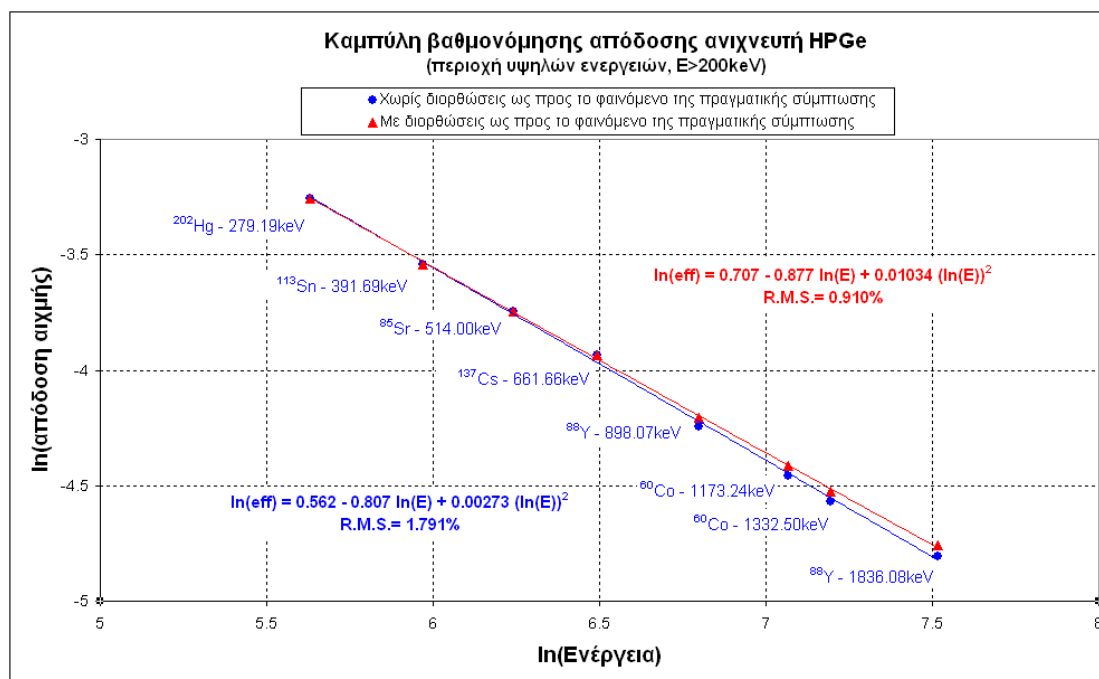
Πίνακας 5.9 Συντελεστές διόρθωσης C_i για τις φωτοκορυφές της βαθμονόμησης

Στη συνέχεια, με βάση τον τύπο $eff'_i = \frac{eff_i}{C_i}$ (βλ. σχέση 5.2) που συνδέει τους συντελεστές C_i με τις αποδόσεις eff_i και eff'_i , υπολογίζουμε τις διορθωμένες τιμές της απόδοσης eff'_i για τις παραπάνω ενέργειες-φωτοκορυφές, με τη βοήθεια των οποίων χαράζουμε τη «νέα», διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης $eff'_{fit}(Energy)$.

Από τη διαδικασία διόρθωσης της καμπύλης βαθμονόμησης, η οποία αποτυπώνεται αριθμητικά στους πίνακες Δ.11-Δ.12 που βρίσκονται στο παράρτημα Δ, προκύπτει:

$$\ln(\text{eff}') = 0.707 - 0.877 \ln(E) + 0.01034 [\ln(E)]^2 \quad (5.22)$$

Η διορθωμένη καμπύλη έχει R.M.S.: 0.910 %. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη τιμή του R.M.S. της μη διορθωμένης καμπύλης (παράγραφος 5.5.2.1) ήταν 1.791%, γεγονός το οποίο υποδηλώνει πως η νέα καμπύλη προσαρμόζεται καλύτερα στα διορθωμένα πειραματικά σημεία. Η παραπάνω σύγκριση των δύο καμπυλών γραφικά πραγματοποιείται στο σχήμα 5.8 στο οποίο απεικονίζονται οι δύο καμπύλες και τα πειραματικά σημεία από τα οποία έχουν προκύψει.



Σχήμα 5.8 : Καμπύλες απόδοσης ανιχνευτή HPGe χωρίς και με διορθώσεις ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Με δεδομένη τη διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής αλλά και την καμπύλη ολικής απόδοσης για τον ανιχνευτή HPGe είναι δυνατός ο υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών για την περίπτωση του ¹³⁴Cs. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

5.5.2.4 Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης για την περίπτωση του ^{134}Cs .

Ακολούθως, και με δεδομένο ότι το υπό μελέτη ισότοπο (^{134}Cs) δεν είναι ένα από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση, προκειμένου για την τελική διόρθωση της υπολογιζόμενης ραδιενέργειάς του, η διαδικασία υπολογισμού συντελεστών διόρθωσης με το πρόγραμμα TrueCoinc, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, επαναλαμβάνεται, αυτή τη φορά για να διορθωθεί το μέγεθος «επιφάνεια» (Area) της κάθε φωτοκορυφής του ^{134}Cs .

Για το σκοπό αυτό εισάγεται η διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής (σχέση 5.22) και η συνάρτηση του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής (σχέση 5.20) στο πρόγραμμα TrueCoinc, απ' όπου προκύπτουν οι ζητούμενοι συντελεστές διόρθωσης C_j (βλ. σχέση 5.4) για τις 5 αιχμές-ενέργειες του ^{134}Cs που ενδιαφέρουν. Οι τιμές των συντελεστών φαίνονται στον πίνακα 5.10 ενώ το αντίστοιχο αρχείο εξόδου του προγράμματος παρατίθεται στον πίνακα Δ.13 του παραρτήματος Δ.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστής C_j
Cs-134	563,26	0,906
Cs-134	569,32	0,906
Cs-134	604,69	0,942
Cs-134	795,84	0,942
Cs-134	801,84	0,912

Πίνακας 5.10 Συντελεστές διόρθωσης C_j για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs

5.5.2.5 Τελική διόρθωση της υπολογιζόμενης ραδιενέργειας του ^{134}Cs .

Έχοντας ήδη υπολογίσει τη διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης και παράλληλα τους συντελεστές διόρθωσης σχηματιζόμενης φωτοκορυφής για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης για κάθε φωτοκορυφή – ενέργεια του ^{134}Cs , είναι δυνατή η τελική διόρθωση της

ραδιενέργειας του συγκεκριμένου ισοτόπου με βάση τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.2.

Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία υπολογισμού της διορθωμένης ραδιενέργειας, η οποία απαιτεί το συνδυασμό δύο διορθώσεων

- ως προς το μέγεθος της απόδοσης και
- ως προς την επιφάνεια της σχηματιζόμενης φωτοκορυφής

μπορεί να εκφραστεί συνοπτικά μέσω της σχέσης:

$$Activity' = Activity \times \frac{C_{eff}}{C_j} \quad (5.23)$$

Όπου

Activity: η μη διορθωμένη τιμή της ραδιενέργειας

Activity': η διορθωμένη τιμή της ραδιενέργειας

C_{eff} : ο συντελεστής που αφορά τη διόρθωση του μεγέθους της απόδοσης, λόγω δηλαδή της αλλαγής της καμπύλης βαθμονόμησης

C_j : ο συντελεστής που αφορά τη διόρθωση της επιφάνειας της εξεταζόμενης φωτοκορυφής.

Οι συντελεστές C_j για κάθε χρησιμοποιούμενη φωτοκορυφή του ^{134}Cs παρατίθενται στον πίνακα 5.10 ενώ οι συντελεστές C_{eff} υπολογίζονται μέσω του λόγου

$$\left(C_{eff} = \frac{eff_i}{eff_i'} \right) \quad (5.24)$$

της μη διορθωμένης απόδοσης φωτοκορυφής (σχέση 5.20) προς τη διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης απόδοσης φωτοκορυφής (σχέση 5.22) για κάθε μία από τις 5 ενέργειες του ^{134}Cs . Οι τιμές του συντελεστή C_{eff} παρατίθενται στον πίνακα 5.11 που ακολουθεί.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστής C_{eff}
Cs-134	563,26	0,9881
Cs-134	569,32	0,9878
Cs-134	604,69	0,9858
Cs-134	795,84	0,9764
Cs-134	801,84	0,9761

Πίνακας 5.11 Συντελεστές διόρθωσης C_{eff} για τις ενέργειες των αιχμών του ^{134}Cs

Γνωρίζοντας τις χωρίς διορθώσεις τιμές της ραδιενέργειας του ^{134}Cs όπως προκύπτει από κάθε φωτοκορυφή του (Πίνακας 5.1) και τις τιμές των συντελεστών C_{eff} και C_j , προσδιορίσθηκε μέσω της σχέσης 5.23 η «νέα» διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης ραδιενέργεια της πηγής ^{134}Cs . Στον πίνακα 5.12 που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι τιμές όλων των συντελεστών καθώς και οι τελικές τιμές της διορθωμένης ραδιενέργειας με τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά αναφέρονται μόνο στην επιφάνεια φωτοκορυφής.

Πηγή	Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια χωρίς διορθώσεις		C_{eff}	C_j	Διορθωμένη ραδιενέργεια	
		Τιμή	Σφάλμα % (1σ)			Τιμή	Σφάλμα % (1σ)
Cs-134	563,26	7,18	15,03	0,9881	0,906	7,83	15,03
	569,32	6,25	14,30	0,9878	0,906	6,81	14,30
	604,69	6,87	2,67	0,9858	0,942	7,19	2,67
	795,84	7,07	3,64	0,9764	0,942	7,33	3,64
	801,84	6,75	7,39	0,9761	0,912	7,22	7,39

Πίνακας 5.12 Εφαρμογή διόρθωσης ραδιενέργειας σε πηγή ^{134}Cs .

(τα σφάλματα του συγκεκριμένου πίνακα αναφέρονται μόνο στο μέγεθος επιφάνεια φωτοκορυφής)

Σημειώνεται, πως το πρόγραμμα TrueCoinc δε παρέχει σφάλματα για τους συντελεστές διόρθωσης και για το λόγο αυτό στους στατιστικούς ελέγχους που παρακάτω θα διενεργηθούν δε λαμβάνονται υπόψη. Ωστόσο μια εκτίμηση των

σφαλμάτων αυτών μπορεί να ληφθεί με βάση πρόγραμμα υπολογισμού συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης το οποίο έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια προηγούμενης Δ.Ε. του ΕΠΤ-ΕΜΠ. (Κ. Καρφόπουλος, 2003). Κατάλληλη τροποποίηση του συγκεκριμένου προγράμματος, για τον ανιχνευτή της παρούσας Δ.Ε. δίνει σχετικά σφάλματα για το συντελεστή διόρθωσης της τάξης του 1%.

Μια άλλη παρατήρηση, η οποία οφείλει να γίνει στο σημείο αυτό, είναι πως για τον υπολογισμό της διορθωμένης ραδιενέργειας (πίνακας 5.12) δεν έχει ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως. Για το λόγο αυτό στην επόμενη παράγραφο δίνεται μια εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη. Ακολούθως γίνεται συνολική αποτίμηση – αξιολόγηση διορθώσεων που επιτεύχθηκαν χωρίς να ληφθεί ή λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο αυτό.

5.5.3 Διαδικασία διόρθωσης ραδιενέργειας ^{134}Cs λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως.

Η διαδικασία διόρθωσης και στην περίπτωση αυτή στηρίζεται στη μεθοδολογία της παραγράφου 5.2 και ακολουθεί τα βήματα τα οποία περιγράφονται στην παράγραφο 5.5.2

5.5.3.1 Πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Το βήμα αυτό της διαδικασίας διόρθωσης παραμένει ίδιο με αυτό της περίπτωσης για την οποία το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως δε λαμβάνεται υπόψη. Με άλλα λόγια η διαδικασία ξεκινάει με την ίδια εξίσωση για την καμπύλη απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης (σχέση 5.20).

5.5.3.2 Προσδιορισμός της καμπύλης ολικής απόδοσης του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. (λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία πεδήςσεως).

Στο βήμα αυτό εντοπίζεται η διαφοροποίηση σε σχέση με όσα παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.5.2.

Και στην περίπτωση αυτή ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση φωτοκορυφής για την ανιχνευτική διάταξη (ttp) συναρτήσει της ενέργειας των εξεταζόμενων φωτονίων. Χρειαζόμαστε την καμπύλη γραμμικής αναδρομής του μεγέθους $\ln(ttp_{sum})$ συναρτήσει του $\ln(E)$, όπου ttp_{sum} είναι ο λόγος της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής (total to peak) όπως υπολογίζεται από το «αθροισμένο» φάσμα (φωτονίων και ηλεκτρονίων) σύμφωνα με τη διαδικασία υπέρθεσης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η τιμή του λόγου ttp_{sum} που αντιστοιχεί στην πηγή KCl μπορεί πολύ εύκολα να εξαχθεί από τα δεδομένα (πίνακες 4.16-4.19, 4^{ου} κεφαλαίου) που ήδη υπάρχουν για το ^{40}K . Σε ό,τι αφορά, όμως, στην πηγή του ^{134}Cs , ο προσδιορισμός του λόγου ttp_{sum} είναι δύσκολος. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται μια αδρή εκτίμηση της τιμής που θα είχε ο συγκεκριμένος λόγος για κάθε ενέργεια. Η εκτίμηση, στηρίζεται στον εξής συλλογισμό: η αναλογία των τιμών ttp_{sum} και ttp για το ^{134}Cs θα είναι περίπου ίση με την αντίστοιχη αναλογία για το ^{40}K . Εκφράζοντας τη σκέψη αυτή με μαθηματικό τύπο ισχύει:

$$\left(\frac{ttp_{sum}}{ttp} \right)_{K-40} = \left(\frac{ttp_{sum}}{ttp} \right)_{Cs-134} \quad (5.25)$$

Αν λοιπόν υπολογίσουμε το λόγο ανάμεσα στις δύο τιμές που αφορούν στο ^{40}K , μπορούμε στη συνέχεια, «εφαρμόζοντας» αυτή την αναλογία στο ^{134}Cs , να εκτιμήσουμε την τιμή του λόγου ttp_{sum} , με δεδομένο ότι γνωρίζουμε ήδη το λόγο ttp . Η καμπύλη που θα χαραχθεί με βάση αυτά τα σημεία θα ανταποκρίνεται στην εκτίμησή μας για τις τιμές που θα προέκυπταν αν συνυπολογίζαμε την επίδραση της ακτινοβολίας πέδησης και για τις δύο πηγές, αν δηλαδή για όλες τις περιπτώσεις ισοτόπων-ενεργειών διαθέταμε «αθροισμένα» φάσματα, όπως συμβαίνει για το ^{40}K . Την αναγωγή αυτή, της μίας περίπτωσης στην άλλη, μας επιτρέπει το γεγονός ότι η

ακτινοβολία πεδήσεως, επηρεάζει μόνο το συνολικό υπόβαθρο, άρα την τιμή της ολικής απόδοσης μόνο, πράγμα που επιτρέπει ακολούθως τη θεώρηση ισότητας μεταξύ των λόγων στη σχέση 5.25.

Αντικαθιστώντας στη σχέση 5.25 τις γνωστές τιμές των 3 μεγεθών, υπολογίζουμε τις κατ' εκτίμηση τιμές του λόγου ttp_{sum} για το ^{134}Cs . Στον πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι τιμές των δύο λόγων καθώς και του μεγέθους $\ln(ttp)$ για όλες τις ενέργειες. Με κανονική γραμματοσειρά σημειώνονται οι τιμές που έχουν υπολογιστεί μέσω προσομοίωσης ή μέσω πειράματος ενώ με έντονα πλάγια γράμματα φαίνονται οι τιμές που εκτιμήθηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που μόλις περιγράφηκε, ξεκινώντας από τη σχέση 5.25. Οι δείκτες “phot” και “sum” υποδηλώνουν τιμές που έχουν προκύψει χωρίς και με συνυπολογισμό αντίστοιχα της ακτινοβολίας πέδησης.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	ln (E)	ttp _{phot}		ttp _{sum}		ln (ttp _{phot})		ln (ttp _{sum})		
			Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	
Cs-134	563,26	6,334	4,181	0,425	4,931	0,360	1,431	0,297	1,595	0,226	Προσομοίωση Γεωμετρία Η
Cs-134	569,32	6,344	4,219	0,349	4,975	0,296	1,44	0,242	1,604	0,185	
Cs-134	604,69	6,405	4,385	0,586	5,171	0,497	1,478	0,396	1,643	0,302	
Cs-134	795,84	6,679	5,071	0,408	5,980	0,346	1,623	0,251	1,788	0,194	
Cs-134	801,84	6,687	5,095	0,401	6,008	0,340	1,628	0,246	1,793	0,190	
K-40	1460,822	7,287	6,919	0,383	8,160	0,325	1,934	0,198	2,099	0,155	
K-40	1460,822	7,287	-	-	9,227	2,61	-	-	2,222	0,283	Πείραμα

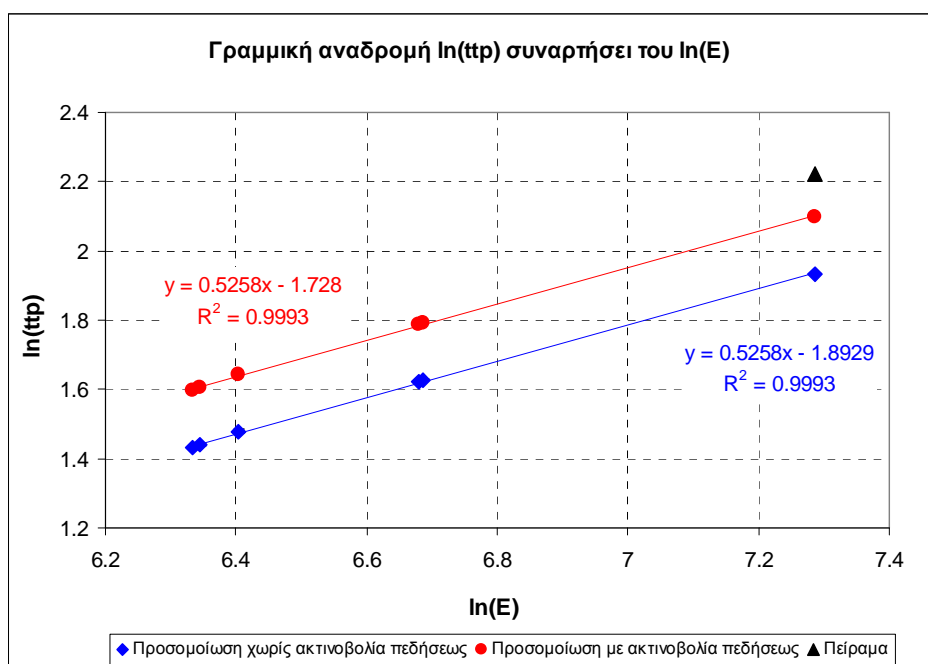
Πίνακας 5.13 Τιμές μεγεθών ttp_{phot} , ttp_{sum} , $\ln(ttp_{phot})$, $\ln(ttp_{sum})$ για μια σειρά ενεργειών

Οι τιμές που έχουν υπολογιστεί μέσω πειράματος συνυπολογίζουν την παρουσία της ακτινοβολίας πεδήσεως, αφού αναφέρονται σε πραγματικές συνθήκες, όπου όλες οι αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα, επιδρώντας στα αποτελέσματα. Εφόσον, αντιπροσωπεύουν «αθροισμένο» φάσμα αντίστοιχο με αυτό της «υπέρθεσης» φασμάτων, θεωρήθηκε σωστότερο στο συγκεκριμένο πίνακα να τοποθετηθούν οι πειραματικές τιμές στις στήλες που αφορούν τη διαδικασία όπου η ακτινοβολία πέδησης έχει ληφθεί υπόψη.

