

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ
MONTE-CARLO**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του
ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ Α. ΧΙΩΝΗ

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επ. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Μαρίλια Ι. Σάββα

ΑΘΗΝΑ 2011

αντί προλόγου...

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε τη χρονική περίοδο Μαρτίου - Οκτωβρίου 2011. Ξεκινώντας, θέλω να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας εργασίας. Η συνεργασία μου μαζί του αποτέλεσε ένα από τα ομορφότερα ενθύμια των προπτυχιακών σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κα. Μ.Ι. Σάββα, η οποία διαθέτοντας τον πολύτιμο προσωπικό της χρόνο μου παρείχε απλόχερα βοήθεια σε κάθε στάδιο της Δ.Ε. Ακόμα, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κ.Λ. Καρφόπουλο για τις πάντα καίριες και εποικοδομητικές συμβουλές του. Η συνεργασία μου με ολόκληρο το προσωπικό του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ήταν πολύτιμη τόσο στο στάδιο της έρευνας, όσο και κατά τη συγγραφή της Δ.Ε. και ευχαριστώ θερμά έκαστο ξεχωριστά γι' αυτό.

Φτάνοντας στο τέλος ενός μεγάλου κεφαλαίου της ζωής μου, αυτό της προπτυχιακής ακαδημαϊκής μου σταδιοδρομίας, θα ήθελα μέσα σε λίγες γραμμές να κάνω ιδιαίτερη μνεία ορισμένων πρόσωπων που έχουν δώσει το δικό τους προσωπικό στίγμα στη ζωή μου. Πρώτοι από όλους, οι 'μεγάλοι' μου φίλοι Αίας Σ. και Γιώργος Μ. Μέσα από τις συμβουλές τους, βγαλμένες από τον καθημερινό προσωπικό τους αγώνα, συνεχίζουν να μου παραδίδουν μαθήματα ζωής και τους ευγνωμονώ για αυτό. Οι συμφοιτητές μου Αίγλη Χ., Πάρης Π. και Στάθης Β., οι οποίοι κυρίως τα τελευταία χρόνια των σπουδών μου, μου προσέφεραν απλόχερα τη φιλία τους. Η στήριξη που μου παρείχαν, αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα για την περάτωση των σπουδών μου. Οι αδερφικοί μου φίλοι, Νίκος Δ. και Γιάννης Σ., οι οποίοι όσα χρόνια κι αν περάσουν, είναι πάντα δίπλα μου να με παροτρύνουν να κάνω ένα βήμα πιο μπροστά. Ευχαριστώ επίσης τη φίλη μου Χριστιάνα Κ. που μου προσέφερε ανιδιοτελώς αμέριστη ψυχολογική και συναισθηματική βοήθεια, όποτε και αν τη χρειάστηκα. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ αξίζει στη συμφοιτήτρια μου Βέρα Κ., για την παρουσία της στη ζωή μου. Μαζί της γνώρισα και βίωσα καταστάσεις άγνωστες για μένα. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ για την οικογένειά μου, Άλκη, Ρένα, Άντζυ και Ήρα, οι οποίοι πρώτοι και πάνω από όλους διαμόρφωσαν το χαρακτήρα μου και μου παρέσχαν τα απαραίτητα εφόδια για να φτάσω μέχρι εδώ.

Με όλους εσάς μοιράζομαι την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Εύχομαι να είστε συνοδοιπόροι, ο καθένας με το δικό του ξεχωριστό τρόπο στα επόμενα κεφάλαια της ζωής μου που ξεκινούν αύριο.

Διονύσιος Α. Χιώνης

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
-------------------------	---

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Το φαινόμενο δημιουργίας αθροιστικών φωτοκορυφών.....	4
2.2.1 Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.....	5
2.2.1.1 Η επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση. .	6
2.2.1.2 Παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.....	8
2.2.1.2.1 Παράγοντες εξαρτώμενοι από το ραδιενεργό ισότοπο.....	9
2.2.1.2.2 Παράγοντες ανεξάρτητοι από το είδος του ραδιενεργού ισοτόπου.....	10
2.2.2 Το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης.....	11
2.3 Διατάξεις ανίχνευσης γ-φασματοσκοπίας του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.....	11
2.3.1 Ο ανιχνευτής υπερ-καθαρού γερμανίου HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.....	12
2.3.2 Ο ανιχνευτής ΧiRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.....	13
2.4 Διόρθωση ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.....	14
2.4.1 Μέθοδοι αντιμετώπισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.....	16
2.4.2 Μέθοδοι υπολογισμού ολικής απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης.....	20
2.4.3 Το πρόγραμμα TrueCoinc.....	22
Σχήματα Κεφαλαίου 2.....	24

Κεφάλαιο 3

3.1 Εισαγωγή.....	26
3.2 Προσομοίωση με τη μέθοδο Monte-Carlo.....	26
3.3 Ο κώδικας Monte-Carlo PENELOPE.....	28
3.3.1 Γενική περιγραφή του κώδικα PENELOPE.....	28
3.3.2 Αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα χρήστη PENMAIN.f.....	29
3.3.3 Κύριο μέρος του κώδικα PENELOPE.....	31
3.3.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές του κώδικα PENMAIN.....	32
3.3.5 Αρχεία εξόδου του κυρίως προγράμματος PENMAIN.....	34
3.3.5.1 Αρχείο εξόδου penmain.dat.....	34
3.3.5.2 Αρχείο εξόδου pm_spc_enddet_#.dat.....	36
3.3.6 Ανάλυση του κώδικα χρήστη PENMAIN.....	38

3.3.6.1 Τμήμα δήλωσης μεταβλητών και προετοιμασίας της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f	39
3.3.6.2 Τμήμα επεξεργασίας και διαμόρφωσης των δεδομένων της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f	41
3.3.6.3 Τμήμα τελικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f	44
3.3.6.4 Τμήμα διαμόρφωσης των αρχείων εξόδου της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f	45
3.3.6.5 Τμήμα υπορουτινών του κώδικα PENMAIN.f	46
3.3.6.6 Υπορουτίνες που καλούνται από τον κώδικα PENMAIN.f	47

Κεφάλαιο 4

4.1 Εισαγωγή	49
4.2 Η φιλοσοφία του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f	49
4.3 Τροποποιήσεις του κώδικα PENMAIN.f	51
4.3.1 Αλλαγές στο αρχείο εισόδου τύπου <i>.in</i>	52
4.3.1.1 Εισαγωγή μεταβλητής εξεταζόμενου ισότοπου 'SISOTO'	52
4.3.2 Αλλαγές στον κώδικα PENMAIN.f	54
4.3.2.1 Τμήμα υπορουτινών του κώδικα PENMAIN.f	54
4.3.2.1.1 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης για το ισότοπο ^{60}Co	55
4.3.2.1.2 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης για το ισότοπο ^{88}Y	56
4.3.2.1.3 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης του ισότοπου ^{57}Co	58
4.3.2.1.4 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης του ισότοπου ^{134}Cs	60
4.3.2.1.5 Έλεγχος ορθής λειτουργίας υπορουτινών διαγραμμάτων διάσπασης	61
4.3.2.3 Τμήμα εγχειριδίου χρήστη του κώδικα PENMAIN.f	63
4.3.2.3.1 Εισαγωγή μεταβλητής 'SISOTO' στο εγχειρίδιο χρήστη του κώδικα PENMAIN.f	64
4.3.2.4 Τμήμα δήλωσης μεταβλητών του κώδικα PENMAIN.f	65
4.3.2.4.1 Δήλωση μεταβλητής 'SISOTOPE'	65
4.3.2.4.2 Δήλωση αλφαριθμητικής μεταβλητής 'KWISOT'	66
4.3.2.4.3 Δήλωση πίνακα EN(100)	67
4.3.2.5 Τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης του κώδικα χρήστη PENMAIN.f	68
4.3.2.5.1 Ανάγνωση εξεταζόμενου ισότοπου	68
4.3.2.5.2 Μέγιστη ενέργεια προσομοιούμενων φωτονίων του εξεταζόμενου ισότοπου	70
4.3.2.6 Τμήμα επεξεργασίας δεδομένων της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f	72
4.3.2.6.1 Καθορισμός αριθμού φωτονίων στην περίπτωση μονοενεργειακής πηγής	72
4.3.2.6.2 Σύνδεση υπορουτινών με τον κώδικα PENMAIN.f	73
4.3.2.6.3 Επιλογή νέου φωτονίου της διάσπασης που εξετάζεται	76
4.3.2.6.4 Αρχικοποίηση μεταβλητής 'DEDE' (καταγεγραμμένη ενέργεια στον ανιχνευτή απόθεσης)	79

4.3.2.6.5 Έλεγχος μη-προσομοιωμένου πρωτογενούς φωτονίου.....	79
4.3.2.6.6 Υπολογισμός συνολικά καταγραφόμενης ενέργειας στον ανιχνευτή απόθεσης.....	80
4.4 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.....	81
Σχήματα Κεφαλαίου 4.....	84

Κεφάλαιο 5

5.1 Εισαγωγή.....	89
5.2 Πιστοποιημένες πηγές ^{60}Co που διατίθενται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.	90
5.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας $1\mu\text{Ci}$	90
5.2.2 Πηγές όγκου.....	91
5.2.2.1 Πηγή όγκου γεωμετρίας '2'.....	91
5.2.2.1 Πηγή όγκου γεωμετρίας '8'.....	93
5.3 Προσομοιώσεις ρεαλιστικών σεναρίων για τις ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.	94
5.3.1 Ανιχνευτική διάταξη HPGe.....	94
5.3.1.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.....	95
5.3.1.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.....	96
5.3.1.3 Πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.....	98
5.3.1.4 Πηγή όγκου γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.....	98
5.3.2 Ανιχνευτική διάταξη XtRa.	100
5.3.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.....	100
5.3.2.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.....	101
5.3.2.3 Πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.....	103
5.3.2.4 Πηγή όγκου γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή XtRa.....	103
5.4 Πειράματα στις ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. και σύγκριση με τα αποτελέσματα του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.	105
5.4.1 Στατιστικός έλεγχος U-Test.....	105
5.4.2 Ανιχνευτική διάταξη HPGe.....	106
5.4.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας $1\mu\text{Ci}$, τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.....	106
5.4.2.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας $1\mu\text{Ci}$ σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.....	108
5.4.2.3 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.....	109
5.4.2.4 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.....	111
5.4.3 Ανιχνευτική διάταξη XtRa.	112

5.4.3.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi , τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.....	112
5.4.3.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi , σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.	114
5.4.3.3 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.....	115
5.4.3.4 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή ΧtRa.....	116
5.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοιώσεις με τον πρωτότυπο και τον τροποποιημένο κώδικα PENMAIN.f.	118
5.5.1 Ανιχνευτική διάταξη HPGe.....	119
5.5.1.1 Συντελεστές διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc για τον ανιχνευτή HPGe.....	120
5.5.1.2 Ισότοπο ^{60}Co	121
5.5.1.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.	121
5.5.1.2.2 Πηγή όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.	122
5.5.1.3 Ισότοπο ^{88}Y	124
5.5.1.3.1 Σημειακή πηγή ^{88}Y τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.	124
5.5.1.3.2 Πηγή όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.	127
5.5.1.4 Ισότοπο ^{134}Cs	130
5.5.1.4.1 Σημειακή πηγή ^{134}Cs τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.	130
5.5.1.4.2 Πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.....	134
5.5.2 Ανιχνευτική διάταξη ΧtRa.	138
5.5.2.1 Συντελεστές διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc για τον ανιχνευτή ΧtRa.....	138
5.5.2.2 Ισότοπο ^{60}Co	139
5.5.2.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.	139
5.5.2.2.2 Πηγή όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.....	141
5.5.2.3 Ισότοπο ^{88}Y	142
5.5.2.3.1 Σημειακή πηγή ^{88}Y τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.	142
5.5.2.3.2 Πηγή όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.	145
5.5.2.4 Ισότοπο ^{57}Co	148
5.5.2.4.1 Σημειακή πηγή ^{57}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.....	148
5.5.2.4.2 Πηγή όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.....	151
5.5.2.5 Ισότοπο ^{134}Cs	153
5.5.2.5.1 Σημειακή πηγή ^{134}Cs τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.....	154
5.5.2.5.2 Πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.....	157
5.6 Πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '10' στον ανιχνευτή ΧtRa.	161
5.7 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.	165

Διαγράμματα Κεφαλαίου 5	167
Κεφάλαιο 6	187
Παράρτημα Α	193
Παράρτημα Β	197
Παράρτημα Γ	202
Βιβλιογραφία	207

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Δ.Ε.) είναι ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo. Το φαινόμενο παρουσιάζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ραδιενεργών δειγμάτων σε ανιχνευτές γερμανίου. Στη φύση υπάρχουν ραδιενεργά ισότοπα, ο πυρήνας των οποίων δύναται να εκπέμψει κατά την αποδιέγερσή του, δύο ή περισσότερα διαδοχικά φωτόνια από τον ίδιο κλάδο διάσπασης. Ως πραγματική σύμπτωση χαρακτηρίζεται η ταυτόχρονη ανίχνευση των διαδοχικών αυτών φωτονίων ως ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με το άθροισμα των ενεργειών των επιμέρους φωτονίων, λόγω αντικειμενικής αδυναμίας της ανιχνευτικής διάταξης να τα διακρίνει ως μεμονωμένα. Η αδυναμία αυτή οφείλεται στο χρόνο απόκρισης της διάταξης ο οποίος είναι της τάξης του μικρο-second σε αντίθεση με τη χρονική διαφορά εκπομπής των φωτονίων που μπορεί να είναι της τάξης pico-second ή και nano-second ορισμένες φορές. Η παρούσα εργασία εστίασε στον προσδιορισμό κατάλληλων συντελεστών για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού. Αυτοί οι συντελεστές διόρθωσης εξαρτώνται από τη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, καθώς και από το ραδιενεργό ισότοπο που εξετάζεται, ενώ απαιτείται για τον προσδιορισμό τους η γνώση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για τις συγκεκριμένες συνθήκες.

Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. μελετήθηκε η λειτουργία του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE (έκδοση 2005), ο οποίος αποτελεί κώδικα προσομοίωσης Monte-Carlo. Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.) από το 2006 και προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη. Η προσομοίωση, συγκρινόμενη με το πείραμα, παρακολουθεί την πορεία σωματιδίων ή φωτονίων χωρίς να λαμβάνει υπόψη φυσικά φαινόμενα που ενδεχομένως να αλλοιώνουν το εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα. Τέτοια περίπτωση αποτελεί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να τροποποιηθεί ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE, ώστε να εμπεριέχεται στις αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με την ύλη και η επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου.

Η Δ.Ε. αποτελείται από έξι (6) Κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια :

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται λεπτομερώς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και παρουσιάζεται η επίδραση του στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ραδιενεργών δειγμάτων. Περιγράφονται οι παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο και διαχωρίζονται σε ανεξάρτητους και εξαρτημένους από το ραδιενεργό ισότοπο. Πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή του φαινομένου της τυχαίας άθροισης, που αποτελεί μαζί με το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης τις δύο συνιστώσες του φαινομένου

δημιουργίας αθροιστικών φωτοκορυφών στη γ-φασματοσκοπία. Αναλύονται, στη συνέχεια, οι γ-ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου HPGe (High Purity Germanium Detector) και ανιχνευτή XtRa (Extended Range Germanium Detector) της εταιρίας Canberra. Ακολούθως περιγράφεται η σημασία της διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης με χρήση κατάλληλων συντελεστών που σχετίζονται με την επιφάνεια σχηματιζόμενων φωτοκορυφών. Πραγματοποιείται μία σύντομη βιβλιογραφική αναφορά των μεθόδων αντιμετώπισης του εξεταζόμενου φαινομένου, καθώς και περιγράφεται ο τρόπος προσδιορισμού της απόδοσης φωτοκορυφής όπως και της ολικής απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης που αποτελεί ουσιαστική παράμετρο για τον ορθό υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης. Τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογία αντιμετώπισης της επίδρασης του φαινομένου από το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., όπως ισχύει μέχρι την εκπόνηση της παρούσας Δ.Ε., ενώ περιγράφεται και το πρόγραμμα TrueCoinc μέσω του οποίου υπολογίζονται μέχρι στιγμής οι ζητούμενοι συντελεστές διόρθωσης για την εξεταζόμενη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή.

Στο **3ο Κεφάλαιο** γίνεται μία σύντομη περιγραφή της τεχνικής προσομοίωσης Monte-Carlo, αναλύοντας τα προτερήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν κατά τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη. Στη συνέχεια του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE και δίνονται περισσότερες πληροφορίες για τον κώδικα PENMAIN.f, έναν από τους τρεις (3) κώδικες χρήστη που εμπεριέχονται στον κώδικα PENELOPE, καθώς η προσοχή της παρούσας Δ.Ε. εστιάζεται στη λειτουργία αυτού του κώδικα χρήστη. Πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους τμημάτων του κώδικα χρήστη PENMAIN.f, όπως τα απαιτούμενα για τη λειτουργία του αρχεία εισόδου, οι χρησιμοποιούμενοι εικονικοί ανιχνευτές και τα εξαγόμενα αρχεία στα οποία καταγράφονται όλες οι πληροφορίες και αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται αναλυτικά η δομή ολόκληρου του κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

Ο κώδικας PENELOPE εξάγει αποτελέσματα προσομοιώνοντας για μεγάλο αριθμό ιστοριών τις πορείες σωματιδίων ή φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας μέσα στην ύλη. Η κάθε ιστορία (shower) αναφέρεται στην παρακολούθηση των αλληλεπιδράσεων μεμονωμένου πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου με την ύλη, μέχρι να χάσει όλη την ενέργειά του ή μέχρι να βρεθεί εκτός των ορίων του εξεταζόμενου συστήματος. Για να μπορέσει ο κώδικας PENELOPE να συμπεριλαμβάνει στους φυσικούς μηχανισμούς του και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, απαιτείται η αλλαγή της έννοιας της μεμονωμένης ιστορίας. Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται αναλυτικά η λογική στην οποία στηρίχθηκε ο τροποποιημένος κώδικας χρήστη PENMAIN.f. Πιο συγκεκριμένα, στο νέο κώδικα ως ιστορία (shower) θεωρείται η διάσπαση του προσομοιούμενου ραδιενεργού πυρήνα, όπου παρακολουθείται η εξέλιξη της πορείας όλων των φωτονίων (δύο ή και περισσότερων) που ανήκουν στον ίδιο κλάδο διάσπασης του εξεταζόμενου ισοτόπου. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η κομβικής σημασίας αλλαγή στη λειτουργία του κώδικα PENMAIN.f, απαιτείται μία σειρά από εξειδικευμένες αλλαγές σε συγκεκριμένα σημεία του πρωτότυπου κώδικα. Ως εκ τούτου, στο 4ο Κεφάλαιο αναλύονται όλες οι τροποποιήσεις που

πραγματοποιήθηκαν, ενώ περιγράφονται και οι προγραμματιστικοί έλεγχοι που έγιναν ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του κώδικα. Με την αλλαγή της έννοιας της ιστορίας διαφοροποιείται και ο τρόπος υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής από τα δεδομένα της προσομοίωσης, ο οποίος αναλύεται στο τέλος του Κεφαλαίου αυτού.

Στο **5ο Κεφάλαιο**, αρχικά, παρουσιάζεται αναλυτικά ο έλεγχος των αποτελεσμάτων του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, σε σχέση με αντίστοιχα δεδομένα από πειράματα με πραγματικές πηγές, στις γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα αποδόσεων φωτοκορυφών για συγκεκριμένες ενέργειες φωτονίων που προκύπτουν μέσω του νέου κώδικα σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα για τις ίδιες συνθήκες γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται και παρουσιάζεται ο δεύτερος έλεγχος της ορθής λειτουργίας του τροποποιημένου κώδικα. Εκτελούνται προσομοιώσεις μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f για τις ίδιες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή και υπολογίζονται οι τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφών για όλες τις περιπτώσεις και για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια. Παράλληλα, προσδιορίζεται η τιμή του λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μέσω του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από τον πρωτότυπο κώδικα. Ο λόγος των αποδόσεων αυτών είναι μια ποσοτικοποίηση της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στην εκάστοτε γεωμετρία πηγής -ανιχνευτή, όπως προκύπτει από την προσομοίωση. Ο λόγος αυτός συγκρίνεται με την τιμή του συντελεστή διόρθωσης της επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, που έχει προκύψει για τις αντίστοιχες συνθήκες, μέσω του προγράμματος TrueCoinc. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων του νέου κώδικα χρήστη PENMAIN.f για το ισότοπο ^{134}Cs , σε σχέση με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φίλτρων αέρα, τα οποία λήφθηκαν κατά τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. την περίοδο Μάρτιος-Απρίλιος 2011, όταν και είχε συμβεί ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi της Ιαπωνίας. Τα φίλτρα αυτά θεωρήθηκαν πηγές όγκου χωρίς βέβαια να αποτελούν πιστοποιημένη ραδιενεργή πηγή.

Στο **Κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται μία συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας Δ.Ε. και σχολιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Ακόμα, αναφέρονται ορισμένα μελλοντικά βήματα για την επέκταση της λειτουργίας του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση τριών (3) παραρτημάτων. Στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του πρωτότυπου κώδικα χρήστη PENMAIN.f, στο οποίο αναλύεται ολόκληρη η δομή του. Στο **Παράρτημα Β** αναφέρονται όλες οι μεταβλητές που εμπεριέχονται στον πρωτότυπο κώδικα PENMAIN.f, όπως έχουν περιγραφεί σε προηγούμενη εργασία [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006], αλλά και οι νεοεισαχθείσες μεταβλητές του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Τέλος, στο **Παράρτημα Γ**, αναλύεται το λογικό διάγραμμα του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f, στο οποίο περιγράφεται η λογική προσομοίωσης που πλέον ακολουθεί ο συγκεκριμένος κώδικας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εισαγωγή στη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence ή cascade summing). Ως τέτοιο χαρακτηρίζεται το φαινόμενο της διαδοχικής εκπομπής δύο ή και περισσοτέρων φωτονίων του ίδιου κλάδου διάσπασης πυρήνα ενός ισοτόπου και η ταυτόχρονη ανίχνευση τους, ως ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με το άθροισμα των ενεργειών που αποθέτουν τα φωτόνια στον ανιχνευτή, λόγω αντικειμενικής αδυναμίας της ανιχνευτικής διάταξης [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003]. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζεται η επίδραση του φαινομένου στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ραδιενεργών δειγμάτων και περιγράφονται οι παράγοντες που κάνουν έντονη την εμφάνιση του, αναλύονται οι ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργία των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν για εκτέλεση πειραμάτων στην παρούσα Δ.Ε. Ακόμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης των μεθόδων αντιμετώπισης του φαινομένου, από τις αρχές της δεκαετίας του '70 μέχρι σήμερα και αναλύεται η μεθοδολογία που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιείται από το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Τέλος γίνεται μία σύντομη αναφορά στο πρόγραμμα TrueCoinc, το οποίο έχει κατασκευασθεί στο Πανεπιστήμιο Kossuth της Ουγγαρίας και το οποίο χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. για την εκτίμηση συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

2.2 Το φαινόμενο δημιουργίας αθροιστικών φωτοκορυφών.

Στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση έχει πολύ μεγάλη σημασία ο προσδιορισμός της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης, η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας ενός ισοτόπου στο εξεταζόμενο δείγμα. Στα πειράματα που πραγματοποιούνται, επιχειρείται μέγιστη ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, και για το λόγο αυτό πρέπει να εξετάζονται εμπειριστικώς όλοι οι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επιφέρουν δυσκολίες και προβλήματα στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Το φαινόμενο της δημιουργίας αθροιστικών φωτοκορυφών (coincidence summation) κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση αποτελεί πολλές φορές πηγή συστηματικού σφάλματος των αποτελεσμάτων της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ραδιενεργού δείγματος. Το σφάλμα που εισάγεται, όταν αγνοείται η επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης, αλλά και κατά την φασματοσκοπική ανάλυση του άγνωστου δείγματος, μπορεί να είναι υψηλότερο από την επιθυμητή ακρίβεια [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003]. Το συγκεκριμένο φαινόμενο

εμφανίζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι η πραγματική σύμπτωση (true coincidence), η οποία αναλύεται εκτενώς στη παράγραφο 2.2.1, και αποτελεί βασικό κομμάτι μελέτης της παρούσας εργασίας και ο δεύτερος αφορά την τυχαία άθροιση (random summing) που παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.2.2.

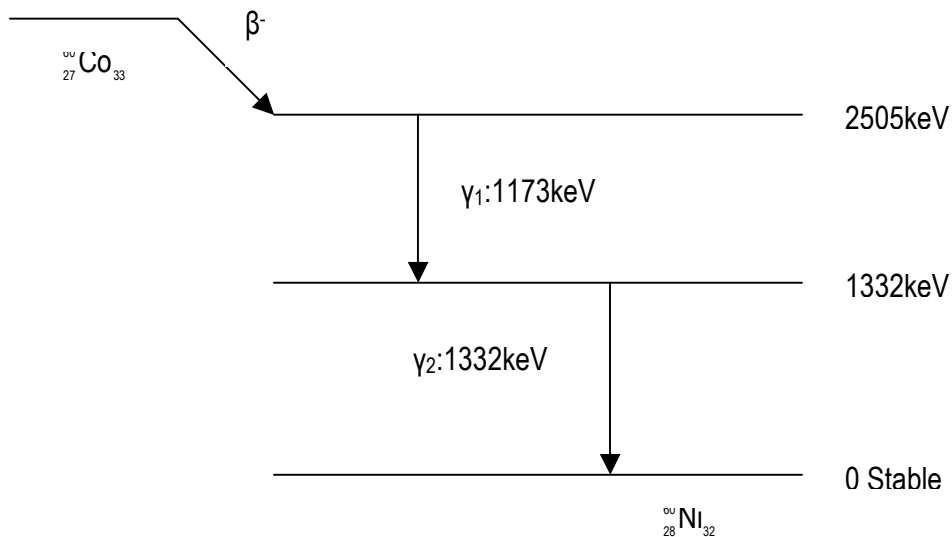
2.2.1 Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης περιγράφεται ως η ταυτόχρονη ανίχνευση από το ανιχνευτικό σύστημα, δύο ή και περισσότερων φωτονίων που εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο του διαγράμματος διάσπασης ενός πυρήνα ραδιενεργού ισότοπου. Η ύπαρξη των αθροιστικών φωτονίων οφείλεται στην αντικειμενική αδυναμία της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται, να παρακολουθήσει ορθά την εξέλιξη του φαινομένου και να αντιληφθεί τα δύο ή και περισσότερα φωτόνια ως μεμονωμένα και όχι ως ένα.

Για την κατανόηση του παραπάνω φαινομένου, παρατίθεται το απλοποιημένο διάγραμμα διάσπασης του ισότοπου ^{60}Co (Σχήμα 2.1). Στο σχήμα εμφανίζονται τα σημαντικότερα φωτόνια που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση του συγκεκριμένου ισότοπου με βάση το ποσοστό εκπομπής τους. Πιο συγκεκριμένα, εκπέμποντας ένα σωματίδιο β^- ο ασταθής πυρήνας ^{60}Co , μετά από μία σειρά διαδοχικών μεταπτώσεων από τη μία ενεργειακή στοιβάδα στην επόμενη, καταλήγει στον σταθερό πυρήνα ^{60}Ni . Στο συγκεκριμένο σχήμα διάσπασης υπάρχει μόνο ένας κλάδος από τον οποίο εκπέμπονται δύο διαδοχικά φωτόνια, με ενέργειες 1173keV και 1332keV, που αντιστοιχούν σε αποδιεγέρσεις του πυρήνα του ισότοπου ^{60}Co από υψηλότερες σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο πυρήνας παραμένει διεγερμένος στις ενδιάμεσες αυτές ενεργειακές στάθμες για χρόνους της τάξεως των picoseconds ή και nanoseconds σε άλλες περιπτώσεις. Αυτό το χρονικό διάστημα, που ονομάζεται χρόνος ημιζωής της στάθμης, είναι πολύ μικρό σε σχέση με τον χρόνο απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται, με αποτέλεσμα ο ανιχνευτής - εφόσον τα φωτόνια από την ίδια διάσπαση αλληλεπιδράσουν με αυτόν - να μην έχει τη δυνατότητα να τα ανιχνεύσει ως δύο ανεξάρτητα φωτόνια, αλλά ως ένα με ενέργεια το άθροισμα των ενεργειών που αποτίθενται στον ανιχνευτή¹. Οι ανιχνευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται έχουν χρόνο διάκρισης της τάξεως μερικών μικρόseconds.

¹ Για παράδειγμα, στην περίπτωση που τα δύο φωτόνια ενέργειας 1173keV και 1332keV, του ισότοπου ^{60}Co , αποθέσουν ολόκληρη την ενέργεια στον ανιχνευτή, ανιχνεύεται ένα φωτόνια συνολικής ενέργειας 2505keV.



Σχήμα 2.1 : Απλοποιημένο διάγραμμα διάσπασης ^{60}Co . Παρουσιάζονται μόνο τα σημαντικότερα φωτόνια.

2.2.1.1 Η επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

Αντικειμενικός στόχος μίας γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, εξεταζόμενου δείγματος, είναι ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός της ραδιενέργειας των ισοτόπων που περιέχονται σε αυτό. Ο ποιοτικός προσδιορισμός ενός ραδιενεργού δείγματος αφορά στον προσδιορισμό του είδους των ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία περιέχονται στο δείγμα και ο ποσοτικός προσδιορισμός στη ραδιενέργεια (Bq) για κάθε έναν από τους ραδιενεργούς πυρήνες που ανιχνεύονται στο δείγμα. Για τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας του κάθε ισοτόπου που ανιχνεύεται χρησιμοποιείται κατάλληλη σχέση (Σχέση 2.1), η οποία παρουσιάζεται και αναλύεται στη συνέχεια της παραγράφου.

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ραδιενεργού δείγματος, καταγράφονται παλμοί, οι οποίοι οφείλονται στην αλληλεπίδραση των εκπεμπόμενων φωτονίων από το δείγμα με την ευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή. Στη συνέχεια, δημιουργείται το ενεργειακό φάσμα, στο οποίο εμφανίζονται φωτοκορυφές των ανιχνευόμενων φωτονίων. Κάθε καταγεγραμμένος παλμός συντελεί στην δημιουργία και ανάπτυξη αντίστοιχης φωτοκορυφής, σε συγκεκριμένη θέση του εν λόγω φάσματος. Αναλύοντας το παραγόμενο φάσμα παρατηρείται πως υψηλότερες φωτοκορυφές οφείλονται στην αλληλεπίδραση και πλήρη απορρόφηση πολλών φωτονίων της ίδιας ενέργειας με το ανιχνευτή και αντίστροφα [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003].