Με βάση τις τιμές του πίνακα 5.13, κατασκευάζουμε νέο γράφημα (σχήμα 5.6) από το οποίο φαίνεται πως η εξίσωση της καμπύλης του εξεταζόμενου λόγου (κόκκινοι κύκλοι) δίνεται από τη σχέση:

$$\ln(\text{ttp}) = 0.5258 \cdot \ln(E) - 1.728 \quad (5.26)$$

Στο σχήμα 5.9 για λόγους σύγκρισης έχουν τοποθετηθεί και τα σημεία – καμπύλη για την περίπτωση κατά την οποία το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως δε λαμβάνεται υπόψη (μπλε ρόμβοι) καθώς και το σημείο το οποίο αντιστοιχεί στον πειραματικό προσδιορισμό του εξεταζόμενου λόγου για την περίπτωση της πηγής ^{40}K (μαύρο τρίγωνο).



Σχήμα 5.9 Γραμμική αναδρομή του μεγέθους $\ln(\text{ttp})$ συναρτήσει του $\ln(E)$ για περιπτώσεις με και χωρίς ακτινοβολία πεδήσεως

Η καμπύλη γραμμικής αναδρομής του μεγέθους $\ln(\text{ttp}_{sum})$ συναρτήσει του $\ln(E)$ που προέκυψε παρουσιάζει, όπως διαπιστώνουμε, καλή «προσαρμογή» στα δεδομένα μας ($R^2=0.9993$). Παρατηρούμε επίσης ότι οι δύο ευθείες είναι παράλληλες, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τις αντίστοιχες εξισώσεις ($y = 0.5258x - 1.8929$ και $y = 0.5258x - 1.728$), οι οποίες διαφέρουν μόνο ως προς το σταθερό όρο. Το γεγονός αυτό αντανακλά την αναλογία μεταξύ των δύο περιπτώσεων (σχέση 5.25).

5.5.3.3 Διόρθωση της καμπύλης απόδοσης φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως.

Ακολουθούνται και για το βήμα αυτό οι διαδικασίες που αναλυτικά περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.5.2.3. Χρησιμοποιείται και πάλι το πρόγραμμα TrueCoinc στο οποίο όμως αυτή τη φορά εισάγονται η μη διορθωμένη καμπύλη απόδοσης φωτοκορυφής (σχέση 5.20) και η καμπύλη ολικής απόδοσης (σχέση 5.26) του ανιχνευτή η οποία συνυπολογίζει το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως.

Εισάγοντας στο πρόγραμμα TrueCoinc τους όρους των παραπάνω συναρτήσεων υπολογίζουμε τους συντελεστές C_i για τις ενέργειες-φωτοκορυφές των ισοτόπων που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης. Τα αποτελέσματα για αυτές τις φωτοκορυφές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14. Στο παράρτημα Δ της παρούσας εργασίας (πίνακες Δ.14-Δ.22) παρατίθενται τα αρχεία εξόδου του προγράμματος TrueCoinc που περιέχουν τους συντελεστές για όλες τις φωτοκορυφές των ισοτόπων. Για λόγους πληρότητας στους πίνακες αναφέρονται και διορθώσεις που αφορούν στα φωτόνια της περιοχής χαμηλών ενεργειών, τα οποία όμως δεν επηρεάζουν την ανάλυση των φωτοκορυφών του ^{134}Cs .

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστής C_i
Cd-109	88,03	0,998
Co-57	122,06	1,000
Ce-139	165,85	0,995
Hg-203	279,19	1,000
Sn-113	391,69	0,998
Sr-85	514,00	1,000
Cs-137	661,66	1,000
Y-88	898,07	0,956
Co-60	1173,24	0,952
Co-60	1332,50	0,951
Y-88	1836,08	0,950

Πίνακας 5.14 Συντελεστές διόρθωσης C_i για τις φωτοκορυφές της βαθμονόμησης

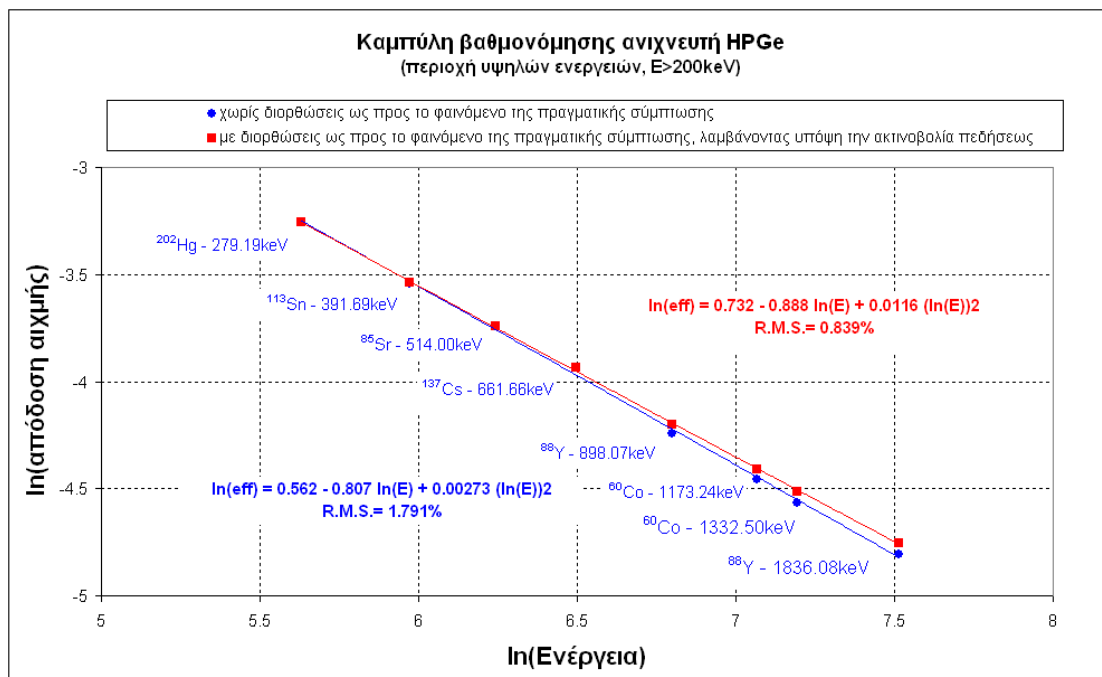
Διαπιστώνουμε μικρή διαφοροποίηση των συντελεστών σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν προηγουμένα (πίνακας 5.9) για την εκδοχή χωρίς το συνυπολογισμό του φαινομένου ακτινοβολίας πεδήσεως (XB), πράγμα αναμενόμενο αφού εισήχθη καμπύλη ολικής απόδοσης διαφορετική από την προηγούμενη.

Στη συνέχεια, με βάση τον τύπο $eff'_i = \frac{eff_i}{C_i}$ που συνδέει τους συντελεστές C_i

με τις αποδόσεις eff_i και eff'_i , υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές της απόδοσης eff'_i για τις παραπάνω ενέργειες-φωτοκορυφές, με τη βοήθεια των οποίων χαράζεται η «νέα», διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης $eff'_{fit}(Energy)$. Από τη διαδικασία διόρθωσης, η οποία αποτυπώνεται αριθμητικά στους πίνακες Δ.23-Δ.24 που βρίσκονται στο παράρτημα Δ, προκύπτει η καμπύλη:

$$\ln(eff') = 0.732 - 0.888 \ln(E) + 0.0116 [\ln(E)]^2 \quad (5.27)$$

η οποία έχει RMS : 0.839%. Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη καμπύλη (MB) παρουσιάζει καλύτερη «προσαρμογή» σε σύγκριση με αυτή που αναφέρεται στην εκδοχή χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως (XB), καθώς εμφανίζει τιμή R.M.S. 0.839 % έναντι 0.910 % της καμπύλης XB. Η διόρθωση που επιτεύχθηκε στην περίπτωση αυτή γραφικά αποδίδεται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10 : Καμπύλες απόδοσης ανιχνευτή HPGe χωρίς και με διορθώσεις ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης λαμβάνοντας υπόψη και την ακτινοβολία πεδήσεως

5.5.3.4 Υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης για την περίπτωση του ^{134}Cs

Όπως και στην παράγραφο 5.5.2.4 για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών για το ^{134}Cs εισάγεται στο πρόγραμμα TrueCoinc η διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής η οποία λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως (σχέση 5.27) και η συνάρτηση του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής (σχέση 5.26) η οποία επίσης λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως.

Οι ζητούμενοι συντελεστές διόρθωσης C_j (βλ. σχέση 5.4) για τις 5 αιχμές-ενέργειες του ^{134}Cs που ενδιαφέρουν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.15 ενώ το αντίστοιχο αρχείο εξόδου του προγράμματος παρατίθεται στον πίνακα Δ.25 του παραρτήματος Δ.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστής C_j
Cs-134	563,26	0,889
Cs-134	569,32	0,890
Cs-134	604,69	0,931
Cs-134	795,84	0,932
Cs-134	801,84	0,897

Πίνακας 5.15 Συντελεστές διόρθωσης C_j για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs λαμβάνοντας υπόψη την ακτινοβολία πεδήσεως.

5.5.3.5 Τελική διόρθωση της υπολογιζόμενης ραδιενέργειας του ^{134}Cs .

Έχοντας ήδη υπολογίσει τη διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης και παράλληλα τους συντελεστές διόρθωσης σχηματιζόμενης φωτοκορυφής για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης για κάθε φωτοκορυφή – ενέργεια του ^{134}Cs , είναι δυνατή η τελική διόρθωση της ραδιενέργειας του συγκεκριμένου ισότοπου με βάση τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.2 και τη σχέση 5.23.

Για την εφαρμογή της σχέσης αυτής οι συντελεστές C_j για κάθε χρησιμοποιούμενη φωτοκορυφή του ^{134}Cs παρατίθενται στον πίνακα 5.15 ενώ οι συντελεστές C_{eff} υπολογίζονται μέσω του λόγου (σχέση 5.24) της μη διορθωμένης απόδοσης φωτοκορυφής (σχέση 5.20) προς τη διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης απόδοση φωτοκορυφής (σχέση 5.27) για κάθε μία από τις 5 ενέργειες του ^{134}Cs . Οι τιμές του συντελεστή C_{eff} παρατίθενται στον πίνακα 5.16.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Συντελεστής C_{eff}
Cs-134	563,26	0,9884
Cs-134	569,32	0,9881
Cs-134	604,69	0,9862
Cs-134	795,84	0,9767
Cs-134	801,84	0,9764

Πίνακας 5.16 Συντελεστές διόρθωσης C_{eff} για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως.

Γνωρίζοντας τις χωρίς διορθώσεις τιμές της ραδιενέργειας του ^{134}Cs όπως προκύπτει από κάθε φωτοκορυφή του (Πίνακας 5.1) και τις τιμές των συντελεστών C_{eff} και C_j , προσδιορίστηκε μέσω της σχέσης 5.23 η «νέα» διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης ραδιενέργεια της πηγής ^{134}Cs . Στον πίνακα 5.17 που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι τιμές όλων των συντελεστών καθώς και οι τελικές τιμές της διορθωμένης ραδιενέργειας με τα αντίστοιχα σφάλματα, τα οποία αναφέρονται μόνο στην επιφάνεια φωτοκορυφής.

Πηγή	Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια χωρίς διορθώσεις		C_{eff}	C_j	Διορθωμένη ραδιενέργεια	
		Τιμή	Σφάλμα % (1σ)			Τιμή	Σφάλμα % (1σ)
Cs-134	563,26	7,18	15,03	0,9884	0,889	7,98	15,03
	569,32	6,25	14,30	0,9881	0,890	6,94	14,30
	604,69	6,87	2,67	0,9862	0,931	7,28	2,67
	795,84	7,07	3,64	0,9767	0,932	7,41	3,64
	801,84	6,75	7,39	0,9764	0,897	7,35	7,39

Πίνακας 5.17 Εφαρμογή διόρθωσης ραδιενέργειας σε πηγή ^{134}Cs λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως.

(τα σφάλματα του συγκεκριμένου πίνακα αναφέρονται μόνο στο μέγεθος επιφάνεια φωτοκορυφής)

Έχοντας πραγματοποιήσει διορθώσεις για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας του ^{134}Cs στο εξεταζόμενο δείγμα ως προς το φαινόμενο της πραγματικής άθροισης, με δύο διαφορετικές θεωρήσεις, στην ακόλουθη παράγραφο παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα ενώ παρουσιάζονται και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκριτική αυτή αξιολόγηση.

5.5.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα.

Με στόχο την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας, τόσο της διαδικασίας διόρθωσης όσο και των δύο προσεγγίσεων, χωρίς και με την ακτινοβολία πεδήσεως (XB και MB), συγκρίθηκαν οι διορθωμένες τιμές με αυτές που είχαν υπολογιστεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ προ διόρθωσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.18 που ακολουθεί μαζί με τα σφάλματά τους, τα οποία αφορούν μόνο στο μέγεθος «επιφάνεια φωτοκορυφής».

Πηγή	Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια (Bq/kg)						Απόκλιση (%)	
		Μη διορθωμένη (ΕΠΤ)		Διορθωμένη (XB)*		Διορθωμένη (MB)**		ΕΠΤ-XB	ΕΠΤ-MB
		Τιμή	σ % (1 σ)	Τιμή	σ % (1 σ)	Τιμή	σ % (1 σ)		
Cs-134	563,26	7,18	15,03	7,83	15,03	7,98	15,03	-9,05	-11,14
	569,32	6,25	14,30	6,81	14,30	6,94	14,30	-8,96	-11,04
	604,69	6,87	2,67	7,19	2,67	7,28	2,67	-4,66	-5,97
	795,84	7,07	3,64	7,33	3,64	7,41	3,64	-3,68	-4,81
	801,84	6,75	7,39	7,22	7,39	7,35	7,39	-6,96	-8,89

* Στους υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

** Στους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

Πίνακας 5.18 Ραδιενέργεια πηγής ^{134}Cs (Σύγκριση διορθωμένων και μη τιμών)

Με βάση τον πίνακα 5.18, φαίνεται καταρχήν πως η διαδικασία διόρθωσης οδήγησε σε τιμές αρκετά διαφοροποιημένες από τις αντίστοιχες μη διορθωμένες (αποκλίσεις που κυμαίνονται από 3.7 έως και 11.1 %). Διαπιστώνεται επίσης πως οι τιμές που προέκυψαν στη δεύτερη περίπτωση διόρθωσης (MB) είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν χωρίς να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως (XB). Με άλλα λόγια με βάση την 2^η προσέγγιση, του συνυπολογισμού δηλαδή, της ακτινοβολίας πέδησης πετύχαμε μεγαλύτερη διόρθωση σε σχέση πάντα με τη χωρίς διορθώσεις τιμή της ραδιενέργειας. Αυτό που ωστόσο πρέπει να εξετασθεί είναι το αν οδηγεί σε τιμές που προσεγγίζουν περισσότερο την

τιμή αναφοράς της ραδιενέργειας. Πριν όμως γίνει ο έλεγχος αυτός αξίζει να εξετασθεί η διασπορά των τιμών των ραδιενεργειών για κάθε ομάδα μετρήσεων. Έχουμε ήδη υπολογίσει (παράγραφος 5.5.1) ότι η διασπορά για την περίπτωση των τιμών χωρίς διορθώσεις ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, είναι ίση με 5.3% σε σχέση με τη μέση τιμή τους. Με βάση τον πίνακα 5.18 η τιμή της διασποράς αυτής είναι 5.04% και 5.08% για τις περιπτώσεις XB και MB αντίστοιχα. Παρατηρείται δηλαδή μικρή βελτίωση.

Για να εκτιμηθεί ποια ομάδα αποτελεσμάτων πλησιάζει περισσότερο στην τιμή αναφοράς, συγκρίθηκαν οι διορθωμένες τιμές με την τιμή αναφοράς. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.19. Για τον στατιστικό έλεγχο που έγινε, χρησιμοποιείται το συνολικό σφάλμα. Για την περίπτωση κατά την οποία δε λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πείδησης, ως σφάλμα της καμπύλης βαθμονόμησης (σχέση 5.22) χρησιμοποιείται η τιμή του RMS της, 0.910% ενώ για την περίπτωση MB η τιμή 0.839% (σχέση 5.27). Χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή τα δεδομένα των διορθωμένων καμπυλών.

Ενέργεια (keV)	Ραδιενέργεια (Bq/kg)						Απόκλιση (%)		U - test	
	Τιμή αναφοράς (TA)		Διορθωμένη (XB)*		Διορθωμένη (MB)**					
	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	TA-XB	TA-MB	TA-XB	TA-MB
563,26	7,65	1,31	7,83	15,1	7,98	15,1	2,4	4,3	0,15	0,27
569,32			6,81	14,4	6,94	14,4	-11,0	-9,3	0,85	0,71
604,69			7,19	3,2	7,28	3,2	-6,0	-4,8	1,81	1,45
795,84			7,33	4,1	7,41	4,1	-4,2	-3,1	1,01	0,76
801,84			7,22	7,6	7,35	7,6	-5,6	-3,9	0,77	0,53

* Στους υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πείδησης

** Στους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πείδησης

Πίνακας 5.19 Ραδιενέργεια πηγής ¹³⁴Cs (Σύγκριση διορθωμένων τιμών με τιμή αναφοράς)

Από τη σύγκριση των πινάκων 5.3 και 5.19 προκύπτει πως οι διορθωμένες τιμές προσεγγίζουν καλύτερα την τιμή αναφοράς. Οι αποκλίσεις τους από τη δοσμένη τιμή αναφοράς κυμαίνονται από 2 έως 11 %, ενώ στην περίπτωση των μη διορθωμένων τιμών οι αποκλίσεις ήταν της τάξης του 6-18 % (Πίνακας 5.3). Συγχρόνως, η τιμή της μεταβλητής σύγκρισης U για την πραγματοποίηση του στατιστικού ελέγχου (U-test) παίρνει τιμές μικρότερες (και εντός της περιοχής

αποδοχής) σε σχέση με τις αντίστοιχες του πίνακα 5.3 οι οποίες αντιστοιχούν στις μη διορθωμένες τιμές της ραδιενέργειας.

Για την πληρέστερη εκτίμηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος για τις δύο ομάδες τιμών και συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς. Η σύγκριση γίνεται τόσο σε όρους απόκλισης όσο και με στατιστικό έλεγχο (εφαρμογή U-test).

Ραδιενέργεια (Bq/kg)									
Τιμή αναφοράς (TA)		Σταθμ. μέσος διορθωμένων τιμών (XB)*		Σταθμ. μέσος διορθωμένων τιμών (MB)**		Απόκλιση (%)		U-test	
Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	Τιμή	σ % (1σ)	TA-XB	TA-MB	TA-XB	TA-MB
7,65	1,31	7,24	2,70	7,33	2,70	- 5,4	- 4,2	1,86	1,44

* Στους υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

** Στους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

Πίνακας 5.20 Ραδιενέργεια πηγής ¹³⁴Cs (Σύγκριση διορθωμένων με τιμή αναφοράς)

Η απόκλιση του σταθμισμένου μέσου των διορθωμένων τιμών από την τιμή αναφοράς, κατά την περίπτωση που δε λαμβάνεται υπόψη και κατά την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως είναι 5.4% και 4.2% αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με την απόκλιση του σταθμισμένου μέσου των υπολογισμένων χωρίς διορθώσεις τιμών, 9.7%, διαπιστώνεται πως και οι δύο δέσμες διορθωμένων τιμών προσεγγίζουν καλύτερα την τιμή αναφοράς από τις μη διορθωμένες. Σε ό,τι αφορά στο στατιστικό έλεγχο U παρατηρείται ότι και για τις δύο περιπτώσεις (XB και MB) προκύπτει ικανοποιητικό - αποδεκτό αποτέλεσμα.

Υπενθυμίζεται ότι κατά τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δεν έχει γίνει υπολογισμός αβεβαιοτήτων για τους συντελεστές αυτούς. Με τον τρόπο αυτό, η αβεβαιότητα που συνοδεύει τη ραδιενέργεια, όπως υπολογίζεται από κάθε φωτοκορυφή του ¹³⁴Cs ξεχωριστά, αλλά και η αντίστοιχη του σταθμισμένου μέσου, είναι υποεκτιμημένες δίνοντας μεγαλύτερες τιμές στη μεταβλητή ελέγχου U. Παρόλα αυτά οι τιμές ικανοποιούν το στατιστικό έλεγχο.

Σε κάθε περίπτωση, είτε σε όρους απόκλισης είτε σε επίπεδο στατιστικού ελέγχου οι τιμές με διόρθωση ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης προσεγγίζουν καλύτερα την τιμή αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση πως είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση διορθώσεων ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης προκειμένου για τη λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση είναι μάλιστα καλύτερη στην περίπτωση κατά την οποία το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως λαμβάνεται υπόψη, παρόλο που στα πλαίσια της Δ.Ε. αυτό έγινε με πολύ προσεγγιστικό τρόπο. Το γεγονός αυτό, μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα πως ακριβέστερος προσδιορισμός – εκτίμηση της ακτινοβολίας πεδήσεως είναι δυνατό να οδηγήσει σε ακόμα καλύτερη προσέγγιση. Απαραίτητος κρίνεται επίσης και ο ορθότερος υπολογισμός των αβεβαιοτήτων οι οποίες συνοδεύουν τις παραπάνω διορθώσεις προκειμένου οι έλεγχοι που ακολούθως γίνονται να οδηγούν σε ασφαλέστερα συμπεράσματα.

5.6 Εξάρτηση του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής από τη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτικής διάταξης.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, για τον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής άθροισης, καθοριστικής σημασίας παράγοντας είναι ο προσδιορισμός της καμπύλης του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής της ανιχνευτικής διάταξης. Ο προσδιορισμός της, όπως φάνηκε και στο κεφάλαιο 4, μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές μεθόδους. Σε ό,τι όμως αφορά στον πειραματικό προσδιορισμό της και προκειμένου αυτός να γίνει πιο εύκολος, συχνά γίνεται η παραδοχή ανεξαρτησίας του συγκεκριμένου λόγου από τη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτικής διάταξης (De Felice et al., 2000). Είναι δηλαδή δυνατό με βάση αυτή την υπόθεση, ο υπολογισμός του λόγου για κάθε περίπτωση – γεωμετρία να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω της χρήσης σημειακών πηγών. Έχοντας πραγματοποιήσει προσομοιώσεις με διαφορετικές γεωμετρίες πηγής-ανιχνευτή για τον προσδιορισμό του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής, στην παράγραφο αυτή ελέγχεται η παραπάνω υπόθεση.

Οι τιμές του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής (λόγος tpr) οι οποίες έχουν υπολογισθεί μέσω προσομοιώσεων στα προηγούμενα κεφάλαια για διαφορετικές γεωμετρίες :

- Σημειακή πηγή 22.4cm από το καπάκι του ανιχνευτή (βλ. πίνακα 4.2).
- Πηγή όγκου γεωμετρίας ‘2’

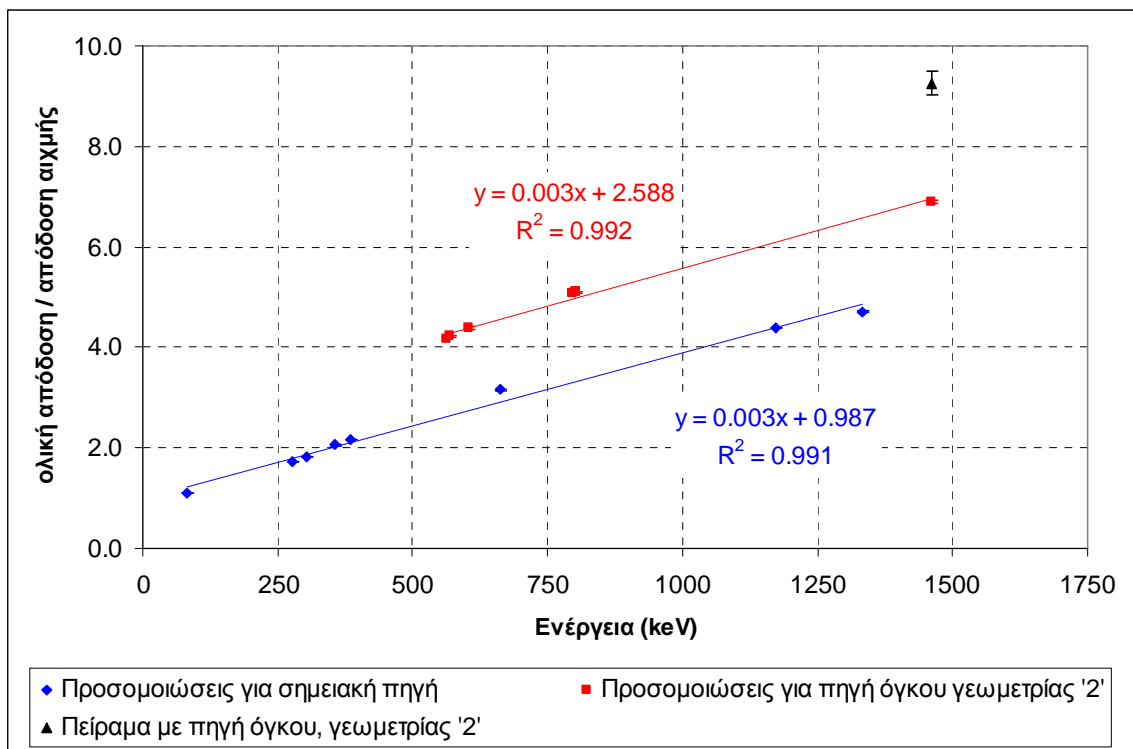
συγκεντρώνονται και παρατίθενται στον πίνακα 5.21. Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή έχει χρησιμοποιηθεί η γεωμετρία H στην οποία έχουμε ήδη καταλήξει από προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 3). Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο περιπτώσεις πηγών οι προσομοιώσεις εκείνες στις οποίες το φαινόμενο της ακτινοβολίας πεδήσεως δεν είχε συνυπολογισθεί. Ειδικά για την περίπτωση των πηγών όγκου παρατίθεται – για λόγους πληρότητας – και η τιμή του λόγου tpr που έχει υπολογιστεί πειραματικά, πάντα για τη γεωμετρία “2”.

Πηγή-Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής		Προσομοίωση Γεωμετρία H (XB)*	Σημειακές πηγές
		Τιμή	σ % (1σ)		
Ba-133	80,997	1,089	0,093	Προσομοίωση Γεωμετρία H (XB)*	Σημειακές πηγές
Ba-133	276,4	1,715	0,074		
Ba-133	302,84	1,832	0,084		
Ba-133	356,01	2,053	0,121		
Ba-133	383,85	2,174	0,124		
Cs-137	661,67	3,155	0,174		
Co-60	1173,2	4,386	0,203		
Co-60	1332,5	4,717	0,158		
Cs-134	563,26	4,184	0,425	Προσομοίωση Γεωμετρία H (XB)*	Πηγές όγκου
Cs-134	569,32	4,219	0,349		
Cs-134	604,69	4,386	0,586		
Cs-134	795,84	5,076	0,408		
Cs-134	801,84	5,102	0,401		
K-40	1460,822	6,897	0,383		
K-40	1460,822	9,259	2,61	Πείραμα	

* Στους υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη η ακτινοβολία πέδησης

Πίνακας 5.21 Λόγος της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής για διαφορετικές γεωμετρίες πηγής ανιχνευτή και διαφορετικές ενέργειες

Με βάση τις τιμές του πίνακα 5.21, απεικονίζουμε σε γράφημα την εξάρτηση του λόγου tpr από την ενέργεια, σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11 Εξάρτηση του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής από τη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή.

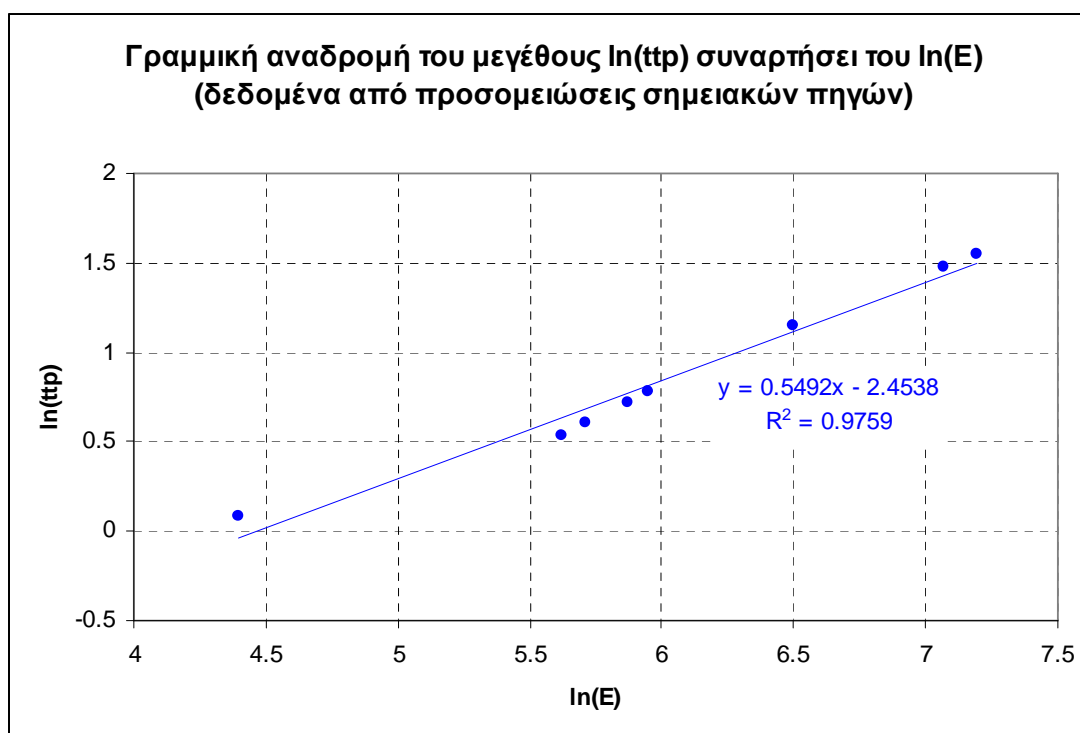
Από το διάγραμμα 5.11 προκύπτει πως υπάρχει απόκλιση του λόγου της ολικής απόδοσης προς την απόδοση αιχμής μεταξύ των 3 γεωμετριών. Σε ό,τι αφορά στο πειραματικό σημείο, όπως έχει αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 4 της παρούσας Δ.Ε., μέρος της απόκλισης αυτής μπορεί να ερμηνευθεί από την παρουσία της ακτινοβολίας πεδήσεως. Αναφορικά με τις δύο άλλες γεωμετρίες, παρατηρούμε πως υπάρχει απόκλιση της τάξης του 30% – 50% για την ενεργειακή περιοχή (500-1300 keV) για την οποία υπάρχουν δεδομένα και για τις δύο καμπύλες, π.χ. η απόκλιση των δύο λόγων για την ενέργεια των 661.66keV η οποία αντιστοιχεί στο ισότοπο ^{137}Cs υπολογίζεται ίση με 42%. Προκειμένου να εξετασθεί το πως αυτή η απόκλιση μεταφέρεται στους συντελεστές διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, θεωρήθηκε η περίπτωση του ^{134}Cs , η οποία μελετήθηκε παραπάνω.

Στον πίνακα 5.12 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας φωτοκορυφής για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης όπως προκύπτουν αν για την καμπύλη του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 5.22, η οποία έχει προκύψει με χρήση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης πηγής όγκου, γεωμετρίας '2' (βλ. τετράγωνα σχήματος 5.8). Προκειμένου να ελεγχθεί

κατά πόσον είναι δυνατό να θεωρηθεί ο λόγος ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής ανεξάρτητος της γεωμετρίας, επαναλήφθηκε ο παραπάνω υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά καμπύλη για τον εξεταζόμενο λόγο η οποία προκύπτει από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για σημειακές πηγές (βλ. ρόμβους σχήματος 5.8). Με άλλα λόγια, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα TrueCoinc με τον ίδιο τρόπο όπως και για τον υπολογισμό των συντελεστών του πίνακα 5.12 αλλάζοντας μόνο την εξίσωση του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής (ttp). Η εξίσωση αυτή είναι:

$$\ln(\text{ttp}) = 0.5492 \cdot \ln(E) - 2.4538 \quad (5.28)$$

και όπως ήδη αναφέρθηκε έχει προκύψει από τα δεδομένα του πίνακα 5.21 τα οποία αντιστοιχούν στην περίπτωση σημειακών πηγών (σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12 Γραμμική αναδρομή του μεγέθους $\ln(\text{ttp})$ συναρτήσει του $\ln(E)$ για την περίπτωση προσομιώσεων σημειακών πηγών (βλ. πίνακα 5.21).

Στον πίνακα 5.22 παρουσιάζονται οι συντελεστές διόρθωσης ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης όπως προκύπτουν με τη χρήση των δύο καμπυλών για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs .

Ενέργεια (keV)	Συντελεστές Διόρθωσης		Αποκλίσεις (%)
	Καμπύλη ttp για γεωμ. όγκου	Καμπύλη ttp για γεωμ. σημειακής πηγής	
563,26	0,889	0,937	- 5,4
569,32	0,890	0,937	- 5,3
604,69	0,931	0,961	- 3,2
795,84	0,932	0,961	- 3,1
801,84	0,897	0,941	- 4,9

Πίνακας 5.22 Υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών με χρήση διαφορετικών καμπυλών ttp.

Από τον πίνακα 5.22 προκύπτει ότι η απόκλιση του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοση αιχμής που υπολογίσθηκε, 30% - 50%, μεταφέρεται στο συντελεστή διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, δίνοντας μια απόκλιση της τάξης του 5%. Οι τιμές αυτές είναι σε συμφωνία και με τις αντίστοιχα προβλεπόμενες από τη βιβλιογραφία. Αναφέρεται συγκεκριμένα η περίπτωση κατά την οποία σφάλμα στον προσδιορισμό της ολικής απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης της τάξης του 35% , για γεωμετρία Marinelli οδηγεί σε σφάλμα του συντελεστή διόρθωσης της τάξης του 5% (De Felice et al., 2000).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται προσπάθεια επιγραμματικής περιγραφής της Διπλωματικής Εργασίας καθώς και των βασικών συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτήν. Εκτιμάται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και η αποτελεσματικότητά της, με κριτήριο τους συνολικούς αλλά και τους επιμέρους στόχους που είχαν αρχικά τεθεί. Διατυπώνονται, τέλος, σκέψεις και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

Πρώτο στάδιο στη διαδικασία βαθμονόμησης και επιμέρους στόχο της Δ.Ε. αποτέλεσε ο προσδιορισμός των διαστάσεων του ανιχνευτή Γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ο προσδιορισμός κρίθηκε απαραίτητος, καθώς η λεπτομερής γνώση των διαστάσεων είναι αναγκαία για την πλήρη περιγραφή της ανιχνευτικής διάταξης στα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης και κυρίως στο αρχείο γεωμετρίας. Δεδομένου ότι συνήθως οι ακριβείς διαστάσεις του κρυστάλλου δεν δίνονται από τον κατασκευαστή και ότι -ακόμα κι αν δίνονται- χρειάζεται οπωσδήποτε να επανεξετάζονται και να επαληθεύονται, προχωρήσαμε στον υπολογισμό των «ακριβών» τιμών τους. Η διαδικασία αυτή στηρίχθηκε στη σύγκριση πειραματικών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, για σειρά συνδυασμών των παραμέτρων που μελετήθηκαν. Στην πορεία της εργασίας φάνηκε ότι η μονομερής μελέτη με πηγές συγκεκριμένου είδους (π.χ. σημειακές) δεν αρκεί, καθώς παρέχει αποτελέσματα που «ταιριάζουν» μόνο στη συγκεκριμένη κατηγορία πηγών και στη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή. Επιβάλλεται δηλαδή ο έλεγχος της γεωμετρίας και με πηγές άλλης κατηγορίας (π.χ. όγκου). Ο έλεγχος αυτός είναι απολύτως απαραίτητος, καθώς είναι πολύ πιθανό μία γεωμετρία που δίνει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα για κάποια σημειακή πηγή, να δίνει μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών πειράματος και προσομοίωσης για μια πηγή όγκου ή ακόμα και για μία άλλη σημειακή πηγή σε άλλη θέση. Έγινε λοιπόν ξεκάθαρο ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία προσδιορίζονται με τη διαδικασία αυτή δεν αντιστοιχούν απαραίτητα στα «ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά» του ανιχνευτή, αλλά απλώς πρόκειται για χαρακτηριστικά τα οποία, μέσω της προσομοίωσης, δίνουν αποτελέσματα τα οποία είναι συμβατά με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η βιαστική εκτίμηση ότι «η πρώτη από τις γεωμετρίες που θα βρεθεί ότι δίνει αποτελέσματα που θα συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις είναι και η μοναδική σωστή γεωμετρία», οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα. Στα

πλαίσια της ΔΕ έγιναν πολλές δοκιμές και τελικά υιοθετήθηκε για τον ανιχνευτή HPGe μία γεωμετρία, η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για γεωμετρία σημειακής πηγής και πηγής όγκου. Η γεωμετρία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ολικής απόδοσης του ανιχνευτή, καθώς και της απόδοσης φωτοκορυφής, για γεωμετρίες και ενέργειες για τις οποίες δεν διατίθενται πειραματικά αποτελέσματα. Για τις περιπτώσεις όμως γεωμετρίας και ενέργειας φωτονίων όπου διατίθενται πειραματικά αποτελέσματα της απόδοσης φωτοκορυφής, αυτά θα πρέπει να θεωρούνται και πιο αξιόπιστα. Εξυπακούεται ότι, περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να οδηγήσει ενδεχομένως σε προσδιορισμό γεωμετρικών χαρακτηριστικών τα οποία να δίνουν καλύτερη σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα για όλες τις γεωμετρίες που δοκιμάστηκαν. Τέτοια διερεύνηση όμως ξεφεύγει από τα όρια της ΔΕ.