Όταν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι έντονο, τα εκπεμπόμενα φωτόνια από τον ίδιο κλάδο διάσπασης ισοτόπου που περιέχονται στο αναλυόμενο δείγμα, δύναται να ανιχνευτούν ως ένα, αθροιστικό, με αποτέλεσμα στο εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα να εμφανίζονται φωτοκορυφές που στην πραγματικότητα μπορεί να μην υφίσταται. Έτσι, οι φωτοκορυφές των μεμονωμένων φωτονίων (στο

παράδειγμα του ^{60}Co τα φωτόνια ενέργειας 1173keV και 1332keV) είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που βλέπουμε αν δεν υπήρχε επιρροή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, ενώ η φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στο αθροιστικό φωτόνιο είναι αυξημένη (στο παράδειγμα του ^{60}Co το φωτόνιο ενέργειας 2505keV). Οι δύο αυτές περιπτώσεις που περιγράφηκαν, αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία με τους όρους 'μειωμένη' και 'αυξημένη' φωτοκορυφή, 'summing out' και 'summing in' effect, αντίστοιχα. Στην περίπτωση της 'μειωμένης' φωτοκορυφής, λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, οι κρούσεις που προέρχονται από φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας, καταγράφονται κακώς εκτός της αναμενόμενης φωτοκορυφής του ενεργειακού φάσματος, συνεπώς εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με την πραγματικότητα. Στην περίπτωση της 'αυξημένης' φωτοκορυφής, κρούσεις, που προέρχονται από την ταυτόχρονη ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων, καταγράφονται σε φωτοκορυφή του φάσματος που αντιστοιχεί σε ενέργεια φωτονίου, το οποίο μπορεί να μην υφίσταται στην πραγματικότητα.

Εκτός από την εμφάνιση των 'αυξημένων' και 'μειωμένων' φωτοκορυφών, κατά την επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική αύξηση του συνεχούς υποστρώματος του παραγόμενου φάσματος. Αυτό οφείλεται στην άθροιση φωτονίων που, τουλάχιστον ένα από τα δύο δεν έχει εναποθέσει ολόκληρη την ενέργειά του στον ανιχνευτή. Επίσης, επίδραση στην κύμανση του υποστρώματος αλλά και στη δημιουργία αθροιστικών φωτοκορυφών, έχει και η παρουσία ακτινοβολίας πέδησης (bremsstrahlung), η οποία μπορεί να εκπέμπεται κατά τη διάσπαση ραδιενεργού πυρήνα². Εφόσον η ακτινοβολία πέδησης ανιχνευτεί, έχει ενδεχομένως ως αποτέλεσμα, πέραν από την αύξηση του συνεχούς υποστρώματος του φάσματος και τη δημιουργία αθροιστικών φωτοκορυφών όταν η ακτινοβολία πέδησης προσπίπτει στον ανιχνευτή ταυτόχρονα με φωτόνια-γ που έχουν εκπεμφθεί από υψηλότερη ενεργειακή στάθμη [Gilmore G., Hemingway J., 1995].

Χρησιμοποιώντας τις φωτοκορυφές φάσματος που προκύπτουν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση του δείγματος που εξετάζεται, μπορεί να γίνει εν τέλει ο ζητούμενος ποιοτικός προσδιορισμός της ραδιενέργειας του. Βασική προϋπόθεση για τον ποσοτικό προσδιορισμό, δηλαδή για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας, αποτελεί η γνώση της απόδοσης φωτοκορυφής για την εξεταζόμενη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή και την ενδιαφερόμενη ενέργεια φωτονίων. Η ραδιενέργεια του δείγματος υπολογίζεται ποσοτικά με χρήση της παρακάτω σχέσης :

$$R = \frac{\text{area}}{\text{Eff}_{\text{peak}} \cdot \text{yield} \cdot \text{time}} \quad (\text{Σχέση 2.1})$$

όπου:

- Eff_{peak} : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή³,
- yield : το ποσοστό εκπομπής των ακτίνων-γ συγκεκριμένης ενέργειας,

² Στην περίπτωση ενός β-ραδιενεργού πυρήνα είναι δυνατόν το σωματίδιο-β που εκπέμπεται να αλληλεπιδράσει με υλικά κοντά στο σημείο της εκπομπής του (στο υλικό της πηγής, τη θωράκιση, το παράθυρο του ανιχνευτή κλπ) και να υποστεί πέδηση, με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας-Χ πέδησης (Bremsstrahlung)

³ Στην παράγραφο 2.3 παρατίθενται περισσότερες λεπτομέρειες για την έννοια 'απόδοση φωτοκορυφής'.

- time : ο χρόνος δειγματοληψίας,
- area : η καθαρή επιφάνεια (εμβαδόν) της φωτοκορυφής.

Στον όρο 'area' επιδρά σημαντικά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αφού τα ανιχνευόμενα κατά την ανάλυση φωτόνια που υπόκεινται στο φαινόμενο, ενδεχομένως να μην καταγράφονται κάτω από την προβλεπόμενη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης της ενέργειας του φωτονίου. Συνεπώς, η επιφάνεια της εξεταζόμενης φωτοκορυφής είναι μικρότερη της πραγματικής και οδηγεί σε μειωμένη εκτίμηση της ραδιενέργειας του αναλυόμενου δείγματος. Επομένως, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αποτελεί σημαντική πηγή συστηματικού σφάλματος κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008].

Στη διεθνή βιβλιογραφία [De Felice et al., 2002] έχουν αναφερθεί περιπτώσεις γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης ραδιενεργών δειγμάτων, κατά τις οποίες το σφάλμα που εισάγει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται μπορεί να είναι από 20%-50% για γεωμετρικές πηγής τοποθετημένης κοντά στον ανιχνευτή και 5-10% για πηγές όγκου, ή ακόμα και από 100% έως 500% σε περιπτώσεις ανιχνευτή φρέατος τύπου-n. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το σφάλμα που εισάγεται είναι μεγαλύτερο από την επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης. Συνεπώς, η ύπαρξη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης μπορεί να αλλοιώσει απόλυτα τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ανιχνευτές υψηλής απόδοσης. Επισημαίνεται, πως παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η διερεύνηση των μηχανισμών και παραμέτρων που επηρεάζουν την έντονη παρουσία του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ραδιενεργού δείγματος.

2.2.1.2 Παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Για περισσότερο από 30 χρόνια μελετάται διεξοδικά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Έχουν δημοσιευθεί πλήθος ερευνών που εστιάζονται στην ανάλυση και παρακολούθηση του φαινομένου, μερικές από τις οποίες είναι οι εργασίες των [Andreev et al., 1972], [Debertin K., Scholtzig U., 1979], [Sinkko K., Aaltonen H., 1985], [Decombaz et al., 1992] και πολλές άλλες. Μέσω πολλών πειραμάτων και αναλύσεων έχουν παρατηρηθεί πως υπάρχουν συγκεκριμένοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Όπως έχει αναφερθεί και σε άλλες παλαιότερες διπλωματικές εργασίες που εκπονήθηκαν από το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003], [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008], μπορεί να γίνει διαχωρισμός των παραγόντων που εξαρτώνται από το είδος της ραδιενεργού πηγής και σε μηχανισμούς που είναι ανεξάρτητοι της. Αυτό που πρέπει να τονισθεί είναι ότι η ένταση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης σε μία εξεταζόμενη πηγή είναι ανεξάρτητη από τη ραδιενέργεια της πηγής.

2.2.1.2.1 Παράγοντες εξαρτώμενοι από το ραδιενεργό ισότοπο.

Στη βιβλιογραφία έχει γίνει αναφορά για τους εξής παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με το μηχανισμό της διαδοχικής εκπομπής δύο ή/και περισσότερων φωτονίων ισότοπου της πηγής που αναλύεται [Garcia-Torano E. et al., 2005], [Lepy M. et al., 2010] :

- Σχήμα διάσπασης ισότοπου, καθώς η πολυπλοκότητα της δομής του διαγράμματος διάσπασης σχετίζεται με την εκπομπή πολλών διαδοχικών φωτονίων.
- Τιμές των χρόνων αποδιέγερσης των ενδιάμεσων σταθμών ενέργειας του ισότοπου που μελετάται.
- Ποσοστά εκπομπής των φωτονίων που ανιχνεύονται.
- Είδος της διάσπασης του πυρήνα (β-διάσπαση, α-διάσπαση, αρπαγή ηλεκτρονίου, εσωτερική μετάπτωση). Για παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.2.1.1, στην περίπτωση β-διάσπασης κατά την παραγωγή ακτίνων-Χ, υπάρχει πιθανότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης τους με φωτόνια που έχουν εκπεμφθεί από υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Συμβάλλουν λοιπόν, στην αύξηση της έντασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

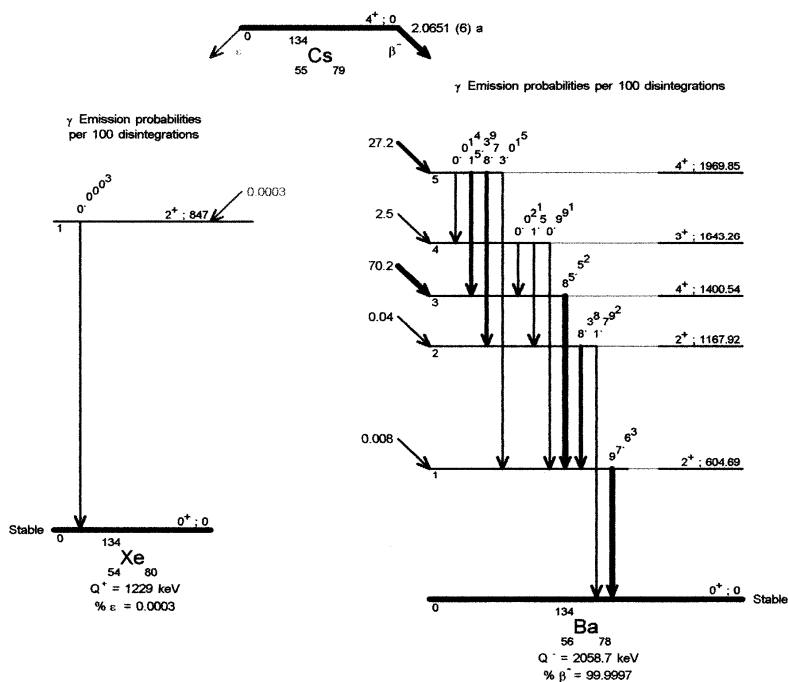
Παρατηρώντας το πλήρες σχήμα διάσπασης του ισότοπου ^{134}Cs (Σχήμα 2.2), ενός πολύπλοκου διαγράμματος με πέντε ενεργειακές στάθμες μικρού χρόνου αποδιέγερσης και έντεκα εκπεμπόμενα φωτόνια, είναι κατανοητό πως είναι μεγάλη η πιθανότητα καταγραφής αθροιστικών φωτονίων από την ανιχνευτική διάταξη.

Η γωνία που σχηματίζουν τα δύο εκπεμπόμενα φωτόνια (angular correlation) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη μελέτη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Για αρκετά ισότοπα τα οποία εκπέμπουν από τον ίδιο κλάδο διάσπασης δύο ή και περισσότερα φωτόνια έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά μοντέλα που περιγράφουν τη γωνιακή κατανομή εκπομπής του δεύτερου φωτονίου ως προς το πρώτο [Hamilton D., 1940]. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ραδιενεργού ισότοπου ^{60}Co , έχει αναπτυχθεί η παρακάτω σχέση:

$$W(\theta) = 1 + \frac{1}{8} \cos^2(\theta) + \frac{1}{24} \cos^4(\theta) \quad (\text{Σχέση 2.2})$$

όπου $W(\theta)$, είναι ο λόγος της πιθανότητας να εκπεμφθεί το δεύτερο φωτόνιο προερχόμενο από τον ίδιο κλάδο διάσπασης υπό γωνία θ ως προς το πρώτο φωτόνιο, προς την πιθανότητα να εκπεμφθεί αντίστοιχα υπό γωνία 90° [Muhlberger C., 2008]. Συνεπώς, η γωνία που σχηματίζουν δύο εκπεμπόμενα φωτόνια είναι πιθανόν να έχει τέτοια τιμή που να μην επιτρέπει την ταυτόχρονη ανίχνευση τους από την γ-φασματοσκοπική διάταξη [Knoll G., 1989]. Τέτοια περίπτωση είναι τα δύο φωτόνια να εκπέμπονται αντιδιαμετρικά, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα αλληλεπίδρασης του ενός φωτονίου με την

ευαίσθητη περιοχή του κρυστάλλου του ανιχνευτή, και το έτερο να απορροφηθεί ή να σκεδαστεί στη θωράκιση της διάταξης.



Σχήμα 2.2 : Διάγραμμα διάσπασης ^{134}Cs [M.-M. Bé, et al., 2004].

2.2.1.2.2 Παράγοντες ανεξάρτητοι από το είδος του ραδιενεργού ισотоύπου.

Ως παράγοντες ανεξάρτητοι από το είδος του ραδιενεργού ισотоύπου, μπορούν να χαρακτηρισθούν οι παράγοντες που έχουν σχέση με το ανιχνευτικό σύστημα και τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή [Knoll G., 1989], [Gilmore G. and Hemingway J., 1995], [De Felice et al., 2000] :

- Χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης, όπως ο βαθμός απόδοσης και η χρονική απόκριση της, το πάχος και το υλικό (Be, Al, κ.λ.π.) του παραθύρου του ανιχνευτή, καθώς και η ύπαρξη και το πάχος του dead layer του ανιχνευτή.
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή το είδος της πηγής (σημειακή, επίπεδη, πηγή όγκου, πηγή σε δοχείο Marinelli ή πηγή στο εσωτερικό του ανιχνευτή).
- Στερεά γωνία πηγής-ανιχνευτή, δηλαδή η απόσταση του εξεταζόμενου δείγματος από την ανιχνευτική διάταξη. Μικρότερη απόσταση πηγής-ανιχνευτή παρουσιάζει μεγαλύτερη πιθανότητα ταυτόχρονης καταγραφής δύο ή και περισσότερων φωτονίων και άρα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι πιο έντονο στα αποτελέσματα του εξαγόμενου ενεργειακού φάσματος.

2.2.2 Το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης.

Το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης παρουσιάζει παρεμφερή συμπεριφορά με το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, αφού και τα δύο φαινόμενα στηρίζονται στην λειτουργία δημιουργίας αθροιστικών φωτοκορυφών. Αφορά φωτόνια τα οποία μπορεί να προέρχονται από τη διάσπαση διαφορετικών πυρήνων. Κατά το φαινόμενο αυτό δύο ή περισσότερα φωτόνια, τέτοιας προέλευσης, αλληλεπιδρούν με την ευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή με χρονική διαφορά μικρότερη από το χρόνο απόκρισης του, και δεν καταγράφονται ως ξεχωριστά γεγονότα. Αντιθέτως, δημιουργείται παλμός ύψους, που ισούται με το ύψος του πρώτου χρονικά παλμού, προσαιξημένο με ποσοστό του ύψους των υπόλοιπων παλμών που καταγράφηκαν στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το ποσοστό αυτό, εξαρτάται από τη χρονική διαφορά αυτών των παλμών [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003].

Η επίδραση του φαινομένου στην μορφολογία του εξαγόμενου φάσματος είναι ανεπιθύμητη, αφού εισάγει σφάλματα στα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, μεταβάλλοντας την επιφάνεια των ενδιαφερόμενων φωτοκορυφών. Η εμφάνιση του φαινομένου εξαρτάται σημαντικά από τη ραδιενέργεια (Bq) της εξεταζόμενης πηγής. Υψηλής ραδιενέργειας πηγή έχει ως συνέπεια μεγάλο πλήθος εκπεμπόμενων φωτονίων και μεγάλη πιθανότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης τους. Επίσης, ένας δεύτερος σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην ένταση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, είναι τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά των συνιστωσών της γ-φασματοσκοπικής διάταξης. Διαδοχικά φωτόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργό πυρήνα, αλλά όχι από τον ίδιο κλάδο διάσπασης ισότοπου, έχουν χρονική διαφορά, κατά την εκπομπή τους, της τάξεως των μικρόseconds, όσος είναι και ο χρόνος διάκρισης των ανιχνευτικών διατάξεων [Gilmore G. and Hemingway J., 1995]. Αυξάνεται δηλαδή η πιθανότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης δύο ή και περισσότερων φωτονίων που φθάνουν στον ανιχνευτή, για καθαρά τυχαίους λόγους, μέσα στο κατάλληλο χρονικό διάστημα που προσδιορίστηκε προηγουμένως.

2.3 Διατάξεις ανίχνευσης γ-φασματοσκοπίας του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Η ακρίβεια των μετρήσεων μία γ-φασματοσκοπικής διάταξης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ανιχνευτή που χρησιμοποιείται. Στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. είναι εγκατεστημένες τέσσερις (4) ανιχνευτικές διατάξεις με ανιχνευτές υπέρ-καθαρού γερμανίου (Ge). Ειδικότερα, αυτές είναι :

- ο ανιχνευτής GeLi (Lithium drifted Germanium detector),
- ο ανιχνευτής HPGe (High Purity Germanium detector),
- ο ανιχνευτής LEGe (Low Energy Germanium detector),
- ο ανιχνευτής XtRa (Extended Range Germanium detector).

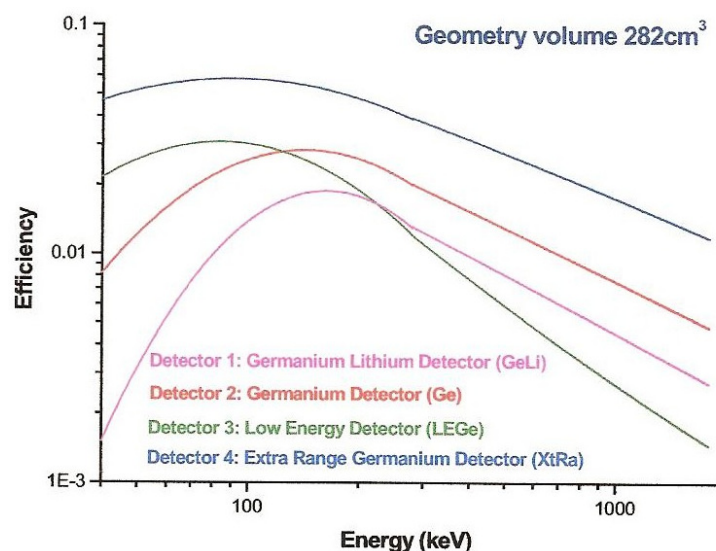
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις των ανιχνευτών HPGe και XtRa και για αυτό το λόγο, οι ανιχνευτές αυτοί παρουσιάζονται στη συνέχεια αναλυτικά σε ξεχωριστές παραγράφους. Ο ανιχνευτής GeLi, δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω τεχνικών προβλημάτων που παρουσίασε κατά τη χρονική

περίοδο της παρούσας Δ.Ε. Επίσης, δεν χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής LeGe διότι εμφανίζει πολύ υψηλή απόδοση για την ανίχνευση φωτονίων κυρίως χαμηλών ενεργειών, έως 100keV, και στην παρούσα Δ.Ε. δόθηκε έμφαση σε φωτόνια υψηλότερων ενεργειών (μερικές εκατοντάδες keV).

Δύο από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι:

- Η απόδοση φωτοκορυφής, δηλαδή η ικανότητα ανίχνευσης φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας, που αποθέτουν ολόκληρη την ενέργειά τους στον ανιχνευτή (full energy peak efficiency). Στην ουσία είναι το ποσοστό των φωτονίων που αποδίδουν ολόκληρη την ενέργεια τους στον ανιχνευτή, σε σχέση με το πλήθος των φωτονίων της ενέργειας αυτής που εκπέμπονται από την πηγή.
- Η διακριτική ικανότητα, δηλαδή η ικανότητα διάκρισης φωτονίων με παραπλήσιες ενέργειες.

Ειδικά για το μέγεθος απόδοση φωτοκορυφής, μία ανιχνευτική διάταξη, πριν χρησιμοποιηθεί για τον ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισωτόπων, πρέπει να έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα, δηλαδή πρέπει να έχει προσδιορισθεί κατάλληλη καμπύλη της απόδοσης, συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή που χρησιμοποιείται κατά τη φασματοσκοπική ανάλυση. Στο Σχήμα 2.3 παρατίθενται οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης των ανιχνευτικών διατάξεων του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., για τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2 στο 5^ο Κεφάλαιο και η οποία έχει την κωδική ονομασία γεωμετρία '2'.

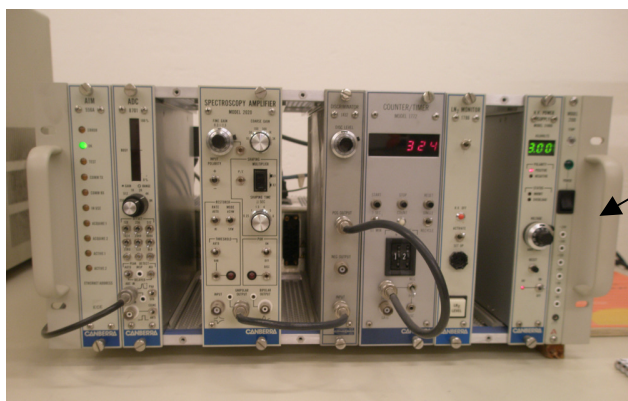


Σχήμα 2.3 : Απόδοση φωτοκορυφής των ανιχνευτικών διατάξεων του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. για γεωμετρία '2'.

2.3.1 Ο ανιχνευτής υπερ-καθαρού γερμανίου HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Ο ανιχνευτής HPGe είναι ένας ομοαξονικός (coaxial) ημιαγωγός ανιχνευτής από γερμάνιο υψηλής καθαρότητας, σχετικής απόδοσης 33.8%, ο οποίος είναι σε λειτουργία στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. από το 1983. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή είναι: διάμετρος κρυστάλλου 55.3mm, ύψος κρυστάλλου

65mm, ενεργός περιοχή που βλέπει το παράθυρο του ανιχνευτή 24.15cm², απόσταση από το παράθυρο 5mm. Στο Σχήμα 2.4, παρουσιάζεται η ανιχνευτική διάταξη, ενώ στον Σχήμα 2.7 στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται το πιστοποιητικό του ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε κρυστάτη αλουμινίου (Al), ο οποίος συνδέεται με δοχείο υγρού αζώτου, και περιβάλλεται εξ ολοκλήρου από ειδική θωράκιση για μείωση του φυσικού υποστρώματος. Η θωράκιση είναι ορθογωνικού σχήματος με κυλιόμενο κάλυμμα, και τα τοιχώματά της αποτελούνται από τρία (3) στρώματα υλικού, τα οποία, ξεκινώντας από το εσωτερικού της θωράκισης είναι κατά σειρά: φύλλο χαλκού, φύλλο κασσίτερου και μεγάλο πάχους στρώμα ασφαλίου. Η διακριτική ικανότητα του HPGe, εκφραζόμενη σε όρους FWHM (Full width at half maximum) για φωτόνια ενέργειας 122.06keV είναι 0.85keV, ενώ για φωτόνια ενέργειας 1332.5keV είναι 1.78keV. Τέλος, ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.5keV είναι 66.5:1.

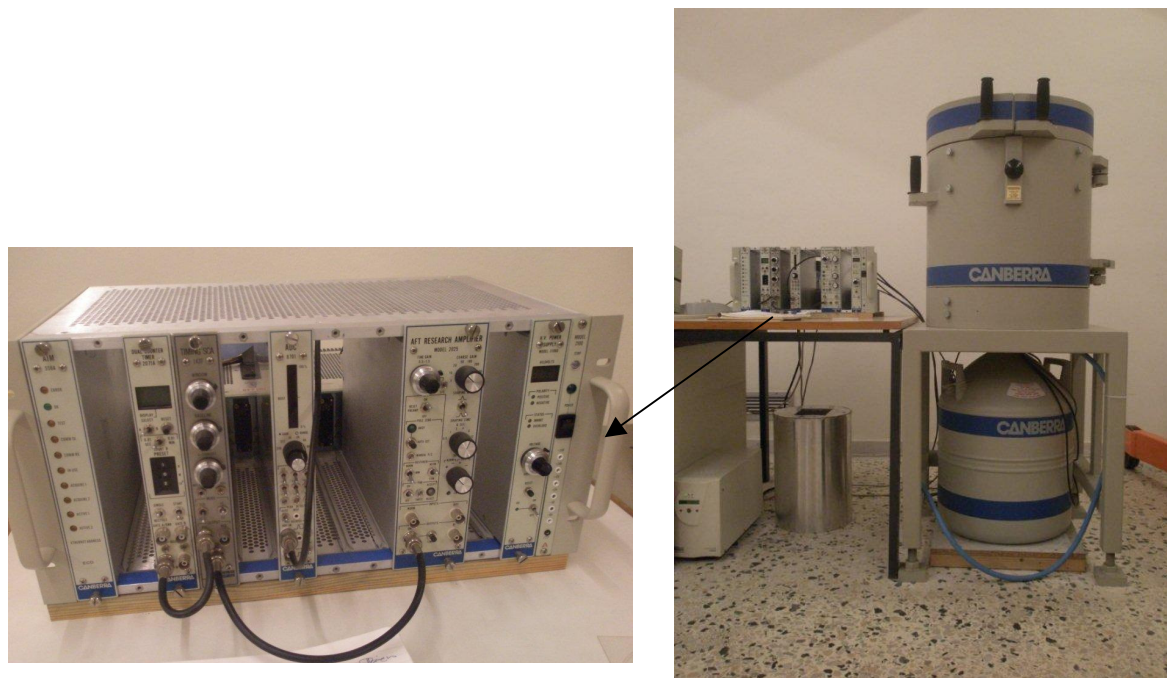


Σχήμα 2.4 : Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

2.3.2 Ο ανιχνευτής XtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής είναι ομοαξονικός ημιαγωγός ανιχνευτής με παράθυρο από ανθρακονήματα (carbon fibers) και είναι εγκατεστημένος στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. από το 1999. Χαρακτηρίζεται ως 'coaxial one open end, closed and facing window'. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής: διάμετρος κρυστάλλου 80mm και ύψος κρυστάλλου 78mm. Έχει σχετική απόδοση 104.5% για φωτόνια ενέργειας 1332.5keV, παρουσιάζοντας διακριτική ικανότητα της τάξεως του 1.03keV για φωτόνια ενέργειας 122.06keV και 2.04keV για 1332.5keV. Ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.5keV είναι 82.2:1. Στο Σχήμα 2.5, παρουσιάζεται η ανιχνευτική διάταξη Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με ανιχνευτή XtRa, ενώ στο Σχήμα 2.8 στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθεται το πιστοποιητικό του. Η συγκεκριμένη

ανιχνευτική διάταξη έχει ρυθμιστεί για την ανάλυση δειγμάτων στην ενεργειακή περιοχή 0-2000keV. Είναι τοποθετημένος σε κατάλληλη κυλινδρική θωράκιση κατακόρυφου προσανατολισμού τύπου *front-open/split-top* της εταιρείας Canberra (μοντέλο 767) και αποτελείται από τέσσερα (4) στρώματα υλικού, τα οποία, ξεκινώντας από το εσωτερικό της θωράκισης, είναι κατά σειρά: φύλλο χαλκού πάχους 1.5mm, φύλλο κασσιτέρου πάχους 1mm, στρώμα μολύβδου πάχους 100mm και στρώμα ασαλιού πάχους 9.5mm.



Σχήμα 2.5 : Ανιχνευτική διάταξη με ανιχνευτή ΧtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

2.4 Διόρθωση ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Στην παράγραφο 2.2.1 παρουσιάστηκε η επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στην ακρίβεια των πραγματοποιούμενων μετρήσεων, κατά την ανάλυση ραδιενεργού δείγματος σε γ-φασματοσκοπική διάταξη. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.2.1.1, η αποτύπωση του φαινομένου στο εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα, εμφανίζεται μέσω της μείωσης της επιφάνειας των φωτοκορυφών που αντιστοιχούν στα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια και μέσω της αύξησης της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στην αθροισμένη ενέργεια. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η εύρεση κατάλληλης μεθόδου, η οποία να διορθώνει την τιμή της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, με στόχο την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης μπορεί να αντιμετωπισθεί με κατάλληλη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης μέσω πρότυπης πηγής, ακριβώς όμοιας σύστασης και γεωμετρίας περιέχοντας τα ίδια ισότοπα, με το προς εξέταση δείγμα. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται η παρουσία του φαινομένου να είναι ίδια τόσο στην πρότυπη πηγή όσο και στην προς

εξέταση πηγή, με αποτέλεσμα να αναιρείται η επίδραση του από τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται [Semkow T. et al., 1990]. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αντικειμενικές δυσκολίες στην εφαρμογή της, καθώς απαιτείται πληθώρα πρότυπων πηγών, διαφορετικών συστάσεων και γεωμετριών ώστε να μπορούν να καλυφθούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις εξεταζόμενων δειγμάτων.

Επίσης η επίδραση του φαινομένου στους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται μπορεί να απαλειφθεί, τοποθετώντας την εξεταζόμενη πηγή σε μακρινή απόσταση από τον ανιχνευτή. Με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται η στερεά γωνία πηγής - ανιχνευτή, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα να ανιχνευτούν ταυτόχρονα δύο ή και περισσότερα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια του εξεταζόμενου ραδιενεργού δείγματος. Η μέθοδος αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης για τις εξεταζόμενες φωτοκορυφές με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλος χρόνος ανάλυσης του δείγματος ώστε να μπορούν να εξαχθούν ορθά αποτελέσματα με καλή στατιστική ακρίβεια. Ως εκ τούτου, η διαδικασία αυτή κρίνεται ιδιαίτερα χρονοβόρα, και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ραδιοπεριβαλλοντικών δειγμάτων που εμφανίζουν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας, μπορεί να είναι ανέφικτη.

Διαπιστώνεται, πως υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να γίνει χρήση των προαναφερόμενων μεθόδων για τη διόρθωση της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Επομένως, απαιτείται ανάπτυξη κατάλληλης διαδικασίας διόρθωσης, η οποία να στηρίζεται στον υπολογισμό συντελεστών διόρθωσης για τον όρο 'επιφάνεια φωτοκορυφής'. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. και έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενες εργασίες [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003], [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008].

Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στη χρήση κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης της επιφάνειας των σχηματιζόμενων φωτοκορυφών και πρέπει να ξεκινάει από τη διαδικασία βαθμονόμησης της γ-φασματοσκοπικής διάταξης που χρησιμοποιείται. Στόχος είναι ο ακριβής υπολογισμός της ραδιενέργειας του δείγματος που αναλύεται. Αφού αναλυθεί η πρότυπη πηγή βαθμονόμησης για κατάλληλο χρονικό διάστημα, εντοπίζονται οι φωτοκορυφές των ισοτόπων που συμμετέχουν στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Eff = \frac{area}{R \cdot yield \cdot time} \quad (\text{Σχέση 2.3})$$

όπου:

- R : η γνωστή τιμή της ραδιενέργειας της πρότυπης πηγής,
- yield : το ποσοστό εκπομπής του εξεταζόμενου φωτονίου,
- time : ο χρόνος ανάλυσης του ραδιενεργού δείγματος στην γ-φασματοσκοπική διάταξη,
- area : η επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής,

Απαιτείται κατάλληλη διόρθωση της τιμής της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής μέσω κατάλληλου συντελεστή C_i , για τον οποίο θα ισχύει :

$$Eff'_i = \frac{\frac{area_i}{C_i}}{R_i \cdot time_i \cdot yield_i} \quad (\text{Σχέση 2.4})$$

όπου προκύπτει : $area'_i = \frac{area_i}{C_i}$ και προφανώς θα ισχύει $Eff'_i = \frac{Eff_i}{C_i}$. (Σχέση 2.5)

Για τις ενέργειες που αντιστοιχούν στα φωτόνια της πρότυπη πηγής βαθμονόμησης, υπολογίζεται η απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης, και ως εκ τούτου προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης, $Eff'_{fit}(E)$, διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Εν συνεχεία, μπορεί να αναλυθεί δείγμα άγνωστης σύστασης, και να υπολογιστεί η ραδιενέργεια κάθε ισότοπου που περιέχεται εντός του. Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο φωτόνιο δε συμμετέχει στη διαμόρφωση αθροιστικών φωτοκορυφών, η ζητούμενη ραδιενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_j = \frac{area_j}{Eff'_{fit_j} \cdot time_j \cdot yield_j} \quad (\text{Σχέση 2.6})$$

Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο φωτόνιο συμμετέχει στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, η ζητούμενη διορθωμένη ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης τιμή της ραδιενέργειας, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R'_j = \frac{area'_j}{Eff'_{fit_j} \cdot time_j \cdot yield_j} \quad (\text{Σχέση 2.7})$$

όπου : $area'_j = \frac{area_j}{C_j}$.