Σε ότι αφορά στην ολική απόδοση του ανιχνευτή, διαπιστώθηκε η μεγάλη δυσκολία πειραματικού προσδιορισμού και η μεγάλη διαφορά μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Ένας σημαντικός λόγος για αυτή τη μεγάλη διαφορά είναι η ύπαρξη στο συνεχές φάσμα των ακτίνων-γ και ακτινοβολίας πείδησης. Στα πλαίσια της ΔΕ έγινε διερεύνηση της επίδρασης της ακτινοβολίας πείδησης και αποδείχθηκε ότι ο συνυπολογισμός του φαινομένου είναι απαραίτητος, αν θέλουμε να πετύχουμε βελτίωση της σύγκλισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά. Ένα ακόμα χρήσιμο συμπέρασμα που προέκυψε, στα πλαίσια της διερεύνησης του φαινομένου της ακτινοβολίας πείδησης, είναι η ανάδειξη της αρχής της υπέρθεσης φασμάτων ως πολύτιμου εργαλείου για το χειρισμό ανάλογων προβλημάτων. Η ακτινοβολία πείδησης από την άλλη πλευρά, ενδεχομένως, ανάλογα με το ισότοπο, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και κατά τη διόρθωση λόγω πραγματικής σύμπτωσης, καθώς τα φωτόνια πείδησης είναι δυνατόν να κάνουν πραγματική σύμπτωση με τα φωτόνια-γ.

Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε στα πλαίσια της ΔΕ ήταν ότι ο λόγος total-to-peak, ο οποίος συχνά στη βιβλιογραφία θεωρείται κατά προσέγγιση σταθερός και ανεξάρτητος της γεωμετρίας και της ενέργειας των φωτονίων, στην πραγματικότητα εξαρτάται και από τα δύο παραπάνω μεγέθη.

Στα πλαίσια της ΔΕ έγινε εφαρμογή των τεχνικών βαθμονόμησης που αναπτύχθηκαν και χρήση του προγράμματος TrueCoinc για τον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης για ^{134}Cs και για δείγμα όγκου που αναλύθηκε στον ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η όλη διαδικασία διόρθωσης οδήγησε σε πολύ

καλή εκτίμηση του ^{134}Cs που περιέχεται στο δείγμα, η οποία δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την τιμή αναφοράς. Ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι, παρόλη τη μεγάλη αβεβαιότητα που συχνά συνοδεύει το μέγεθος total-to-peak, η αβεβαιότητα του συντελεστή διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης είναι πολύ χαμηλότερη και συνήθως σε αποδεκτά όρια.

Τόσο στα πλαίσια περιγραφής της γενικής μεθόδου διόρθωσης λόγω του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης, όσο και κατά την παρουσίαση της εφαρμογής για το ^{134}Cs , αναδείχθηκε η ανάγκη εντοπισμού όλων των μεγεθών που χρήζουν διόρθωσης και ο συνυπολογισμός κάθε φορά όλων των συντελεστών, ώστε να είναι πραγματικά πλήρης και ορθή η διαδικασία διόρθωσης. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης ενδεχομένως υπεισέρχεται και κατά τη διάρκεια της πειραματικής βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή. Ανάλογα με την περίπτωση (π.χ. αν το ισότοπο που αναλύεται έχει χρησιμοποιηθεί στη βαθμονόμηση του ανιχνευτή ή όχι), απαιτείται διαφορετική προσέγγιση, όχι βέβαια από άποψη μεθόδου αλλά μόνο από άποψη βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν ή επαναληφθούν. Προσοχή χρειάζεται, αν μιλάμε για πολλαπλές διορθώσεις, στην κατασκευή και επανεισαγωγή των διορθωμένων συναρτήσεων (καμπύλη βαθμονόμησης), ώστε να υπολογιστούν οι σωστοί συντελεστές διόρθωσης, είτε αυτοί αφορούν την απόδοση, είτε αφορούν την επιφάνεια της φωτοκορυφής. Στα πλαίσια της ΔΕ έγινε προσπάθεια να ληφθεί σε κάποιο βαθμό - εντελώς προσεγγιστικά - υπόψη η ακτινοβολία πέδησης και κατά τη διόρθωση πραγματικής σύμπτωσης για το ισότοπο ^{134}Cs . Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά.

Ανακεφαλαιώνοντας, θεωρούμε πως ανάμεσα στα συμπεράσματα της εργασίας ξεχωρίζει ως βασικό η σημασία του φαινομένου της ακτινοβολίας πέδησης και η ανάγκη συνυπολογισμού του τόσο στη διαδικασία προσδιορισμού των αποδόσεων όσο και στη διαδικασία διορθώσεων μεγεθών όπως η ραδιενέργεια δείγματος. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε υποδεικνύει μια κατεύθυνση, η οποία, στο βαθμό που επεξεργαστεί περαιτέρω και αξιοποιηθεί, μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της ακρίβειας των σχετικών διορθώσεων. Ελπίζουμε τα συμπεράσματα αυτής της προσπάθειας να φανούν χρήσιμα σε μελλοντικές εργασίες, συμβάλλοντας στην επίλυση παρόμοιων προβλημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναγνωστάκης Μ.Ι., “*γ-Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χαμηλών Ραδιενεργειών στην Περιοχή Χαμηλών Ενεργειών*”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (1998).
- 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).
- Δεληγιάννης 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).
- Καρφόπουλος Κ.Λ., “*Μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (True Coincidence) σε ημιαγωγούς ανιχνευτές Γερμανίου και υπολογισμός συντελεστών διόρθωσης*”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2003).
- Μανώλακας Π., “*Εκτίμηση της δόσεως εξαιτίας της λειτουργίας μηχανής ακτίνων-Χ με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo*”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα (2007).
- 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.
- Be M., Chiste V., Dulieu C., Browne E., Dersch R., Helmer R., “*Table de radionuclides - Monographie BIPM 5 Table of radionuclides - Monograph BIPM 5*”, (2004).

- Bielajew A.F. and Salvat F., “Improved electron transport mechanics in the PENELOPE Monte-Carlo model”, Nucl. Instrum. Meth. B 173, 332-343. (2001).
- 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., Bruyant F., Maire M., McPherson A.C., Zanarini P., *GEANT3*, CERN Data Handling Division, Geneva, (1987).
- Debertain K. and Helmer R.G., “*Gamma- and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*”, North Holland Press (1988).
- Debertain K. and Schotzig U., Nuclear Instruments and Methods 158 (1979) 471.
- Decombaz M., Gostely J.J. and Laedermann J.P., “*Coincidence-summing corrections for extended sources in gamma-ray spectrometry using Monte Carlo simulation*”, Nuclear Instruments and Methods vol. A312, pp. 152-159, (1992).
- De Felice P., Angelini P., Fazio A. and Capogni M., “*A national Campaign for Coincidence-Summing Correction in γ -Ray spectrometry*”, Applied Radiation and Isotopes 56 (2002), 117-123.
- De Felice P., Angelini P., Fazio A. and Biagini R., “*Fast procedures for coincidence-summing correction in γ -ray spectrometry*”, Applied Radiation and Isotopes 52 (2000), 745-752.
- Dryak P., Kovar P., “*Experimental and MC determination of HPGe detector efficiency in the 40–2754 keV energy range for measuring point source geometry with the source-to-detector distance of 25 cm*”, Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 1346–1349.
- El-Gharbawy H.A., Metwally S.M., Sharshar 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.
- Gehrke R.J., Helmer R.G. and Greenwood R.C., Nuclear Instruments and Methods 147 (1977) 405.
- Gilmore G. and Hemingway J.D., “*Practical Gamma-ray Spectrometry*”, John Wiley & Sons, Chichester (1995).

- Hacker Ch., “*Radiation Decay, version 3.6*”, (2001).
- 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).
- Hardy J.C., Jacob V.E., Sanchez-Vega M., Effinger R.T., Lipnik P., Mayes V.E., Willis D.K., Helmer R.G., “*Precise efficiency calibration of an HPGe detector: source measurements and MonteCarlo calculations with sub-percent precision*”, Int. J. Appl. Radiat. Isot. 56, 65-69 (2002).
- Helmer R.G., Hardy J.C., Jacob V.E., Sanchez-Vega M., Neilson R.G., Nelson J., “*The use of Monte Carlo calculations in the determination of a Ge detector efficiency curve*”, Nuclear Instruments and Methods A 511, 360-381 (2003).
- Hernandez F., El-Daoushy F., “*Accounting for incomplete charge collection in Monte Carlo simulations of the efficiency of well-type Ge-detectors*”, Nuclear Instruments and Methods A 498 (2003) 340-351.
- Karamanis D., “*Efficiency simulation of HPGe and Si(Li) detectors in γ - and in X-ray spectroscopy*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics A 505 (2003) 282-285.
- Knoll G.F., “*Radiation Detection and Measurement*”, John Wiley and Sons, (1989).
- Le Petit G., Jutier C., Gross P., Greiner V., “*Low-level activity measurement of ^{131}Xe , ^{133}Xe , ^{135}Xe and ^{133}Xe in atmospheric air samples using high-resolution dual X-g spectrometry*”, Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 1307–1312.
- Lepy M.C., “*Total efficiency calibration for coincidence-summing corrections*”, Nuclear Instruments and Methods A 579 (2007) 284-287.
- Lepy M.C., Brun P., Collin C., Plagnard J., “*Experimental validation of coincidence summing corrections computed by the ETNA software*”, Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 1340-1345.
- Leutz H., Schulz G. and Wenninger H., “*The Decay of Potassium-40*”, Zeitschrift für Physik 187, 151-164 (1965).
- McCallum G.J. and Coote G.E., Nuclear Instruments and Methods 130 (1975) 189.

- Mrdja D., Bikit I. and Slivka J., “*The 210Pb bremsstrahlung component in the background spectrum of lead shielded γ -spectrometers*”, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia (2006).
- Novkovic D., Kandic A., Durasevic M., Vukanac I., Milosevic Z., Nadder L., “*Coincidence summing of X- and γ -rays in γ -ray spectrometry*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 578 (2007) 207–217.
- Overwater R.M.W., Bode P. and De Goeij J.J.M., “*Gamma-ray spectroscopy of voluminous sources. Corrections for source geometry and self-attenuation*”, Nuclear Instruments and Methods A324, 209 (1993).
- Quintana B. and Fernandez F., “*An Empirical Method to Determine Coincidence – Summing Corrections in Gamma Spectrometry*”, Applied Radiation and Isotopes 46 (1995), 961-964.
- Rodenas J., Martinavarro A., Rius V., “*Validation of the MCNP code for the simulation of Ge-detector calibration*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics A 450 (2000) 88-97.
- Saegusa J., Kawasaki K., Mihara A., Mitsuo I., Yoshida M., “*Determination of detection efficiency curves of HPGe detectors on radioactivity measurement of volume samples*”, Appl. Radiat. Isot. 61 (2004), 1383-1390.
- Salvat F., Fernandez-Varea J.M., Sempau J., “*PENELOPE-2006: A code system for Monte Carlo simulation of Electron and Photon transport*”, NEA Data Bank, Workshop proceedings, Barcelona, Spain, 4-7 July 2006.
- 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., “*Applications of the Monte Carlo calculations to gamma-spectrometric measurements of environmental samples*”, Applied Radiation & Isotopes Vol.47, 919 (1995).
- Sima O., “*Monte Carlo simulation versus semi-empirical calculation of autoabsorption factors for semiconductor detector calibration in complex geometries*”, Progr. Nucl. Energy 24, 327 (1990).
- Sima O., Arnold D., “*Self-attenuation and Coincidence-summing Corrections calculated by Monte Carlo simulations for Gamma-spectrometric measurements with well-type Germanium detectors*”, Applied Radiation & Isotopes Vol.47, No 9/10, p. 889-893 (1996).

- Sima O., “*Accurate calculation of total efficiency of Ge well-type detectors suitable for efficiency calibration using common standard sources*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume 450, Issue 1 (2000), 98-108.
- 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).
- Turhan, A. Zararsız, H. Yücel, “*Sample geometry and efficiency determination of bremsstrahlung radiation of Sr-90 on gamma detection systems*”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 269, No.1 (2006) 141–145.
- Tzika F., Stamatelatos I.E., “*Thermal neutron shelf-shielding correction factors for large sample instrumental NAA using the MCNP code*”, Nuclear Instruments and Methods B 213, 177-181 (2004).
- Vidmar T., “*EFFTRAN- A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry*”, Nuclear Instruments and Methods A 550 (2005), 603-608.
- Vidmar T., Korun M., Vodenik Br., “*A method for calculation of true coincidence summing correction factors for extended sources*”, Applied Radiation and Isotopes 65 (2007), 243-246.
- Vidmar T., Likar A., “*Calculation of total efficiencies of extended samples for HPGe detectors*”, Nuclear Instruments and Methods A 555 (2005) 251-254.
- Wang Z., Kahn B., and Valentine J.D, “*Efficiency Calculation and Coincidence Summing Correction of a Germanium Detector by Monte-Carlo Simulation*”, IEEE, p.1038 (2002).
- <http://www.canberra.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΚΩΔΙΚΑΣ PENMAIN

A.1 Αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN.

➤ **Αρχείο pm_material.dat**

Το αρχείο αυτό δημιουργείται μέσω της υπορουτίνας PEINIT (IWR=16). Περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για κάθε υλικό που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της προσομοίωσης. Αναφέρονται οι παράμετροι της προσομοίωσης, η πυκνότητα, ο αριθμός στοιχείων στο μόριο κάθε υλικού, ο ατομικός αριθμός, η μοριακή πυκνότητα ενώ παρατίθενται και μια σειρά πίνακες με τις διάφορες ιδιότητες κάθε υλικού.

➤ **Αρχείο pm_geometry.rep**

Το αρχείο αυτό δημιουργείται μέσω της υπορουτίνας GEOMIN και περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα της γεωμετρίας της κατασκευής όπως αυτά αναγράφονται στο αρχείο γεωμετρίας (τύπου .geo) που καθόρισε ο χρήστης.

➤ **Αρχείο pengeom_tree.rep**

Το αρχείο αυτό δημιουργείται μέσω της υπορουτίνας GEOMIN. Περιλαμβάνει το γενεαλογικό δέντρο των modules της κατασκευής και πληροφορίες σχετικά με τις πλεονάζουσες επιφάνειες.

➤ **Αρχείο psource.dat**

Το αρχείο αυτό δημιουργείται μόνο όταν η πηγή εκπέμπει σωματίδια με φάσμα ενεργειών. Το συγκεκριμένο αρχείο έχει 4 στήλες. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV) των εκπεμπόμενων σωματιδίων και η δεύτερη στην πιθανότητα εκπομπής σωματιδίων με αντίστοιχη ενέργεια (σε 1/eV). Στην τρίτη και τέταρτη στήλη καταγράφονται το άνω και κάτω όριο αντίστοιχα της πιθανότητας (σε eV/particle).

➤ **Αρχείο pm_energy_el_trans.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων από την κατασκευή ηλεκτρονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα εκπομπής ηλεκτρονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$). Στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_energy_el_back.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα ύπαρξης οπισθοσκεδαζόμενου ηλεκτρονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$). Στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_energy_ph_trans.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων από την κατασκευή φωτονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα εκπομπής φωτονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_energy_ph_back.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων φωτονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα ύπαρξης οπισθοσκεδαζόμενου φωτονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_energy_po_trans.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων από την κατασκευή ποζιτρονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα ύπαρξης εκπεμπομένου ποζιτρονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_energy_po_back.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων ποζιτρονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα ύπαρξης οπισθοσκεδαζόμενου ποζιτρονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_angle_el.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της γωνίας υπό την οποία τα ηλεκτρόνια εξέρχονται της κατασκευής. Η πρώτη και η δεύτερη στήλη αναφέρονται στις γωνίες εξόδου THETA και PHI αντίστοιχα (σε μοίρες). Η τρίτη στήλη αναφέρεται στην πιθανότητα ύπαρξης ηλεκτρονίου εξερχόμενου υπό τις αντίστοιχες γωνίες THETA και PHI (σε $1/\text{sr}$). Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_angle_ph.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της γωνίας υπό την οποία τα φωτόνια εξέρχονται της κατασκευής. Η πρώτη και η δεύτερη στήλη αναφέρονται στις γωνίες εξόδου THETA και PHI αντίστοιχα (σε μοίρες). Η τρίτη στήλη αναφέρεται στην πιθανότητα ύπαρξης φωτονίου εξερχόμενου υπό τις αντίστοιχες γωνίες THETA και PHI (σε $1/\text{sr}$). Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_angle_po.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της γωνίας υπό την οποία τα ποζιτρόνια εξέρχονται της κατασκευής. Η πρώτη και η δεύτερη στήλη αναφέρονται στις γωνίες εξόδου THETA και PHI αντίστοιχα (σε μοίρες). Η τρίτη στήλη αναφέρεται στην πιθανότητα ύπαρξης ποζιτρονίου εξερχόμενου υπό τις αντίστοιχες γωνίες THETA και PHI (σε $1/\text{sr}$). Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

➤ **Αρχείο pm_spc_impdet_[αριθμός ανιχνευτή].dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των σωματιδίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης στον οποίο αναφέρεται το αρχείο.

Μπορούν να υπάρχουν έως 5 τέτοια αρχεία που αντιστοιχούν σε 5 διαφορετικούς ανιχνευτές αλληλεπίδρασης. Ο αύξων αριθμός του αντίστοιχου ανιχνευτή υποδεικνύεται μέσα σε αγκύλες στον τίτλο του κάθε αρχείου. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα ύπαρξης σωματιδίου με την αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας (σε 3σ).

➤ **Αρχείο pm_depth_dose.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της δόσης του βάθους (ύψους της κατασκευής). Η πρώτη στήλη του συγκεκριμένου αρχείου αναφέρεται στο βάθος Z (σε cm) ενώ η δεύτερη στη δόση που αντιστοιχεί στη θέση με βάθος Z (σε $eV/(g/cm^2)$). Στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της δόσης (σε 3σ).

➤ **Αρχείο pm_psf_impdet_[αριθμός ανιχνευτή].dat**

Το αρχείο αυτό περιέχει τις τιμές των διαφόρων μεταβλητών των σωματιδίων όπως αυτές καταγράφηκαν τη στιγμή που τα σωματίδια εισέρχονταν στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης στον οποίο αναφέρεται το αρχείο. Το συγκεκριμένο αρχείο δημιουργείται μόνο όταν η μεταβλητή IPSF (στο αρχείο εισόδου) πάρει/έχει τις τιμές 1 ή -1. Μπορούν να υπάρχουν έως 5 τέτοια αρχεία που αντιστοιχούν σε 5 διαφορετικούς ανιχνευτές αλληλεπίδρασης. Ο αύξων αριθμός του αντίστοιχου ανιχνευτή υποδεικνύεται μέσα σε αγκύλες στον τίτλο του κάθε αρχείου. Οι μεταβλητές που περιέχονται είναι:

- Το είδος των σωματιδίων (KPAR)
- Η ενέργεια (E)
- Οι συντεταγμένες της θέσης (X, Y, Z)
- Τα συνημίτονα κατεύθυνσης (U, V, W)
- Ο παράγοντας βαρύτητας (WGHT)
- Το διάνυσμα ILB και
- Ο αριθμός προσαύξησης της ιστορίας (NSHI)

➤ **Αρχείο pm_3d_dose.dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η τρισδιάστατη (X-Y-Z) κατανομή της δόσης μέσα στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο (enclosure) που έχει καθορίσει ο χρήστης στο αρχείο

εισόδου (τύπου .in). Σε περίπτωση που δεν έχει καθοριστεί ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το αρχείο αυτό δεν δημιουργείται. Μέσα στο αρχείο αναφέρονται τα όρια του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου καθώς και το μέγεθος των καναλιών για την κάθε συντεταγμένη. Οι πρώτες 3 στήλες περιλαμβάνουν τους δείκτες των καναλιών για τις X, Y και Z συντεταγμένες αντίστοιχα. Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται η δόση που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη θέση (σε eV/g) και στην πέμπτη το μέγιστο πιθανό σφάλμα της δόσης (σε 3σ).

➤ **Αρχείο pm_2d_dose_[αριθμός καναλιού].dat**

Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η δισδιάστατη (X-Y) κατανομή της δόσης του κάθετου στον άξονα Z επιπέδου μέσα στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο (enclosure) που έχει καθορίσει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου (τύπου .in). Δημιουργούνται αρχεία ισάριθμα με τα κανάλια του Z άξονα, με κάθε αρχείο να αντιστοιχεί σε διαφορετικό επίπεδο. Σε περίπτωση που δεν έχει καθοριστεί το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το αρχείο αυτά δεν δημιουργούνται. Μέσα στο αρχείο καταγράφεται ο αύξων αριθμός του επιπέδου και το ύψος Z στο οποίο αντιστοιχεί. Οι πρώτες 3 στήλες περιλαμβάνουν τους δείκτες των καναλιών για τις X, Y και Z συντεταγμένες αντίστοιχα. Οι επόμενες 3 στήλες αναφέρονται στις συντεταγμένες X, Y και Z αντίστοιχα (σε cm). Στην έβδομη στήλη καταγράφεται η δόση που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη θέση (σε eV/g) και στην όγδοη το μέγιστο πιθανό σφάλμα της δόσης (σε 3σ).

➤ **Αρχείο dump1.dat**

Πρόκειται για το dump αρχείο της προσομοίωσης, το οποίο περιέχει σειρά αριθμών σε καθορισμένη μορφή καθώς και τον τίτλο της διαδικασίας. Οι αριθμοί αυτοί –αν και δεν ενδιαφέρουν άμεσα το χρήστη– είναι χρήσιμοι για τον κώδικα. Ουσιαστικά στο αρχείο dump καταχωρούνται, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, οι τρέχουσες τιμές των διαφόρων μεταβλητών. Σε περίπτωση που η προσομοίωση διακοπεί και επιθυμείται μετέπειτα η συνέχισή της από το σημείο που διακόπηκε, ο κώδικας θα διαβάσει από το αρχείο dump τις τιμές που είχαν οι μεταβλητές τη στιγμή της διακοπής. Ο τίτλος που αναγράφεται στο αρχείο αυτό θα πρέπει να είναι όμοιος με αυτόν που αναφέρεται στο αρχείο εισόδου. Αν δεν ισχύει κάτι τέτοιο, ο κώδικας εντοπίζει σφάλμα και τερματίζεται. Επισημαίνεται ότι σε περίπτωση διαγραφής από το χρήστη του αρχείου dump, ο κώδικας αδυνατεί να συνεχίσει την προσομοίωση

οπότε ξεκινά νέα προσομοίωση. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που ο χρήστης αλλάξει την ονομασία του αρχείου χωρίς να καταχωρήσει τη νέα ονομασία στο αρχείο εισόδου.

A.2 Πρόγραμμα γραφικής απεικόνισης Shower.

Πρόκειται για ανεξάρτητο βοηθητικό πρόγραμμα, το οποίο χρησιμοποιείται για τη γραφική απεικόνιση της προσομοίωσης φωτονίων και ηλεκτρονίων με την ύλη. Το πρόγραμμα Shower προσομοιώνει τη μεταφορά και την αλληλεπίδραση των σωματιδίων μιας δέσμης, η οποία προσπίπτει σε πλάκα από ορισμένο υλικό, και ταυτόχρονα εμφανίζει στην οθόνη γραφικά την κίνηση των πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται στη διάρκεια αλλά και μετά από κάθε αλληλεπίδραση.

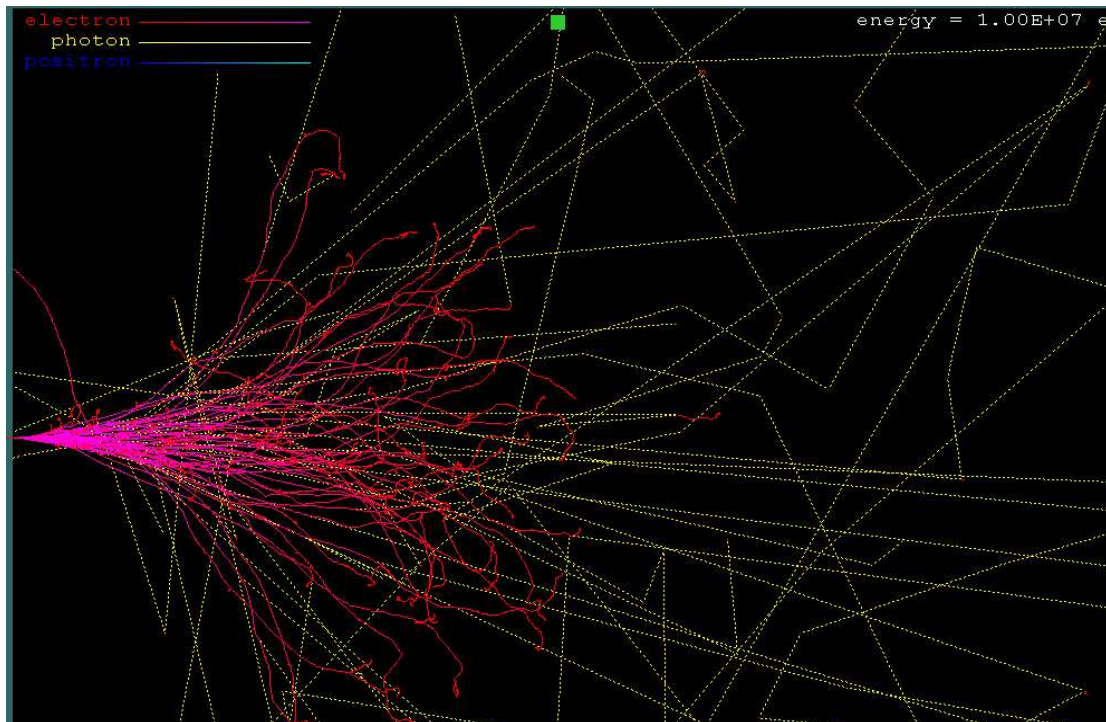
Επισημαίνεται ότι το πρόγραμμα Shower δεν είναι κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων προσομοίωσης αλληλεπιδράσεων, απλά παρέχει τη δυνατότητα εποπτικής παρουσίασης των αλληλεπιδράσεων, γεγονός που το καθιστά εξαιρετικά χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο.

Όπως και τα προγράμματα *gview2d* και *gview3d*, το πρόγραμμα Shower τρέχει μόνο στο λειτουργικό περιβάλλον Windows. Για την εκτέλεσή του απαιτείται η μεταφορά του εκτελέσιμου αρχείου *shower.exe* στον κατάλογο *pendbase*, όπου βρίσκονται όλα τα αρχεία δεδομένων για τα διάφορα υλικά.

Μέσω παραθύρου διαλόγου, που ανοίγει κατά την εκτέλεση του προγράμματος, ο χρήστης καλείται να καθορίσει παραμέτρους όπως:

- Το είδος των πρωτογενών σωματιδίων της δέσμης (1=ηλεκτρόνια, 2=φωτόνια, 3=ποζιτρόνια)
- Την αρχική ενέργεια των σωματιδίων (σε eV)
- Την ενέργεια απορρόφησης (cut-off energy) των ηλεκτρονίων (σε eV)
- Την ενέργεια απορρόφησης (cut-off energy) των φωτονίων (σε eV)
- Το πλήθος των ιστοριών που θα προσομοιωθούν (έως 50)
- Το υλικό της πλάκας (κωδικός αριθμός υλικού)
- Το πάχος της πλάκας (σε cm). Σημειώνεται ότι για τη γραφική απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων θεωρείται ότι η οθόνη του H/Y έχει πλάτος ίσο με το πάχος της πλάκας.

Στο σχήμα A.1 παρατίθεται η απεικόνιση στην οθόνη του H/Y της αλληλεπίδρασης δέσμης ηλεκτρονίων αρχικής ενέργειας 10^7 eV με πλάκα υλικού Triethyl phosphate (κωδικός 270) πάχους 10cm. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι ενέργειες απορρόφησης ηλεκτρονίων και φωτονίων είναι ίσες με 10^4 eV και τα αρχικά σωματίδια της δέσμης 50.



Σχήμα A.1. Γραφική απεικόνιση προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης δέσμης ηλεκτρονίων με πλάκα υλικού Triethyl phosphate με το πρόγραμμα Shower

A.3 Βιβλιοθήκες δεδομένων.

Οι ενεργές διατομές φωτονίων και ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούνται στον κώδικα προέρχονται από βιβλιοθήκες δεδομένων οι οποίες περιέχονται σε 767 αρχεία ASCII. Στα αρχεία αυτά είναι καταχωρημένες πληροφορίες για 280 συνολικά προκαθορισμένα υλικά, που έχουν προκύψει από τη βάση δεδομένων του προγράμματος ESTAR του Berger (1992). Τα πρώτα 99 υλικά του πίνακα αντιστοιχούν στα στοιχεία με ατομικό αριθμό $Z=1-99$, αυξανόμενου του ατομικού αριθμού Z . Στις θέσεις με αύξοντα αριθμό 100-280 του πίνακα βρίσκονται μείγματα

που αντιπροσωπεύουν τα υλικά που συναντώνται συνήθως σε κατασκευές, ταξινομημένα κατ'αλφαβητική σειρά. Σημειώνεται ότι ο κώδικας PENELOPE δε λειτουργεί για στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του $Z=99$. Εκτός από τις ενεργές διατομές, οι βιβλιοθήκες περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη σύσταση και την πυκνότητα των υλικών, καθώς και άλλα πυρηνικά δεδομένα όπως είναι οι ενέργειες ιονισμού, διαγράμματα μεταπτώσεων και παράμετροι για τα φάσματα εκπομπής σωματιδίων (Salvat F. Et al, 2006).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – 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 cm²
 Distance from window 5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage +1.3000 Vdc.
 Recommended Bias Voltage +1.3000 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 ⁵⁷	Co ⁶⁰			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	0.85	1.78			
FWTM (keV)	1.61	3.26			
Peak/Compton		66.5:1			
Efficiency (%)		33.8%			

Πίνακας Β.1 Πιστοποιητικό ανιχνευτή HPGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ



Certificate of measurement of
radioactive gamma reference source

TA 6412

Description Principal radionuclide: Barium-133 Product code: BDR.121
Source number: 7R192

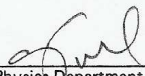
Measurement Reference time: 1200 GMT on 1st January 1981
Activity of the principal radionuclide: 1.149 microcuries
Recommended half-life: 10.8 years
Method of measurement:
The source was measured using equipment calibrated directly or indirectly with similar sources prepared from a series of absolutely standardized solutions.

Accuracy The OVERALL UNCERTAINTY in the activity quoted above for the principal radionuclide was estimated to be less than $\pm 7.0\%$

This estimate of uncertainty was calculated in accordance with the recommendations of the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU Report 12). The limits of uncertainty were taken as the arithmetic sum of the uncertainty due to random variations, calculated at the 99.7% confidence level, and the estimated systematic uncertainties in the measurement.

Remarks Tests for leakage and surface contamination have been carried out with satisfactory results.
Further information about this source including details of its construction, purity of the radionuclide, recommended nuclear data and half-life is given in the data sheet accompanying the source.

Approved


Physics Department


for Managing Director

The Radiochemical
Centre Ltd
registered England

registered office: White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire

telephone: Little Chalfont
(024 04)
4444

cables: Activity
Amersham

telex: 83141

Πίνακας Β.2 Πιστοποιητικό πηγής ¹³³Ba



**Certificate of measurement of
radioactive gamma reference source**

TA 6421

Description Principal radionuclide: Cobalt-60 Product code: CKR.151
Source number: 1U557

Measurement Reference time: 1200 GMT on 1st February 1981
Activity of the principal radionuclide: 11.91 microcuries
Recommended half-life: 5.27 years
Method of measurement:
The source was measured using equipment calibrated directly or indirectly with similar sources prepared from a series of absolutely standardized solutions.

Accuracy The OVERALL UNCERTAINTY in the activity quoted above for the principal radionuclide was estimated to be less than $\pm 1.9\%$

This estimate of uncertainty was calculated in accordance with the recommendations of the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU Report 12). The limits of uncertainty were taken as the arithmetic sum of the uncertainty due to random variations, calculated at the 99.7% confidence level, and the estimated systematic uncertainties in the measurement.

Remarks Tests for leakage and surface contamination have been carried out with satisfactory results.
Further information about this source including details of its construction, purity of the radionuclide, recommended nuclear data and half-life is given in the data sheet accompanying the source.

Approved


Physics Department


for Managing Director

The Radiochemical
Centre Ltd
registered England
1002610

registered office: White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire
HP7 011
telephone: Little Chalfont
(024 04)
4444

cables: Activity
Amersham
telex: 83141

Πίνακας Β.3 Πιστοποιητικό πηγής ^{60}Co



**Certificate of measurement of
radioactive gamma reference source**

TA 6424

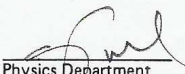
Description	Principal radionuclide:	Caesium-137	Product code:	CDR.121
			Source number:	7S266
Measurement	Reference time:	1200 GMT on 1st January 1981		
	Activity of the principal radionuclide:	0.993	microcuries	
	Recommended half-life:	30.17	years	
	Method of measurement:	The source was measured using equipment calibrated directly or indirectly with similar sources prepared from a series of absolutely standardized solutions.		

Accuracy The OVERALL UNCERTAINTY in the activity quoted above for the principal radionuclide was estimated to be less than $\pm 6.0\%$

This estimate of uncertainty was calculated in accordance with the recommendations of the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU Report 12). The limits of uncertainty were taken as the arithmetic sum of the uncertainty due to random variations, calculated at the 99.7% confidence level, and the estimated systematic uncertainties in the measurement.

Remarks Tests for leakage and surface contamination have been carried out with satisfactory results. Further information about this source including details of its construction, purity of the radionuclide, recommended nuclear data and half-life is given in the data sheet accompanying the source.

Approved


Physics Department


for Managing Director

The Radiochemical
Centre Ltd
registered England

registered office:
White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire
4444

telephone:
Little Chalfont
(024 04)
4444

cables:
Activity
Amersham

telex:
83141

Πίνακας Β.4 Πιστοποιητικό πηγής ¹³⁷Cs



International Atomic Energy Agency
Analytical Quality Control Services
Wagramer Strasse 5, P.O.Box 100, A-1400 Vienna, Austria

REFERENCE SHEET

REFERENCE MATERIAL

IAEA-327

RADIONUCLIDES IN SOIL

Date of issue: April 2001[Ⓞ]

Recommended Values
(Based on dry weight)

Reference Date for decay correction: 31st December 1994

Radionuclide	Recommended Value Bq/kg	95% Confidence Interval Bq/kg	N*
⁴⁰ K	621	612 – 630	143
⁹⁰ Sr	2.37	2.23 – 2.51	30
¹³⁷ Cs	24.9	24.6 – 25.2	152
²¹⁰ Pb	58.8	53.9 – 63.7	26
²²⁶ Ra	34.1	32.7 – 35.5	56
²²⁸ Ra	38.7	37.8 – 39.6	109
²²⁸ Th	38.2	37.2 – 39.2	56
²³⁰ Th	34.1	32.4 – 35.8	10
²³² Th	38.7	37.2 – 40.2	22
²³⁴ U [#]	31.9	30.4 – 33.4	32
²³⁸ U	32.8	31.4 – 34.2	32
²³⁸ Pu	0.020	0.018 – 0.022	20
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	0.58	0.56 – 0.60	51

* Number of accepted laboratory means which were used to calculate the recommended values and confidence intervals.

The recommended value for ²³⁴U was calculated from the ²³⁸U recommended activity concentration in combination with the median of the ²³⁴U/²³⁸U activity ratio calculated from participants results.

Ⓞ Revision of the original reference sheet dated May 2000.

Πίνακας Β.5 Πιστοποιητικό πηγής ΙΑΕΑ-327

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

Στο παρόν παράρτημα περιγράφεται η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών, ο υπολογισμός δηλαδή του σταθμισμένου μέσου των τιμών αυτών και της αντίστοιχης αβεβαιότητας, ο οποίος βασίζεται στη μεθοδολογία που προτείνεται στη βιβλιογραφία (Gilmore & Hemingway, 1995).

Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν

$$x_1 \pm \delta x_1, x_2 \pm \delta x_2, \dots, x_i \pm \delta x_i$$

όπου

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

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

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή των x_i . Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά σωστός ο απλοϊκός αυτός υπολογισμός, καθώς λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξαρτήτως του αν αυτές συνοδεύονται από μικρό ή μεγαλύτερο σφάλμα. Η ορθή διαδικασία είναι ο υπολογισμός του «σταθμισμένου» μέσου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i} \quad (\Gamma.1)$$

όπου

w_i : συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της

απόκλισης της κάθε τιμής, δηλαδή $w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2}$.

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

$$\text{var}(x) = \frac{1}{\sum w_i} \quad (\Gamma.2)$$

η οποία ονομάζεται και «εσωτερική διακύμανση» (internal variance), διότι λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες των τιμών.