Δεν απαιτείται καμία διόρθωση στην ειδική περίπτωση όπου η j φωτοκορυφή και το αντίστοιχο ισότοπο που εξετάζεται, ταυτίζεται με την i φωτοκορυφή και το αντίστοιχο ισότοπο της πρότυπης πηγής βαθμονόμησης.

Στην επόμενη παράγραφο, πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική αναφορά σε διάφορες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί και αφορούν στον αναλυτικό υπολογισμό των κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης.

2.4.1 Μέθοδοι αντιμετώπισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 αναπτύχθηκαν μέθοδοι προσδιορισμού διόρθωσης της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Έχουν αναπτυχθεί μοντέλα θεωρητικά, εμπειρικά, ημιεμπειρικά αλλά και μέθοδοι που στηρίχθηκαν στη χρήση προγραμματιστικού κώδικα

προσομοίωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, επισημαίνεται πως στόχος είναι να πραγματοποιηθεί διόρθωση της τιμής της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής (Area), μέσω κατάλληλων συντελεστών.

Μεταξύ των θεωρητικών μεθόδων που έχουν προταθεί για την επίλυση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, μία πρώτη προσέγγιση αφορά τη χρήση περιοδικά επαναλαμβανόμενων εξισώσεων για τον αναλυτικό υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης για οποιοδήποτε σχήμα β-διάσπασης [Andreev et al., 1972,1973]. Μεταγενέστερα προτάθηκε [Semkow et al., 1990] και αναπτύχθηκε [Korun and Martincic, 1993] μέθοδος που βασίζεται στην αξιοποίηση υπολογισμού πινάκων για την περιγραφή πολύπλοκων διαγραμμάτων διάσπασης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση συστήματος πολύπλοκων εξισώσεων, το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με το διάγραμμα διάσπασης του εξεταζόμενου ισότοπου. Χρήση αυτού του θεωρητικού μοντέλου, αποτελεί μία ουσιαστική προσέγγιση στον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης, αφού προβλέπονται όλες οι περιπτώσεις συμπτώσεων και αθροίσεων από όλες τις πιθανές μεταπτώσεις του πυρήνα (cascades).

Στην εργασία των [Quintana B. and Fernandez F., 1995] αναπτύσσεται μία εμπειρική μέθοδος για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης των επιφανειών φωτοκορυφής που συναντώνται κατά την ανάλυση ραδιοπεριβαλλοντικών δειγμάτων. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία, πραγματοποιείται ένας ουσιαστικός διαχωρισμός στο είδος των φωτοκορυφών που μπορούν να εμφανισθούν σε ενεργειακό φάσμα ενός δείγματος σε γ-φασματοσκοπική διάταξη. Διαχωρίζεται η 'πραγματική επιφάνεια κορυφής', T_i από την 'μετρούμενη επιφάνεια κορυφής', M_i . Η πρώτη ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που αποθέτουν όλη την ενέργεια τους στην ευαίσθητη περιοχή του κρυστάλλου ανά μονάδα χρόνου (full energy peak). Η δεύτερη ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός κρούσεων που καταγράφονται στην κορυφή που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου. Ο ζητούμενος συντελεστής διόρθωσης προκύπτει από το λόγο της 'μετρούμενης' προς την 'πραγματική' επιφάνεια φωτοκορυφής, στην περίπτωση που οι αθροιστικές φωτοκορυφές προκύπτουν αποκλειστικά από το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και όχι από το φαινόμενο της τυχαίας άθροισης. Για το i φωτόνιο που περιέχεται στο προς εξέταση ραδιενεργό δείγμα και αναλύεται σε συγκεκριμένη γεωμετρία ανιχνευτή - πηγής, ο εν λόγω συντελεστής υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση :

$$C_i = \frac{T_i}{M_i} \quad (\text{Σχέση 2.8})$$

Επίσης, η μέθοδος επεκτείνεται και στην περίπτωση που το ίδιο δείγμα αναλυθεί σε δύο διαφορετικές γεωμετρίες, για παράδειγμα τη γεωμετρία 'M' και τη γεωμετρία αναφοράς 'P'. Οι 'πραγματικές' επιφάνειες, T_i^M και T_i^P , που αφορούν την εκπομπή του i φωτονίου, σχετίζονται με το συντελεστή $C_g(E_\gamma)$, ο οποίος εξαρτάται από την ιδιότητα αυτοαπορρόφησης του εξεταζόμενου φωτονίου καθώς και από την επίδραση που μπορεί να επιφέρει η αλλαγή της στερεάς γωνίας πηγής ανιχνευτή της M-geometry ως προς την P-geometry. Συνεπώς ο εν λόγω συντελεστής, C_g εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$C_G(E_\gamma) = \frac{T_i^M}{T_i^P} \quad (\text{Σχέση 2.9})$$

Στην περίπτωση που η 'μετρούμενη επιφάνεια κορυφής' της πηγής αναφοράς M_i^P ισοτόπου που εκπέμπει ακτίνες γ σε σύμπτωση, είναι ίση με την αντίστοιχη 'πραγματική' επιφάνεια, τότε ο συντελεστής διόρθωσης για τη M-geometry, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$C_i = \frac{M_i^P}{M_i^M} C_G(E_\gamma) \quad (\text{Σχέση 2.10})$$

Στην εργασία των [Overwater et al., 1993] σημειώνεται πως στην περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση d πάνω από το παράθυρο του ανιχνευτή, ο συντελεστής C_G δίνεται από τη Σχέση 2.11. Η συγκεκριμένη γεωμετρία πληροί τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως καθώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης δύο ή και περισσότερων φωτονίων που εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο διάσπασης του εξεταζόμενου ισοτόπου.

$$C_G(E, V, m, d) = \frac{\varepsilon_M(E, V, m)}{\varepsilon_P(E, d)} \quad (\text{Σχέση 2.11})$$

όπου :

- $\varepsilon_M(E, V, m)$ είναι η συνάρτηση απόδοσης φωτοκορυφής (photo peak efficiency function) για φωτόνια που εκπέμπονται από πηγή με όγκο V και μάζα m ,
- $\varepsilon_P(E, d)$ είναι η συνάρτηση απόδοσης φωτοκορυφής για φωτόνια που εκπέμπονται από σημειακή πηγή σε απόσταση d από τον ανιχνευτή.

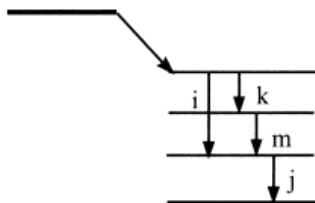
Εν συνεχεία μπορεί να προσδιοριστεί καμπύλη C_G συναρτήσει της ενέργειας των εξεταζόμενων φωτονίων E , η οποία χαρακτηρίζεται από τον όγκο, τη μάζα της πηγής καθώς και από την απόσταση που έχει τοποθετηθεί η προς ανάλυση σημειακή πηγή. Τελικά, δύναται να υπολογιστεί μέσω της καμπύλης $C_G(E)$, ο ζητούμενος συντελεστής διόρθωσης της σχηματιζόμενης επιφάνειας φωτοκορυφής C_i , για το εξεταζόμενο φωτόνιο ενέργειας E_γ .

Μέσω της συγκεκριμένης εμπειρικής μεθοδολογίας μπορούν να εισαχθούν διορθώσεις από όλες τις πιθανές συμπτώσεις άθροισης, οι οποίες δύναται να οφείλονται στη σύμπτωση φωτονίων, στη σύμπτωση ακτίνων X και γ καθώς και στη σύμπτωση των παραγόμενων φωτονίων κατά την εξαΰλωση ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου και των ακτίνων γ που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση του θυγατρικού πυρήνα [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Η μέθοδος αυτή δεν υποστηρίζεται από κάποιο προγραμματιστικό κώδικα με αποτέλεσμα η εξαγωγή των ζητούμενων συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών, να αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία.

Εκτός των παραπάνω μεθόδων, έχουν προταθεί και διάφοροι άλλοι τρόποι υπολογισμού των συντελεστών διόρθωσης της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Αναφέρεται η μέθοδος προσδιορισμού συντελεστών διόρθωσης από τους [De Felice et al., 2000], [De Felice et al., 2002]. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στη θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου λαμβάνοντας υπόψη τις εσωτερικές διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά τη διάσπαση πυρήνα ραδιενεργού ισότοπου. Προτάθηκε ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης, C_i , να προκύπτει μέσω της σχέσης :

$$C_i = \left[1 + \frac{\sum_{k,m} P_{t_{km}} P_k P_m \varepsilon_k \varepsilon_m}{I_{\gamma_i} \varepsilon_i} \right] \left[1 - \frac{\sum_j P_{t_{ij}} P_i P_j \varepsilon_j}{I_{\gamma_i}} \right] \quad (\text{Σχέση 2.12})$$

Για την επεξήγηση της Σχέσης 2.12, παρατίθεται το Σχήμα 2.6, στο οποίο παρουσιάζεται ένα ιδεατό απλοποιημένο διάγραμμα διάσπασης, με τέσσερις (4) ενεργειακές στάθμες και τέσσερα (4) εκπεμπόμενα πρωτογενή φωτόνια.



Σχήμα 2.6 : Απλοποιημένο διάγραμμα διάσπασης ιδεατού ισότοπου.

Στη Σχέση 2.12, εμφανίζονται οι εξής όροι :

- P_k είναι η εσωτερική πιθανότητα εκπομπής του φωτονίου γ_k ,
- P_m είναι η εσωτερική πιθανότητα εκπομπής του φωτονίου γ_m ,
- $P_{t_{km}}$ είναι η ανά διάσπαση πιθανότητα να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη εκπομπή των φωτονίων γ_k και γ_m αντίστοιχα,
- ε_k είναι η απόδοση φωτοκορυφής του φωτονίου γ_k ,
- ε_m είναι η απόδοση φωτοκορυφής του φωτονίου γ_m ,
- ε_{t_j} είναι η ολική απόδοση⁵ του θυγατρικού (generic) φωτονίου γ_j ,
- I_{γ_i} είναι το ποσοστό εκπομπής (yield) του φωτονίου γ_i .

Σημειώνεται πως οι συντελεστές διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής που προκύπτουν από τη Σχέση 2.12, σύμφωνα με την εργασία των [De Felice et al., 2000] είναι απόλυτα

⁴ Ως εσωτερική πιθανότητα εκπομπής φωτονίου ορίζεται η ανά μετάπτωση πιθανότητα εκπομπής του [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003].

⁵ 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).

έγκυρες για γεωμετρία σημειακής πηγής, ενώ για πηγές όγκου πραγματοποιείται κατάλληλη επεξεργασία της σχέσης, όπως αναφέρεται στο βιβλίο των [Debertin and Helmer 1988]. Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός των ζητούμενων συντελεστών με χρήση της Σχέσης 2.12, είναι απαραίτητη η λεπτομερής και ακριβής γνώση τόσο των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του ραδιενεργού ισότοπου (ποσοστά εκπομπής, εσωτερικές πιθανότητες εκπομπής) όσο και των αποδόσεων φωτοκορυφής των εξεταζόμενων φωτονίων και ολικής απόδοσης της γ -φασματοσκοπικής διάταξης συναρτήσει της ενέργειας.

Τη δεκαετία του '80 αναπτύχθηκαν οι πρώτοι υπολογιστικοί κώδικες όπως οι KORSUM και CORCO από το '*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*' [Debertin and Achotzig, 1979] και '*Laboratoire National Henri Becquerel*' [Morel et al., 1983] αντίστοιχα, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν με πολύπλοκα σχήματα διάσπασης, καθώς και να προσομοιώσουν διάφορα είδη διάσπασης του ραδιενεργού πυρήνα που μελετούταν. Από τις πρωτοποριακές αυτές μελέτες μέχρι σήμερα, έχουν δημιουργηθεί και αναπτυχθεί αρκετοί προγραμματιστικοί κώδικες. Μερικοί από αυτούς έχουν βασιστεί στην αρχή προσομοίωσης Monte Carlo για τον αριθμητικό υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης των επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών [Haase et al., 1993]. Τέτοιοι κώδικες με ευρεία χρήση στην επιστημονική κοινότητα είναι ο κώδικας GEANT3 [Brun R. et al., 1987] και ο κώδικας MCNP [Briesmeister J., 1997].

Ανακεφαλαιώνοντας, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού των συντελεστών διόρθωσης των επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, καθένας από τους οποίους παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [Lery M. et al., 2010]. Στις περισσότερες από τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν προηγουμένως, ιδιαίτερο ενδιαφέρον και δυσκολία παρουσιάζει ο υπολογισμός του ολικού βαθμού απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται. Επισημαίνεται πως ο προσδιορισμός του ολικού βαθμού απόδοσης, αποτελεί σημείο κομβικής σημασίας για τον ορθό τελικό υπολογισμό των κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Στην επόμενη παράγραφο, πραγματοποιείται παρουσίαση διάφορων μεθόδων προσδιορισμού του συγκεκριμένου μεγέθους όπως προτείνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία [De Felice et al., 2000], καθώς και της μεθοδολογίας που έχει επιλεγεί να ακολουθείται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

2.4.2 Μέθοδοι υπολογισμού ολικής απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης.

Η ολική απόδοση περιγράφεται ως ο λόγος του πλήθους των καταγεγραμμένων κρούσεων σε οποιαδήποτε θέση του ενεργειακού φάσματος, ως προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται από την εξεταζόμενη πηγή. Για τον πειραματικό προσδιορισμό της ολικής απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας, απαιτείται πλήθος μονοενεργειακών πηγών. Επιλέγονται πηγές που

εκπέμπουν φωτόνια των οποίων οι ενέργειες να καλύπτουν ένα ευρύ ενεργειακό φάσμα (0-2000keV), ώστε να μπορεί να επιτευχθεί όσο το δυνατόν υψηλότερη ακρίβεια με το μικρότερο πιθανό συστηματικό σφάλμα κατά τον υπολογισμό της ζητούμενης ολικής απόδοσης. Το μειονέκτημα της μεθόδου εστιάζεται στο γεγονός ότι οι περισσότερες διαθέσιμες πηγές εκπέμπουν περισσότερα του ενός φωτόνια και πολλές φορές μπορεί να συνοδεύονται και από εκπομπή ακτίνων-Χ. Στη διεθνή βιβλιογραφία [De Felice et al., 2000] αναλύονται διάφορες μεθοδολογίες προσδιορισμού του συγκεκριμένου μεγέθους, και στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις (3) από αυτές, οι οποίες είναι εύκολες στην εφαρμογή χωρίς την εισαγωγή υψηλού σφάλματος στον τελικό υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης των επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών.

Κατά τη πρώτη μέθοδο, θεωρείται πως υπάρχει μία απλή γραμμική σχέση μεταξύ του λογαρίθμου της ολικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας των φωτονίων που εκπέμπονται από την αναλυόμενη πηγή. Η συγκεκριμένη θεώρηση εφαρμόζεται για την ενεργειακή περιοχή 160keV - 2000keV, και απαιτεί μόνο δύο τιμές για τον πειραματικό υπολογισμό του εξεταζόμενου μεγέθους. Στην εργασία των [De Felice et al., 2000], πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υπολογισμού της ολικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης, για την ενέργεια των 661keV του ^{137}Cs και για την ενέργεια των 1252keV του ^{60}Co , που αντιστοιχεί στην μέση σταθμισμένη ενέργεια των δύο κύριων εκπεμπόμενων φωτονίων του συγκεκριμένου ισότοπου. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τόσο σημειακές πηγές όσο και πηγές όγκου (Marinelli beakers), για τον προσδιορισμό της προτεινόμενης γραμμικής σχέσης. Σημειώνεται πως η ολική απόδοση για ενέργειες χαμηλότερες των 160keV, μπορεί να θεωρηθεί ίδια με την τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για την αντίστοιχη ενέργεια. Τελικά, στους ζητούμενους συντελεστές διόρθωσης των επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών, εκτιμάται ότι εισάγεται αβεβαιότητα της τάξης του 5%, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή που κάθε φορά εξετάζεται.

Στη δεύτερη μέθοδο, θεωρείται πως ο λόγος απόδοσης φωτοκορυφής προς ολική απόδοση ανιχνευτικής διάταξης (peak to total efficiency) για μία συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων μπορεί να υποτεθεί πως δεν εξαρτάται από τη μετρούμενη γεωμετρία μέτρησης. Κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί πως η ολική απόδοση και η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτώνται με τον ίδιο τρόπο από τη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή. Σημειώνεται πως και σε αυτή τη μέθοδο, πραγματοποιείται η παραδοχή πως η ολική απόδοση για ενέργειες χαμηλότερες των 160keV, μπορεί να θεωρηθεί ίδια με την τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για την αντίστοιχη ενέργεια. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία υπολογισμού είναι αρκετά απλή στην εφαρμογή της αλλά εισάγει σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της ολικής απόδοσης της τάξεως του 15% για σημειακή πηγή πάνω στο παράθυρο του ανιχνευτή και της τάξεως του 20% με 35% για γεωμετρία όγκου (Marinelli beaker). Τα σφάλματα αυτά οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην επίδραση της σκεδάσεως Compton στα υλικά που περιβάλλουν τον ανιχνευτή. Παρά ταύτα, εκτιμάται πως το σφάλμα των ζητούμενων συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών, ανέρχεται στο 5%, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία μέτρησης.

Η τρίτη μέθοδος συσχετίζει το λόγο peak to total efficiency με το λόγο φωτοηλεκτρικού φαινομένου προς ολικό συντελεστή εξασθένησης στο γερμάνιο (photoelectric to total cross section). Στην εργασία των [De Felice et al., 2000], διαπιστώνεται πως ο λόγος peak to total efficiency προς photoelectric to total cross section, είναι ανάλογος με την ενέργεια του εξεταζόμενου φωτονίου. Αναφέρονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα, για την κατανόηση της μεθόδου. Για την ενέργεια των 59keV ο λόγος photoelectric to total cross section λαμβάνει την τιμή 0.937 που σημαίνει πως η πιθανότητα να αποθέσουν στον ανιχνευτή τα συγκεκριμένα φωτόνια το σύνολο της ενέργειας τους, ανέρχεται στο 93,7%. Για την ενέργεια των 1836keV η πιθανότητα αυτή ανέρχεται στο 0.6%. Συνεπώς διαπιστώνεται πως στις υψηλές ενέργειες, μεγάλη επίδραση στον προσδιορισμό της ολικής απόδοσης διαδραματίζει η σκέδαση Compton καθώς και το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης.

Στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., επιλέχθηκε να χρησιμοποιείται η πειραματική μέθοδος που μελετάει το λόγο peak to total efficiency, για τον υπολογισμό του ολικού βαθμού απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης. Συνδυάζοντας το συγκεκριμένο λόγο (peak to total efficiency) με την τιμή της απόδοσης αιχμής η οποία προκύπτει μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης απόδοσης των διατάξεων που χρησιμοποιούνται, είναι εφικτός ο στόχος του προσδιορισμού της ζητούμενης ολικής απόδοσης. Μέσω κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος μπορούν να αξιοποιηθούν οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης, με στόχο τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης των επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών. Στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης το πρόγραμμα 'TrueCoinc', το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Kossuth Ουγγαρίας [Sudar S., 2000] και διατίθεται δωρεάν από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (Δ.Ο.Α.Ε).

2.4.3 Το πρόγραμμα TrueCoinc

Το πρόγραμμα 'TrueCoinc' είναι ένα φιλικό προς το χρήστη πρόγραμμα, το οποίο υπολογίζει άμεσα τους συντελεστές διόρθωσης των επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Το πρόγραμμα διαθέτει ενσωματωμένες κατάλληλες βάσεις δεδομένων σχετικά με τα διαγράμματα διάσπασης των ισοτόπων. Ο χρήστης εισάγει εξωτερικά δεδομένα σχετικά με τα χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης. Στη συνέχεια ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του προγράμματος.

Αρχικά απαιτείται ο προσδιορισμός της καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης αιχμής πλήρους απορρόφησης (full energy peak efficiency) του συγκεκριμένου ανιχνευτή που χρησιμοποιείται για τη συγκεκριμένη γεωμετρία μέτρησης. Αυτό πραγματοποιείται πειραματικά με χρήση προτύπων πηγών βαθμονόμησης, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.4. Η καμπύλη απόδοσης αιχμής συναρτήσε

της ενέργειας μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα μέσω τεσσάρων διαφορετικών μορφών⁶ (power functions, exponential power series, negative power series, ή transformed power series), προσδιορίζοντας μόνο τους κατάλληλους συντελεστές που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση. Η καμπύλη απόδοσης αιχμής αποτελείται από δύο τμήματα, ένα που αντιστοιχεί στις χαμηλές - μεσαίες ενέργειες, κάτω των 280keV και ένα υψηλών ενεργειών, με αποτέλεσμα να προσδιορίζονται δύο καμπύλες.

Εν συνεχεία, γίνεται κατάλληλος προσδιορισμός της καμπύλης του λόγου ολικής απόδοσης προς την απόδοση φωτοκορυφής (total efficiency / peak efficiency) συναρτήσει της ενέργειας. Προφανώς, για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, θα πρέπει να έχει προηγουμένως υπολογισθεί η συνάρτηση ολικής απόδοσης (total efficiency) για τον συγκεκριμένο ανιχνευτή με χρήση ικανού αριθμού μονοενεργειακών πηγών⁷ στην ενεργειακή περιοχή που παρουσιάζει ενδιαφέρον μελέτης. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει την συγκεκριμένη συνάρτηση μέσω τεσσάρων διαφορετικών μορφών⁸ (relative to peak efficiency, power functions, negative power series, ή transformed power series) τοποθετώντας τους κατάλληλους συντελεστές που απαιτούνται.

Πλέον ο χρήστης έχει διαμορφώσει δύο καμπύλες βαθμονόμησης, την καμπύλη απόδοσης αιχμής και την καμπύλη του λόγου ολικής απόδοσης προς απόδοσης αιχμής, συναρτήσει της ενέργειας, για τον ανιχνευτή που εξετάζει, τη γεωμετρία πηγής που χρησιμοποιεί και την ενεργειακή περιοχή που τον ενδιαφέρει. Μέσω της βάσης δεδομένων 'TrueCoinc DataFiles', που περιέχονται στις βιβλιοθήκες του προγράμματος, επιλέγεται το επιθυμητό σχήμα διάσπασης του ραδιενεργού ισότοπου για το οποίο θέλει ο χρήστης να προσδιορίσει τους συντελεστές διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών. Τελικά, προκύπτει πίνακας αποτελεσμάτων όπου περιέχονται οι ζητούμενοι συντελεστές διόρθωσης ξεχωριστά για 'summing in' και 'summing out' effect, για το ισότοπο που εξετάζεται και για τις συνθήκες που ενδιαφέρουν το χρήστη (ανιχνευτής και γεωμετρία πηγής). Η διορθωμένη τιμή της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, προκύπτει διαιρώντας την αρχική τιμή του μεγέθους 'επιφάνεια αιχμής' με τον κατάλληλο συντελεστή διόρθωσης που υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος 'TrueCoinc'.

⁶ Αναλυτική περιγραφή των τεσσάρων (4) συναρτήσεων καμπύλης απόδοσης αιχμής (peak efficiency), παρουσιάζεται σε παλαιότερη εργασία [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]

⁷ Η χρήση μονοενεργειακών πηγών εξασφαλίζει ότι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δεν λαμβάνει χώρα κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης.

⁸ Αναλυτική περιγραφή των τεσσάρων (4) συναρτήσεων καμπύλης ολικής απόδοσης (total efficiency), παρουσιάζεται σε παλαιότερη εργασία [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]

Σχήματα Κεφαλαίου 2.

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%			

Σχήμα 2.7 : Πιστοποιητικό του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

Specifications

Detector Model GX10021 Serial number b 00078
 Cryostat Model 7500SL
 Preamplifier Model 2002CSL

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

Nominal volume cc Relative efficiency 100 %

Resolution 2.10 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 keV (FWTM) at 1.33 MeV
1.20 keV (FWHM) at 122 keV
 keV (FWTM) at

Peak/Compton 78:1 Cryostat well diameter Well depth mm

Cryostat description or Drawing Number if special Vertical Dipstick, type 7500SL (Carbon Epoxy window) + 4"

CFE

Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window

Diameter 80 mm Active volume cc
 Length 78 mm Crystal well depth mm
 Distance from window (outside) 5 mm Crystal well diameter mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+)4000 Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+)4500 Vdc
 Leakage current at recommended bias 0.01 nA
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.1 Vdc

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 6 μ s

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	1.03	2.04			
FWTM (keV)		3.99			
Peak/Compton		82.2:1			
Rel. Efficiency		104.5%			

- Test are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996

- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by :

Date : September 7, 1999

Approved by :

Date : September 7, 1999

Docum : GDAME001	Date : 02/02/99
Issue : Spec. Sheet GC	Name : PVE
Revue : D	Page : 1/1
Basis : 0.W001PVE.15	Appr :

Σχήμα 2.8 : Πιστοποιητικό του ανιχνευτή ΧtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PENELOPE

3.1 Εισαγωγή.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε εκτενώς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, καθώς και η επίδραση που μπορεί να έχει στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετοί κώδικες Η/Υ, βασισμένοι στη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo, οι οποίοι εξετάζουν την αλληλεπίδραση των σωματιδίων (ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων) και φωτονίων με την ύλη. Σκοπός της παρούσας Δ.Ε. είναι η ανάλυση και μελέτη τέτοιου προγραμματιστικού κώδικα ο οποίος χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., καθώς και η τροποποίησή του, ώστε να εισαχθεί στη λειτουργία του το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της γενικής μεθόδου προσομοίωσης Monte-Carlo, στην οποία βασίζεται και ο κώδικας PENELOPE που χρησιμοποιείται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Αναλύεται η λογική με την οποία προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης και παρουσιάζονται λεπτομερώς ορισμένα τμήματα του κώδικα, τα οποία κατά τη διάρκεια της παρούσας Δ.Ε. παρουσίασαν αυξημένο ενδιαφέρον μελέτης ή και τροποποιήθηκαν.

3.2 Προσομοίωση με τη μέθοδο Monte-Carlo.

Στα τέλη της δεκαετίας '50 έκανε την εμφάνιση της η μέθοδος προσομοίωσης Monte-Carlo. Μία μέθοδος της οποίας ο τρόπος λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχος με τη ρίψη ενός ζαριού σε παιχνίδι τύχης, για αυτό το λόγο άλλωστε η ονομασία της προέρχεται από τη δημοφιλή περιοχή του Μονακό και το θρυλικό καζίνο που διαθέτει. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτού του είδους προσομοίωσης είναι ο τρόπος δημιουργίας της ιστορίας ενός σωματιδίου ή φωτονίου, ο οποίος στηρίζεται στη διαδικασία στατιστικής δειγματοληψίας, που υλοποιείται με την επιλογή τυχαίων αριθμών μέσω χρήσης κατάλληλης γεννήτριας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για μεγάλο αριθμό ιστοριών ώστε να επιτευχθεί καλή στατιστική ακρίβεια των αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν, δηλαδή να προσεγγίσουν την πραγματικότητα όσο το δυνατόν καλύτερα. Σημαντικός παράγοντας για να θεωρούνται αποδεκτά και αξιόπιστα τα αποτελέσματα από μία προσομοίωση είναι οι αβεβαιότητες που τα συνοδεύουν να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων, όπως αυτά καθορίζονται από τον ίδιο το χρήστη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της βέλτιστης διάρθρωσης και του ορθού σχεδιασμού της προσομοίωσης καθώς και από τη δημιουργία επαρκούς πλήθους ιστοριών.

Η μέθοδος Monte-Carlo χρησιμοποιείται για την επίλυση σύνθετων φυσικών και μαθηματικών προβλημάτων [James F., 1980], [Rubinstein R., 1981], [Kalos M. & Whitlock P., 1986] και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις προβλημάτων που εμπλέκονται πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές και σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη ή αδύνατη η επίλυση με χρήση αναλυτικών μεθόδων. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενδεχομένως και μετά από κατάλληλους υπολογισμούς, εξάγεται το τελικό ζητούμενο αποτέλεσμα μαζί με τις εκτιμήσεις της στατιστικής ακρίβειας (αβεβαιότητας) που το συνοδεύουν [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006], οι οποίες μπορεί να είναι τυχαίες ή και συστηματικές. Σε κάθε περίπτωση, η τάξη μεγέθους του σφάλματος του αποτελέσματος, μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για το κατά πόσον τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προσεγγίζουν ή αποκλίνουν από την πραγματικότητα.

Μετά από πολλές εφαρμογές και αρκετούς κώδικες προσομοίωσης έχει γίνει κοινώς αποδεκτό στην επιστημονική και ερευνητική κοινότητα, πως η μέθοδος Monte-Carlo είναι ιδιαίτερα επιτυχής στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης σωματιδίων (ή φωτονίων) με την ύλη. Τηρώντας πάντα τους φυσικούς νόμους καθώς και τους μηχανισμούς και κανόνες που διέπουν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, η μέθοδος Monte-Carlo προσομοιώνει την ιστορία ενός σωματιδίου ή φωτονίου που ξεκινάει ως μία ελεύθερη διαδρομή στον τρισδιάστατο χώρο όπου για τυχαίους λόγους μπορεί, αλληλεπιδρώντας με την ύλη, να αλλάξει κατεύθυνση κίνησης, να χάσει ένα μέρος ή και ολόκληρη την αρχική του ενέργεια, να οδηγήσει στην παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων ή φωτονίων ή και να μην αλληλεπιδράσει καθόλου. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση τυχαίων αριθμών, με τιμές στην περιοχή $[0,1]$, μέσω των οποίων είναι δυνατόν από προκαθορισμένες κατανομές πιθανότητας (Probability Distribution Functions - PDF) διαφόρων φυσικών μεγεθών όπως, η ελεύθερη διαδρομή φωτονίων μέσα σε ένα υλικό ή το είδος αλληλεπίδρασης που λαμβάνει χώρα κλπ, να επιλέγεται τελικά η θέση στην οποία γίνεται μία αλληλεπίδραση, το είδος της και άλλες παράμετροι του προβλήματος. Η ιστορία τερματίζεται είτε όταν το σωματίδιο ή φωτόνιο εξέλθει από τα όρια του συστήματος, όπως τα έχει θέσει ο χρήστης, είτε όταν χαθεί ολόκληρη η ενέργειά του [Δ.Ε Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Με το πέρας της ιστορίας, ο κώδικας ξεκινάει από την αρχή τη διαδικασία δημιουργίας νέας ιστορίας. Αυτή η διαδικασία, επαναλαμβανόμενη για μεγάλο αριθμό ιστοριών, δίνει με κατάλληλο πλήθος επαναλήψεων αποτελέσματα τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές των μεγεθών που ενδιαφέρουν τον χρήστη. Ορισμένες από τις μεταβλητές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, είναι η ενέργεια που απόθεσε το σωματίδιο ή το φωτόνιο σε συγκεκριμένη θέση στο χώρο η τελική κατάσταση του μετά το πέρας της ιστορίας κλπ.