Διαφορετικά, αν συνυπολογιστεί και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η «εξωτερική διακύμανση», η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\text{var}(x) = \frac{\sum [x_i - \bar{x}]^2 w_i}{\sum w_i} \quad (\Gamma.3)$$

Ανάμεσα στις δύο, επιλέγεται η αβεβαιότητα με τη μεγαλύτερη τιμή, ώστε να αποφεύγεται υποεκτίμηση του σφάλματος. Η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος περιλαμβάνει τελικά το σταθμισμένο μέσο και την αντίστοιχη αβεβαιότητα

$$\bar{x} \pm \text{var}(x) \quad (\Gamma.4)$$

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος και η αβεβαιότητα δέσμης τιμών στα πλαίσια της Δ.Ε.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ-
ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ TrueCoinc**

```

4 661.66 10957.5 12968.9 12949.2 1.069E-02 +- .35 1.042E-02 2.6
5 898.07 106.6 33734.2 28860.4 8.093E-03 +- .22 8.231E-03 -1.7
6 1173.24 1925.2 18405.9 18247.5 6.643E-03 +- .33 6.701E-03 -.9
7 1332.50 1925.2 18422.1 18263.6 6.024E-03 +- .34 6.077E-03 -.9
8 1836.08 106.6 35661.7 30509.5 4.807E-03 +- .25 4.753E-03 1.1

Efficiency Regression Analysis Results
( +- indicate standard error )
Constant : 5.616802E-01 +- 8.310120E-01 or 147.95 % - Student : .68
1st order : -8.069804E-01 +- 2.543549E-01 or 31.52 % - Student : 3.17
2nd order : 2.726993E-03 +- 1.933276E-02 or 708.94 % - Student : .14
Correlation coef.: .9995 R.M.S. (%) : .387 - 1.791

Final results of high energy region efficiency calibration
on : 25-Mar-03 at : 10:35

ln(eff) = 5.616801E-01 -8.069804E-01 *ln(E) +2.726994E-03 *ln(E)**2

Calibration results :
Efficiency Calibration Date : 25-Mar-03 Time : 10:35

Detector : 2 - Ge
MCA type : 1 - Jupiter 8671
Region : 3 4096
Geometry : 2 Description : Q1222A - 282 cc cyl. plastic b
Sample Volume : 1.00 gr
Geometry Volume : 282.00 cm**3

Medium Energy Region Efficiency Coefficients :
ln(eff) = -2.283672E+01 +7.758976E+00 *ln(E) -7.806894E-01 *ln(E)**2

Midpoint Energy : 279.19 keV
Midpoint Effic. (Med-High): 2.031E-02 - 2.022E-02 Diff.: .4 %

High Energy Region Efficiency Coefficients :
ln(eff) = 5.616801E-01 -8.069804E-01 *ln(E) +2.726994E-03 *ln(E)**2

** Efficiency calibration data for detector 2 saved ***

```

Πίνακας Δ.1 Αρχική καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή HPGe

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{109}Cd EC/B+ 462.9 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	2.634	0.18	17.8	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
2	2.806	7.19E-2	15.6	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
3	2.978	0.50	15.6	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
4	2.984	4.46	16.2	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
5	3.151	1.96	15.1	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
6	3.203	0.35	25.1	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
7	3.234	0.54	24.7	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
8	3.256	2.97E-2	16.2	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
9	3.348	0.57	16.6	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
10	3.520	0.20	15.5	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
11	3.743	6.78E-2	29.4	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
12	3.750	0.11	23.7	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
13	21.708	1.22E-3	4.0	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
14	21.990	29.58	2.8	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
15	22.163	55.74	2.8	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
16	24.912	4.76	2.8	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
17	24.943	9.19	2.7	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
18	25.144	6.68E-2	4.5	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
19	25.455	2.29	2.6	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
20	25.511	8.55E-3	42.8	0.998	0.998	1.000	Ag X EC 463 D
21	88.000	3.61	2.7	0.999	0.999	1.000	^{109}Cd EC 463 D g

Πίνακας Δ.2 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc
(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{57}Co EC/B+ 271.79 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	0.615	6.79E-2	27.5	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
2	0.628	4.70E-2	25.0	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
3	0.704	0.56	24.4	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
4	0.704	6.27E-2	24.5	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
5	0.708	3.73E-3	27.2	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
6	0.717	0.41	23.9	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
7	0.792	3.17E-2	30.9	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
8	0.792	1.99E-2	30.1	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
9	6.391	16.45	4.9	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
10	6.404	32.58	4.4	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
11	7.058	3.87	4.5	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
12	7.058	1.98	4.8	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
13	7.108	2.04E-3	5.5	0.950	0.950	1.000	Fe X EC 272 D
14	14.400	9.16	1.6	0.948	0.948	1.000	^{57}Co EC 272 D g
15	122.0	85.60	0.1	1.000	1.000	1.000	^{57}Co EC 272 D g
16	136.4	10.70	0.7	1.000	1.000	1.000	^{57}Co EC 272 D g
17	230.4	4.00E-4	10.0	0.895	0.895	1.000	^{57}Co EC 272 D g
18	339.6	3.90E-3	7.6	0.939	0.939	1.000	^{57}Co EC 272 D g
19	352.3	3.20E-3	9.3	0.947	0.943	1.004	^{57}Co EC 272 D g
20	366.8	1.30E-3	23.0	0.944	0.943	1.001	^{57}Co EC 272 D g
21	570.0	1.70E-2	5.8	0.949	0.948	1.001	^{57}Co EC 272 D g
22	692.4	0.15	6.0	1.004	1.000	1.004	^{57}Co EC 272 D g
23	706.5	5.30E-3	9.4	1.016	1.000	1.016	^{57}Co EC 272 D g

Πίνακας Δ.3 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc
 (Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{139}Ce EC/B+ 137.64 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	4.121	0.16	13.1	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
2	4.529	6.66E-2	9.6	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
3	4.634	0.43	10.5	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
4	4.651	3.92	11.7	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
5	5.042	2.37	11.5	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
6	5.062	0.10	19.3	0.972	0.972	1.000	La X EC 138 D
7	5.143	0.17	20.8	0.972	0.972	1.000	La X EC 138 D
8	5.212	3.28E-2	11.2	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
9	5.384	0.82	11.0	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
10	5.483	8.29E-3	10.0	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
11	5.792	0.35	10.2	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
12	5.891	3.83E-3	11.8	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
13	6.060	2.87E-2	20.4	0.972	0.972	1.000	La X EC 138 D
14	6.075	4.14E-2	20.7	0.972	0.972	1.000	La X EC 138 D
15	32.658	3.35E-3	3.2	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
16	33.034	23.10	2.3	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
17	33.442	42.07	2.3	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
18	37.720	4.05	2.2	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
19	37.801	7.82	2.1	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
20	38.085	9.43E-2	3.8	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
21	38.726	2.52	2.1	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
22	38.826	2.24E-2	48.0	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
23	38.910	0.40	11.1	0.958	0.958	1.000	La X EC 138 D
24	165.8	79.90	1.7E-20.996	0.996	1.000	139Ce EC 138 D g	

Πίνακας Δ.4 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc
(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{203}Hg B- 46.612 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	8.953	0.11	9.2	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
2	10.172	0.24	4.1	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
3	10.268	2.15	4.4	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
4	10.994	2.77E-2	5.3	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
5	11.812	3.30E-2	4.2	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
6	11.931	0.15	14.0	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
7	12.213	1.22	5.0	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
8	12.261	0.53	4.7	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
9	12.390	0.18	15.8	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
10	12.643	6.29E-2	4.2	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
11	14.291	0.25	5.9	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
12	14.625	5.03E-2	15.8	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
13	14.683	4.13E-2	10.5	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
14	14.738	6.48E-2	16.0	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
15	70.184	5.13E-3	3.0	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
16	70.832	3.58	2.1	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
17	72.873	6.01	1.9	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
18	82.115	0.72	1.9	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
19	82.574	1.39	2.0	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
20	83.093	3.93E-2	3.9	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
21	84.865	0.50	2.0	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
22	85.134	1.17E-2	44.4	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
23	85.444	8.71E-2	10.4	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
24	85.530	7.67E-4	10.1	1.000	1.000	1.000	TI X B- 46.6 D
25	279.2	81.50	0.1	1.000	1.000	1.000	203Hg B- 46.6 D g

Πίνακας Δ.5 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc

(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{113}Sn EC/B+ 115.09 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	2.905	0.14	17.3	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
2	3.112	6.65E-2	16.1	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
3	3.279	0.40	16.5	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
4	3.287	3.65	14.7	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
5	3.487	1.93	15.3	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
6	3.535	0.15	25.0	0.974	0.974	1.000	In X EC 115 D
7	3.573	0.24	24.7	0.974	0.974	1.000	In X EC 115 D
8	3.608	2.48E-2	16.4	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
9	3.714	0.56	16.5	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
10	3.922	0.21	16.5	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
11	4.160	3.22E-2	29.0	0.974	0.974	1.000	In X EC 115 D
12	4.160	5.36E-2	27.6	0.974	0.974	1.000	In X EC 115 D
13	23.702	1.53E-3	3.7	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
14	24.002	27.77	2.8	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
15	24.210	51.35	2.8	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
16	27.238	4.61	2.9	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
17	27.276	8.89	2.8	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
18	27.493	7.36E-2	4.6	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
19	27.863	2.36	2.8	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
20	27.924	1.13E-2	50.0	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
21	27.939	1.92E-2	10.5	0.972	0.972	1.000	In X EC 115 D
22	255.0	1.82	4.4	0.998	0.998	1.000	113Sn EC 115 D g
23	382.9	6.40E-5	3.1	0.941	0.941	1.000	113Sn EC 115 D g
24	391.6	64.00	3.1	0.998	0.998	1.000	113Sn EC 115 D g
25	638.0	9.54E-4	5.0	1.002	1.000	1.002	113Sn EC 115 D g
26	646.8	3.84E-6	5.8	0.998	0.998	1.000	113Sn EC 115 D g

Πίνακας Δ.6 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc
(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{85}Sr EC/B+ 64.84 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	1.482	6.75E-2	21.2	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
2	1.542	3.87E-2	25.5	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
3	1.693	0.15	20.2	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
4	1.694	1.31	22.9	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
5	1.752	0.74	25.2	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
6	1.775	6.95E-3	20.4	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
7	1.818	3.77E-2	31.5	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
8	1.827	5.48E-2	29.1	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
9	2.050	3.88E-3	30.6	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
10	2.051	1.01E-2	30.3	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
11	13.336	17.97	3.5	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
12	13.395	34.67	3.6	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
13	14.952	2.53	3.5	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
14	14.961	4.91	3.5	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
15	15.089	1.69E-2	4.8	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
16	15.185	0.77	3.5	0.953	0.953	1.000	Rb X EC 64.8 D
17	129.8	4.80E-4	4.1	0.940	0.940	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
18	151.1	1.15E-3	75.2	0.949	0.949	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
19	354.0	4.80E-5	40.2	0.949	0.949	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
20	362.8	9.60E-4	4.1	0.940	0.940	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
21	514.0	95.70	4.1	1.000	1.000	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
22	716.8	3.07E-4	40.2	0.940	0.940	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
23	868.0	1.20E-2	5.7	1.001	1.000	1.001	^{85}Sr EC 64.8 D g
24	951.0	2.88E-5	4.1	1.000	1.000	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g

Πίνακας Δ.7 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc
(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{137}Cs B- 30.07 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	3.954	1.36E-2	13.3	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
2	4.331	5.96E-3	10.1	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
3	4.451	3.77E-2	11.6	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
4	4.466	0.34	10.5	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
5	4.828	0.21	10.1	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
6	4.852	2.60E-2	20.0	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
7	4.927	4.48E-2	19.4	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
8	4.994	2.85E-3	12.1	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
9	5.156	7.06E-2	11.3	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
10	5.531	3.06E-2	11.0	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
11	5.797	7.59E-3	20.3	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
12	5.809	1.06E-2	21.0	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
13	31.452	2.55E-4	3.2	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
14	31.817	1.96	2.3	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
15	32.194	3.57	2.3	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
16	36.304	0.34	2.2	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
17	36.378	0.66	2.2	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
18	36.652	7.65E-3	4.0	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
19	37.255	0.20	2.1	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
20	37.349	1.76E-3	47.8	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
21	37.425	3.06E-2	10.0	1.000	1.000	1.000	Ba X B- 30.1 Y
22	661.6	85.10	0.2	1.000	1.000	1.000	^{137}Cs B- 30.1 Y g

Πίνακας Δ.8 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc
(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{88}Y

EC/B+ 106.65 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	1.582	6.62E-2	21.8	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
2	1.649	3.78E-2	25.1	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
3	1.805	0.15	19.0	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
4	1.806	1.34	21.7	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
5	1.872	0.76	24.6	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
6	1.902	7.58E-3	20.3	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
7	1.936	3.78E-2	29.8	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
8	1.947	5.49E-2	31.0	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
9	2.196	4.63E-3	30.7	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
10	2.196	1.04E-2	30.8	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
11	14.098	17.64	3.4	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
12	14.165	33.99	3.5	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
13	15.825	2.52	3.4	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
14	15.836	4.89	3.5	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
15	15.971	1.86E-2	5.1	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
16	16.085	0.86	4.0	0.965	0.965	1.000	Sr X EC 107 D
17	850.6	6.55E-2	19.6	0.920	0.920	1.000	88Y EC 107 D g
18	898.0	93.70	0.3	0.962	0.962	1.000	88Y EC 107 D g
19	1382.2	2.08E-2	28.6	0.962	0.962	1.000	88Y EC 107 D g
20	1836.1	99.20	0.3	0.957	0.957	1.000	88Y EC 107 D g
21	2686.7	7.32E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
22	2734.0	0.71	9.7	2.449	1.000	2.449	88Y EC 107 D g
23	3219.7	7.05E-3	28.0	1.027	1.000	1.027	88Y EC 107 D g

Πίνακας Δ.9 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc

(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{60}Co

B- 5.2704 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	346.9	7.60E-3	6.5	0.922	0.922	1.000	^{60}Co B- 5.27 Y g
2	826.2	7.60E-3	10.5	0.918	0.918	1.000	^{60}Co B- 5.27 Y g
3	1173.2	99.90	2.0E-20	0.959	0.959	1.000	^{60}Co B- 5.27 Y g
4	1332.5	100.00	1.0E-20	0.958	0.958	1.000	^{60}Co B- 5.27 Y g
5	1679.5	1.34E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
6	2158.8	1.11E-3	16.2	1.044	0.956	1.091	^{60}Co B- 5.27 Y g
7	2505.0	2.00E-6	20.0	5.334E-1	1.000	5.334E-1	^{60}Co B- 5.27 Y g

Πίνακας Δ.10 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc (Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Energy (keV)	Experimental Efficiency	TCC Factors	New Experimental Efficiency	ln(E)	ln(eff_old)	ln(eff_new)	
88.03	2.336E-02	0.999	2.3383E-02	4.477678	-3.75673	-3.75573	
122.06	2.869E-02	1.000	2.8690E-02	4.804513	-3.551207	-3.551207	
165.85	2.740E-02	0.996	2.7510E-02	5.111084	-3.597212	-3.593204	
279.19	2.032E-02	1.000	2.0320E-02	5.631893	-3.89615	-3.89615	
Energy (keV)	Experimental Efficiency	TCC Factors	New Experimental Efficiency	ln(E)	ln(eff_old)	ln(eff_new)	
279.19	2.032E-02	1.000	2.0320E-02	5.631893	-3.89615	-3.89615	
391.69	1.539E-02	0.998	1.5421E-02	5.970471	-4.174037	-4.172035	
514	1.281E-02	1.000	1.2810E-02	6.242223	-4.357529	-4.357529	
661.66	1.069E-02	1.000	1.0690E-02	6.494752	-4.538447	-4.538447	
898.07	8.093E-03	0.962	8.4127E-03	6.800248	-4.816756	-4.778015	
1173.24	6.643E-03	0.959	6.9270E-03	7.067524	-5.014192	-4.972327	
1332.5	6.024E-03	0.958	6.2881E-03	7.194812	-5.112004	-5.069096	
1836.08	4.807E-03	0.957	5.0230E-03	7.515388	-5.337682	-5.29373	
Old Calibration - High Energy				New Calibration - High Energy			
a0	5.62E-01			a0			
a1	-8.07E-01 *ln(E)			a1	*ln(E)		
a2	2.73E-03 *ln(E)^2			a2	*ln(E)^2	Από SPUNAL	
New to Old Ratio High Energy							
Energy	ln(E)	Efficiency New	Efficiency Old	Old to New Ratio			
	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!			

Πίνακας Δ.11 Διόρθωση καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή HPGe (Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

III. High Energy Region Efficiency Calibration Results
 (+- indicate 90% relative (%) error)

	Energy (keV)	H.Life (d)	Nominal Activity (gps)	Decayed Activity (gps)	E f f i e n c y		Dif. (%)
					Experimental	Fitted	
1	279.19				2.032E-02	2.021E-02	0.5
2	391.69				1.542E-02	1.565E-02	-1.4
3	514.00				1.281E-02	1.276E-02	0.4
4	661.66				1.069E-02	1.057E-02	1.1
5	898.07				8.413E-03	8.435E-03	-0.3
6	1173.24				6.927E-03	6.934E-03	-0.1
7	1332.50				6.288E-03	6.319E-03	-0.5
8	1836.08				5.023E-03	5.009E-03	0.3

Efficiency Regression Analysis Results
 (+- indicate standard error)

Constant : 7.073764E-01 +- 4.244639E-01 or 60.01 % - Student : 1.67
 1st order : -8.765375E-01 +- 1.299193E-01 or 14.82 % - Student : 6.75
 2nd order : 1.033479E-02 +- 9.874779E-03 or 95.55 % - Student : 1.05
 Correlation coef.: 0.9999 R.M.S. (%) : 0.211 - 0.910

Final results of high energy region efficiency calibration
 on : 30-Jun-08 at : 16:08:03

$$\ln(\text{eff}) = 7.073764E-01 - 8.765375E-01 * \ln(E) + 1.033479E-02 * \ln(E)**2$$

Calibration results :

Efficiency Calibration Date : 30-Jun-08

Time : 16:08:03

Detector : 2 - Ge

MCA type : 9 - Genie

Region : 3 4096

Geometry : 2

Sample Volume : 282.00 cm**3 Description : T.C.C. Vas - 282 cc cyl. plastic box

Πίνακας Δ.12 Διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή HPGe
(Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

^{134}Cs B- 2.0648 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	Eff	TotEff	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	3.954	1.62E-3	13.2	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLI B- 2.06 Y
2	4.331	7.04E-4	10.1	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLh B- 2.06 Y
3	4.451	4.47E-3	11.5	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLa2 B- 2.06 Y
4	4.466	4.07E-2	10.3	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLa1 B- 2.06 Y
5	4.828	2.48E-2	10.1	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLb1 B- 2.06 Y
6	4.852	2.61E-3	20.0	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLb4 B- 2.06 Y
7	4.927	4.49E-3	19.5	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLb3 B- 2.06 Y
8	4.994	3.37E-4	12.1	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLb6 B- 2.06 Y
9	5.156	8.36E-3	11.1	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLb2,15 B- 2.06 Y
10	5.531	3.62E-3	11.0	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLg1 B- 2.06 Y
11	5.797	7.61E-4	20.3	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLg2 B- 2.06 Y
12	5.809	1.07E-3	21.0	0.934	0.00	0.00	0.934	1.000	Ba XLg3 B- 2.06 Y
13	31.452	3.08E-5	3.2	0.934	4.62E-3	4.27E-3	0.934	1.000	Ba XKa3 B- 2.06 Y
14	31.817	0.23	2.3	0.934	4.75E-3	4.41E-3	0.934	1.000	Ba XKa2 B- 2.06 Y
15	32.194	0.43	2.3	0.934	4.89E-3	4.57E-3	0.934	1.000	Ba XKa1 B- 2.06 Y
16	36.304	4.13E-2	2.2	0.934	6.41E-3	6.38E-3	0.934	1.000	Ba XKb3 B- 2.06 Y
17	36.378	7.98E-2	2.2	0.934	6.44E-3	6.42E-3	0.934	1.000	Ba XKb1 B- 2.06 Y
18	36.652	9.24E-4	4.0	0.934	6.55E-3	6.55E-3	0.934	1.000	Ba XKb5 B- 2.06 Y
19	37.255	2.52E-2	2.1	0.934	6.78E-3	6.84E-3	0.934	1.000	Ba XKb2 B- 2.06 Y
20	37.349	2.12E-4	47.8	0.934	6.81E-3	6.89E-3	0.934	1.000	Ba XKb4 B- 2.06 Y
21	37.425	3.69E-3	10.0	0.934	6.84E-3	6.92E-3	0.934	1.000	Ba XK02,3 B- 2.06 Y
22	232.6	1.10E-3	1.0E-40	0.904	2.38E-2	6.30E-2	0.904	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
23	242.7	2.72E-2	11.0	0.906	2.30E-2	6.23E-2	0.906	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
24	326.5	1.62E-2	6.1	0.882	1.80E-2	5.67E-2	0.882	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
25	475.3	1.49	0.6	0.912	1.35E-2	5.21E-2	0.912	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
26	563.2	8.35	0.4	0.906	1.19E-2	5.02E-2	0.906	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
27	569.3	15.40	0.3	0.906	1.18E-2	5.00E-2	0.906	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
28	604.7	97.60	3.0E-20	0.942	1.13E-2	4.94E-2	0.942	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
29	795.8	85.50	4.6E-20	0.942	9.22E-3	4.66E-2	0.942	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
30	801.9	8.69	0.4	0.912	9.17E-3	4.65E-2	0.912	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
31	847.4	7.83E-4	0.0	1.000	8.80E-3	4.59E-2	1.000	1.000	alias
32	889.9	1.92E-4	0.0	1.000	8.49E-3	4.55E-2	1.000	1.000	alias
33	931.3	3.48E-4	0.0	1.000	8.21E-3	4.50E-2	1.000	1.000	alias
34	1038.6	0.98	0.4	0.975	7.58E-3	4.40E-2	0.950	1.026	^{134}Cs B- 2.06 Y g
35	1080.0	2.44E-2	0.0	1.000	7.37E-3	4.37E-2	1.000	1.000	alias
36	1168.0	1.79	0.3	1.040	6.96E-3	4.30E-2	0.953	1.091	^{134}Cs B- 2.06 Y g
37	1174.0	0.28	0.0	1.000	6.93E-3	4.29E-2	1.000	1.000	alias
38	1365.2	3.01	0.3	1.073	6.21E-3	4.16E-2	0.950	1.129	^{134}Cs B- 2.06 Y g
39	1406.6	0.11	0.0	1.000	6.08E-3	4.14E-2	1.000	1.000	alias

Πίνακας Δ.13 Συντελεστές διόρθωσης για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc (Διόρθωση Χωρίς Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
							^{109}Cd EC/B+ 462.9 D
1	2.634	0.18	17.8	0.998	0.998	1.000	Ag XLI EC 463 D
2	2.806	7.19E-2	15.6	0.998	0.998	1.000	Ag XLh EC 463 D
3	2.978	0.50	15.6	0.998	0.998	1.000	Ag XLa2 EC 463 D
4	2.984	4.46	16.2	0.998	0.998	1.000	Ag XLa1 EC 463 D
5	3.151	1.96	15.1	0.998	0.998	1.000	Ag XLb1 EC 463 D
6	3.203	0.35	25.1	0.998	0.998	1.000	Ag XLb4 EC 463 D
7	3.234	0.54	24.7	0.998	0.998	1.000	Ag XLb3 EC 463 D
8	3.256	2.97E-2	16.2	0.998	0.998	1.000	Ag XLb6 EC 463 D
9	3.348	0.57	16.6	0.998	0.998	1.000	Ag XLb2,15 EC 463 D
10	3.520	0.20	15.5	0.998	0.998	1.000	Ag XLg1 EC 463 D
11	3.743	6.78E-2	29.4	0.998	0.998	1.000	Ag XLg2 EC 463 D
12	3.750	0.11	23.7	0.998	0.998	1.000	Ag XLg3 EC 463 D
13	21.708	1.22E-3	4.0	0.997	0.997	1.000	Ag XKa3 EC 463 D
14	21.990	29.58	2.8	0.997	0.997	1.000	Ag XKa2 EC 463 D
15	22.163	55.74	2.8	0.997	0.997	1.000	Ag XKa1 EC 463 D
16	24.912	4.76	2.8	0.997	0.997	1.000	Ag XKb3 EC 463 D
17	24.943	9.19	2.7	0.997	0.997	1.000	Ag XKb1 EC 463 D
18	25.144	6.68E-2	4.5	0.997	0.997	1.000	Ag XKb5 EC 463 D
19	25.455	2.29	2.6	0.997	0.997	1.000	Ag XKb2 EC 463 D
20	25.511	8.55E-3	42.8	0.997	0.997	1.000	Ag XKb4 EC 463 D
21	88.000	3.61	2.7	0.998	0.998	1.000	109Cd EC 463 D g

Πίνακας Δ.14 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{57}Co

EC/B+ 271.79 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	0.615	6.79E-2	27.5	0.941	0.941	1.000	Fe XLI EC 272 D
2	0.628	4.70E-2	25.0	0.941	0.941	1.000	Fe XLh EC 272 D
3	0.704	0.56	24.4	0.941	0.941	1.000	Fe XLa1 EC 272 D
4	0.704	6.27E-2	24.5	0.941	0.941	1.000	Fe XLa2 EC 272 D
5	0.708	3.73E-3	27.2	0.941	0.941	1.000	Fe XLb6 EC 272 D
6	0.717	0.41	23.9	0.941	0.941	1.000	Fe XLb1 EC 272 D
7	0.792	3.17E-2	30.9	0.941	0.941	1.000	Fe XLb3 EC 272 D
8	0.792	1.99E-2	30.1	0.941	0.941	1.000	Fe XLb4 EC 272 D
9	6.391	16.45	4.9	0.941	0.941	1.000	Fe XKa2 EC 272 D
10	6.404	32.58	4.4	0.941	0.941	1.000	Fe XKa1 EC 272 D
11	7.058	3.87	4.5	0.941	0.941	1.000	Fe XKb1 EC 272 D
12	7.058	1.98	4.8	0.941	0.941	1.000	Fe XKb3 EC 272 D
13	7.108	2.04E-3	5.5	0.941	0.941	1.000	Fe XKb5 EC 272 D
14	14.400	9.16	1.6	0.939	0.939	1.000	^{57}Co EC 272 D g
15	122.0	85.60	0.1	1.000	1.000	1.000	^{57}Co EC 272 D g
16	136.4	10.70	0.7	1.000	1.000	1.000	^{57}Co EC 272 D g
17	230.4	4.00E-4	10.9	0.877	0.877	1.000	^{57}Co EC 272 D g
18	339.6	3.90E-3	7.6	0.929	0.929	1.000	^{57}Co EC 272 D g
19	352.3	3.20E-3	9.3	0.937	0.933	1.004	^{57}Co EC 272 D g
20	366.8	1.30E-3	23.0	0.934	0.933	1.001	^{57}Co EC 272 D g
21	570.0	1.70E-2	5.8	0.940	0.939	1.001	^{57}Co EC 272 D g
22	692.4	0.15	6.0	1.004	1.000	1.004	^{57}Co EC 272 D g
23	706.5	5.30E-3	9.4	1.016	1.000	1.016	^{57}Co EC 272 D g

Πίνακας Δ.15 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{139}Ce EC/B+ 137.64 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	4.121	0.16	13.1	0.951	0.951	1.000	La XLI EC 138 D
2	4.529	6.66E-2	9.6	0.951	0.951	1.000	La XLh EC 138 D
3	4.634	0.43	10.2	0.951	0.951	1.000	La XLa2 EC 138 D
4	4.651	3.92	11.2	0.951	0.951	1.000	La XLa1 EC 138 D
5	5.042	2.37	11.2	0.951	0.951	1.000	La XLb1 EC 138 D
6	5.062	0.10	19.3	0.967	0.967	1.000	La XLb4 EC 138 D
7	5.143	0.17	20.0	0.967	0.967	1.000	La XLb3 EC 138 D
8	5.212	3.28E-2	11.2	0.951	0.951	1.000	La XLb6 EC 138 D
9	5.384	0.82	11.0	0.951	0.951	1.000	La XLb2,15 EC 138 D
10	5.483	8.29E-3	10.0	0.951	0.951	1.000	La XLb5 EC 138 D
11	5.792	0.35	10.2	0.951	0.951	1.000	La XLg1 EC 138 D
12	5.891	3.83E-3	11.2	0.951	0.951	1.000	La XLg6 EC 138 D
13	6.060	2.87E-2	20.0	0.967	0.967	1.000	La XLg2 EC 138 D
14	6.075	4.14E-2	20.0	0.967	0.967	1.000	La XLg3 EC 138 D
15	32.658	3.35E-3	3.2	0.950	0.950	1.000	La XKa3 EC 138 D
16	33.034	23.10	2.3	0.950	0.950	1.000	La XKa2 EC 138 D
17	33.442	42.07	2.3	0.950	0.950	1.000	La XKa1 EC 138 D
18	37.720	4.05	2.3	0.950	0.950	1.000	La XKb3 EC 138 D
19	37.801	7.82	2.3	0.950	0.950	1.000	La XKb1 EC 138 D
20	38.085	9.43E-2	3.8	0.950	0.950	1.000	La XKb5 EC 138 D
21	38.726	2.52	2.3	0.950	0.950	1.000	La XKb2 EC 138 D
22	38.826	2.24E-2	48.0	0.950	0.950	1.000	La XKb4 EC 138 D
23	38.910	0.40	11.2	0.950	0.950	1.000	La XKO2,3 EC 138 D
24	165.8	79.90	1.7E-2	0.995	0.995	1.000	^{139}Ce EC 138 D g

Πίνακας Δ.16 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENelope Vasilopoulou Dipl. Th. brams

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{203}Hg

B- 46.61 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	8.953	0.11	9.5	1.000	1.000	1.000	TI XLI B- 46.6 D
2	10.172	0.24	4.5	1.000	1.000	1.000	TI XLa2 B- 46.6 D
3	10.268	2.15	4.5	1.000	1.000	1.000	TI XLa1 B- 46.6 D
4	10.994	2.77E-2	5.0	1.000	1.000	1.000	TI XLh B- 46.6 D
5	11.812	3.30E-2	4.5	1.000	1.000	1.000	TI XLb6 B- 46.6 D
6	11.931	0.15	14.0	1.000	1.000	1.000	TI XLb4 B- 46.6 D
7	12.213	1.22	5.0	1.000	1.000	1.000	TI XLb1 B- 46.6 D
8	12.261	0.53	4.5	1.000	1.000	1.000	TI XLb2,15 B- 46.6 D
9	12.390	0.18	15.0	1.000	1.000	1.000	TI XLb3 B- 46.6 D
10	12.643	6.29E-2	4.5	1.000	1.000	1.000	TI XLb5 B- 46.6 D
11	14.291	0.25	5.0	1.000	1.000	1.000	TI XLg1 B- 46.6 D
12	14.625	5.03E-2	15.0	1.000	1.000	1.000	TI XLg2 B- 46.6 D
13	14.683	4.13E-2	10.0	1.000	1.000	1.000	TI XLg6 B- 46.6 D
14	14.738	6.48E-2	16.0	1.000	1.000	1.000	TI XLg3 B- 46.6 D
15	70.184	5.13E-3	3.0	1.000	1.000	1.000	TI XKa3 B- 46.6 D
16	70.832	3.58	2.0	1.000	1.000	1.000	TI XKa2 B- 46.6 D
17	72.873	6.01	1.0	1.000	1.000	1.000	TI XKa1 B- 46.6 D
18	82.115	0.72	1.0	1.000	1.000	1.000	TI XKb3 B- 46.6 D
19	82.574	1.39	2.0	1.000	1.000	1.000	TI XKb1 B- 46.6 D
20	83.093	3.93E-2	3.0	1.000	1.000	1.000	TI XKb5 B- 46.6 D
21	84.865	0.50	2.0	1.000	1.000	1.000	TI XKb2 B- 46.6 D
22	85.134	1.17E-2	4.0	1.000	1.000	1.000	TI XKb4 B- 46.6 D
23	85.444	8.71E-2	10.0	1.000	1.000	1.000	TI XKO2,3 B- 46.6 D
24	85.530	7.67E-4	10.0	1.000	1.000	1.000	TI XKP2,3 B- 46.6 D
25	279.2	81.50	0.0	1.000	1.000	1.000	^{203}Hg B- 46.6 D g

Πίνακας Δ.17 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{113}Sn

EC/B+ 115.09 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	2.905	0.14	17.3	0.967	0.967	1.000	In XLI EC 115 D
2	3.112	6.65E-2	16.1	0.967	0.967	1.000	In XLh EC 115 D
3	3.279	0.40	16.5	0.967	0.967	1.000	In XLa2 EC 115 D
4	3.287	3.65	14.7	0.967	0.967	1.000	In XLa1 EC 115 D
5	3.487	1.93	15.3	0.967	0.967	1.000	In XLb1 EC 115 D
6	3.535	0.15	25.0	0.969	0.969	1.000	In XLb4 EC 115 D
7	3.573	0.24	24.7	0.969	0.969	1.000	In XLb3 EC 115 D
8	3.608	2.48E-2	16.4	0.967	0.967	1.000	In XLb6 EC 115 D
9	3.714	0.56	16.5	0.967	0.967	1.000	In XLb2,15 EC 115 D
10	3.922	0.21	16.5	0.967	0.967	1.000	In XLg1 EC 115 D
11	4.160	3.22E-2	29.0	0.969	0.969	1.000	In XLg2 EC 115 D
12	4.160	5.36E-2	27.6	0.969	0.969	1.000	In XLg3 EC 115 D
13	23.702	1.53E-3	3.7	0.967	0.967	1.000	In XKa3 EC 115 D
14	24.002	27.77	2.8	0.967	0.967	1.000	In XKa2 EC 115 D
15	24.210	51.35	2.8	0.967	0.967	1.000	In XKa1 EC 115 D
16	27.238	4.61	2.9	0.967	0.967	1.000	In XKb3 EC 115 D
17	27.276	8.89	2.8	0.967	0.967	1.000	In XKb1 EC 115 D
18	27.493	7.36E-2	4.6	0.967	0.967	1.000	In XKb5 EC 115 D
19	27.863	2.36	2.8	0.967	0.967	1.000	In XKb2 EC 115 D
20	27.924	1.13E-2	50.0	0.967	0.967	1.000	In XKb4 EC 115 D
21	27.939	1.92E-2	10.5	0.967	0.967	1.000	In XKO2,3 EC 115 D
22	255.0	1.82	4.4	0.998	0.998	1.000	113Sn EC 115 D g
23	382.9	6.40E-5	3.1	0.930	0.930	1.000	113Sn EC 115 D g
24	391.6	64.00	3.1	0.998	0.998	1.000	113Sn EC 115 D g
25	638.0	9.54E-4	5.0	1.002	1.000	1.002	113Sn EC 115 D g
26	646.8	3.84E-6	5.8	0.998	0.998	1.000	113Sn EC 115 D g

Πίνακας Δ.18 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. bremms

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{85}Sr

EC/B+ 64.84 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	1.482	6.75E-2	21.2	0.945	0.945	1.000	Rb XLI EC 64.8 D
2	1.542	3.87E-2	25.5	0.945	0.945	1.000	Rb XLh EC 64.8 D
3	1.693	0.15	20.2	0.945	0.945	1.000	Rb XLa2 EC 64.8 D
4	1.694	1.31	22.9	0.945	0.945	1.000	Rb XLa1 EC 64.8 D
5	1.752	0.74	25.2	0.945	0.945	1.000	Rb XLb1 EC 64.8 D
6	1.775	6.95E-3	20.4	0.945	0.945	1.000	Rb XLb6 EC 64.8 D
7	1.818	3.77E-2	31.5	0.945	0.945	1.000	Rb XLb4 EC 64.8 D
8	1.827	5.48E-2	29.1	0.945	0.945	1.000	Rb XLb3 EC 64.8 D
9	2.050	3.88E-3	30.6	0.945	0.945	1.000	Rb XLg2 EC 64.8 D
10	2.051	1.01E-2	30.3	0.945	0.945	1.000	Rb XLg3 EC 64.8 D
11	13.336	17.97	3.5	0.945	0.945	1.000	Rb XKa2 EC 64.8 D
12	13.395	34.67	3.6	0.945	0.945	1.000	Rb XKa1 EC 64.8 D
13	14.952	2.53	3.5	0.945	0.945	1.000	Rb XKb3 EC 64.8 D
14	14.961	4.91	3.5	0.945	0.945	1.000	Rb XKb1 EC 64.8 D
15	15.089	1.69E-2	4.8	0.945	0.945	1.000	Rb XKb5 EC 64.8 D
16	15.185	0.77	3.5	0.945	0.945	1.000	Rb XKb2 EC 64.8 D
17	129.8	4.80E-4	4.1	0.929	0.929	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
18	151.1	1.15E-3	75.2	0.940	0.940	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
19	354.0	4.80E-5	40.2	0.940	0.940	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
20	362.8	9.60E-4	4.1	0.929	0.929	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
21	514.0	95.70	4.1	1.000	1.000	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
22	716.8	3.07E-4	10.2	0.929	0.929	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g
23	868.0	1.20E-2	5.7	1.001	1.000	1.001	^{85}Sr EC 64.8 D g
24	951.0	2.88E-5	4.1	1.000	1.000	1.000	^{85}Sr EC 64.8 D g

Πίνακας Δ.19 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{137}Cs

B- 30.07 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	3.954	1.36E-2	13.3	1.000	1.000	1.000	Ba XLI B- 30.1 Y
2	4.331	5.96E-3	10.1	1.000	1.000	1.000	Ba XLh B- 30.1 Y
3	4.451	3.77E-2	11.6	1.000	1.000	1.000	Ba XLa2 B- 30.1 Y
4	4.466	0.34	10.5	1.000	1.000	1.000	Ba XLa1 B- 30.1 Y
5	4.828	0.21	10.1	1.000	1.000	1.000	Ba XLb1 B- 30.1 Y
6	4.852	2.60E-2	20.0	1.000	1.000	1.000	Ba XLb4 B- 30.1 Y
7	4.927	4.48E-2	19.4	1.000	1.000	1.000	Ba XLb3 B- 30.1 Y
8	4.994	2.85E-3	12.1	1.000	1.000	1.000	Ba XLb6 B- 30.1 Y
9	5.156	7.06E-2	11.3	1.000	1.000	1.000	Ba XLb2,15 B- 30.1 Y
10	5.531	3.06E-2	11.0	1.000	1.000	1.000	Ba XLg1 B- 30.1 Y
11	5.797	7.59E-3	20.3	1.000	1.000	1.000	Ba XLg2 B- 30.1 Y
12	5.809	1.06E-2	21.0	1.000	1.000	1.000	Ba XLg3 B- 30.1 Y
13	31.452	2.55E-4	3.2	1.000	1.000	1.000	Ba XKa3 B- 30.1 Y
14	31.817	1.96	2.3	1.000	1.000	1.000	Ba XKa2 B- 30.1 Y
15	32.194	3.57	2.3	1.000	1.000	1.000	Ba XKa1 B- 30.1 Y
16	36.304	0.34	2.2	1.000	1.000	1.000	Ba XKb3 B- 30.1 Y
17	36.378	0.66	2.2	1.000	1.000	1.000	Ba XKb1 B- 30.1 Y
18	36.652	7.65E-3	4.0	1.000	1.000	1.000	Ba XKb5 B- 30.1 Y
19	37.255	0.20	2.1	1.000	1.000	1.000	Ba XKb2 B- 30.1 Y
20	37.349	1.76E-3	47.8	1.000	1.000	1.000	Ba XKb4 B- 30.1 Y
21	37.425	3.06E-2	10.0	1.000	1.000	1.000	Ba XKO2,3 B- 30.1 Y
22	661.6	85.10	0.2	1.000	1.000	1.000	^{137}Cs B- 30.1 Y g