Μελέτες έχουν δείξει πως στην περίπτωση της κίνησης σωματιδίων και φωτονίων, η τεχνική Monte-Carlo είναι εξαιρετικά ρεαλιστική και μπορεί να εκληφθεί ως ένα θεωρητικό πείραμα [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Γίνεται αντιληπτό πως το πόσο ακριβής μπορεί να γίνει η προσομοίωση έχει άμεση εξάρτηση με το πόσο λεπτομερώς μπορεί να περιγραφεί το φαινόμενο που αντιμετωπίζεται. Ωστόσο, πολλές φορές προγραμματιστικοί κώδικες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο προσομοίωσης Monte-Carlo δεν εισάγουν την επιρροή της ακτινοβολίας περιβάλλοντος ή άλλα φαινόμενα όπως αυτό της

πραγματικής σύμπτωσης, με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να μην είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα πειραματικά [Δ.Ε. Σάββα Μ., 2009]. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι η μέθοδος Monte-Carlo είναι ένα εργαλείο το οποίο, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις και συνθήκες, μπορεί να αποτελέσει ένα αξιόπιστο μέσο προσδιορισμού της διάδοσης σωματιδίων και φωτονίων στο χώρο, υπό την προϋπόθεση ότι ο χρήστης γνωρίζει σε βάθος τόσο τη θεωρία του προς εξέταση προβλήματος, όσο και τη λειτουργία του κώδικα προσομοίωσης που χρησιμοποιεί για την επίλυση του.

3.3 Ο κώδικας Monte-Carlo PENELOPE.

Το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. χρησιμοποιεί τα τελευταία χρόνια τον κώδικα προσομοίωσης PENELOPE για την αντιμετώπιση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές Δ.Ε. στις οποίες κύριο εργαλείο για την επίλυση μία ποικιλίας προβλημάτων ήταν ο κώδικας PENELOPE [Δ.Ε. Αθανασίου Ν. (2006), Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ. (2008), Δ.Ε. Δουλγκέρογλου Μ. (2009), Δ.Ε. Σάββα Μ. (2009), Δ.Ε. Χαυλής Σ. (2011)].

Ο εν λόγω κώδικας αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης από τους Salvat F., Fernandez-Varea J.M., και Sempau J. το 1996 και από τότε έχει βρει τεράστια εφαρμογή σε ποικίλα ερευνητικά προβλήματα προσομοίωσης [Mazurier J. et al, (2001), Salvat F. et al, (2006)]. Από το 1996 έχουν αναπτυχθεί αρκετές εκδόσεις του κώδικα (2000, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2010). Στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. έχει εγκατασταθεί και χρησιμοποιείται η έκδοση του 2005 και αυτή είναι και η έκδοση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Δ.Ε.

Ο κώδικας PENELOPE, ο οποίος είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, είχε κατασκευαστεί αρχικά για να αντιμετωπίζει προβλήματα προσομοίωσης διάδοσης ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη. Από αυτήν την ιδιαιτερότητα προέκυψε και το όνομα του κώδικα: **PEN**etration and **E**nergy **L**oss of **P**ositrons and **E**lectrons. Αργότερα, για την επέκταση και πληρότητα του κώδικα, προστέθηκε και η προσομοίωση φωτονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές και διαφορετικά υλικά.

3.3.1 Γενική περιγραφή του κώδικα PENELOPE.

Ο πρωτότυπος κώδικας PENELOPE δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει σημειακές πηγές οι οποίες εκπέμπουν ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια ή φωτόνια, των οποίων οι τροχιές και η εξέλιξη των ιστοριών τους παρακολουθούνται πλήρως από το κυρίως πρόγραμμα ή αλλιώς κώδικα χρήστη. Ο PENELOPE αποτελείται από διάφορες συνιστώσες (κυρίως προγράμματα, υπορουτίνες, αρχεία εισόδου και αρχεία εξόδου), οι οποίες συνδυαζόμενες μεταξύ τους κάνουν τον κώδικα λειτουργικό. Απαραίτητη συνιστώσα του κώδικα PENELOPE είναι ένα κυρίως πρόγραμμα, το οποίο συνδέεται με

συγκεκριμένους πηγαίους κώδικες (*PENELOPE.f*, *PENGEOM.f*, *PENVARED.f*, *MATERIAL.f*, *TIMER.f*) οι οποίοι περιέχουν τις υπορουτίνες προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων, με στόχο την ομαλή διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Το κυρίως πρόγραμμα συντάσσεται από τον χρήστη και είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία του κώδικα με τα αρχεία εισόδου, τις υπορουτίνες που περιέχονται στον κώδικα προσομοίωσης PENELOPE, αλλά και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσω των αρχείων εξόδου. Στις υπορουτίνες περιγράφονται οι μηχανισμοί και οι νόμοι της φύσης που εμφανίζονται στα προβλήματα αλληλεπίδρασης των σωματιδίων και ακτινοβολίας με την ύλη. Τα αρχεία εισόδου συντάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο, όπως ορίζει το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα PENELOPE, και έχει μελετηθεί αναλυτικά σε προηγούμενη εργασία [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006].

Η έκδοση του 2005, πάνω στην οποία στηρίχτηκε η παρούσα Δ.Ε., παρέχει τρία κυρίως προγράμματα χρήστη, γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Αυτά είναι τα: PENSLAB, PENCYL και PENMAIN. Το PENSLAB κατασκευάστηκε για να λύνει προβλήματα αλληλεπίδρασης σωματιδίων και ακτινοβολίας για γεωμετρία επίπεδης πλάκας, ενώ το PENCYL για απλές και σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές. Τέλος, το PENMAIN είναι σχεδιασμένο για σύνθετα προβλήματα πιο πολύπλοκης γεωμετρίας. Στην παρούσα Δ.Ε. αναλύθηκε, μελετήθηκε και τροποποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό το κυρίως πρόγραμμα PENMAIN. Για αυτό το λόγο στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η λειτουργία των αρχείων εισόδου και εξόδου και των εικονικών ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται από το κυρίως πρόγραμμα PENMAIN, καθώς και των υπορουτινών που καλούνται από το εν λόγω κώδικα χρήστη.

3.3.2 Αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

Για την πραγματοποίηση προσομοίωσης με χρήση του κυρίως προγράμματος PENMAIN, είναι απαραίτητη η δημιουργία τριών αρχείων εισόδου. Αυτά είναι:

- το αρχείο εισόδου γεωμετρίας, τύπου *.geo*,
- το αρχείο εισόδου υλικών, τύπου *.mat*,
- το γενικό αρχείο εισόδου, τύπου *.in*.

Κατά την κατασκευή του αρχείου γεωμετρίας τύπου *.geo* περιγράφεται με τυποποιημένο και αυστηρό τρόπο, η γεωμετρία του υπό εξέταση προβλήματος. Η σύνταξη του αρχείου γίνεται με συγκεκριμένους κανόνες και πρέπει να ακολουθούνται πιστά οι οδηγίες του εγχειριδίου χρήσης (manual), ώστε το κυρίως πρόγραμμα να μπορεί να «διαβάσει» το αρχείο και κατ' επέκταση να προσομοιώσει ορθά τη διάταξη. Ορίζονται όλες οι επιφάνειες και οι γεωμετρίες μέσω των οποίων διαμορφώνεται η διάταξη που ενδιαφέρει το χρήστη. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα συνδυάζοντας τις διάφορες επιφάνειες, να σχηματίσει σώματα (bodies) της διάταξης, για τα οποία δηλώνει επιπροσθέτως το υλικό (material) από

τα οποία είναι κατασκευασμένα. Στο αρχείο γεωμετρία τύπου *.geo*, μπορούν να δημιουργηθούν αρκετά πολύπλοκες κατασκευές, οι οποίες μπορούν να προσεγγίζουν αρκετά ρεαλιστικά τη γεωμετρία του πραγματικού προβλήματος. Ακολούθως, οι σύνθετες αυτές εικονικές κατασκευές μπορούν να αποτελέσουν μέρος της προσομοίωσης του κυρίως προγράμματος PENMAIN. Ακόμα, δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να εποπτεύει σε όλα τα στάδια της δημιουργίας του αρχείου γεωμετρίας την κατασκευή του, μέσω δύο απεικονιστικών προγραμμάτων σε δύο και στις τρεις διαστάσεις, το *gview2d* και το *gview3d* αντίστοιχα. Στην παρούσα Δ.Ε. κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε αρχείο γεωμετρίας που αναπαριστά την ανιχνευτική διάταξη HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., ενώ χρησιμοποιήθηκε ακόμα και αρχείο γεωμετρίας για τον ανιχνευτή ΧtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., το οποίο αναπτύχθηκε σε παλαιότερη εργασία [Δ.Ε. Σάββα Μ., 2009].

Ο χρήστης κατά την κατασκευή του αρχείου γεωμετρίας τύπου *.geo*, έχει διαφοροποιήσει τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα διάφορα μέρη της διάταξης. Ωστόσο, δεν έχει καθορίσει ποια είναι αυτά τα υλικά. Ο καθορισμός αυτός γίνεται μέσω του προγράμματος MATERIAL.exe, βασισμένο στον πηγαίο κώδικα MATERIAL.f, το οποίο παρέχεται μαζί με τον κώδικα PENELOPE. Το πρόγραμμα αυτό κατασκευάζει μεμονωμένα αρχεία υλικών, όσα τα υλικά που έχουν δηλωθεί στο αρχείο γεωμετρίας. Στη συνέχεια, δημιουργείται το συνολικό αρχείο υλικών που περιέχει όλες τις απαραίτητες φυσικές σταθερές και παραμέτρους για όλα τα υλικά της προσομοιούμενης κατασκευής. Το συνολικό αρχείο υλικών είναι αυτό που ονομάζεται αρχείο εισόδου υλικών τύπου *.mat* και έχει ιδιαίτερο ρόλο στην προσομοίωση, αφού καθορίζει για κάθε σώμα της κατασκευής το υλικό από το οποίο αποτελείται. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτοιμα υλικά τα οποία προϋπάρχουν σε βιβλιοθήκες του κώδικα PENELOPE και αναφέρονται στο παράρτημα 4 της Δ.Ε. Αθανασίου Ν. 2006. Επίσης δύναται να δημιουργηθούν από το χρήστη νέα, σύνθετα υλικά των οποίων η χημική σύσταση παρουσιάζει ίσως ιδιομορφίες. Αυτός ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται από διάφορες επιλογές που παρέχονται στον χρήστη μέσω του προγράμματος MATERIAL.exe και τον βοηθούν να επιλέξει επακριβώς το υλικό που αντιστοιχεί σε κάθε σώμα της κατασκευής. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά τη δημιουργία του αρχείου εισόδου τύπου *.mat*, ώστε να βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία τα υλικά, με τη σειρά που αυτά ορίζονται στο αρχείο γεωμετρίας τύπου *.geo*.

Το τρίτο αρχείο που απαιτείται για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι το αρχείο εισόδου τύπου *.in*. Σε αυτό ο χρήστης ορίζει κατά σειρά το όνομα της προσομοίωσης, τα χαρακτηριστικά της ραδιενεργού πηγής (είδος πρωτευόντων σωματιδίων, ενέργεια σωματιδίου ή φωτονίου, συντεταγμένες σημειακής πηγής), το κατώτερο όριο ενέργειας μέχρι το οποίο παρακολουθεί ο κώδικας το σωματίδιο ή φωτόνιο (cut-off energy), καθώς και τα ονόματα των αρχείων υλικών και γεωμετρίας στα οποία ανατρέχει το κυρίως πρόγραμμα για τον καθορισμό των αντίστοιχων απαραίτητων για την προσομοίωση παραμέτρων. Επίσης, σε αυτό το αρχείο ο χρήστης ορίζει τους εικονικούς ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται, οι οποίοι αναλύονται στην παράγραφο 3.3.4, μαζί με τα χαρακτηριστικά τους

(ενεργειακό παράθυρο, κανάλια) και τέλος θέτει τα όρια της προσομοίωσης δηλαδή ποιο είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα που διαρκεί η προσομοίωση και ποιο είναι το πλήθος ιστοριών που προσομοιώνονται.

Είναι σημαντικό ο χρήστης να γνωρίζει επακριβώς πως κατασκευάζονται τα τρία αρχεία εισόδου και κάθε φορά να εισάγει σωστά τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Μη ορθά δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν στη μη λειτουργία του κώδικα, ή και σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Επισημαίνεται ότι το κυρίως πρόγραμμα PENMAIN περιέχει πλήρες εγχειρίδιο χρήσης στην αγγλική γλώσσα ώστε να αποφευχθούν τυχόν λάθη και να διευκολυνθεί ο χρήστης κατά τη διαμόρφωση του αρχείου εισόδου τύπου *.in*, αλλά και κατά τη διάρθρωση των υπολοίπων απαραίτητων δεδομένων της προσομοίωσης. Ο χρήστης μπορεί, επίσης, να ανατρέξει στη Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006, στην οποία παρουσιάζονται αναλυτικά και στην ελληνική γλώσσα ο τρόπος κατασκευής όλων των αρχείων εισόδου καθώς και τα σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον.

3.3.3 Κύριο μέρος του κώδικα PENELOPE.

Ο κώδικας PENELOPE, με την εξαίρεση του κώδικα χρήστη κατανέμεται σε τέσσερα αρχεία πηγαίου κώδικα γλώσσα FORTRAN, με τις ονομασίες: *PENELOPE.f*, *PENGEOM.f*, *PENVARED.f* και *TIMER.f*, που περιέχουν τις υπορουτίνες οι οποίες είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης και αναλύονται ακολούθως.

Στο αρχείο *PENELOPE.f* περιέχονται όλες εκείνες οι υπορουτίνες οι οποίες καλούνται από το κυρίως πρόγραμμα και έχουν σχέση με τη φυσική της προσομοίωσης. Περιέχει δεκάδες υπορουτίνες, μέσω των οποίων παρακολουθείται η πορεία του σωματιδίου ή του φωτονίου και επιστρέφει στον κώδικα χρήστη τις απαραίτητες πληροφορίες και τιμές διαφόρων μεταβλητών, ώστε να συνεχιστεί η προσομοίωση. Συνιστάται ο χρήστης να μην παρεμβαίνει στο αρχείο *PENELOPE.f*, εκτός και αν θέλει να τροποποιήσει τη φυσική της προσομοίωσης.

Εν συνεχεία, μέσω των υπορουτινών του αρχείου *PENGEOM.f* γίνεται η σύνδεση του αρχείου εισόδου γεωμετρίας τύπου *.geo*, με το κυρίως πρόγραμμα. Οι υπορουτίνες αυτές εντοπίζουν τη θέση που βρίσκεται το σωματίδιο ή φωτόνιο σε κάθε στιγμή της πορείας του. Στο αρχείο *PENGEOM.f* εμπεριέχεται η υπορουτίνα STEP, η οποία έχει ιδιαίτερη σημασία αφού ενημερώνει το κυρίως πρόγραμμα τότε το σωματίδιο ή φωτόνιο εισέρχεται ή εξέρχεται από κάποιο σώμα της γεωμετρίας και ως εκ τούτου καθορίζεται σε κάθε στιγμή της προσομοίωσης η θέση του εξεταζόμενου σωματιδίου, αλλά και το υλικό μέσα στο οποίο κινείται και αλληλεπιδρά. Οι υπορουτίνες του αρχείου *PENGEOM.f* χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f καθώς το συγκεκριμένο κυρίως πρόγραμμα προβλέπει την κατασκευή σύνθετων γεωμετριών. Οι κώδικες χρήστη PENSLAB και PENCYL που πραγματεύονται απλές

και συγκεκριμένες γεωμετρικές διατάξεις δεν απαιτούν τη χρήση των υπορουτινών του αρχείου *PENGEOM.f*.

Στο αρχείο *PENVARED.f* εμπεριέχονται υπορουτίνες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη βελτίωση της στατιστικής των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την πραγματοποίηση της προσομοίωσης (variance reduction).

Τέλος, οι υπορουτίνες του αρχείου *TIMER.f*, παρακολουθούν χρονικά όλη την πορεία του εξεταζόμενου σωματιδίου ή φωτονίου και καταγράφει τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Κατά τη διαδικασία του compilation του κυρίως προγράμματος *PENMAIN.f* για την παραγωγή του εκτελέσιμου αρχείου *PENMAIN.exe*, είναι απαραίτητη η συνύπαρξη στον ίδιο φάκελο (directory) των τεσσάρων αρχείων που αναφέρθηκαν. Προτείνεται στο χρήστη να παρεμβαίνει μόνο στο κυρίως πρόγραμμα *PENMAIN.f*, τροποποιώντας το όπως κάθε φορά κρίνει. Σε πολύ συγκεκριμένες μόνον περιπτώσεις είναι δυνατόν να χρειάζονται αλλαγές στις υπορουτίνες των τεσσάρων αρχείων του κυρίως κώδικα *PENELOPE*. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι η αύξηση του μέγιστου αριθμού των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο αρχείο εισόδου γεωμετρίας ή του μέγιστου αριθμού εικονικών ανιχνευτών αλληλεπίδρασης (impact detectors) και αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detectors), οι οποίοι αναλύονται στην επόμενη παράγραφο. Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει επακριβώς τη διάρθρωση των πηγαίων κωδίκων που αναφέρθηκαν, εάν επιθυμεί να πραγματοποιήσει κάποια τροποποίηση στον κώδικα προσομοίωσης *PENELOPE*.

3.3.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές του κώδικα *PENMAIN*.

Κατά τη δημιουργία του αρχείου γεωμετρίας κατασκευάζεται η διάταξη που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Η διάταξη αυτή καθορίζεται από τις ανάγκες της προσομοίωσης και μπορεί να είναι για παράδειγμα μία ανιχνευτική διάταξη, μία μηχανή ακτίνων-χ κ.λ.π. Στην περίπτωση των εικονικών ανιχνευτών, ορίζονται διάφορα σώματα όπως ο κρύσταλλος, το dead layer, τα διάφορα στρώματα θωράκισης και η εξεταζόμενη πηγή. Το σώμα του ανιχνευτή πολλές φορές αποτελείται από δύο ή και περισσότερα σώματα. Ο χρήστης, μέσω του αρχείου εισόδου τύπου *.in*, ορίζει ποια σώματα της κατασκευής συνθέτουν τον ανιχνευτή.

Ο κώδικας *PENMAIN.f* δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει στην προσομοίωση τρία είδη ανιχνευτών (ανιχνευτής αλληλεπίδρασης, ανιχνευτής δόσης, ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας):

- Στον *ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (impact detector)* καταγράφονται οι ενέργειες των σωματιδίων ή φωτονίων που διέρχονται μέσα του. Ως τέτοιος μπορεί να θεωρηθεί ένα σώμα ή μία ομάδα σωμάτων, τα οποία αποτελούν μέρος της κατασκευής, αρκεί να έχουν προηγουμένως κατάλληλα οριστεί στο αρχείο εισόδου τύπου *.geo*. Στην έκδοση 2005 του κώδικα *PENELOPE* ο χρήστης μπορεί να εισάγει μέχρι πέντε εικονικούς ανιχνευτές αλληλεπίδρασης, ορίζοντας τους στο αρχείο

εισόδου τύπου *.in*. Όταν το προσομοιωμένο σωματίδιο ή φωτόνιο εισέλθει στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, καταγράφεται η ενέργεια του και εν συνεχεία εξάγεται σε κατάλληλο αρχείο εξόδου το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων που εισήλθαν στον ανιχνευτή. Στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f υπάρχει συγκεκριμένο τμήμα εντολών που αντιστοιχεί στη λειτουργία του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης. Στη Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006, υπάρχει λεπτομερής παρουσίαση όλων των μεταβλητών και παραμέτρων που επηρεάζουν τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης.

- Ο *ανιχνευτής δόσης (dose enclosure)*, ο οποίος χρησιμοποιείται για την καταγραφή της κατανομής της δόσης σε τμήμα της εξαταζόμενης διάταξης. Ως τέτοιος χαρακτηρίζεται ένα νοητό τρισδιάστατο ορθογωνικό πλέγμα, το οποίο δεν περιέχεται στην κατασκευή του αρχείου εισόδου γεωμετρίας τύπου *.geo*. Σκοπός του συγκεκριμένου ανιχνευτή είναι να καταγράφει αθροιστικά μετά από το πέρας κάθε ιστορίας, τη δόση λόγω αλληλεπίδρασης σωματιδίων ή φωτονίων εντός των ορίων του. Στο τέλος της προσομοίωσης εξάγεται κατάλληλο αρχείο δεδομένων μέσα στο οποίο καταγράφεται η κατανομή δόσης στον εικονικό ανιχνευτή (δηλαδή η δόση που έχει καταγραφεί στα διάφορα στοιχεία του ορθογωνικού πλέγματος).
- Ο *ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector)* καταγράφει την αποτιθέμενη ενέργεια των σωματιδίων ή φωτονίων που εισέρχονται σε αυτόν. Ως τέτοιος μπορεί να θεωρηθεί ένα σώμα ή μία ομάδα σωμάτων, ανάλογα με την πολυπλοκότητα της διάταξης που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που η προσομοίωση περιλαμβάνει ανιχνευτική διάταξη, ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας αντιστοιχίζεται στον κρύσταλλο της πραγματικής διάταξης, δηλαδή την περιοχή εκείνη στην οποία γίνεται η ανίχνευση των σωματιδίων ή φωτονίων που εναποθέτουν τμήμα ή ολόκληρη την ενέργειά τους. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία από ποια ακριβώς σώματα (*bodies*) αποτελείται ο συγκεκριμένος ανιχνευτής, καθώς και στον ορισμό του υλικού από το οποίο είναι στην πραγματικότητα κατασκευασμένος. Στο αρχείο εισόδου τύπου *.in* καθορίζεται ο αριθμός των ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Στην έκδοση 2005 του κώδικα PENELOPE μπορούν να δηλωθούν έως και πέντε ανιχνευτές αυτού του είδους, ενώ δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να αυξήσει το πλήθος τους, τροποποιώντας κατάλληλες μεταβλητές στους πηγαίους κώδικες του PENELOPE. Στο τέλος της προσομοίωσης δημιουργείται κατάλληλο αρχείο εξόδου, ένα για κάθε ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, μέσω του οποίου μπορεί να εξαχθεί το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα. Στο συγκεκριμένο αρχείο εξόδου, για κάθε ενεργειακό κανάλι δίνεται η πιθανότητα ύπαρξης φωτονίου το οποίο αποθέτει ποσό ενέργειας εντός των ορίων του συγκεκριμένου καναλιού συνοδευόμενη από το αντίστοιχο μέγιστο πιθανό απόλυτο σφάλμα.

3.3.5 Αρχεία εξόδου του κυρίως προγράμματος PENMAIN.

Κατά την εκτέλεση μίας προσομοίωσης, υπολογίζονται διάφορες παράμετροι και μεταβλητές που ενδιαφέρουν τον χρήστη. Ο κώδικας χρήστη (user code) PENMAIN, που διανέμεται με τον κώδικα PENELOPE, δημιουργεί εικοσιένα (21) αρχεία εξόδου τα οποία παρέχουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για την προσομοίωση. Στην παρούσα Δ.Ε. δεν κρίθηκε αναγκαίο να μελετηθούν όλα τα αρχεία εξόδου το ίδιο διεξοδικά, καθώς αυτό έχει ήδη γίνει σε παλαιότερες Δ.Ε. [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006], αλλά να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα αρχεία εξόδου *penmain.dat* και *pm_spc_enddet_#.dat*, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό στην παρούσα εργασία.

3.3.5.1 Αρχείο εξόδου *penmain.dat*.

Το κυριότερο αρχείο εξόδου είναι το *penmain.dat*, καθώς στο συγκεκριμένο αρχείο παρουσιάζονται εποπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Αναγράφονται οι τιμές σημαντικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν τον χρήστη και μπορούν, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, να δώσουν αξιόπιστη περιγραφή της εξέλιξης της προσομοίωσης. Η χρονική περίοδος που η προσομοίωση ανανεώνει το αρχείο εξόδου *penmain.dat* με τις νέες τιμές των μεταβλητών αυτών, ονομάζεται *dumping period* και καθορίζεται από τον χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου τύπου *.in*. Ένα αρχείο εξόδου *penmain.dat* χωρίζεται σε δύο τμήματα τα οποία φέρουν ευδιάκριτες ονομασίες, το τμήμα δεδομένων εισόδου (με επικεφαλίδα 'Program Penmain Input data file'), το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 και το τμήμα αποτελεσμάτων (με επικεφαλίδα 'Program Penmain Results'), το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Στο πρώτο αναγράφονται κατά σειρά η ώρα και ο τίτλος της προσομοίωσης, η περιγραφή της πηγής, τα δεδομένα των υλικών και οι αντίστοιχες παράμετροι για κάθε υλικό, καθώς και οι ονομασίες των αρχείων υλικών και γεωμετρίας τύπου *.mat* και *.geo* αντίστοιχα. Ακόμα, καταγράφεται το μέγιστο επιτρεπτό μήκος βήματος ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων σε κάθε σώμα, δηλαδή το μέγιστο μήκος που μπορεί να διατρέξει ένα σωματίδιο μέχρι να αλληλεπιδράσει για πρώτη φορά με το υλικό του αντίστοιχου σώματος, για τις ενεργειακές και γωνιακές κατανομές των εκπεμπόμενων σωματιδίων ή φωτονίων, για τα χαρακτηριστικά των τριών ειδών εικονικών ανιχνευτών (αλληλεπίδρασης, αποτιθέμενης ενέργειας και δόσης) καθώς και για το εύρος των ενεργειακών καναλιών κάθε ανιχνευτή που έχει επιλεγθεί να χρησιμοποιηθεί. Ακόμα αναφέρονται η ονομασία του προσωρινού αρχείου αποθήκευσης δεδομένων (*dump file*) στο οποίο ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο καταγράφονται δεδομένα στο αρχείο *dump*, καθώς επίσης ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που πραγματοποιούνται και η μέγιστη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

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

Date and time: 11th Jul 2011. 14:32:30

XtRa(no CSS) Co-60 point source,0.55cm from the detector cap.

-----
>>>>> Source description.
Primary particles: photons
Initial energy = 1.173000E+06 eV
```

Σχήμα 3.1: Τμήμα δεδομένων εισόδου αρχείου εξόδου *penmain.dat*.

Ενώ το πρώτο τμήμα είναι σταθερό και διαμορφώνεται κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης, το δεύτερο τμήμα, των αποτελεσμάτων, εμπλουτίζεται κάθε φορά που συμπληρώνεται η συγκεκριμένη χρονική περίοδος *dump time*, όπως την έχει ορίσει ο χρήστης, με τις νέες τιμές των μεταβλητών που υπολογίζονται από την προσομοίωση. Ορισμένα από τα δεδομένα που αναφέρονται στο τμήμα αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 και ενδιαφέρουν τον χρήστη είναι: ο χρόνος που έχει διαρκέσει η προσομοίωση, η ταχύτητα της προσομοίωσης (σε ιστορίες ανά δευτερόλεπτο), καθώς και ο αριθμός των πρωτευόντων σωματιδίων ή φωτονίων που έχουν προσομοιωθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως καθορισμός από τον χρήστη μικρής περιόδου καταγραφής στο αρχείο *dump*, έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του όγκου του αρχείου εξόδου *penmain.dat* καθώς και χρονική καθυστέρηση της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά που ολοκληρώνεται χρονικά μία *dumping period*, η προσομοίωση τίθεται σε αναμονή ώστε στο αρχείο εξόδου *penmain.dat* να προστεθούν τα καινούργια, ανανεωμένα δεδομένα των μεταβλητών. Όταν καταγραφούν τα ανανεωμένα δεδομένα, τα οποία αυξάνουν τον όγκο του συγκεκριμένου αρχείου, η προσομοίωση συνεχίζεται κανονικά. Γίνεται κατανοητό ότι εάν ο χρήστης θέσει μικρή περίοδο *dump*, τότε λόγω της επαναλαμβανόμενης καταγραφής, επιβραδύνεται η προσομοίωση. Προτείνεται στον χρήστη να ορίζει μικρό *dumping period*, της τάξεως για παράδειγμα του ενός λεπτού, στην αρχή της προσομοίωσης, ώστε να εποπτεύσει τη σωστή λειτουργία της, και εν συνεχεία να αυξάνει τον χρόνο για τη γρηγορότερη περάτωση της διαδικασίας (π.χ. μερικές ώρες).

```

*****
**   Program PENMAIN. Results.   **
*****
Simulation time ..... 6.007813E+01 sec
Simulation speed ..... 4.684234E+02 showers/sec
Simulated primary showers ..... 2.814200E+04

Transmitted primary particles ..... 2.300000E+01
Backscattered primary particles ..... 7.800000E+01
Absorbed primary particles ..... 2.804100E+04

Fractional transmission ..... 8.172838E-04 +- 5.1E-04
Fractional backscattering ..... 2.807192E-03 +- 1.0E-03
Fractional absorption ..... 9.964111E-01 +- 1.1E-03

Secondary-particle generation probabilities:
-----
|           | electrons | photons | positrons |
-----|-----|-----|-----|
| transmitted | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
|           | +- 0.0E+00 | +- 0.0E+00 | +- 0.0E+00 |
-----|-----|-----|-----|
| backscattered | 1.066022E-04 | 3.553408E-05 | 0.000000E+00 |
|           | +- 1.8E-04 | +- 1.1E-04 | +- 0.0E+00 |
-----|-----|-----|-----|
| absorbed | 2.536138E+00 | 3.753074E+00 | 5.685452E-04 |
|           | +- 1.6E-02 | +- 3.8E-02 | +- 4.3E-04 |
-----|-----|-----|-----|

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 2.918300E+03 +- 6.0E+02 eV (effic. = 3.50E+00)
Body 2 ..... 1.273473E+03 +- 4.9E+02 eV (effic. = 1.00E+00)
Body 3 ..... 3.846584E+03 +- 8.1E+02 eV (effic. = 3.37E+00)
Body 4 ..... 1.013718E+03 +- 4.4E+02 eV (effic. = 7.93E-01)
...
Average deposited energies (energy detectors):
Detector # 1 ... 1.660356E+05 +- 6.4E+03 eV (effic. = 1.00E+02)
Last random seeds = 1646149120 , 1255195657

```

Σχήμα 3.2 : Τμήμα αποτελεσμάτων εισόδου αρχείου εξόδου *penmain.dat*.

3.3.5.2 Αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet#.dat*.

Στην παρούσα Δ.Ε. αναλύθηκε αρκετά η λειτουργία καθώς και η διαμόρφωση και ενός άλλου αρχείου εξόδου με την ονομασία *pm_spc_enddet#.dat*. Η δίεση στην κωδική ονομασία του αρχείου δεδομένων αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, όπως ακριβώς αυτός έχει ορισθεί στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*. Στο συγκεκριμένο αρχείο, τμήμα του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, στις πρώτες τέσσερις γραμμές αναγράφονται κατά σειρά η ονομασία του αρχείου και η επεξήγηση των τριών στηλών δεδομένων που ακολουθούν. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στη μέση τιμή της ενέργειας κάθε ενεργειακού καναλιού (σε eV) του οποίου η ενεργειακή διαμέριση έχει καθορίσει στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*, από το χρήστη. Στη δεύτερη στήλη καταγράφεται η πυκνότητα πιθανότητας απόθεσης ενέργειας στο συγκεκριμένο κανάλι, που υπολογίζεται ως:

$$\frac{\text{bin particles}}{(\text{total particles} \cdot \text{bin width})} \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

Όπου:

- *bin particles* : πλήθος σωματιδίων που απέθεσαν ενέργειας εντός του ενεργειακού καναλιού,
- *total particles* : συνολικό πλήθος σωματιδίων που προσομοιώθηκαν,

- bin width : εύρος ενεργειακού καναλιού (eV).

Η τρίτη στήλη δίνει το μέγιστο πιθανό απόλυτο σφάλμα (3σ) της πιθανότητας της δεύτερης στήλης. Το συγκεκριμένο αρχείο εξόδου είναι από τα σημαντικότερα για την παρούσα Δ.Ε., αφού με κατάλληλη χρήση των δεδομένων που παρέχει, μπορεί να εξαχθεί το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων τα οποία αποθέτουν ενέργεια εντός των γεωμετρικών ορίων του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Επίσης, μέσω σχέσεων οι οποίες έχουν αναλυθεί εκτενώς σε παλαιότερες εργασίες [Δ.Ε. Σάββα Μ., (2009), Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., (2008)], και βασίζονται στα δεδομένα του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, υπολογίζεται η απόδοση φωτοκορυφής ή απόδοση αιχμής μίας γ-ανιχνευτικής διάταξης.

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται πως η προαναφερόμενη απόδοση προκύπτει από την ακόλουθη σχέση :

$$Eff_E = \text{probability density} \cdot \text{bin width} \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

όπου

- Eff_E : η απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη ενέργεια,
- probability density : η τιμή της δεύτερης στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat* για το κανάλι που περιλαμβάνει την συγκεκριμένη ενέργεια,
- bin width : το πλάτος καναλιού.

Ενώ η σχετική αβεβαιότητα της τιμής της απόδοσης όπως προκύπτει από την προσομοίωση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$unc_{sim} = 100 \cdot \frac{\text{statistical uncertainty}}{\text{probability density}} \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

όπου

- unc_{sim} : η αβεβαιότητα απόδοσης φωτοκορυφής για την εκάστοτε ενέργεια ($\%, 3\sigma$),
- statistical uncertainty : η τιμή της τρίτης στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat* για το κανάλι που περιλαμβάνει την συγκεκριμένη ενέργεια,

```

# 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).

1.590000E+03  7.240606E-08  5.268090E-08
2.770000E+03  9.796114E-08  6.127539E-08
3.950000E+03  8.518360E-08  5.714002E-08
5.130000E+03  9.370196E-08  5.992866E-08
6.310001E+03  1.107387E-07  6.514867E-08
7.490001E+03  1.064795E-07  6.388368E-08
8.670001E+03  8.092442E-08  5.569334E-08
9.850001E+03  1.533305E-07  7.665830E-08
1.103000E+04  1.405529E-07  7.339529E-08
1.221000E+04  8.092442E-08  5.569334E-08
1.339000E+04  1.149979E-07  6.638954E-08
1.457000E+04  1.448121E-07  7.449885E-08
1.575000E+04  1.661080E-07  7.978789E-08
...

```

Σχήμα 3.3 : Τμήμα αρχείου εξόδου τύπου *pm_spc_enddet_#.dat*.

Εκτός από τα δύο αρχεία εξόδου που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή του *penmain.dat* και του *pm_spc_enddet_#.dat*, στην παρούσα Δ.Ε. αναλύθηκαν σχολαστικά και άλλα αρχεία εξόδου των οποίων ο τρόπος λειτουργίας βοήθησε σημαντικά στην εμπειριστατωμένη κατανόηση του κώδικα χρήστη PENMAIN. Επιγραμματικά τέτοια ήταν το *pm_material.dat* και το αρχείο *pm_geometry.rep*. Το πρώτο δημιουργείται μέσω της υπορουτίνας PEINIT, η οποία αναλύεται στην παράγραφο 3.3.6.6, και σε αυτό περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τα υλικά που συνθέτουν τη διάταξη, όπως είναι οι παράμετροι προσομοίωσης, η πυκνότητα και ο αριθμός των στοιχείων που περιέχει το μόριο του υλικού κλπ [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006]. Στο αρχείο *pm_geometry.rep*, το οποίο δημιουργείται με τη βοήθεια της υπορουτίνας GEOMIN, περιλαμβάνονται δεδομένα της γεωμετρίας της κατασκευής, όπως αυτά αναγράφονται στο αρχείο γεωμετρίας τύπου *.geo*.

3.3.6 Ανάλυση του κώδικα χρήστη PENMAIN.

Στην παράγραφο που ακολουθεί γίνεται λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα χρήστη PENMAIN. Ο συγκεκριμένος κώδικας, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και σχεδιάστηκε για να προσομοιώνει τη διάδοση σωματιδίων ή φωτονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από πληθώρα διαφόρων υλικών. Αποτελείται από 2980 γραμμές κώδικα. Πέραν της αναλυτικής επεξήγησης των διάφορων τμημάτων του κώδικα που παρατίθεται στη συνέχεια, στο Παράρτημα Α της παρούσας Δ.Ε. παρατίθεται και το αντίστοιχο λογικό διάγραμμα ροής.

3.3.6.1 Τμήμα δήλωσης μεταβλητών και προετοιμασίας της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f.

Στο πρώτο τμήμα του κώδικα PENMAIN.f, διαβάζονται οι παράμετροι οι οποίες είναι απαραίτητες για την προσομοίωση από τα διάφορα αρχεία εισόδου και αρχικοποιούνται διάφορες παράμετροι.

- [Γραμμές 1-5] : Σύνδεση των υπορουτινών των αρχείων *PENELOPE.f*, *PENGEON.f*, *PENVARED.f* και *TIMER.f* για την πραγματοποίηση του compilation.
- [Γραμμές 6-489] : Εγχειρίδιο χρήστη (manual) κώδικα PENMAIN.f.
- [Γραμμές 490-604] : Τμήμα δήλωσης όλων των παραμέτρων, μεταβλητών, μετρητών και πινάκων που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του κώδικα.
- [Γραμμή 605] : Δηλώνεται η υπορουτίνα RAND, η οποία χρησιμοποιείται για την κλήση των γεννητριών τυχαίων αριθμών.
- [Γραμμές 606-609] : Καλείται η υπορουτίνα TIME0, η οποία βρίσκεται στις βιβλιοθήκες του αρχείου *TIMER.f*, και αρχικοποιούνται οι μετρητές χρόνου.
- [Γραμμές 610-1598] : Ανοίγει το αρχείο εισόδου τύπου *.in*, δημιουργείται το αρχείο εξόδου *penmain.dat* και καταγράφονται σε αυτό όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης, όπως ακριβώς τις έχει συντάξει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*. Επιγραμματικά, και εν σειρά καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:
 - [Γραμμές 610-620] : Ημερομηνίας προσομοίωσης.
 - [Γραμμές 621-631] : Όνομα προσομοίωσης.
 - [Γραμμές 632-658] : Περιγραφή σημειακής πηγής.
 - [Γραμμές 659-669] : Περιγραφή μονοενεργειακής πηγής
 - [Γραμμές 670-711] : Περιγραφή ενεργειακού φάσματος.
 - [Γραμμές 712-714] : Μέγιστη δυνατή ενέργεια ποζιτρονίων.
 - [Γραμμές 715-731] : Χωρική θέση της σημειακής πηγής.
 - [Γραμμές 732-760] : Γωνιακή κατανομή των πρωτευόντων σωματιδίων ή φωτονίων.
 - [Γραμμές 761-816] : Δεδομένα από αρχείο phase - space (psf) – προαιρετικό - τα οποία είναι αρχεία εισόδου σε ASCII μορφή και περιέχουν τιμές των διαφόρων παραμέτρων των σωματιδίων. Είναι χρήσιμα για την περίπτωση ιδιαίτερα σύνθετων και πολύπλοκων προβλημάτων, αφού επιτρέπουν τη διάσπαση της προσομοίωσης σε μικρότερα στάδια [Δ.Ε. Αθανασίου Ν. 2006].
 - [Γραμμές 817-838] : Αριθμός υλικών από τα οποία αποτελείται η κατασκευή.
 - [Γραμμές 839-902] : Παράμετροι προσομοίωσης ανάλογα με κάθε υλικό.
 - [Γραμμές 903-931] : Όνομα αρχείο εισόδου υλικών *.mat* και άνοιγμα αρχείου δεδομένων *pm_material.dat*.

- [Γραμμές 932-975] : Όνομα αρχείου εισόδου γεωμετρίας .geo.
- [Γραμμές 976-1010] : Μέγιστο μήκος βήματος ηλεκτρονίων και φωτονίων σε κάθε σώμα της κατασκευής.
- [Γραμμές 1011-1078] : Δεδομένα για αναγκαστική αλληλεπίδραση των σωματιδίων ή φωτονίων με την ύλη - προαιρετικό.
- [Γραμμές 1079-1155] : Ενέργεια και γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων σωματιδίων ή φωτονίων.
- [Γραμμές 1159-1166] : Μέγεθος ενεργειακών καναλιών.
- [Γραμμές 1167-1324] : Δεδομένα για τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης (impact detectors).
- [Γραμμές 1325-1410] : Δεδομένα για τους ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detectors).
- [Γραμμές 1411-1516] : Δεδομένα για τους ανιχνευτές δόσης (dose distribution).
- [Γραμμές 1517-1598] : Δεδομένα της προσομοίωσης όπως η ονομασία του αρχείου dump, η διάρκεια της περιόδου dumping , ο αριθμός ιστοριών που προσομοιώνονται, οι αρχικές τιμές των μεταβλητών ISEED1 και ISEED2 οι οποίες χρησιμεύουν στις γεννήτριες τυχαίων αριθμών, καθώς και ο μέγιστος χρόνος που διαρκεί η προσομοίωση.
- [Γραμμές 1599-1756] : Καθορίζονται τα δεδομένα ανάκτησης σε περίπτωση επανεκκίνησης της προσομοίωσης.
- [Γραμμές 1757-1769] : Αρχικοποιείται ο μετρητής SHN, ο οποίος σχετίζεται με τον αριθμό των ιστοριών που προσομοιώνονται.

Μέχρι το σημείο αυτό του κώδικα έχουν καταγραφεί όλα τα δεδομένα και οι πληροφορίες που απαιτούνται για να αρχίσει η προσομοίωση. Το πρόγραμμα PENMAIN.exe πλέον προσομοιώνει ιστορίες για τις οποίες δεν χρειάζεται να λάβει ξανά τις πληροφορίες που περιγράφηκαν στις γραμμές 1 έως 1769. Κάθε φορά που μία ιστορία φτάνει στο τέλος της, υπάρχει εντός του κώδικα κατάλληλη εντολή προγραμματισμού, η οποία επιστρέφει την προσομοίωση στο σημείο αμέσως μετά την γραμμή 1769. Ο κώδικας στο σημείο αυτό πραγματοποιεί μία σειρά ελέγχων. Εάν ο αύξων αριθμός της ιστορίας που μόλις έχει τερματιστεί δεν είναι μεγαλύτερος από το μέγιστο αριθμό ιστοριών που έχει επιλέξει ο χρήστης να προσομοιωθούν και επίσης εάν μετά το πέρας της τελευταίας ιστορίας δεν έχει ξεπεραστεί ο μέγιστος χρόνος προσομοίωσης, τότε αυτόματα ξεκινάει η προσομοίωση της επόμενης ιστορίας (shower). Σε διαφορετική περίπτωση ο κώδικας ολοκληρώνει τη λειτουργία του.

3.3.6.2 Τμήμα επεξεργασίας και διαμόρφωσης των δεδομένων της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f.

Στη συνέχεια περιγράφεται επιγραμματικά το τμήμα του κώδικα PENMAIN.f, στο οποίο γίνεται η διαμόρφωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

- [Γραμμή 1770] : Εντολή CONTINUE. Σε αυτό το σημείο αρχίζει κάθε φορά η ιστορία (shower) του νέου πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου που έχει επιλέξει ο χρήστης να προσομοιωθεί.
- [Γραμμές 1771-1783] : Μηδενίζεται η ενέργεια των σωματιδίων ή φωτονίων που έχει αποτεθεί στα σώματα, μεταβλητή DEBO για κάθε σώμα KB, της κατασκευής από την προηγούμενη ιστορία (shower).
- [Γραμμές 1784-1789] : Μηδενίζεται η ενέργεια του σωματιδίου ή φωτονίου που έχει καταγραφεί στους ανιχνευτές, μεταβλητή DEDI για τον ανιχνευτή KD, από την προηγούμενη ιστορία.
- [Γραμμές 1790-1791] : Καλείται η υπορουτίνα CLEANS η οποία μηδενίζει τις αρχικές τιμές της λίστας δευτερογενών σωματιδίων (secondary stack), στην οποία αποθηκεύονται προσωρινά τα δευτερογενή σωματίδια που προκύπτουν από τις διάφορες αλληλεπιδράσεις του πρωτογενούς. Είναι απαραίτητο να καλείται πάντα η συγκεκριμένη υπορουτίνα, πριν την έναρξη κάθε νέας ιστορίας (shower) της προσομοίωσης που πραγματοποιείται, όπως άλλωστε αναφέρεται επεξηγηματικά και στην ίδια την υπορουτίνα CLEANS.
- [Γραμμές 1792-1805] : Για σημειακή πηγή, την οποία προβλέπει ο πρωτότυπος κώδικας, αυξάνεται ο αριθμός των ιστοριών που προσομοιώθηκαν, μεταβλητή SHN, καθορίζεται το είδος και ο παράγοντας βαρύτητας του πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου, μεταβλητές KPAR και WGHT αντίστοιχα, καθώς και η θέση της πηγής στο χώρο μέσω συντεταγμένων X, Y, Z που έχει εισάγει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.
- [Γραμμές 1806-1807] : Για τη σημειακή πηγή καλείται η υπορουτίνα GCONE από την οποία καθορίζονται τα συνημίτονα κατεύθυνσης για τα πρωτογενή σωματίδια ή φωτόνια που προσομοιώνονται.
- [Γραμμές 1808-1828] : Για τη σημειακή πηγή καθορίζεται η αρχική ενέργεια του σωματιδίου ή φωτονίου που έχει επιλεγεί να προσομοιωθεί ανάλογα με τον τύπο της ραδιενεργού πηγής (μονοενεργειακή ή συνεχές φάσμα).
- [Γραμμές 1830-1853] : Από αρχείο δεδομένων phase-space (psf) διαβάζονται το είδος, η ενέργεια, ο παράγοντας βαρύτητας, οι συντεταγμένες και τα συνημίτονα κατεύθυνσης του πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου που προσομοιώνεται.

- [Γραμμές 1854-1857] : Καλείται η υπορουτίνα LOCATE η οποία χρησιμεύει για να προσδιοριστεί το σώμα (body) μέσα στο οποίο βρίσκεται το σημείο του χώρου με συντεταγμένες X, Y, Z, δηλαδή το σημείο στο χώρο που βρίσκεται η πηγή των προσομοιούμενων σωματιδίων ή φωτονίων.
- [Γραμμές 1858-1870] : Ελέγχεται εάν το σωματίδιο βρίσκεται εντός του συστήματος που έχει ορίσει ο χρήστης.
- [Γραμμές 1871-1905] : Διαμορφώνονται δεδομένα για τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, όπως η καταγεγραμμένη ενέργεια του σωματιδίου ή φωτονίου που έχει εισέλθει σε αυτόν για το συγκεκριμένο shower, μεταβλητή DEDI, ο καθορισμός του ενεργειακού εύρους που καταγράφει ο ανιχνευτής, IE, καθώς και ο αριθμός των σωματιδίων ή φωτονίων με ενέργεια που ανήκει στο συγκεκριμένο κανάλι, μεταβλητή DIT για το κανάλι IE.
- [Γραμμές 1906-1914] : Ελέγχεται εάν η ενέργεια του σωματιδίου ή φωτονίου είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τιμή (cut-off energy), ώστε ανάλογα να τερματιστεί ή να συνεχίσει η προσομοίωση της συγκεκριμένης ιστορίας.
- [Γραμμές 1915-1945] : Διαμορφώνονται τα δεδομένα αποτιθέμενης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές βαρύτητας, μεταβλητή DEP, την αποτιθέμενη ενέργεια σε κάθε σώμα (body) για τη συγκεκριμένη ιστορία, τη μεταβλητή DEBO, καθώς και δεδομένα που αναφέρονται στη δόση που καταγράφεται στη συγκεκριμένη θέση του ανιχνευτή στην οποία βρίσκεται το προσομοιωμένο σωματίδιο ή φωτόνιο, μεταβλητή DOSE. Επίσης, προσδιορίζεται ο αριθμός του καναλιού της x, y και z συντεταγμένης της συγκεκριμένης θέσης του ανιχνευτή όπου βρίσκεται το προσομοιωμένο σωματίδιο ή φωτόνιο, μέσω των μεταβλητών I1, I2 και I3 αντίστοιχα.
- [Γραμμές 1946-1949] : Καλείται η υπορουτίνα START. Για την περίπτωση ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων καλείται υποχρεωτικά πριν από κάθε νέα διαδρομή (track) του πρωτογενούς ή δευτερογενούς σωματιδίου. Για φωτόνια, η κλήση της είναι προαιρετική αλλά επιθυμητή, καθώς τελικά βοηθάει στον προσδιορισμό λαθών στο κυρίως πρόγραμμα [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006].
- [Γραμμές 1951-1959] : Καλείται η υπορουτίνα JUMPF, στην περίπτωση της εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης (Interaction forcing), στην οποία υπολογίζεται η απόσταση, μεταβλητή DS, που διανύει το σωματίδιο ή φωτόνιο μέχρι αυτό να αλληλεπιδράσει για πρώτη φορά ή να ξανά-αλληλεπιδράσει.
- [Γραμμές 1960-1963] : Καλείται η υπορουτίνα JUMP για τον υπολογισμό της απόστασης DS σε κάθε άλλη περίπτωση (Analogue simulation) πλην της εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης.
- [Γραμμή 1964] : Καλείται η υπορουτίνα STEP η οποία ενημερώνει το κυρίως πρόγραμμα για την είσοδο και έξοδο του εξεταζόμενου σωματιδίου ή φωτονίου από ένα σώμα (body) της γεωμετρίας σε ένα άλλο.
- [Γραμμές 1965-1974] : Ελέγχεται αν το σωματίδιο βρίσκεται εντός του συστήματος.

- [Γραμμές 1975-2009] : Περαιτέρω υπολογισμοί για τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης, ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι αρχείου Phase-space (psf).
- [Γραμμές 2010-2015] : Ελέγχεται αν το σωματίδιο ή φωτόνιο έχει διέλθει από μία διεπιφάνεια.
- [Γραμμές 2016-2020] : Καλείται η υπορουτίνα KNOCKF ή KNOCK, ανάλογα με τον αν υπάρχει ή όχι εξαναγκασμένη αλληλεπίδραση αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες υπορουτίνες, μαζί με τις υπορουτίνες START και JUMP, είναι από τις πιο σημαντικές, αφού σε αυτές πραγματοποιείται η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης που υφίσταται το σωματίδιο ή φωτόνιο από πλευρά φυσικής. Στην περίπτωση κατά την οποία το προσομοιούμενο σωματίδιο ή φωτόνιο έχει αποθέσει μέρος της ενέργειας του στο υλικό της κατασκευής εξαιτίας αλληλεπίδρασης που πραγματοποιήθηκε, υπολογίζεται η τιμή της μέσω της μεταβλητής DE. Το είδος της αλληλεπίδρασης περιγράφεται από τη μεταβλητή ICOL, ενώ η τιμή της DE ισούται με τη διαφορά των ενεργειών του σωματιδίου ή φωτονίου πριν και μετά την αλληλεπίδραση.
- [Γραμμή 2021] : Υπολογίζεται η αποτιθέμενη ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές βαρύτητας, μεταβλητή DEP.
- [Γραμμές 2022-2041] : Περαιτέρω υπολογισμοί της συνολικής δόσης (μεταβλητή DOSE) και της αποτιθέμενης ενέργειας σε κάθε σώμα της κατασκευής για την συγκεκριμένη ιστορία (μεταβλητή DEBO).
- [Γραμμές 2042-2052] : Διαδικασία με την ονομασία 'Russian Roulette' εξειδικευμένη για φωτόνια των οποίων το συνημίτονο κατεύθυνσης στην κατεύθυνση z είναι μικρότερο του μηδενός (photons moving downstream). Καλείται η υπορουτίνα VKILL.
- [Γραμμές 2052-2061] : Ελέγχεται αν το σωματίδιο ή φωτόνιο έχει χάσει όλη την ενέργειά του.
- [Γραμμές 2062-2069] : Ενημερώνονται οι συνολικοί μετρητές πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων (particle counters) ανάλογα με την έκβαση της ιστορίας (shower) της προσομοίωσης.
- [Γραμμές 2071-2083] : Τα σωματίδια ή φωτόνια που έχουν προσομοιωθεί, τερματίζουν την πορεία τους με διάφορους τρόπους. Το πρόγραμμα υπολογίζει, ανάλογα με το είδος τους, τον συνολικό αριθμό αυτών που εκπέμφθηκαν (transmitted), οπισθοσκεδάστηκαν (backscattered) ή απορροφήθηκαν (absorbed) από την κατασκευή.
- [Γραμμές 2084-2104] : Προσδιορίζεται η γωνιακή κατανομή, ανάλογα με το είδος των εκπεμπόμενων σωματιδίων ή φωτονίων.
- [Γραμμές 2105-2114] : Καλείται η υπορουτίνα SECPAR η οποία καθορίζει την αρχική κατάσταση του δευτερογενούς σωματιδίου και το αφαιρεί από τη δευτερογενή στοιβάδα (secondary stack).
- [Γραμμές 2115-2138] : Στην περίπτωση όπου υπάρχουν δευτερογενή σωματίδια (μεταβλητή LEFT) τότε επαναλαμβάνεται η τεχνική ' Russian Roulette' έως ότου να προσομοιωθούν όλα και υπολογίζονται διάφορες μεταβλητές της δόσης.

3.3.6.3 Τμήμα τελικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f.

Μέχρι τη γραμμή 2138 του κώδικα PENMAIN.f, έχουν γίνει όλοι οι κατάλληλοι υπολογισμοί των μεγεθών που αφορούν την προσομοίωση, όπως περιγράφηκε στην ακριβώς προηγούμενη παράγραφο. Η προσομοίωση της τρέχουσας ιστορίας έχει τερματιστεί και εν συνεχεία γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ώστε να αρχίσει η διαμόρφωση των αρχείων εξόδου.

- [Γραμμές 2139-2152] : Προσδιορίζεται ο συνολικός αριθμός πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων με ίδια τελική κατάσταση στο τέλος της ιστορίας (μεταβλητές PRIM και SEC αντίστοιχα).
- [Γραμμές 2153-2160] : Μηδενίζεται η τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας που έχει καταγράψει ο κάθε ανιχνευτής απόθεσης, μεταβλητή DEDE, ώστε να διαγραφεί η αποθηκευμένη κατά την προηγούμενη ιστορία (shower) τιμή.