Πίνακας Δ.20 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{88}Y

EC/B+ 106.65 D

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	1.582	6.62E-2	21.8	0.959	0.959	1.000	Sr XLI EC 107 D
2	1.649	3.78E-2	25.1	0.959	0.959	1.000	Sr XLh EC 107 D
3	1.805	0.15	19.0	0.959	0.959	1.000	Sr XLa2 EC 107 D
4	1.806	1.34	21.7	0.959	0.959	1.000	Sr XLa1 EC 107 D
5	1.872	0.76	24.6	0.959	0.959	1.000	Sr XLb1 EC 107 D
6	1.902	7.58E-3	20.3	0.959	0.959	1.000	Sr XLb6 EC 107 D
7	1.936	3.78E-2	29.8	0.959	0.959	1.000	Sr XLb4 EC 107 D
8	1.947	5.49E-2	31.0	0.959	0.959	1.000	Sr XLb3 EC 107 D
9	2.196	4.63E-3	30.7	0.959	0.959	1.000	Sr XLg2 EC 107 D
10	2.196	1.04E-2	30.8	0.959	0.959	1.000	Sr XLg3 EC 107 D
11	14.098	17.64	3.4	0.959	0.959	1.000	Sr XKa2 EC 107 D
12	14.165	33.99	3.5	0.959	0.959	1.000	Sr XKa1 EC 107 D
13	15.825	2.52	3.4	0.959	0.959	1.000	Sr XKb3 EC 107 D
14	15.836	4.89	3.5	0.959	0.959	1.000	Sr XKb1 EC 107 D
15	15.971	1.86E-2	5.1	0.959	0.959	1.000	Sr XKb5 EC 107 D
16	16.085	0.86	4.0	0.959	0.959	1.000	Sr XKb2 EC 107 D
17	850.6	6.55E-2	19.6	0.906	0.906	1.000	88Y EC 107 D g
18	898.0	93.70	0.3	0.956	0.956	1.000	88Y EC 107 D g
19	1382.2	2.08E-2	28.6	0.956	0.956	1.000	88Y EC 107 D g
20	1836.1	99.20	0.3	0.950	0.950	1.000	88Y EC 107 D g
21	2686.7	7.32E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
22	2734.0	0.71	9.7	2.449	1.000	2.449	88Y EC 107 D g
23	3219.7	7.05E-3	28.0	1.027	1.000	1.027	88Y EC 107 D g

Πίνακας Δ.21 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα

TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{60}Co

B- 5.2704 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	346.9	7.60E-3	6.5	0.908	0.908	1.000	60Co B- 5.27 Y g
2	826.2	7.60E-3	10.5	0.903	0.903	1.000	60Co B- 5.27 Y g
3	1173.2	99.90	2.0E-20	0.952	0.952	1.000	60Co B- 5.27 Y g
4	1332.5	100.00	1.0E-20	0.951	0.951	1.000	60Co B- 5.27 Y g
5	1679.5	1.34E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
6	2158.8	1.11E-3	16.2	1.035	0.948	1.091	60Co B- 5.27 Y g
7	2505.0	2.00E-6	20.0	5.334E-1	1.000	5.334E-1	60Co B- 5.27 Y g

Πίνακας Δ.22 Συντελεστές διόρθωσης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Energy (keV)	Experimental Efficiency	TCC Factors	New Experimental Efficiency	ln(E)	ln(eff_old)	ln(eff_new)
88.03	2.336E-02	0.998	2.3407E-02	4.477678	-3.75673	-3.754728
122.06	2.869E-02	1.000	2.8690E-02	4.804513	-3.551207	-3.551207
165.85	2.740E-02	0.995	2.7538E-02	5.111084	-3.597212	-3.5922
279.19	2.032E-02	1.000	2.0320E-02	5.631893	-3.89615	-3.89615
279.19	2.032E-02	1.000	2.0320E-02	5.631893	-3.89615	-3.89615
391.69	1.539E-02	0.998	1.5421E-02	5.970471	-4.174037	-4.172035
514	1.281E-02	1.000	1.2810E-02	6.242223	-4.357529	-4.357529
661.66	1.069E-02	1.000	1.0690E-02	6.494752	-4.538447	-4.538447
898.07	8.093E-03	0.956	8.4655E-03	6.800248	-4.816756	-4.771758
1173.24	6.643E-03	0.952	6.9779E-03	7.067524	-5.014192	-4.965001
1332.5	6.024E-03	0.951	6.3344E-03	7.194812	-5.112004	-5.061763
1836.08	4.807E-03	0.950	5.0600E-03	7.515388	-5.337682	-5.286389

Old Calibration - High Energy			New Calibration - High Energy		
a0	5.62E-01		a0		
a1	-8.07E-01	*ln(E)	a1		*ln(E)
a2	2.73E-03	*ln(E)^2	a2		*ln(E)^2

Από SPUNAL

New to Old Ratio_High Energy				
Energy	ln(E)	Efficiency New	Efficiency Old	Old to New Ratio
	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!

Πίνακας Δ.23 Διόρθωση καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή HPGe (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

	Energy (keV)	H.Life (d)	Nominal Activity (gps)	Decayed Activity (gps)	E f f i e n c y		Dif. (%)
					Experimental	Fitted	
1	279.19				2.032E-02	2.019E-02	0.6
2	391.69				1.542E-02	1.565E-02	-1.4
3	514.00				1.281E-02	1.278E-02	0.3
4	661.66				1.069E-02	1.060E-02	0.9
5	898.07				8.465E-03	8.469E-03	0.0
6	1173.24				6.978E-03	6.974E-03	0.1
7	1332.50				6.334E-03	6.361E-03	-0.4
8	1836.08				5.060E-03	5.054E-03	0.1

Efficiency Regression Analysis Results
(+- indicate standard error)

Constant : 7.318756E-01 +- 3.918168E-01 or 53.54 % - Student : 1.87
1st order : -8.883818E-01 +- 1.199267E-01 or 13.50 % - Student : 7.41
2nd order : 1.163533E-02 +- 9.115273E-03 or 78.34 % - Student : 1.28
Correlation coef.: 0.9999 R.M.S. (%) : 0.198 - 0.839

Final results of high energy region efficiency calibration
on : 30-Jun-08 at : 16:18:39

$$\ln(\text{eff}) = 7.318756E-01 - 8.883818E-01 * \ln(E) + 1.163533E-02 * \ln(E)**2$$

Calibration results :

Efficiency Calibration Date : 30-Jun-08

Time : 16:18:39

Detector : 2 - Ge

MCA type : 9 - Genie

Region : 3 4096

Geometry : 2

Description : TCC-Brems - 282 cc cyl. plastic box

Sample Volume : 282.00 cm**3

Geometry Volume : 282.00 cm**3

Πίνακας Δ.24 Διορθωμένη καμπύλη βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή HPGe

(Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th. brems

Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)

Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{134}Cs B- 2.0648 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	3.954	1.62E-3	13.2	0.922	0.922	1.000	Ba XLI B- 2.06 Y
2	4.331	7.04E-4	10.1	0.922	0.922	1.000	Ba XLh B- 2.06 Y
3	4.451	4.47E-3	11.5	0.922	0.922	1.000	Ba XLa2 B- 2.06 Y
4	4.466	4.07E-2	10.3	0.922	0.922	1.000	Ba XLa1 B- 2.06 Y
5	4.828	2.48E-2	10.1	0.922	0.922	1.000	Ba XLb1 B- 2.06 Y
6	4.852	2.61E-3	20.0	0.922	0.922	1.000	Ba XLb4 B- 2.06 Y
7	4.927	4.49E-3	19.5	0.922	0.922	1.000	Ba XLb3 B- 2.06 Y
8	4.994	3.37E-4	12.1	0.922	0.922	1.000	Ba XLb6 B- 2.06 Y
9	5.156	8.36E-3	11.1	0.922	0.922	1.000	Ba XLb2,15 B- 2.06 Y
10	5.531	3.62E-3	11.0	0.922	0.922	1.000	Ba XLg1 B- 2.06 Y
11	5.797	7.61E-4	20.3	0.922	0.922	1.000	Ba XLg2 B- 2.06 Y
12	5.809	1.07E-3	21.0	0.922	0.922	1.000	Ba XLg3 B- 2.06 Y
13	31.452	3.08E-5	3.2	0.922	0.922	1.000	Ba XKa3 B- 2.06 Y
14	31.817	0.23	2.3	0.922	0.922	1.000	Ba XKa2 B- 2.06 Y
15	32.194	0.43	2.3	0.922	0.922	1.000	Ba XKa1 B- 2.06 Y
16	36.304	4.13E-2	2.2	0.922	0.922	1.000	Ba XKb3 B- 2.06 Y
17	36.378	7.98E-2	2.2	0.922	0.922	1.000	Ba XKb1 B- 2.06 Y
18	36.652	9.24E-4	4.0	0.922	0.922	1.000	Ba XKb5 B- 2.06 Y
19	37.255	2.52E-2	2.1	0.922	0.922	1.000	Ba XKb2 B- 2.06 Y
20	37.349	2.12E-4	47.8	0.922	0.922	1.000	Ba XKb4 B- 2.06 Y
21	37.425	3.69E-3	10.0	0.922	0.922	1.000	Ba XKO2,3 B- 2.06 Y
22	232.6	1.10E-3	1.0E-40	0.887	0.887	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
23	242.7	2.72E-2	11.0	0.889	0.889	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
24	326.5	1.62E-2	6.1	0.862	0.862	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
25	475.3	1.49	0.6	0.897	0.897	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
26	563.2	8.35	0.4	0.889	0.889	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
27	569.3	15.40	0.3	0.890	0.890	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
28	604.7	97.60	3.0E-20	0.931	0.931	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
29	795.8	85.50	4.6E-20	0.932	0.932	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
30	801.9	8.69	0.4	0.897	0.897	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
31	847.4	7.82E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
32	889.9	1.92E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
33	931.3	3.47E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
34	1038.6	0.98	0.4	0.966	0.941	1.026	^{134}Cs B- 2.06 Y g
35	1080.0	2.44E-2	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
36	1168.0	1.79	0.3	1.031	0.944	1.091	^{134}Cs B- 2.06 Y g
37	1174.0	0.28	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
38	1365.2	3.01	0.3	1.063	0.941	1.128	^{134}Cs B- 2.06 Y g
39	1406.6	0.11	0.0	1.000	1.000	1.000	alias

Πίνακας Δ.25 Συντελεστές διόρθωσης για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc (Διόρθωση Με Ακτινοβολία πεδήσεως)

Total efficiency: PENELOPE Vasilopoulou Dipl. Th.
 Full energy peak efficiency: HPGe Vasilopoulou Dipl.Th. (Q1222A)
 Parent radioactive isotope, decay mode and half-life

 ^{134}Cs

B- 2.0648 Y

No	E[keV]	Rel.Int	err[%]	TrueCc	TrueCl	TrueCg	Parent Isotope
1	3.954	1.62E-3	13.2	0.956	0.956	1.000	Ba XLI B- 2.06 Y
2	4.331	7.04E-4	10.1	0.956	0.956	1.000	Ba XLh B- 2.06 Y
3	4.451	4.47E-3	11.5	0.956	0.956	1.000	Ba XLa2 B- 2.06 Y
4	4.466	4.07E-2	10.3	0.956	0.956	1.000	Ba XLa1 B- 2.06 Y
5	4.828	2.48E-2	10.1	0.956	0.956	1.000	Ba XLb1 B- 2.06 Y
6	4.852	2.61E-3	20.0	0.956	0.956	1.000	Ba XLb4 B- 2.06 Y
7	4.927	4.49E-3	19.5	0.956	0.956	1.000	Ba XLb3 B- 2.06 Y
8	4.994	3.37E-4	12.1	0.956	0.956	1.000	Ba XLb6 B- 2.06 Y
9	5.156	8.36E-3	11.1	0.956	0.956	1.000	Ba XLb2,15 B- 2.06 Y
10	5.531	3.62E-3	11.0	0.956	0.956	1.000	Ba XLg1 B- 2.06 Y
11	5.797	7.61E-4	20.3	0.956	0.956	1.000	Ba XLg2 B- 2.06 Y
12	5.809	1.07E-3	21.0	0.956	0.956	1.000	Ba XLg3 B- 2.06 Y
13	31.452	3.08E-5	3.2	0.956	0.956	1.000	Ba XKa3 B- 2.06 Y
14	31.817	0.23	2.3	0.956	0.956	1.000	Ba XKa2 B- 2.06 Y
15	32.194	0.43	2.3	0.956	0.956	1.000	Ba XKa1 B- 2.06 Y
16	36.304	4.13E-2	2.2	0.956	0.956	1.000	Ba XKb3 B- 2.06 Y
17	36.378	7.98E-2	2.2	0.956	0.956	1.000	Ba XKb1 B- 2.06 Y
18	36.652	9.24E-4	4.0	0.956	0.956	1.000	Ba XKb5 B- 2.06 Y
19	37.255	2.52E-2	2.1	0.956	0.956	1.000	Ba XKb2 B- 2.06 Y
20	37.349	2.12E-4	47.8	0.956	0.956	1.000	Ba XKb4 B- 2.06 Y
21	37.425	3.69E-3	10.0	0.956	0.956	1.000	Ba XKO2,3 B- 2.06 Y
22	232.6	1.10E-3	1.0E-4	0.936	0.936	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
23	242.7	2.72E-2	11.0	0.937	0.937	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
24	326.5	1.62E-2	6.1	0.921	0.921	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
25	475.3	1.49	0.6	0.941	0.941	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
26	563.2	8.35	0.4	0.937	0.937	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
27	569.3	15.40	0.3	0.937	0.937	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
28	604.7	97.60	3.0E-2	0.961	0.961	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
29	795.8	85.50	4.6E-2	0.961	0.961	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
30	801.9	8.69	0.4	0.941	0.941	1.000	^{134}Cs B- 2.06 Y g
31	847.4	7.83E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
32	889.9	1.92E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
33	931.3	3.48E-4	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
34	1038.6	0.98	0.4	0.992	0.967	1.026	^{134}Cs B- 2.06 Y g
35	1080.0	2.44E-2	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
36	1168.0	1.79	0.3	1.057	0.968	1.091	^{134}Cs B- 2.06 Y g
37	1174.0	0.28	0.0	1.000	1.000	1.000	alias
38	1365.2	3.01	0.3	1.092	0.967	1.129	^{134}Cs B- 2.06 Y g
39	1406.6	0.11	0.0	1.000	1.000	1.000	alias

Πίνακας Δ.26 Συντελεστές διόρθωσης για τις φωτοκορυφές του ^{134}Cs όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc (Δοκιμή με σημειακές πηγές)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε – ΣΥΝΕΧΕΣ ΦΑΣΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

⁴⁰K

Στο παρόν παράρτημα, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του συνεχούς φάσματος εκπομπής των ηλεκτρονίων από το ⁴⁰K, το οποίο αξιοποιήθηκε στις προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της μελέτης του φαινομένου της ακτινοβολίας πεδήσεως. Ως αφετηρία χρησιμοποιήθηκε το φάσμα εκπομπής ηλεκτρονίων που περιέχεται στο paper “The Decay of Potassium-40” των Leutz, Schulz, Wenninger (1965), το οποίο παρουσιάζεται στον πίνακα Ε.1 που ακολουθεί.

Energy (keV)	Final spectrum $N(W)$	Experimental shapefactor	Theoretical shapefactor	Quotient of experimental and theoretical shapefactor
100	635	279	264	1.056
150	704	272	263	1.032
200	771	270	264	1.024
250	836	272	266	1.021
300	888	275	270	1.020
350	932	279	274	1.018
400	962	284	280	1.012
450	984	288	288	1.000
500	995	295	296	0.995
550	1000	304	307	0.991
600	996	315	320	0.987
650	984	330	335	0.986
700	962	346	352	0.984
750	936	368	373	0.986
800	900	395	400	0.988
850	855	427	433	0.987
900	796	467	475	0.984
950	728	515	524	0.983
1000	642	581	587	0.990
1050	549	674	667	1.010
1100	449	805	764	1.054

Πίνακας Ε.1 Φάσμα εκπομπής ηλεκτρονίων από το ⁴⁰K (Leutz et al., 1965)

Όπως φαίνεται, το δομημένο σε πίνακα φάσμα δίνει τον αριθμό των γεγονότων ανά ενεργειακή περιοχή, με τις τιμές της 1^{ης} στήλης να αντιστοιχούν στη μέση ενέργεια κάθε ενεργειακής περιοχής. Όμως, για την εισαγωγή του στα αρχεία εισόδου (τύπου .in) της προσομοίωσης, ο πίνακας πρέπει να έχει τη μορφή που απαιτείται από τον κώδικα PENELOPE, δηλαδή να περιέχει πιθανότητες (2^η στήλη) ανά ενεργειακή

περιοχή (1^η στήλη), με τη διαφορά ότι εδώ στην 1^η στήλη πρέπει να αναγράφονται τα κάτω όρια των ενεργειακών περιοχών (Salvat et al., 2006). Για να είναι σε μορφή κατάλληλη προς εισαγωγή στο αρχείο εισόδου της προσομοίωσης, ο πίνακας χρειάζεται δύο τροποποιήσεις:

- ο Υπολογισμό των πιθανοτήτων. Διαιρώντας κάθε τιμή της 2^{ης} στήλης του πίνακα E.1 με το άθροισμα των τιμών της 2^{ης} στήλης, προκύπτει ο λόγος των γεγονότων που αντιστοιχούν σε κάθε ενεργειακή περιοχή προς τα συνολικά γεγονότα, δηλαδή η πιθανότητα εκπομπής ηλεκτρονίων με ενέργεια στη συγκεκριμένη περιοχή.
- ο Αναγραφή των κάτω ορίων κάθε ενεργειακής περιοχής. Με δεδομένο ότι η 1^η στήλη του πίνακα E.1 περιέχει τις μέσες ενέργειες, το κάτω όριο της κάθε περιοχής εύκολα υπολογίζεται. Θα είναι ουσιαστικά η ενέργεια εκείνη που «ισαπέχει» από δύο διαδοχικές μέσες τιμές.

Με βάση την προαναφερθείσα διαδικασία, κατασκευάζεται ο «τροποποιημένος» πίνακας (E.2), ο οποίος είναι σε μορφή κατάλληλη για να εισαχθεί στο αρχείο εισόδου της προσομοίωσης.

Ενέργεια (keV) (κάτω όριο ενεργ.περιοχής)	Πιθανότητα εκπομπής ηλεκτρονίων
75	0,03628
125	0,04022
175	0,04405
225	0,04776
275	0,05073
325	0,05324
375	0,05496
425	0,05622
475	0,05684
525	0,05713
575	0,05690
625	0,05622
675	0,05496
725	0,05347
775	0,05142
825	0,04885
875	0,04548
925	0,04159
975	0,03668
1025	0,03136
1075	0,02565

Πίνακας E.2 Τελικός (τροποποιημένος) πίνακας πιθανότητας ανά ενέργεια