- [Γραμμές 2161-2170] : Υπολογίζεται η συνολική αποτιθέμενη ενέργεια στο κάθε σώμα (μεταβλητή TDEBO) και της συνολικής αποτιθέμενης ενέργειας που έχει καταγράψει κάθε ανιχνευτής απόθεσης στο συγκεκριμένο shower (μεταβλητή DEDE).
- [Γραμμές 2171-2186] : Υπολογίζεται η συνολική αποτιθέμενη ενέργεια που έχει καταγράψει κάθε ανιχνευτής απόθεσης αθροιστικά μέχρι την ιστορία που έχει προσομοιωθεί (μεταβλητή TDED) και γίνεται υπολογισμός του αριθμού των σωματιδίων ή φωτονίων που έχουν αποθέσει ενέργεια η οποία βρίσκεται εντός των ορίων ενέργειας του καναλιού KE.
- [Γραμμές 2187-2195] : Για κάθε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης υπολογίζεται η συνολική ενέργεια των εισερχόμενων σωματιδίων ή φωτονίων στον ανιχνευτή (μεταβλητή TDID).
- [Γραμμές 2196-2198] : Καλείται η υπορουτίνα TIMER στην οποία υπολογίζεται ο χρόνος προσομοίωσης σε δευτερόλεπτα.
- [Γραμμές 2199-2216] : Ελέγχεται εάν έχει ξεπεραστεί ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος προσομοίωσης, όπως αυτός έχει οριστεί από το χρήστη στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.
- [Γραμμές 2217-2263] : Αποθηκεύονται τα συνολικά αποτελέσματα των μεταβλητών PDE, PDA, DIT, DET και DOSE, για μετέπειτα αξιοποίηση τους κατά την καταγραφή τους στα αντίστοιχα αρχεία εξόδου.
- [Γραμμές 2264-2304] : Δημιουργείται το αρχείο dump, όπου καταγράφονται οι τιμές των μεταβλητών SHN, DET, DOSE, PDE, PDA, TDEBO, ISEED1, ISEED2 κ.λ.π., ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όπως ορίζεται από την dumping period.

3.3.6.4 Τμήμα διαμόρφωσης των αρχείων εξόδου της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f.

Μετά το πέρας της τελικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιείται σε κατάλληλο τμήμα του κώδικα η καταγραφή όλων των δεδομένων στα αρχεία εξόδου. Αυτά τα αποτελέσματα είναι που χρησιμοποιεί ο χρήστης για να εξάγει τα χρήσιμα σε αυτόν συμπεράσματα.

- [Γραμμές 2305-2434] : Καταγράφονται αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου *penmain.dat* στο τμήμα αποτελεσμάτων (Program PENMAIN. Results.)
- [Γραμμές 2435-2468] : Καταγράφονται αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου *psource.dat*, στην περίπτωση πηγής που εκπέμπει σωματίδια ή φωτόνια με φάσμα ενεργειών.
- [Γραμμές 2469-2489] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_energy_el_trans.dat*, το οποίο αφορά στην κατανομή της ενέργειας των εκπεμπόμενων από την κατασκευή ηλεκτρονίων (Transmitted electrons).
- [Γραμμές 2490-2507] : Καταγράφονται αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου *pm_energy_el_back.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (Backscattered electrons).
- [Γραμμές 2508-2525] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_energy_ph_trans.dat*, το οποίο αφορά την κατανομή της ενέργειας των εκπεμπόμενων φωτονίων (Transmitted photons).
- [Γραμμές 2526-2543] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_energy_ph_back.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων φωτονίων (Backscattered photons).
- [Γραμμές 2544-2561] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_energy_po_trans.dat*, το οποίο αφορά την κατανομή της ενέργειας των εκπεμπόμενων από την κατασκευή ποζιτρονίων (Transmitted positrons).
- [Γραμμές 2562-2579] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_energy_po_back.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων ποζιτρονίων (Backscattered positrons).
- [Γραμμές 2580-2605] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_angle_el.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της γωνίας με την οποία εξέρχονται της κατασκευής τα ηλεκτρόνια.
- [Γραμμές 2606-2629] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_angle_ph.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της γωνίας με την οποία εξέρχονται της κατασκευής τα φωτόνια.

- [Γραμμές 2630-2653] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_angle_po.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της γωνίας με την οποία εξέρχονται της κατασκευής τα ποζιτρόνια.
- [Γραμμές 2654-2676] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_spc_impdet_#.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας των σωματιδίων ή φωτονίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης. Η δίσωση (#) αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό ανιχνευτή αλληλεπίδρασης.
- [Γραμμές 2677-2703] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, το οποίο, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, αφορά στην κατανομή της αποτιθέμενης ενέργειας των σωματιδίων ή φωτονίων που βρίσκονται εντός του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Η δίσωση (#) αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό του συγκεκριμένου είδους ανιχνευτή.
- [Γραμμές 2704-2734] : Καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο αρχείο εξόδου *pm_depth_dose.dat*, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της δόσης συναρτήσει του βάθους ή του ύψους της κατασκευής.
- [Γραμμές 2735-2771] : Συμπληρώνονται στο αρχείο εξόδου *penmain.dat*, δεδομένα που αφορούν την κατανομή της δόσης.
- [Γραμμές 2772-2803] : Καταγράφονται αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου *pm_3d_dose.dat*, στο οποίο περιγράφεται η τρισδιάστατη κατανομή της δόσης εντός του κατάλληλου ορθογωνίου παραλληλογράμμου (enclosure) το οποίο έχει ορίσει ο χρήστης.
- [Γραμμές 2804-2871] : Συμπληρώνονται στο αρχείο εξόδου *penmain.dat*, δεδομένα που αφορούν την κατανομή της τρισδιάστατης δόσης, καθώς και οι τιμές των τυχαίων αριθμών ISEED1 και ISEED2, των οποίων η χρησιμότητα παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.3.6.1.

Είναι σαφές ότι σε αυτό το τμήμα του κώδικα υπολογίζονται και καταγράφονται πληροφορίες σε αρχεία εξόδου, οι οποίες δεν ενδιαφέρουν στις συνήθεις εφαρμογές του κώδικα στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Στο μέλλον θα μπορούσε να γίνει τροποποίηση αυτού του τμήματος του κώδικα με στόχο την ταχύτερη εκτέλεσή του.

3.3.6.5 Τμήμα υπορουτινών του κώδικα PENMAIN.f

Στο αρχείο PENMAIN.f, μετά από τον κώδικα χρήστη, ακολουθούν οι βιβλιοθήκες υπορουτινών, οι οποίες καλούνται σε διάφορα τμήματα του. Εκτός από τις τέσσερις (4) υπορουτίνες που αναφέρονται στη συνέχεια, καλούνται επιπλέον από τον κώδικα χρήστη και άλλες δώδεκα (12) υπορουτίνες οι οποίες ανήκουν στους πηγαίους κώδικες του PENELOPE, και αναλύονται στην παράγραφο 3.3.6.6.

- [Γραμμές 2872-2907] : Υπορουτίνα GCONE η οποία υπολογίζει και επιστρέφει στο πρόγραμμα τα συνημίτονα κατεύθυνσης των εκπεμπόμενων σωματιδίων ή φωτονίων.
- [Γραμμές 2908-2931] : Υπορουτίνα GCONE0 στην οποία αρχικοποιούνται όλοι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην υπορουτίνα GCONE.
- [Γραμμές 2908-2931] : Υπορουτίνα N2CH10, η οποία υπολογίζει ένα δεκαψήφιο ακέραιο αριθμό που χρησιμεύει στη διαμόρφωση των αρχείων εξόδων για τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης.
- [Γραμμές 2908-2931] : Υπορουτίνα RDPSF, η οποία διαβάζει το αρχείο δεδομένων phase-space (psf).

3.3.6.6 Υπορουτίνες που καλούνται από τον κώδικα PENMAIN.f

Εκτός από τέσσερις (4) υπορουτίνες, οι οποίες αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.3.6.5 και βρίσκονται στις βιβλιοθήκες του αρχείου PENMAIN.f, καλούνται από τον εν λόγω κώδικα και αρκετές ακόμα υπορουτίνες οι οποίες είναι απαραίτητες για την προσομοίωση. Αυτές είναι οι εξής:

- Υπορουτίνα CLEANS, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENELOPE.f* και καθορίζει τις αρχικές τιμές της δευτεροβάθμιας στοιβάδας. Η υπορουτίνα αυτή πρέπει να καλείται πριν από την έναρξη παρακολούθησης της πορείας κάθε νέου πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου.
- Υπορουτίνα LOCATE, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENGEOM.f* και χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του σώματος που περιλαμβάνει το σημείο με συντεταγμένες X,Y και Z, δηλαδή καθορίζει εντός ποιου σώματος βρίσκεται το υπό εξέταση σωματίδιο ή φωτόνιο.
- Υπορουτίνα STEP, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENGEOM.f* και ενημερώνει το κυρίως πρόγραμμα όταν ένα σωματίδιο εξέρχεται από ένα σώμα (body) της κατασκευής και εισέρχεται μέσα σε άλλο.
- Υπορουτίνα START, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENELOPE.f* και καλείται υποχρεωτικά στην περίπτωση σωματιδίων και προαιρετικά στην εξέταση φωτονίων πριν από κάθε νέα παρακολούθηση της πορείας πρωτογενών ή δευτερογενών σωματιδίων ή φωτονίων.
- Υπορουτίνα JUMP, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENELOPE.f* και υπολογίζει την απόσταση (DS) που διανύει το σωματίδιο μέχρι αυτό να αλληλεπιδράσει για πρώτη φορά ή να ξανά-αλληλεπιδράσει.
- Υπορουτίνα KNOCK, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENELOPE.f* και προσομοιώνει την αλληλεπίδραση που υφίσταται το σωματίδιο στην περίπτωση που το σωματίδιο δεν έχει εξέλθει από το σώμα της κατασκευής και παραμένει μέσα σ' αυτό.

- Υπορουτίνα SECPAR, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENELOPE.f* και καθορίζει την αρχική κατάσταση του δευτερογενούς σωματιδίου και το αφαιρεί από τη δευτεροβάθμια στοιβάδα προκειμένου να ξεκινήσει η προσομοίωσή του.
- Υπορουτίνα TIMER, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *TIMER.f* και υπολογίζει τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης σε δευτερόλεπτα.
- Υπορουτίνα TIME0, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *TIMER.f* και αρχικοποιεί τους μετρητές χρόνου.
- Υπορουτίνα PDATET, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *TIMER.f* και εξάγει με τη μορφή 'ddth Mon yyyy. hh:mm:ss ' την ημερομηνία και την ώρα έναρξης της προσομοίωσης.
- Υπορουτίνα PEINIT, η οποία διαβάζει το αρχείο που περιέχει δεδομένα σχετικά με τα διάφορα υλικά που συγκροτούν τη γεωμετρία του προβλήματος, προετοιμάζει τους πίνακες που χρησιμοποιούνται στους περαιτέρω υπολογισμούς και καταγράφει σε ξεχωριστό αρχείο όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006].
- Υπορουτίνα GEOMIN, η οποία βρίσκεται στο αρχείο *PENGEOM.f* και διαβάζει από το αρχείο εισόδου τα δεδομένα της γεωμετρίας της κατασκευής και αρχικοποιεί τις υπόλοιπες υπορουτίνες που αφορούν τη γεωμετρία.

Είναι σημαντικό να τονισθεί πως σε όλα τα τμήματα του κώδικα γίνονται συνεχείς έλεγχοι προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον έχουν ορισθεί σωστά τα δεδομένα εισόδου. Στη Δ.Ε. Αθανασίου Ν. (2006) και συγκεκριμένα στο παράρτημα 3, υπάρχει αναλυτικός πίνακας με όλες τις μεταβλητές του κώδικα PENMAIN.f και γίνεται λεπτομερής επεξήγησή τους. Καθ' όλη την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε., το συγκεκριμένο παράρτημα αποτέλεσε πηγή ουσιαστικής βοήθειας και για αυτό το λόγο παρατίθεται συμπληρωμένο με τις νέες μεταβλητές που εισήχθησαν στο τέλος της εργασίας (Παράρτημα Β).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΡΙΩΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PENMAIN.f

4.1 Εισαγωγή.

Κύριος στόχος της παρούσας Δ.Ε. είναι η τροποποίηση του προγραμματιστικού κώδικα PENELOPE, ώστε να εισαχθεί στη λειτουργία της προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων και φωτονίων με την ύλη και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence). Στο Κεφάλαιο 2 αναλύθηκε εκτενώς τόσο το ίδιο το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης όσο και η επίδραση που αυτό έχει στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Η συνήθης τακτική στο Ε.Π.Τ-Ε.Μ.Π. περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης οι οποίοι, όπως περιγράφεται εκτενώς στην παράγραφο 2.4.2, βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα.

Ο πρωτότυπος κώδικας PENELOPE δεν έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Μέσω της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε και επιτεύχθηκε σημαντική τροποποίηση του κυρίως προγράμματος PENMAIN προς την κατεύθυνση αυτή. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα PENMAIN.f, ώστε το εξαγόμενο από την προσομοίωση ενεργειακό φάσμα να περιέχει τις επιδράσεις από το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

4.2 Η φιλοσοφία του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.

Στον πρωτότυπο κώδικα PENMAIN.f της έκδοσης PENELOPE 2005, η βασική λογική της προσομοίωσης εστιάζεται στη μεμονωμένη παρακολούθηση της πορείας ενός πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου μέσα στην ύλη. Στην πορεία αυτή περιλαμβάνονται τόσο οι αλληλεπιδράσεις του πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου, όσο και εκείνες που πραγματοποιούν τα παραγόμενα δευτερογενή σωματίδια, μέχρι να χάσουν όλη την ενέργειά τους ή μέχρι να βρεθούν εκτός των ορίων του εξεταζόμενου συστήματος. Η πορεία αυτή χαρακτηρίζεται ως μία ιστορία (shower). Για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων της πορείας αυτής, δηλαδή για μεγάλο αριθμό προσομοιούμενων ιστοριών, εξάγονται αποτελέσματα συνεχώς αυξανόμενης στατιστικής ακρίβειας, τα οποία προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο την πραγματικότητα.

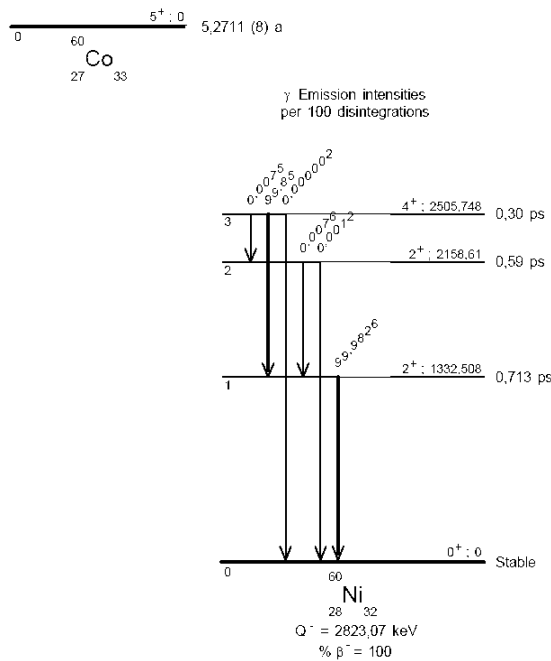
Η βασική τροποποίηση του πρωτότυπου κώδικα, ώστε να περιλαμβάνεται στους φυσικούς μηχανισμούς και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, είναι η αλλαγή της έννοιας της μεμονωμένης ιστορίας. Όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2, αλλά και σε προηγούμενη εργασία [Δ.Ε. Καρφόπουλος Κ., 2003], το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης αναφέρεται στην περίπτωση όπου δύο ή περισσότερα

φωτόνια εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο του διαγράμματος διάσπασης ενός πυρήνα ραδιενεργού ισότοπου με χρονική διαφορά μικρότερη από το χρόνο απόκρισης της χρησιμοποιούμενης ανιχνευτικής διάταξης. Τα φωτόνια αυτά ανιχνεύονται ως ένα αθροιστικό φωτόνιο με ενέργεια ίση με το άθροισμα των ενεργειών των επιμέρους φωτονίων. Επισημαίνεται ότι δύναται να δημιουργηθούν παραπάνω από μία αθροιστικές κορυφές, στην περίπτωση ισότοπου με συγκριτικά πολύπλοκο διάγραμμα διάσπασης και πολλά εκπεμπόμενα εν σειρά φωτόνια κατά την αποδιέγερση του πυρήνα. Οι αθροιστικές αυτές φωτοκορυφές προκύπτουν από συνδυασμό των πρωτογενών φωτονίων της εκάστοτε διαδρομής που μπορεί να ακολουθηθεί. Στα πλαίσια επομένως της παρούσας Δ.Ε., ως ιστορία (shower) θεωρείται η διάσπαση του προσομοιούμενου ραδιενεργού πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, για ραδιενεργό ισότοπο το οποίο υφίσταται έντονα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, όταν γίνεται αναφορά στον όρο ιστορία (shower) περιγράφεται η πλήρης αποδιέγερση του εν λόγω πυρήνα. Προσομοιώνεται, με άλλα λόγια, η εξέλιξη της πορείας όλων των φωτονίων (δύο ή και περισσότερων) που ανήκουν στον ίδιο κλάδο διάσπασης του εξεταζόμενου ισότοπου.

Συνοψίζοντας, με τη νέα έννοια της ιστορίας (shower) η διαδικασία που επαναλαμβάνεται για την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων είναι η αποδιέγερση του πυρήνα του προσομοιούμενου ισότοπου και όχι η παρακολούθηση φωτονίου μεμονωμένης ενέργειας όπως προβλέπεται από την έκδοση της PENELOPE του 2005.

Για να γίνει πιο κατανοητή η νέα έννοια της ιστορίας (shower) στον τροποποιημένο κώδικα, γίνεται αναφορά στην περίπτωση του ισότοπου ^{60}Co . Στο παρακάτω Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το σχήμα διάσπασης του ^{60}Co , όπου εμφανίζονται όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα ποσοστά εκπομπής. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV και 1332 keV. Λόγω της μικρής χρονικής διαφοράς που εκπέμπονται τα φωτόνια αυτά, τάξεως picoseconds, υπάρχει πιθανότητα να ανιχνευτούν ταυτόχρονα από την ανιχνευτική διάταξη. Κατά την προσομοίωση του ισότοπου ^{60}Co με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, παρακολουθείται αρχικά η πορεία του πρώτου εκπεμπόμενου φωτονίου, ενέργειας 1173 keV, και στη συνέχεια προσομοιώνεται και το δεύτερο φωτόνιο των 1332 keV. Μέσω κατάλληλων διεργασιών στον κώδικα επομένως, επιτυγχάνεται η προσομοίωση μίας ιστορίας (shower) να περιλαμβάνει την παρακολούθηση και των δύο φωτονίων.

Πιο συγκεκριμένα, πριν την καταγραφή των αποτελεσμάτων στα αρχεία εξόδου, λαμβάνονται υπόψη δεδομένα από την παρακολούθηση και των δύο εκπεμπόμενων φωτονίων και καταγράφεται συγκεντρωτικά η συνολική επίδραση του αποδιεγειρόμενου πυρήνα. Αφού γίνει η πρόχειρη καταγραφή των δεδομένων εξόδου της προσομοίωσης, η διαδικασία που επαναλαμβάνεται είναι ολόκληρη η αποδιέγερση του πυρήνα του ισότοπου ^{60}Co , δηλαδή η εκπομπή και παρακολούθηση του φωτονίου ενέργειας 1173 keV και στη συνέχεια του φωτονίου 1332 keV.



Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα διάσπασης ^{60}Co [M.-M. Bé, et al., 2004].

Πριν αναλυθούν εκτενώς οι τροποποιήσεις που έγιναν στον κώδικα ώστε να περιλαμβάνει και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, πρέπει να τονισθεί ότι ο νέος κώδικας PENMAIN.f προσφέρει στον χρήστη τις ίδιες δυνατότητες με τον πρωτότυπο κώδικα της έκδοσης PENELOPE του 2005. Η επέκτασή του έγκειται στην εξέταση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και επομένως αφορά αποκλειστικά την προσομοίωση φωτονίων και όχι σωματιδίων (ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια). Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι αναγκαίες αλλαγές στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

4.3 Τροποποιήσεις του κώδικα PENMAIN.f.

Οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν εντοπίζονται στο αρχείο εισόδου τύπου *.in* και σε διάφορα σημεία του κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Αρχικά, παρουσιάζονται οι αλλαγές στο αρχείο εισόδου και ακολούθως, σε ξεχωριστές παραγράφους, οι επιμέρους αλλαγές στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ανάλυση των αλλαγών, ώστε σε επόμενη πιθανή επέμβαση του χρήστη στον κώδικα να μην υπάρξουν ασάφειες ως προς τη λειτουργία του.

Ο νέος κώδικας στηρίζεται στην αρχή λειτουργίας του πρωτότυπου. Ωστόσο, οι τροποποιήσεις είναι αποκλειστικά διαμορφωμένες για την περίπτωση φωτονίων κατά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Επομένως στις ακόλουθες παραγράφους αναλύεται η λειτουργία του νέου κώδικα, εστιάζοντας στα προσομοιωμένα πρωτογενή φωτόνια χωρίς να γίνεται αναφορά σε πρωτογενή ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια.

4.3.1 Αλλαγές στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.

Ο πρωτότυπος κώδικας PENMAIN.f μπορεί να προσομοιώσει την πορεία ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων. Ο χρήστης επιλέγει το είδος των προς εξέταση σωματιδίων ή φωτονίων μέσω του αρχείου εισόδου τύπου *.in*. Η μεταβλητή η οποία αντιπροσωπεύει το είδος του πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου που προσομοιώνεται έχει την κωδική ονομασία SKPAR και παίρνει την τιμή δύο (2) στην περίπτωση προσομοίωσης φωτονίων. Εν συνεχεία, η τιμή της ενέργειας του φωτονίου που προσομοιώνεται μπορεί να δηλωθεί με δύο τρόπους. Είτε μέσω της μεταβλητής SENERG η οποία αντιστοιχεί στην ενέργεια μονοενεργειακής πηγής είτε μέσω της μεταβλητής SPECTR η οποία αναφέρεται σε συνεχές φάσμα ενέργειας.

4.3.1.1 Εισαγωγή μεταβλητής εξεταζόμενου ισότοπου 'SISOTO'.

Η πρώτη καθοριστική αλλαγή στον τροποποιημένο κώδικα χρήστη PENMAIN.f αφορά στην εισαγωγή μίας νέας μεταβλητής στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*, η οποία αναφέρεται στο ισότοπο που επιθυμεί ο χρήστης να προσομοιωθεί. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μεταβλητή να ονομαστεί SISOTO ακολουθώντας τους κανόνες ονοματολογίας του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE, ενώ η κωδική ονομασία του περιγράφει το προς εξέταση ραδιενεργό ισότοπο. Ο χρήστης αφού επιλέξει προσομοίωση φωτονίων, δίνοντας στο αρχείο εισόδου *.in* την τιμή δύο (2) στη μεταβλητή SKPAR, δίνει στην αλφαριθμητική μεταβλητή SISOTO την ονομασία του προς εξέταση ισότοπου. Είναι σημαντικό να διασαφηνιστεί πως για την ομαλή λειτουργία της προσομοίωσης πρέπει να επιλεγθεί μόνο μία εκ των τριών μεταβλητών SENERG, SPECTR ή SISOTO, αφού κάθε μία από αυτές αντιπροσωπεύει τελείως διαφορετικό τρόπο εισαγωγής δεδομένων για την αρχικοποίηση και εκκίνηση της. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι στο κυρίως πρόγραμμα υπάρχει κατάλληλος έλεγχος ο οποίος αποτρέπει τη λανθασμένη λειτουργία της προσομοίωσης, ελέγχοντας εάν η αλφαριθμητική μεταβλητή που δίνει ο χρήστης είναι μία από τις τρεις προαναφερθείσες.

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται το τροποποιημένο αρχείο εισόδου τύπου *.in* για προσομοίωση του ισότοπου ^{60}Co , στο οποίο έχει επισημανθεί με έντονα γράμματα η εισαγωγή της μεταβλητής SISOTO. Σε σχέση με το παλιό αρχείο εισόδου τύπου *.in*, η μοναδική διαφοροποίηση είναι η αλφαριθμητική μεταβλητή SISOTO που αφορά στην προσομοίωση ραδιενεργού ισότοπου.

```

TITLE  xtra geom8 simulation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SISOTO Co-60          [Isotope]
SPOSIT  0 0 0.5      [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    10          [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR  1 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  2 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  3 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  4 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  5 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  6 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  7 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  8 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR  9 1.0e5 1.0e3 1.0e5 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 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  xtra.mat          [Material definition file, 20 chars]

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

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 2.6e6 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).
ENDDT   1e3 2.6e6 1000    [Energy window and number of channels]
EDBODY  14                [Active body; one line for each body]
EDBODY  15                [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Job properties
RESUME  dump1.dat         [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump1.dat         [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   3600              [Dumping period, in sec]

NSIMSH  5.0e9             [Desired number of simulated showers]
TIME    2.0e5             [Allotted simulation time, in sec]

```

Σχήμα 4.2 : Παράδειγμα τροποποιημένου αρχείου εισόδου τύπου *.in*.

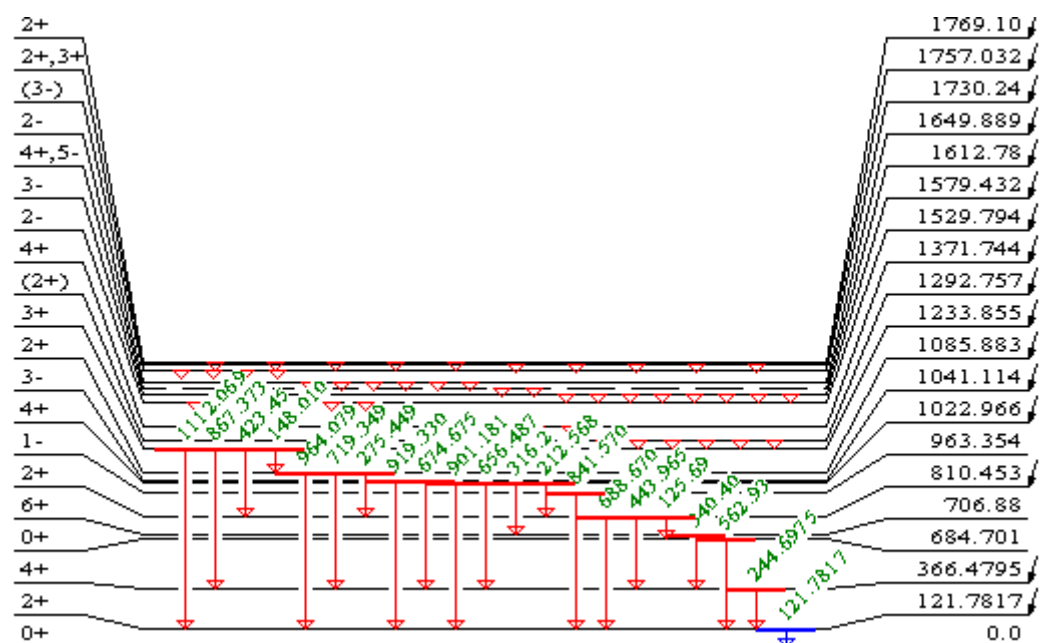
Για την ομαλή διεξαγωγή της προσομοίωσης, ο χρήστης πρέπει να εστιάσει την προσοχή του σε ορισμένα σημεία κατά την κατασκευή του αρχείου εισόδου τύπου *.in*. Στην περίπτωση προσομοίωσης ραδιενεργού ισότοπου, ο τροποποιημένος κώδικας επεξεργάζεται τις πορείες των φωτονίων μέσα στην ύλη, οπότε πρέπει υποχρεωτικά να έχει επιλεγθεί η τιμή δύο (2) στη μεταβλητή SKPAR. Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η επιλογή της κωδικής ονομασίας που δίνεται στο προς εξέταση ισότοπο. Το κυρίως πρόγραμμα διαβάζει μία αλφαριθμητική μεταβλητή η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά τα επτά (7) ψηφία. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε να χρησιμοποιούνται ονομασίες όπως Co-60, Co-57, Y-88 και Cs-134, οι οποίες να είναι εύκολες στη χρήση καθώς υποδηλώνουν το αντίστοιχο ισότοπο. Προτείνεται στο χρήστη, στην ονομασία του ισότοπου να αναγράφει πρώτα το χημικό σύμβολο και στη συνέχεια το μαζικό αριθμό και όχι ανάποδα. Ο χρήστης πρέπει να δίνει ιδιαίτερη προσοχή στην κωδική ονομασία της μεταβλητής SISOTO, καθώς αντιπροσωπεύει το προς εξέταση ισότοπο και κατ' επέκταση καθορίζει το σχήμα διάσπασης που χρησιμοποιείται στη συνέχεια της προσομοίωσης.

4.3.2 Αλλαγές στον κώδικα PENMAIN.f.

Κατά τη διαδικασία της τροποποίησης του κώδικα χρήστη PENMAIN.f, ώστε να λαμβάνει υπόψη του το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές σε διάφορα τμήματά του. Αυτά είναι το τμήμα υπορουτινών, το τμήμα εγχειριδίου χρήστη, το τμήμα δήλωσης μεταβλητών, το τμήμα προετοιμασίας και τέλος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Κατά σειρά και σε ανεξάρτητες παραγράφους αναλύονται ακολούθως όλες οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτό.

4.3.2.1 Τμήμα υπορουτινών του κώδικα PENMAIN.f.

Ουσιαστική προσθήκη στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f είναι η υπορουτίνα που περιγράφει το σχήμα διάσπασης του εξεταζόμενου ραδιενεργού ισότοπου. Κάθε ισότοπο περιγράφεται από το σχήμα διάσπασής του το οποίο μπορεί να είναι απλό όπως του ^{60}Co , Σχήμα 4.1, ή ιδιαίτερα πολύπλοκο με δεκάδες ενεργειακές στάθμες και αρκετά εκπεμπόμενα φωτόνια τα οποία καθιστούν τη μελέτη του πιο απαιτητική, όπως το σχήμα διάσπασης του ^{152}Eu , που παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 : Σχήμα διάσπασης ^{152}Eu [Isotope Explorer].

Το πρώτο ισότοπο το οποίο πραγματεύτηκε η παρούσα εργασία είναι το ^{60}Co . Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 2.2.1, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την εξήγηση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Το σχήμα διάσπασής είναι απλό, με τρεις ενεργειακές στάθμες και δύο εκπεμπόμενα φωτόνια, ενέργειας 1173 keV και 1332 keV, ενώ εκπέμπεται με πολύ μικρό ποσοστό εκπομπής και τρίτο φωτόνιο ενέργειας 2505 keV. Κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα ^{60}Co μπορεί να προκύψει μονάχα ένα αθροιστικό φωτόνιο, ενέργειας 2505 keV, με την ταυτόχρονη ανίχνευση των

φωτονίων ενέργειας 1173 keV και 1332 keV. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο ισότοπο να είναι το πρώτο για το οποίο κατασκευάστηκε υπορουτίνα, ακριβώς επειδή το απλό σχήμα διάσπασής του και τα λίγα εκπεμπόμενα φωτόνια καθιστούν εύκολο τον έλεγχο της ορθότητας της υπορουτίνας.

Με την ίδια λογική επιλέχθηκε να κατασκευαστούν οι υπορουτίνες για τα σχήματα διάσπασης των ισοτόπων ^{88}Y , του ^{57}Co και του ^{134}Cs , οι οποίες και παρουσιάζονται ακολούθως. Προτείνεται στο χρήστη που επιθυμεί να εντάξει μία νέα υπορουτίνα σχήματος διάσπασης στις βιβλιοθήκες του κώδικα χρήστη PENMAIN.f, να ακολουθήσει τη μεθοδολογία κατασκευής τους που παρουσιάζεται και επεξηγείται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

4.3.2.1.1 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης για το ισότοπο ^{60}Co .

Όπως φαίνεται στο σχήμα διάσπασης του ^{60}Co (Σχήμα 4.1), υπάρχει πιθανότητα 99.88% ο πυρήνας του ισοτόπου να αποδιεγερθεί στην πρώτη ενεργειακή στάθμη των 2505 keV και στη συνέχεια, εκπέμποντας φωτόνιο ενέργειας 1173 keV, να φτάσει στην στάθμη των 1332 keV, πριν εκπέμψει το δεύτερο φωτόνιο ενέργειας 1332 keV και σταθεροποιηθεί. Δηλαδή στο 99.88% των ιστοριών που προσομοιώνονται, ο κώδικας παρακολουθεί τις πορείες δύο φωτονίων, ενέργειας 1173 keV και 1332 keV αντίστοιχα, με σημαντική πιθανότητα να ανιχνευτεί αθροιστικό φωτόνιο ενέργειας 2505 keV. Στο υπόλοιπο 0.12% των ιστοριών εκπέμπεται μόνο το φωτόνιο ενέργειας 1332 keV.

Πρέπει να επισημανθεί ότι το πλήρες διάγραμμα διάσπασης του ^{60}Co (Σχήμα 4.1) περιλαμβάνει και άλλα εκπεμπόμενα φωτόνια εκτός από τα δύο που λαμβάνονται υπόψη στην υπορουτίνα. Ωστόσο, επειδή τα φωτόνια αυτά έχουν συγκριτικά μικρά ποσοστά εκπομπής, κρίθηκε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, να μην συμπεριληφθούν στη διάρθρωση της υπορουτίνας. Η διαφορά ανάμεσα στο ποσοστό εκπομπής των φωτονίων αυτών και εκείνο των επικρατέστερων φωτονίων είναι τόσο μεγάλη που δεν απαιτείται κατάλληλη αναγωγή των χρησιμοποιούμενων στην υπορουτίνα ποσοστών εκπομπής.

Στο Σχήμα 4.4, στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθεται η υπορουτίνα που κατασκευάστηκε για το σχήμα διάσπασης του ^{60}Co . Η υπορουτίνα αυτή εντάχθηκε στο τμήμα υπορουτινών του κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

Επιλέχθηκε όλες οι υπορουτίνες που περιγράφουν τα σχήματα διάσπασης των ραδιενεργών ισοτόπων στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f να έχουν πανομοιότυπη κωδική ονομασία. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.4, για το ισότοπο ^{60}Co δίνεται η ονομασία "SUBISOTOPECo60". Η ονομασία αυτή δίνεται για ευκολία κατανόησης του περιεχομένου της υπορουτίνας από τον εκάστοτε χρήστη. Προτείνεται ο χρήστης κατά τη συγγραφή νέας υπορουτίνας ισοτόπου που δεν περιέχεται στον τροποποιημένο από την παρούσα Δ.Ε. κώδικα χρήστη PENMAIN.f, να ακολουθήσει τον παραπάνω τρόπο ονομασίας της για την ύπαρξη ομοιομορφίας στο πρόγραμμα. Η συγκεκριμένη μορφή για την ονομασία των υπορουτινών διευκολύνει το χρήστη και οδηγεί στην αποφυγή επιπρόλαιων σφαλμάτων στη διάρθρωση της προσομοίωσης

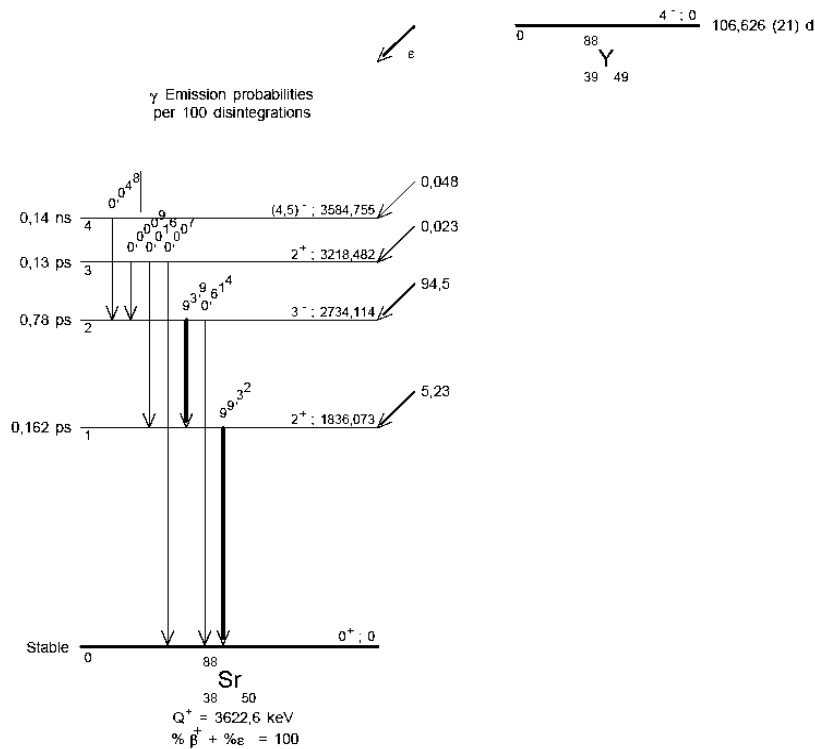
Εν συνεχεία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4, η υπορουτίνα δέχεται μία μεταβλητή, RA, ως είσοδο και εξάγει τις τιμές των μεταβλητών, NF, E1 και E2. Η μεταβλητή εισόδου RA αντιπροσωπεύει έναν τυχαίο αριθμό. Ο αριθμός αυτός έχει επιλεγεί να υπολογίζεται στο κυρίως πρόγραμμα πριν αυτό καλέσει την υπορουτίνα, ώστε να μην υπάρχει συστηματικότητα στον τρόπο που υπολογίζει η υπορουτίνα τις εξαγόμενες τιμές των μεταβλητών. Στην ίδια την υπορουτίνα αρχικοποιείται η μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται κατά την προσομοιούμενη αποδιέγερση του ραδιενεργού πυρήνα και ορίζονται οι ενέργειες των φωτονίων που δύναται να εκπέμψει το ισότοπο. Η μεταβλητή του πλήθους των εκπεμπόμενων φωτονίων επιλέγεται να ονομαστεί NF και αναφέρεται στο πλήθος των φωτονίων τα οποία προσομοιώνονται στη συγκεκριμένη ιστορία (shower). Ανάλογα με τα ποσοστά εκπομπής των φωτονίων και τις εσωτερικές πιθανότητες να βρεθεί ο πυρήνας του ραδιενεργού ισότοπου σε κάθε ενεργειακή στάθμη, αλλάζει και ο αριθμός των φωτονίων τα οποία εκπέμπονται, NF.

Συνδυάζοντας το σχήμα διάσπασης (Σχήμα 4.1) με την υπορουτίνα του ^{60}Co (Σχήμα 4.4), γίνεται κατανοητό πως όταν ο τυχαίος αριθμός RA έχει τιμή μεταξύ του 0 και του 0.9988, δηλαδή αντιστοιχεί σε πιθανότητα 99.88%, εκπέμπονται δύο φωτόνια, ενέργειας 1173 keV και 1332 keV αντίστοιχα, και η μεταβλητή NF παίρνει την τιμή δύο (2). Σε κάθε άλλη περίπτωση, δηλαδή για το υπόλοιπο 0.12%, εκπέμπεται ένα φωτόνιο, ενέργειας 1332 keV, και η μεταβλητή NF παίρνει την τιμή ένα (1). Επειδή ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE έχει κατασκευαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε να επεξεργάζεται την ενέργεια σε eV, είναι απαραίτητη η κατάλληλη μετατροπή των μονάδων από keV σε eV.

Κατάλληλα επεξηγηματικά σχόλια έχουν τοποθετηθεί σε διάφορα σημεία του κυρίως προγράμματος, όπου κρίθηκε αναγκαίο, ώστε να γίνουν οι υπορουτίνες όσο το δυνατόν πιο κατανοητές στον χρήστη.

4.3.2.1.2 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης για το ισότοπο ^{88}Y .

Το ραδιενεργό ισότοπο ^{88}Y παρουσιάζει διάγραμμα διάσπασης αντίστοιχης φιλοσοφίας με αυτό του ^{60}Co . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5, υπάρχουν τέσσερις ενδιάμεσες ενεργειακές στάθμες αποδιέγερσης για το συγκεκριμένο ισότοπο. Υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα ο πυρήνας του ισότοπου να αποδιεγερθεί στις δύο πρώτες ενεργειακές στάθμες (0.048% στα 3584 keV και 0.023% στα 3218 keV). Συνεπώς επιλέχθηκε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, να εστιαστεί η προσοχή στις επόμενες δύο στάθμες, όπου στο 94.5% των περιπτώσεων υπάρχει αποδιέγερση στην στάθμη των 2734 keV και στο 5.23% αποδιεγείρεται ο πυρήνας στη στάθμη των 1836 keV.



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα διάσπασης ^{88}Y [M.-M. Bé, et al., 2004].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χωρίς βλάβη της γενικότητας, από το παραπάνω διάγραμμα διάσπασης λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δύο στάθμες ενεργειών, των 2734 keV και των 1836 keV. Επομένως, γίνεται κατάλληλη αναγωγή ώστε ιδεατά ο πυρήνας του ^{88}Y να έχει μόνο δύο ενεργειακές στάθμες αποδιέγερσης, από όπου προκύπτουν τα αντίστοιχα τροποποιημένα ποσοστά εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα, στο 94.75% των ιστοριών που προσομοιώνονται, μπορούν να εκπεμφθούν, μέσω δύο διαφορετικών διαδρομών, είτε δύο φωτόνια (NF=2) είτε ένα φωτόνιο (NF=1). Στην πρώτη περίπτωση και με ποσοστό εκπομπής 99.31% εκπέμπονται εν σειρά φωτόνια ενέργειας 898 keV και 1836 keV, δημιουργώντας κατάλληλες προϋποθέσεις ώστε να ανιχνευτεί αθροιστικό φωτόνιο ενέργειας 2734 keV. Στη δεύτερη περίπτωση, εκπέμπεται μόνο ένα φωτόνιο, ενέργειας 2734 keV, το οποίο περιπλέκει την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στο ενεργειακό φάσμα που προκύπτει μετά το πέρας της προσομοίωσης, υπάρχουν καταγεγραμμένα γεγονότα στο ενεργειακό κανάλι που αντιστοιχεί στην ενέργεια των 2734 keV. Ωστόσο, τα καταγεγραμμένα αυτά γεγονότα προέρχονται τόσο από το πραγματικά εκπεμπόμενο φωτόνιο των 2734 keV, όσο και από το αθροιστικό φωτόνιο λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 898 keV και 1836 keV, χωρίς να μπορεί να γίνει διαχωρισμός τους. Επισημαίνεται ότι αυτό ακριβώς συμβαίνει και στο φάσμα που προκύπτει από γ-φασματοσκοπική ανάλυση και άρα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προσεγγίζουν όντως την πραγματικότητα. Στο υπόλοιπο 5.25% των ιστοριών που προσομοιώνονται, εκπέμπεται με 100% πιθανότητα ένα φωτόνιο (NF=1) ενέργειας 1836 keV.

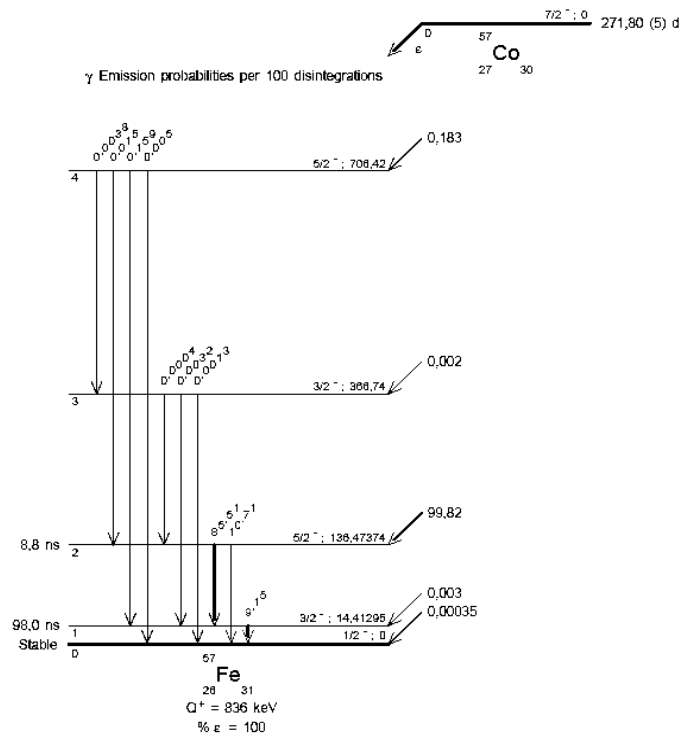
Με βάση τα δεδομένα που αναλύθηκαν προηγουμένως, κατασκευάστηκε υπορουτίνα η οποία περιγράφει το σχήμα διάσπασης του ισότοπου ^{88}Y . Στο Σχήμα 4.6, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται επακριβώς η συγκεκριμένη υπορουτίνα, η οποία εντάχθηκε στις βιβλιοθήκες του κώδικα χρήστη PENMAIN.f

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η υπορουτίνα για το ισότοπο ^{88}Y η οποία έχει την κωδική ονομασία "SUBISOTOPEY88", κατ' αντίστοιχα με την υπορουτίνα για το ισότοπο ^{60}Co . Η υπορουτίνα δέχεται μία μεταβλητή ως είσοδο, τον τυχαίο αριθμό RA, και επιστρέφει τιμές σε τέσσερις μεταβλητές, NF, E1, E2 και E3. Ο τυχαίος αριθμός RA υπολογίζεται στο κυρίως πρόγραμμα, όπως και για την υπορουτίνα του ^{60}Co , ενώ οι μεταβλητές που επιστρέφουν στον κύριο κώδικα είναι ο αριθμός φωτονίων που εκπέμπονται σε κάθε ιστορία, NF, καθώς και οι ενέργειες που έχουν αυτά, E1, E2, και E3 αντίστοιχα.

Επισημαίνεται ότι ειδικά στην υπορουτίνα για το ισότοπο ^{88}Y , κατά τη δήλωση μεταβλητών ορίζεται και ένας δεύτερος τυχαίος αριθμός με την ονομασία RB. Αυτό συμβαίνει επειδή στο διάγραμμα διάσπασης του ^{88}Y υπάρχει πιθανότητα στην ενεργειακή στάθμη των 2734 keV να εκπεμφθεί φωτόνιο ενέργειας είτε 898 keV είτε 2734 keV. Με την εισαγωγή αυτού του τυχαίου αριθμού RB επιτυγχάνεται και σε αυτή τη στάθμη αποδιέγερσης τυχαιότητα στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

4.3.2.1.3 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης του ισότοπου ^{57}Co .

Το επόμενο ραδιενεργό ισότοπο που υπόκειται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και μελετήθηκε εκτενώς στην παρούσα Δ.Ε. είναι το ^{57}Co . Στο παρακάτω Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα διάσπασης του συγκεκριμένου ισότοπου. Το διάγραμμα φαίνεται αρκετά πολύπλοκο, με δέκα (10) εκπεμπόμενα φωτόνια και τέσσερις (4) ενεργειακές στάθμες. Επιλέχθηκε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, να εστιαστεί η προσοχή μόνο σε τρία φωτόνια και τις δύο ενεργειακές στάθμες των 136 keV και 14.4 keV. Τα ενδιαφερόμενα φωτόνια αντιστοιχούν σε ενέργειες 122 keV, 136 keV, 14.4 keV, τα οποία είναι πιο πιθανό να εκπεμφθούν κατά την αποδιέγερση του πυρήνα του ισότοπου ^{57}Co .



Σχήμα 4.7 : Διάγραμμα διάσπασης ^{57}Co [M.-M. Bé, et al., 2004].

Όπως ειπώθηκε και στην περίπτωση του ισοτόπου ^{88}Y , επειδή είναι πολύ μικρή η πιθανότητα ο πυρήνας του ^{57}Co να αποδιεγερθεί στις ενεργειακές στάθμες των 706 keV και 366 keV σε σχέση με τις στάθμες των 136 keV και 14.4 keV επιλέχθηκε να τροποποιηθούν κατάλληλα τα ποσοστά εκπομπής που χρησιμοποιούνται στην υπορουτίνα για το συγκεκριμένο ισότοπο. Λόγω της διάρθρωσης του σχήματος διάσπασης, στο 99.99% των ιστοριών που προσομοιώνονται ο πυρήνας αποδιεγείρεται στην ενεργειακή στάθμη των 136 keV και στη συνέχεια εκπέμπει είτε εν σειρά δύο φωτόνια 122 keV και 14.4 keV, είτε ένα φωτόνιο ενέργειας 136 keV. Στο υπόλοιπο 0.01% των ιστοριών προβλέπεται να εκπέμψει ένα φωτόνιο ενέργειας 14.4 keV.

Επισημάνεται για άλλη μία φορά, πως σε όλες τις υπορουτίνες περιγραφής διαγράμματος διάσπασης ακολουθήθηκε ο ίδιος τρόπος κατασκευής. Στο Σχήμα 4.8, στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθεται η υπορουτίνα που αντιστοιχεί στο ισότοπο ^{57}Co η οποία, όπως και όλες οι υπορουτίνες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αποτελεί τμήμα του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

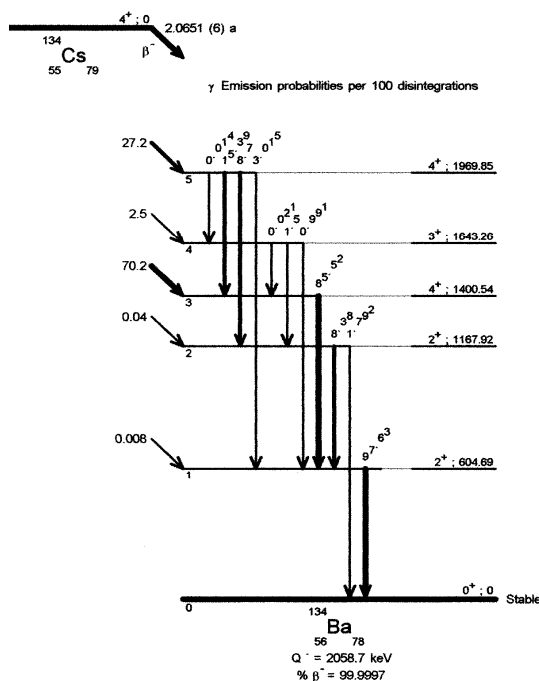
Με βάση όσα έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, επιλέχθηκε η κωδική ονομασία της υπορουτίνας να είναι 'SUBISOTOPECo57'. Όπως και στην περίπτωση του ^{88}Y , δηλώνεται και δεύτερος τυχαίος αριθμός (RB). Η υπορουτίνα κάθε φορά που καλείται επιστρέφει τέσσερις μεταβλητές: τον αριθμό των φωτονίων που προσομοιώνονται, NF, καθώς και τις ενέργειες αυτών, E1, E2 και E3 αντίστοιχα.

4.3.2.1.4 Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης του ισότοπου ^{134}Cs .

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν οι υπορουτίνες που περιγράφουν τα σχήματα διάσπασης των ραδιενεργών ισωτόπων ^{60}Co , ^{88}Y και ^{57}Co . Και στις τρεις περιπτώσεις επιλέχθηκε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, να μελετηθούν ως απλοποιημένα τα συγκεκριμένα σχήματα, αγνοώντας την επίδραση που μπορεί να επιφέρουν φωτόνια με συγκριτικά μικρά ποσοστά εκπομπής. Επιδιώχθηκε να μελετηθεί άλλο ένα ισότοπο, το ^{134}Cs , στο οποίο το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης έχει πολύ μεγάλη επίδραση.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα διάσπασης του ισωτόπου ^{134}Cs του οποίου ο πυρήνας έχει πέντε (5) ενδιάμεσες ενεργειακές στάθμες και μπορούν να εκπεμφθούν από ένα έως τέσσερα φωτόνια, στην ενεργειακή περιοχή 242 keV μέχρι 1365 keV. Επομένως, παρουσιάζεται μεγάλη πιθανότητα να δημιουργηθούν στο εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα περισσότερες από μία αθροιστικές φωτοκορυφές, από περισσότερους από έναν συνδυασμούς φωτονίων, ενώ ακόμα υπάρχει πιθανότητα να αθροιστούν περισσότερα των δύο φωτόνια. Πρόκειται λοιπόν για ένα ισότοπο το οποίο έχει αρκετά πολύπλοκο σχήμα διάσπασης με πολλές εν δυνάμει αθροιστικές φωτοκορυφές.

Αναλύθηκε η πολυπλοκότητα του σχήματος διάσπασης του συγκεκριμένου ισωτόπου και δεδομένου ότι δεν υπάρχουν φωτόνια που να μπορούν να παραληφθούν λόγω συγκριτικά μικρού ποσοστού εκπομπής, κρίθηκε πως για το συγκεκριμένο ισότοπο η υπορουτίνα πρέπει να περιλαμβάνει επακριβώς όλες τις ενεργειακές στάθμες και όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια, με τα ποσοστά εκπομπής που προτείνει η βιβλιογραφία. Συνεπώς η υπορουτίνα που κατασκευάστηκε για το ^{134}Cs περιγράφει με μεγάλη λεπτομέρεια το σχήμα διάσπασής του.



Σχήμα 4.9 : Διάγραμμα διάσπασης ^{134}Cs [M.-M. Bé, et al., 2004].

Στο Σχήμα 4.10, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται αυτοτελής η υπορουτίνα που κατασκευάστηκε για το σχήμα διάσπασης του ^{134}Cs , ενώ είναι εμφανώς πολύπλοκότερη από τις υπορουτίνες για τα προηγούμενα ισότοπα. Ακολουθήθηκαν οι ίδιοι κανόνες ονοματολογίας και επομένως δόθηκε στην υπορουτίνα η κωδική ονομασία 'SUBISOTOPECs134'. Αξίζει να σημειωθεί πως για τη συγκεκριμένη υπορουτίνα, λόγω του πολύπλοκου σχήματος διάσπασης του ισοτόπου ^{134}Cs , επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν συνολικά τέσσερις (4) τυχαίοι αριθμοί, RA, RB, RC και RD, οι οποίοι καθορίζουν κάθε φορά τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται και κατ' επέκταση τα τελικά αποτελέσματα που επιστρέφονται στο κυρίως πρόγραμμα. Μελετώντας το σχήμα διάσπασης είναι εύκολο να βγει το συμπέρασμα πως οποιαδήποτε διαδρομή και εάν ακολουθηθεί, ο μέγιστος αριθμός φωτονίων που μπορεί να εκπεμφθούν είναι τέσσερα (4). Συνεπώς η υπορουτίνα επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα τον αριθμό των φωτονίων που προσομοιώνονται, NF, καθώς και τις ενέργειες τους, E1, E2, E3 και E4 αντίστοιχα.

4.3.2.1.5 Έλεγχος ορθής λειτουργίας υπορουτινών διαγραμμάτων διάσπασης.

Για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας των υπορουτινών που περιγράφηκαν προηγουμένως, κατασκευάστηκαν εξωτερικά προγράμματα, ένα για κάθε υπορουτίνα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το πρόγραμμα για το ισότοπο ^{60}Co .

Στο Σχήμα 4.11, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το εξωτερικό πρόγραμμα 'EMISSION RATE', γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, στο οποίο πραγματοποιείται έλεγχος της υπορουτίνας 'SUBISOTOPECo60'. Αφού κατασκευαστεί αρχείο εξόδου με την ονομασία 'Results.DAT', ζητείται από το πρόγραμμα να υπολογιστεί για 10 000 ιστορίες ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται κάθε φορά, NF, καθώς και να αναφέρονται οι ενέργειες τους, E1 και E2 αντίστοιχα. Έχουν προστεθεί μετρητές C1 και C2, οι οποίοι υπολογίζουν το πλήθος των φωτονίων ενέργειας $E1=1173\text{keV}$ και $E2=1332\text{keV}$, αντίστοιχα, που εκπέμπονται σε ένα δείγμα 10 000 επαναλήψεων. Μετά το τέλος των επαναλήψεων το πρόγραμμα υπολογίζει τα ποσοστά εκπομπής των φωτονίων ενέργειας E1 και E2 μέσω των μεταβλητών ER1 και ER2 αντίστοιχα. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται μέσω της απλής σχέσης

$$ER1 = \frac{C1}{I}, ER2 = \frac{C2}{I}, \text{ όπου } I: \text{ ο αριθμός των επαναλήψεων.}$$

Μετά την εκτέλεση του παραπάνω εξωτερικού προγράμματος δημιουργείται το αρχείο αποτελεσμάτων 'Results.DAT', τμήμα του οποίου παρατίθεται στο παρακάτω Σχήμα 4.12. Στις τελευταίες δύο γραμμές του αρχείου αποτελεσμάτων παρουσιάζονται με έντονα γράμματα οι τιμές των μεταβλητών C1, C2 και ER1, ER2, δηλαδή οι τιμές των μετρητών και του ποσοστού εκπομπής, αντίστοιχα, για κάθε ένα από τα δύο φωτόνια. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε σύνολο 10 000 ιστοριών, πραγματοποιείται εκπομπή του φωτονίου 1173 keV στις 9988 ιστορίες, ενώ εκπομπή του φωτονίου ενέργειας 1332 keV πραγματοποιείται πάντα, δηλαδή και στις 10 000 ιστορίες. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 4.3.2.1.1, η πιθανότητα να εκπεμφθούν και τα δύο φωτόνια είναι

βιβλιογραφία [Debertin K. and Helmer R., 1988], [M.-M. Bé, et al., 2004] και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται από τον ίδιο τον κώδικα. Τονίζεται ότι κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής από τα αποτελέσματα που εξάγονται από την προσομοίωση με χρήση του νέου κώδικα PENMAIN.f, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.4, πρέπει να χρησιμοποιούνται αυτές οι τιμές των ποσοστών εκπομπής.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ποσοστό εκπομπής (%)
^{60}Co	1173	99.88
	1332	100.00
^{88}Y	898	94.15
	1836	99.36
	2734	0.64
^{57}Co	14.4	85.77
	122	85.75
	136	14.28
^{134}Cs	242	0.02
	326	0.02
	475	1.48
	563	8.53
	569	15.28
	604	98.18
	795	85.70
	801	8.82
	1038	0.96
	1167	1.82
	1365	2.97

Πίνακας 4.1 : Συνολικά ποσοστά εκπομπής των φωτονίων που εμπεριέχονται στις υπορουτίνες διαγραμμάτων διάσπασης του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.

4.3.2.3 Τμήμα εγχειριδίου χρήστη του κώδικα PENMAIN.f.

Στον πρωτότυπο κώδικα χρήστη PENMAIN.f της έκδοσης PENELOPE 2005, παρέχεται στον χρήστη βοηθητικό εγχειρίδιο λειτουργίας του κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 3, υπάρχει στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f αναλυτική περιγραφή του αρχείου εισόδου τύπου *.in*, καθώς και επεξήγηση όλων των μεταβλητών που εμφανίζονται σε αυτό. Εκτός από τη δομή του αρχείου εισόδου τύπου *.in*, στο εγχειρίδιο αυτό δίνονται πληροφορίες σχετικά με τη σημασία και τη λειτουργικότητα κάθε μεταβλητής, καθώς κι οι προεπιλεγμένες τιμές τους.

4.3.2.3.1 Εισαγωγή μεταβλητής 'SISOTO' στο εγχειρίδιο χρήστη του κώδικα PENMAIN.f.

Στην παράγραφο 4.3.1 αναλύθηκαν οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*. Για την πληρέστερη διαμόρφωση του νέου κώδικα χρήστη PENMAIN.f, κρίθηκε αναγκαία η εν μέρη αλλαγή του βοηθητικού εγχειριδίου ώστε να περιλαμβάνει τη νέα μεταβλητή 'SISOTO'.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται το τμήμα του εγχειριδίου χρήστη που περιγράφει τη δομή του αρχείου εισόδου *.in*. Επισημαίνεται πως η δομή αυτή είναι αυστηρά ορισμένη και ο χρήστης δεν πρέπει να ξεφεύγει από τα όρια που έχουν τεθεί ως προς τη σύνταξη των τιμών των μεταβλητών. Σε κάθε μία γραμμή δίνεται εν σειρά η κωδική ονομασία της μεταβλητής την οποία αναγνωρίζει ο κώδικας (π.χ. 'SKPAR'), η αλφαριθμητική τιμή της μεταβλητής αυτής (π.χ. 'KPARP') και τέλος, εντός αγκύλης, μία σύντομη περιγραφή της ίδιας της μεταβλητής (π.χ. [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]).

Με ακριβώς τον ίδιο τρόπο εντάχθηκαν, όπως φαίνεται με έντονα γράμματα στο Σχήμα 4.13, πληροφορίες για τη μεταβλητή 'SISOTO' που αντιστοιχεί στο προς εξέταση ισότοπο. Επιλέχθηκε η εν λόγω μεταβλητή να αντιστοιχίζεται στην αλφαριθμητική τιμή 'SISOTOPE' και να ακολουθεί ο χαρακτηρισμός '[Isotope]'.

```
C The structure of the input file is the following,
C
C .....1.....2.....3.....4.....5.....6.....+...
C TITLE title of the job, up to 120 characters.
C
C >>>>>>> Source definition.
C SKPAR KPARP [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
C SENERG SE0 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
C SPECTR Ei,Pi [E bin: lower-end and total probability]
C SISOTO SISOTOPE [Isotope]
C SPOSIT SX0,SY0,SZ0 [Coordinates of the source]
C SDIREC THETA,SPHI [Beam axis direction angles, in deg]
C SAPERT SALPHA [Beam aperture, in deg]
C
C ...
C ...
```

Σχήμα 4.13 : Τμήμα αρχείου εισόδου τύπου *.in* (εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα PENMAIN.f).

Μετά την περιγραφή της δομή του αρχείου εισόδου *.in* στο βοηθητικό εγχειρίδιο χρήσης, ακολουθούν σχόλια όπου δίνεται μία σύντομη επεξήγηση κάθε μεταβλητής που εμφανίζεται στο αρχείο εισόδου *.in*. Για καλύτερη κατανόηση, για τη μεταβλητή 'SKPAR', η οποία χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα και προηγουμένως, υπάρχει αναφορά στο εγχειρίδιο χρήστη του κώδικα PENMAIN.f η οποία φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.14.

```
C >>>>>>> Source definition.
C
C SKPAR_ : kind of primary particle (1=electrons, 2=photons or 3=positrons).
C         DEFAULT: KPARP=1
C
```

Σχήμα 4.14 : Επεξήγησης μεταβλητής 'SKPAR' (εγχειρίδιο χρήσης κώδικα PENMAIN.f).

Κατ' αντιστοιχία με την παραπάνω σύντομη περιγραφή της μεταβλητής, εισάγεται επεξηγηματικό σχόλιο για τη νέα μεταβλητή 'SISOTO', η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15. Προτείνεται στον χρήστη

κάθε φορά που εισάγει στον κώδικα PENMAIN.f νέα υπορουτίνα σχήματος διάσπασης να ανανεώνει το συγκεκριμένο σημείο του εγχειριδίου χρήστη προσθέτοντας τα νέα ισότοπα ώστε να είναι ολοκληρωμένη η μορφή του τροποποιημένου κώδικα. Επισημαίνεται ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, δεν έχει δοθεί προεπιλεγμένη τιμή στη μεταβλητή 'SISOTO' ('DEFAULT: none') ώστε να μην τροποποιηθεί το προκαθορισμένο σενάριο προσομοίωσης, αλλά να παραμείνει όμοιο με τον πρωτότυπο κώδικα.

```
C
C SISOTO : For an isotope source, name of the isotope (Co-60,Co-57,Y-88, Cs-134)
C           DEFAULT: none
C
```

Σχήμα 4.15 : Επεξήγησης μεταβλητής 'SISOTO' (εγχειρίδιο χρήσης κώδικα PENMAIN.f).

4.3.2.4 Τμήμα δήλωσης μεταβλητών του κώδικα PENMAIN.f.

Το κυρίως πρόγραμμα (Main Program) του κώδικα χρήστη PENMAIN.f διαθέτει εκτεταμένο τμήμα δήλωσης μεταβλητών. Συγκεκριμένα, στον πρωτότυπο κώδικα PENMAIN.f της έκδοσης PENELOPE 2005, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.6.1, ορίζονται όλες οι μεταβλητές (εσωτερικές και εξωτερικές), οι παράμετροι καθώς και οι πίνακες με τις διαστάσεις τους που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται όλες οι νέες μεταβλητές που εισάγονται στον κώδικα και είναι προγραμματιστικά αναγκαία η δήλωση τους στην αρχή του κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι μεταβλητές οι οποίες εμφανίζονται στο νέο αρχείο εισόδου τύπου *.in*, καθώς και οι μεταβλητές των ενεργειών των εκπεμπόμενων φωτονίων. Σημειώνεται ότι εισήχθησαν και άλλες μεταβλητές των οποίων ο ρόλος και η λειτουργικότητα αναλύονται σε άλλες παραγράφους (4.3.2.6.1, 4.3.2.6.2, 4.3.2.6.3).

Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς και στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος Κεφαλαίου, είναι απαραίτητη η προσθήκη της νέας μεταβλητής 'SISOTO' η οποία περιγράφει το προσομοιούμενο ισότοπο. Είναι απαραίτητο επομένως στο τμήμα δηλώσεων του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f να δηλωθεί η συγκεκριμένη μεταβλητή καθώς και η αλφαριθμητική τιμή που την συνοδεύει.

4.3.2.4.1 Δήλωση μεταβλητής 'SISOTOPE'.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.3.1.1, η μεταβλητή 'SISOTOPE' είναι μία αλφαριθμητική μεταβλητή στην οποία ο χρήστης δίνει την ονομασία του ισοτόπου που επιθυμεί να προσομοιώσει μέσω του κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Έχει επιλεγθεί για την ονομασία του ισοτόπου να χρησιμοποιείται συγκεκριμένος τρόπος γραφής. Πρώτα αναγράφεται το σύμβολο του στοιχείου στο οποίο ανήκει το ισότοπο, όπως εμφανίζεται στον περιοδικό πίνακα χημικών στοιχείων (π.χ. Co, Y, Cs), ακολουθεί μία παύλα (-) και εν συνεχεία αναγράφεται ο μαζικός αριθμός του εξεταζόμενου ισοτόπου.

Γίνεται κατανοητό ότι κανένα ισότοπο δεν μπορεί να συνταχθεί χρησιμοποιώντας περισσότερους από επτά (7) χαρακτήρες (π.χ. Co-57, Co-60, Y-88). Επομένως, επιλέχθηκε ο κώδικας χρήστη PENMAIN.f να αναγνωρίζει για τη μεταβλητή 'SISOTOPE' επτά (7) χαρακτήρες. Στο παρακάτω Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται το τμήμα δήλωσης μεταβλητών του τροποποιημένου κώδικα χρήστη με την ιδιότητα χαρακτήρων (CHARACTER). Με έντονα γράμματα έχει σημειωθεί η δήλωση της μεταβλητής 'SISOTOPE'.

```

C *****
C                                     MAIN PROGRAM
C *****
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER*4 (I-N)
  CHARACTER*2  LIT
  CHARACTER*10 LCH10
  CHARACTER*20 OFILE, PSFI, PSFDIO, SPCDIO, SPCDEO, PFILED, PFILER
  CHARACTER*23 DATE23
  CHARACTER*120 TITLE, TITLE2, BUFFER, BUF2
  CHARACTER*200 PSFREC
  CHARACTER*7  SISOTOPE

```

Σχήμα 4.16 : Δήλωση μεταβλητής 'SISOTOPE' (τμήμα δηλώσεων μεταβλητών κώδικα PENMAIN.f).

Σε περίπτωση που η ονομασία που θέλει να δώσει ο χρήστης σε κάποιο νέο ισότοπο τυγχάνει να ξεπερνά τους επτά (7) χαρακτήρες, που είναι το προβλεπόμενο πλήθος χαρακτήρων για τη μεταβλητή 'SISOTOPE', επιβάλλεται να γίνει αλλαγή στο τμήμα του κώδικα που φαίνεται στο Σχήμα 4.16.

4.3.2.4.2 Δήλωση αλφαριθμητικής μεταβλητής 'KWISOT'.

Κατά τη σύνδεση του κώδικα χρήστη PENMAIN.f με το αρχείο εισόδου τύπου *.in* κάθε μεταβλητή του δεύτερου (π.χ. 'SKPAR', 'SENERG', 'SPECTR') αντιστοιχίζεται σε μία αλφαριθμητική μεταβλητή αμφιμονοσήμαντα (π.χ. 'KWTITL', 'KWKPAR', 'KWSENE', αντίστοιχα). Ο χρήστης δύναται να εισάγει τα δεδομένα της προσομοίωσης μέσω 38 τέτοιων αλφαριθμητικών μεταβλητών. Πρέπει να επισημανθεί ότι σε μία προσομοίωση δεν χρησιμοποιούνται όλες οι διαθέσιμες μεταβλητές καθώς κάποιες από αυτές αλληλεπικαλύπτονται. Για παράδειγμα ποτέ στον τροποποιημένο κώδικα δεν πρέπει να εισάγεται για την ίδια προσομοίωση η ενέργεια μονοενεργειακής πηγής και η ονομασία του ισότοπου που επιθυμείται να προσομοιωθεί, μέσω των μεταβλητών 'SENERG' και 'SISOTO' αντίστοιχα.

Κατά τη διαδικασία ανάγνωσης του αρχείου εισόδου *.in*, ο κώδικας χρήστη PENMAIN.f ελέγχει σειριακά ποια μεταβλητή τύπου 'KW....' διαθέτει τιμή σωστά ορισμένη με χρήση μίας άλλης βοηθητικής αλφαριθμητικής μεταβλητής που έχει την ονομασία 'KWORD' και αρχικοποιεί την κατάλληλη κάθε φορά μεταβλητή. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή 'KWORD' παίρνει εν σειρά τις ονομασίες 'KWKPAR', 'KWSENE', 'KWSPEC' και διαβάζει τις αλφαριθμητικές τιμές που τους αντιστοιχούν 'KPARP', 'SE0', 'Ei', 'Pi' αντίστοιχα, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 4.13. Αυτή είναι η διαδικασία ανάγνωσης μέχρι να αναγνωστεί ολόκληρο το αρχείο εισόδου *.in*. Για την ανάγνωση του προσομοιούμενου ισότοπου εισάγεται μεταβλητή τύπου 'KW....' η οποία αντιστοιχεί στη μεταβλητή 'SISOTO' και ονομάζεται 'KWISOT'. Στο παρακάτω Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται το τροποποιημένο τμήμα δήλωσης αλφαριθμητικών μεταβλητών τύπου 'KW....', στο οποίο με έντονα γράμματα εμφανίζεται η νέα μεταβλητή 'KWISOT'.

```

C
CHARACTER*6 KWORD,
1 KWTITL, KWKPAR, KWSENE, KWSPEC, KWSPOS, KWSDIR, KWSAPE, KWPSFN,
1 KWPSPL, KWEMAX, KWNMAT, KWSIMP, KWMATF, KWGEOM, KWSMAX, KWIFOR,
1 KWNBE, KWNBTH, KWNBPH, KWIDET, KWIPSF, KWISPC, KWIBOD, KWIPAR,
1 KWEDET, KWESPC, KWEBOD, KGRDXX, KGRDYY, KGRDZZ, KGRDBN, KWRESU,
1 KWDUMP, KWDMP, KWNMPP, KWRSEE, KWTIME, KWCOMM, KWISOT

```

Σχήμα 4.17 : Δήλωση αλφαριθμητική μεταβλητής 'KWISOT' (τμήμα δηλώσεων μεταβλητών κώδικα PENMAIN.f).

Εκτός από τη δήλωση των μεταβλητών τύπου 'KW...', είναι απαραίτητη και η σύνδεσή τους με τις αντίστοιχες κωδικές ονομασίες του αρχείου εισόδου .in. Στο Σχήμα 4.18 που ακολουθεί παρατίθεται το τμήμα του κώδικα όπου ορίζεται για κάθε αλφαριθμητική μεταβλητή τύπου 'KW...' η ονομασία στο αρχείο εισόδου .in στην οποία αντιστοιχεί, όπως 'TITLE', 'SKPAR'. Οι μεταβλητές αυτές έχουν το χαρακτηρισμό της παραμέτρου (PARAMETER), δηλαδή μίας μη εκτελέσιμης εντολής που περιέχει αλφαριθμητική πληροφορία και κάθε φορά που το πρόγραμμα συναντά μία τέτοια μεταβλητή της δίνει την τιμή που αναφέρεται στην πρόταση PARAMETER [Shelley J., 1989]. Ακολουθώντας τη λογική με την οποία έχει κατασκευαστεί ο κώδικας, εισάγεται στο συγκεκριμένο τμήμα και η παράμετρος «KWISOT='SISOTO'», που αντιστοιχεί στο προς εξέταση ισότοπο και φαίνεται με έντονα γράμματα στο Σχήμα 4.18.

```

PARAMETER(
1 KWTITL='TITLE', KWKPAR='SKPAR', KWSENE='SENERG', KWSPEC='SPECTR',
1 KWSPOS='SPOSIT', KWSDIR='SDIREC', KWSAPE='SAPERT', KWPSFN='IPSFN',
1 KWPSPL='IPSPLI', KWEMAX='EPMAX', KWNMAT='NMAT', KWSIMP='SIMP',
1 KWMATF='PFNAME', KWGEOM='GEOMFN', KWSMAX='DSMAX', KWIFOR='IFORCE',
1 KWNBE='NBE', KWNBTH='NBTH', KWNBPH='NBPH', KWIDET='IMPDET',
1 KWIPSF='IDPSF', KWISPC='IDSPC', KWIBOD='IDBODY', KWIPAR='IDKPAR',
1 KWEDET='ENDDDET', KWESPC='EDSPC', KWEBOD='EDBODY', KGRDXX='GRIDX',
1 KGRDYY='GRIDY', KGRDZZ='GRIDZ', KGRDBN='GRIDBN', KWRESU='RESUME',
1 KWDUMP='DUMPTO', KWDMP='DUMPP', KWNMPP='NSIMSH', KWRSEE='RSEED',
1 KWTIME='TIME', KWCOMM='', KWISOT='SISOTO')

```

Σχήμα 4.18 : Δήλωση παραμέτρου 'SISOTO' (τμήμα δηλώσεων παραμέτρων κώδικα PENMAIN.f).

4.3.2.4.3 Δήλωση πίνακα EN(100).

Η τελευταία αλλαγή του τμήματος δηλώσεων μεταβλητών, αφορά στα εκπεμπόμενα φωτόνια που προκύπτουν από την υπορουτίνα διαγράμματος διάσπασης ισότοπου. Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 4.3.2.1, αυτού του τύπου οι υπορουτίνες επιστρέφουν τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται σε κάθε ιστορία (shower) καθώς και τις ενέργειες τους. Οι υπορουτίνες επιστρέφουν στο κυρίως πρόγραμμα τις ενέργειες των εξεταζόμενων φωτονίων μέσω των μεταβλητών E1, E2, E3 κ.λ.π, οι οποίες αναγνωρίζονται από τον κώδικα χρήστη ως μεταβλητές EN(1), EN(2), EN(3) κ.λ.π., αντίστοιχα, όπως θα αναλυθεί και στην παράγραφο 4.3.2.6.2. Οι μεταβλητές ενέργειας τύπου EN(I) αποτελούν στοιχεία πίνακα μίας στήλης, του οποίου οι διαστάσεις πρέπει να ορισθούν κατάλληλα, ανάλογα με το πόσα φωτόνια εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση του προσομοιούμενο ισότοπου. Κρίθηκε πως μία μέγιστη και από την ασφαλή μεριά τιμή για το μέγεθος του συγκεκριμένου πίνακα είναι ο αριθμός 100, δηλαδή να εκπεμφθούν μέχρι 100 φωτόνια. Στην περίπτωση που ο χρήστης εισάγει σχήμα διάσπασης ισότοπου στο οποίο υπάρχει διαδρομή που οδηγεί στην εκπομπή εν σειρά περισσότερων από 100

φωτονίων, πρέπει να τροποποιηθούν οι διαστάσεις του εν λόγω πίνακα στο τμήμα δηλώσεων μεταβλητών του κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Στο παρακάτω Σχήμα 4.19 φαίνεται η εισαγωγή του εν λόγω πίνακα.

```
C
    DIMENSION EN(100) !Number of possible photons in the isotope decay scheme.
```

Σχήμα 4.19 : Δήλωση πίνακα EN(100).

Επαναλαμβάνεται πως η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε τη λειτουργία του κώδικα χρήστη PENMAIN.f σε συνδυασμό με το αρχείο εισόδου *.in*. Η ανάλυση που έχει παρατεθεί έχει σχέση μόνο με το συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να υποτεθεί πως οι τροποποιήσεις που εφαρμόστηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στους υπόλοιπους κώδικες χρήστη (PENSLAB ή PENCYL).

4.3.2.5 Τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης του κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

Στην παρούσα παράγραφο αναλύονται οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης. Στο συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα χρήστη PENMAIN.f διαβάζεται το αρχείο εισόδου τύπου *.in* και όλες οι απαραίτητες για την προσομοίωση μεταβλητές παίρνουν τις αντίστοιχες τιμές, ανάλογα με τα δεδομένα που έχει δώσει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου *.in*. Στο σημείο αυτό, ελέγχονται όλες οι τιμές ώστε να είναι ορθά ορισμένες από το χρήστη και εντός των επιτρεπτών ορίων που έχουν τεθεί. Εάν δεν τηρούνται τα όρια αυτά, η προσομοίωση τερματίζεται και ο χρήστης ενημερώνεται για τον προβληματικό ορισμό. Παράλληλα διαμορφώνονται κατάλληλα αρχεία εξόδου, όπως το *penmain.dat*, όπου καταγράφονται δεδομένα της προσομοίωσης, όπως αυτά δίνονται στο αρχείο εισόδου τύπου.

4.3.2.5.1 Ανάγνωση εξεταζόμενου ισотоπυ.

Ο κώδικας αναγνωρίζει το προς εξέταση ισότοπο, το οποίο έχει ορίσει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου *.in*, στο τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης. Στο τμήμα αυτό γίνεται και ο έλεγχος της ονομασίας του ισотоπυ αυτού με βάση τις υπορουτίνες που διατίθενται στις βιβλιοθήκες του κώδικα χρήστη PENMAIN.f και κρίνεται κατά πόσο είναι εφικτή η συγκεκριμένη προσομοίωση.

Αφού διαμορφωθεί το αρχείο εξόδου *penmain.dat*, καταγράφονται σε αυτό πληροφορίες σχετικά με την ημερομηνία, την ώρα και την ονομασία της προσομοίωσης, καθώς και δεδομένα που αφορούν την περιγραφή της πηγής, όπως αυτά δίνονται στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.

Αναγνωρίζεται και καταγράφεται το είδος των πρωτογενών σωματιδίων που προσομοιώνονται μέσω κατάλληλης μεταβλητής και εν συνεχεία το είδος της πηγής. Στην πρωτότυπη μορφή του κώδικα χρήστη PENMAIN.f της έκδοσης PENELOPE 2005, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε μονοενεργειακή

πηγή ή πηγή συνεχούς φάσματος ενέργειας. Στον τροποποιημένο κώδικα, όπου υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης ισotόπου, όταν στο αρχείο εισόδου τύπου *.in* έχει δοθεί τιμή στη μεταβλητή 'SISOTO', ο κώδικας αναγνωρίζει τη συγκεκριμένη ονομασία και καταγράφει στο εξόδου *penmain.dat* ότι πρόκειται για προσομοίωση ισotόπου. Στο παρακάτω Σχήμα 4.20 φαίνεται το αντίστοιχο τμήμα του κώδικα όπου δίνονται οι εντολές για καταγραφή στο αρχείο εξόδου *penmain.dat* της ονομασίας του υπό εξέταση ισotόπου.

```
C
C **** Isotope.
C
      ELSE IF (KWORD.EQ.KWISOT) THEN
      READ(BUFFER,*) SISOTOPE
      WRITE(26,8888) SISOTOPE
8888  FORMAT(3X,'Isotope : ',A7)
      ISPEC=2
      110  CONTINUE
      READ(5,'(A6,1X,A120)') KWORD,BUFFER
      IF(KWORD.EQ.KWCOMM) GO TO 110
      IF(KWORD.EQ.KWPSFN) GO TO 21
```

Σχήμα 4.20 : Ανάγνωση ισotόπου (τμήμα προετοιμασίας προσομοίωσης κώδικα PENMAIN.f).

Στο τμήμα του κώδικα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ελέγχεται αρχικά η περίπτωση ο χρήστης να έχει δώσει τιμή στη μεταβλητή 'KWISOT' και ανάλογα διαβάζεται η αλφαριθμητική ονομασία της μεταβλητής. Η ονομασία αυτή στη συνέχεια καταγράφεται στο αρχείο εξόδου *penmain.dat* με κατάλληλη μορφή, που χαρακτηρίζεται από τον αριθμό εντολής 8888, δηλαδή με τη λέξη 'Isotope : '.

Ο πρωτότυπος κώδικας στο σημείο αυτό, δηλαδή στο τμήμα προετοιμασίας της προσομοίωσης, δίνει τιμή στη μεταβλητή 'ISPEC', η οποία αποτελεί δείκτη για το είδος της πηγής [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006] και λαμβάνει την τιμή μηδέν (0) για μονοενεργειακή πηγή ή ένα (1) για πηγή συνεχούς φάσματος ενέργειας. Η ίδια λογική ακολουθήθηκε και στον τροποποιημένο κώδικα. Εισάγεται επομένως και νέα τιμή για τη μεταβλητή 'ISPEC' για την περίπτωση που προσομοιώνεται διάγραμμα διάσπασης ισotόπου. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση προσομοίωσης ισotόπου λαμβάνει την τιμή δύο (2).

Για να αποφευχθούν προβλήματα κατά την ανάγνωση του αρχείου εισόδου *.in* και την καταγραφή στο αρχείο εξόδου *penmain.dat*, ακολουθήθηκε και πάλι η λογική του πρωτότυπου κώδικα. Έτσι, μετά την καταγραφή του υπό εξέταση ισotόπου στο αρχείο εξόδου *penmain.dat*, ο κώδικας ελέγχει σειριακά την επόμενη σειρά του αρχείου εισόδου τύπου *.in* κατ' αντιστοιχία με τους ελέγχους που πραγματοποιούνται στην περίπτωση μονοενεργειακής πηγής. Συνοπτικά, γίνεται έλεγχος για κενή γραμμή στο αρχείο εισόδου *.in* (μεταβλητή 'KWCOMM=' ') και ανάλογα διαβάζεται η επόμενη γραμμή, καθώς και για ύπαρξη αρχείου εισόδου δεδομένων Phase file – psf (μεταβλητή 'KWPSFN') όπου παρακάμπτονται ορισμένες εντολές του κώδικα σχετικές με τη θέση της πηγής και τη γωνιακή κατανομή των πρωτογενών σωματιδίων. Επισημαίνεται ότι οι δύο αυτοί έλεγχοι εμφανίζονται σε διάφορα μέρη του τμήματος προετοιμασίας της προσομοίωσης και διασφαλίζουν τη σωστή συνεργασία του κώδικα χρήστη PENMAIN.f με το αρχείο εισόδου τύπου *.in*. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να εισαχθούν και στην περίπτωση προσομοίωσης ισotόπου.

Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται τμήμα του αρχείου εξόδου *penmain.dat* από προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Εμφανίζονται αρχικά πληροφορίες αναφορικά με την ημέρα και ώρα εκτέλεσης της προσομοίωσης (Date and time) καθώς και ο τίτλος της προσομοίωσης. Ακολούθως, κατά την περιγραφή της πηγής, δίνονται πληροφορίες για το είδος πρωτογενών σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκε (φωτόνια) και αναγράφεται η ονομασία του ισότοπου που επιλέχθηκε (^{60}Co). Τονίζεται ότι αυτή η ονομασία είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που αναγράφεται στο αρχείο εισόδου τύπου *.in* (Σχήμα 4.2).

```
*****  
**   Program PENMAIN.  Input data file.  **  
*****  
  
Date and time:  9th May 2011. 19:02:16  
  
xtra geom8 simulation.  
  
-----  
>>>>> Source description.  
Primary particles: photons  
Isotope  : Co-60  
...  
...
```

Σχήμα 4.21 : Καταγραφή προσομοιούμενου ισότοπου στο αρχείο *penmain.dat*.

4.3.2.5.2 Μέγιστη ενέργεια προσομοιούμενων φωτονίων του εξεταζόμενου ισότοπου.

Αφού αναγνωριστεί και καταγραφεί στο αρχείο εξόδου *penmain.dat* η ονομασία του ισότοπου που προσομοιώνεται, καθορίζεται η αρχική ενέργεια των εξεταζόμενων σωματιδίων. Με βάση αυτή την ενέργεια ορίζεται πληθώρα δεδομένων που αφορούν στις ιδιότητες των υλικών και παραμέτρους της προσομοίωσης και καθορίζονται οι αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης. Γίνεται κατανοητό ότι η αρχική ενέργεια αυτή, η οποία συμβολίζεται στον πρωτότυπο κώδικα ως 'E0', είναι κομβικής σημασίας.

Στην περίπτωση ενός ισότοπου, η ουσιώδης διαφορά από μία μονοενεργειακή πηγή είναι το πλήθος των φωτονίων που μπορούν να εκπνευθούν και κατ' επέκταση να προσομοιωθούν. Επομένως, δεν έχει νόημα ο όρος αρχική ενέργεια των πρωτογενών φωτονίων, αφού υπάρχουν τόσες αρχικές ενέργειες όσα και τα φωτόνια που εμφανίζονται στο σχήμα διάσπασης του εκάστοτε ισότοπου. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο κομμάτι του κώδικα η πληροφορία για την αρχική ενέργεια 'E0' καθορίζει δεδομένα και παραμέτρους μόνο για τα υλικά της διάταξης που χρησιμοποιείται. Επομένως, επιλέχθηκε για κάθε ισότοπο να ορίζεται ως αρχική ενέργεια η μέγιστη από τις ενέργειες των φωτονίων που μπορεί να εκπέμψει ο υπό εξέταση πυρήνας. Μία άλλη σκέψη ήταν να επιλεχθεί η μέγιστη ενέργεια φωτονίου ανάμεσα τόσο στα εκπνευόμενα από τον πυρήνα φωτόνια, όσο και από τα αθροιστικά. Ωστόσο, η ιδέα αυτή απορρίφθηκε καθώς δεδομένου ότι τα αθροιστικά φωτόνια μπορεί να μην είναι πραγματικά, δεν είναι εφικτό να προσομοιώνεται φωτόνιο με τέτοια ενέργεια. Επισημαίνεται ότι η χρήση της μέγιστης ενέργειας πραγματικού φωτονίου καλύπτει ακόμα και την περίπτωση κατά την οποία το αθροιστικό φωτόνιο είναι και πραγματικό, καθώς το αθροιστικό είναι αυτό που έχει τη μέγιστη ενέργεια.

Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η διαδικασία επιλογής της μέγιστης ενέργειας φωτονίου για κάθε ισότοπο ξεχωριστά. Στην περίπτωση που προσομοιώνεται ισότοπο, δηλαδή η μεταβλητή ISPEC έχει πάρει την τιμή δύο (2), η μέγιστη ενέργεια 'E0' διαμορφώνεται ανάλογα με το ισότοπο που έχει επιλεγεί κάθε φορά. Έτσι, για παράδειγμα για το ⁶⁰Co παίρνει την τιμή 1332.508 keV, ενώ για το ⁸⁸Y την τιμή 2734.114 keV. Τονίζεται ότι στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να εισάγει κάποιο νέο ισότοπο για το οποίο δεν υπάρχει υπορουτίνα διαγράμματος διάσπασης στις βιβλιοθήκες του κώδικα χρήστη PENMAIN.f, πρέπει να επεκταθεί και το συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα εισάγοντας ως αρχική ενέργεια φωτονίου, E0, τη μέγιστη ενέργεια φωτονίου που εκπέμπεται από το σχήμα διάσπασης του συγκεκριμένου ισοτόπου.

```

IF(ISPEC.EQ.2) THEN
  IF(SISOTOPE.EQ.'Co-60') THEN
    E0=1332.508*1000.0D0           !Max energy of Co-60 photons.
  ELSE IF(SISOTOPE.EQ.'Y-88')THEN
    E0=2734.114*1000.0D0         !Max energy of Y-88 photons.
  ELSE IF(SISOTOPE.EQ.'Co-57')THEN
    E0=136.473*1000.0D0         !Max energy of Co-57 photons.
  ELSE IF(SISOTOPE.EQ.'Cs-134')THEN
    E0=1365.16*1000.0D0        !Max energy of Cs-134 photons.
  ELSE
    WRITE(26,*) 'Isotope unrecognized.'
    STOP 'Isotope unrecognized.'
ENDIF

```

Σχήμα 4.22 : Μέγιστη ενέργεια εξεταζόμενου ισοτόπου (τμήμα προετοιμασίας προσομοίωσης κώδικα PENMAIN.f).

Ο κώδικας αναγνωρίζει το εξεταζόμενο ισότοπο από την ονομασία που έχει δοθεί στο αρχείο εισόδου τύπου *.in* μέσω της μεταβλητής 'SISOTOPE'. Στην περίπτωση που ο χρήστης εισάγει στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*, όνομα ισοτόπου για το οποίο δεν είναι ενήμερες οι βιβλιοθήκες του κώδικα χρήστη PENMAIN.f, τότε η προσομοίωση δεν είναι δυνατόν να εκτελεσθεί. Για την περίπτωση αυτή επιλέχθηκε να εμφανίζεται στο αρχείο εξόδου *penmain.dat* αλλά και στην οθόνη του υπολογιστή κατάλληλο μήνυμα με την ένδειξη: 'Isotope unrecognized'. Η εισαγωγή αυτού του ελέγχου θεωρήθηκε απαραίτητη ώστε σε περίπτωση που διακοπεί η προσομοίωση, να γνωρίζει ο χρήστης την αιτία και να μπορεί να ανατρέξει σε τυχόν λάθη. Είναι αναγκαίο για τη λειτουργία της προσομοίωσης, κάθε φορά που ο χρήστης εισάγει σχήμα διάσπασης κάποιου νέου ισοτόπου στις βιβλιοθήκες του κώδικα, να ανανεώνει το συγκεκριμένο τμήμα ακολουθώντας τα βήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Στα Σχήματα 4.23 και 4.23 παρατίθενται τμήμα του αρχείου εξόδου *penmain.dat* και μήνυμα στην οθόνη του υπολογιστή, αντίστοιχα, για προσομοίωση που διακόπηκε λόγω ισοτόπου του οποίου το σχήμα διάσπασης δεν υπήρχε στις βιβλιοθήκες του κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

```

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

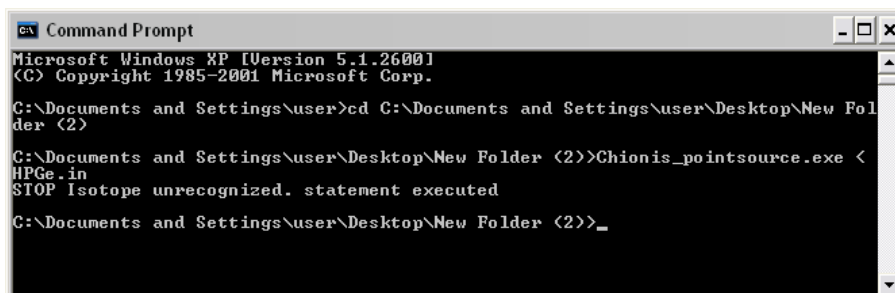
Date and time:  4th Oct 2011.  13:59:09

HPGe, Eu-152 point source at 0.5mm from the detector cap.

-----
>>>>> Source description.
Primary particles: photons
Isotope : Eu-152
Isotope unrecognized.

```

Σχήμα 4.23 : Καταγραφή μηνύματος 'Isotope unrecognized' στο αρχείο εξόδου *penmain.dat*.



```

Command Prompt
Microsoft Windows XP [Version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\user>cd C:\Documents and Settings\user\Desktop\New Folder (2)

C:\Documents and Settings\user\Desktop\New Folder (2)>Chionis_pointsource.exe <
HPGe.in
STOP Isotope unrecognized. statement executed

C:\Documents and Settings\user\Desktop\New Folder (2)>_

```

Σχήμα 4.24 : Καταγραφή μηνύματος 'Isotope unrecognized' στην οθόνη του υπολογιστή.

4.3.2.6 Τμήμα επεξεργασίας δεδομένων της προσομοίωσης του κώδικα PENMAIN.f.

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται έξι (6) από τις σημαντικότερες αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Οι τροποποιήσεις αυτές που αναλύονται και επεξηγούνται παρακάτω, ευθύνονται για την άκρως ικανοποιητική λειτουργία του κώδικα που λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Στο τμήμα επεξεργασίας δεδομένων ο κώδικας επαναλαμβάνει για αρκετό αριθμό ιστοριών τις ίδιες εντολές εξάγοντας ταυτόχρονα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Έχουν αρχικοποιηθεί όλες οι μεταβλητές και οι μετρητές των πρωτογενών σωματιδίων (Primary particle counters) και εν συνεχεία καθορίζεται η αρχική κατάσταση τους.

4.3.2.6.1 Καθορισμός αριθμού φωτονίων στην περίπτωση μονοενεργειακής πηγής.

Όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως, η σημαντικότερη διαφοροποίηση του νέου κώδικα χρήστη από τον πρωτότυπο είναι η παρακολούθηση στην ίδια προσομοίωση δύο ή και περισσότερων πρωτογενών φωτονίων που εκπέμπονται από τον ίδιο κλάδο διάσπασης ενός εξεταζόμενου ισότοπου. Για την επίτευξη μίας τέτοιας προσομοίωσης απαιτείται η γνώση του αριθμού των φωτονίων που προκύπτουν από την προσομοιούμενη σε κάθε ιστορία (shower) διάσπαση του πυρήνα. Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.3.2.1, η μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι η 'NF'. Για να υπάρχει ομοιομορφία στον κώδικα και να μην αλλάξουν οι δυνατότητές με την εισαγωγή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, επιλέχθηκε η μεταβλητή 'NF' να χρησιμοποιείται και στην περίπτωση προσομοίωσης μονοενεργειακής πηγής. Είναι προφανές ότι σε αυτή την περίπτωση η

μεταβλητή λαμβάνει την τιμή ένα (1) καθώς από μία μονοενεργειακή πηγή εκπέμπεται μόνο ένα πρωτογενές φωτόνιο σε κάθε διάσπαση. Η αντίστοιχη τροποποίηση του κώδικα φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.25.

```

C ---- Initial energy ...
      IF (ISPEC.EQ.0) THEN
          E=E0
          NF=1
          SHIST(1)=SHIST(1)+1.0D0
      ENDIF
! Monoenergetic source.
! Number of emitted photons.

```

Σχήμα 4.25 : Καθορισμός αριθμού φωτονίων στην περίπτωση μονοενεργειακής πηγής (τμήμα επεξεργασίας δεδομένων προσομοίωσης κώδικα PENMAIN.f).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25, στην περίπτωση της μονοενεργειακής πηγής (ISPEC=0) καθορίζεται ως εξεταζόμενη ενέργεια η αρχική ενέργεια του φωτονίου και εν συνεχεία δηλώνεται ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων ίσος με ένα (NF=1). Η μεταβλητή 'SHIST' αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σωματιδίων προερχόμενων από την ίδια στήλη του φάσματος ενέργειας της πηγής [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006].

4.3.2.6.2 Σύνδεση υπορουτινών με τον κώδικα PENMAIN.f.

Η δεύτερη αλλαγή του τμήματος επεξεργασίας δεδομένων του κώδικα χρήστη αφορά στην κλίση των υπορουτινών διαγραμμάτων διάσπασης και κατ' επέκταση στη δήλωση του αριθμού των φωτονίων που λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση κάθε ιστορίας (shower) και των αντίστοιχων ενεργειών τους. Στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται το τμήμα του κώδικα όπου οι υπορουτίνες διαγράμματος διάσπασης επιστρέφουν τα δεδομένα του ισотоπού που εξετάζεται. Σημειώνεται πως για την περίπτωση που μελετάται σχήμα διάσπασης ισотоπού, επομένως η μεταβλητή 'ISPEC' έχει την τιμή δύο (2), καλείται ένας τυχαίος αριθμός RA πριν κλιθούν οι υπορουτίνες, όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 4.3.2.1.

```

C ---- Isotope Subroutine ...
      IF (ISPEC.EQ.2) THEN
          RA=RAND(1.0D0)
          IF (SISOTOPE.EQ.'Co-60') THEN
              CALL SUBISOTOPECo60(RA,NF,EN(1),EN(2))
          ELSE IF (SISOTOPE.EQ.'Y-88') THEN
              CALL SUBISOTOPEY88(RA,NF,EN(1),EN(2),EN(3))
          ELSE IF (SISOTOPE.EQ.'Co-57') THEN
              CALL SUBISOTOPECo57(RA,NF,EN(1),EN(2),EN(3))
          ELSE IF (SISOTOPE.EQ.'Cs-134') THEN
              CALL SUBISOTOPECs134(RA,NF,EN(1),EN(2),EN(3),EN(4))
          ENDIF

```

Σχήμα 4.26 : Δεδομένα ισотоπού - Μέρος Α' (τμήμα εισαγωγής δεδομένων υπορουτινάς).

Η διάρθρωση της συγκεκριμένης τροποποίησης του κώδικα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.26, είναι απλή αλλά πρέπει να γίνει απολύτως κατανοητή στο χρήστη. Ανάλογα με την ονομασία του ισотоπού που έχει διαβάσει στο αρχείο εισόδου τύπου .in, ο κώδικας καλεί την αντίστοιχη υπορουτίνα από τις βιβλιοθήκες του κώδικα PENMAIN.f. Η εκάστοτε υπορουτίνα επιστρέφει τιμές για το πλήθος των φωτονίων που προσομοιώνονται καθώς και για τις αντίστοιχες ενέργειές τους, όπως έχει ήδη περιγραφεί.

Η εκάστοτε υπορουτίνα μπορεί, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.26, να δώσει περισσότερες από μία τιμές για τις ενέργειες των φωτονίων. Ανάλογα με το σχήμα διάσπασης διαφέρει και ο μέγιστος αριθμός φωτονίων που μπορούν να εκπνευθούν σε μία διάσπαση του πυρήνα. Επιλέχθηκε η κάθε υπορουτίνα να επιστρέφει πάντα τόσες τιμές ενεργειών όσο το μέγιστο πλήθος πιθανώς εκπνευόμενων φωτονίων. Με άλλα λόγια, κάθε υπορουτίνα επιστρέφει πάντα ως μεταβλητές στο κυρίως πρόγραμμα τις ενέργειες του μέγιστου αριθμού φωτονίων που έχει δυνατότητα να εκπέμψει ο πυρήνας του ισότοπου (EN(1), EN(2), EN(3), ...), ανεξάρτητα εάν από τη συγκεκριμένη διαδρομή που έχει επιλεγεί να ακολουθηθεί, μέσω τυχαίων αριθμών, εκπέμφθηκαν λιγότερα φωτόνια.

Για την κατανόηση αυτής της αλλαγής γίνεται αναφορά στο σχήμα διάσπασης του ^{134}Cs (Σχήμα 4.9) σε συνδυασμό με την υπορουτίνα που έχει κατασκευαστεί για αυτό το ισότοπο (Σχήμα 4.10). Σημειώνεται πως οποιαδήποτε διαδρομή εάν ακολουθηθεί στο σχήμα διάσπασης του συγκεκριμένου ισότοπου, ο μέγιστος αριθμός φωτονίων που μπορούν να εκπνευθούν είναι τέσσερα (4). Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, η υπορουτίνα επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα σε κάθε ιστορία τον αριθμό των φωτονίων, NF, που μετέχουν στην προσομοίωση καθώς και τέσσερις (4) μεταβλητές ενεργειών, EN(1), EN(2), EN(3) και EN(4). Για παράδειγμα, αποδιέγερση του πυρήνα του ^{134}Cs στην ενεργειακή στάθμη των 1969.85 keV (πιθανότητα 0.05%) έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή εν σειρά τεσσάρων (4) φωτονίων ενεργειών EN(1)=326.59 keV, EN(2)=242.72 keV, EN(3)=795.85 keV και EN(4)=604.69 keV. Στην ενεργειακή στάθμη των 1167.92 keV με πιθανότητα 17.62% εκπέμπεται μόνο ένα φωτόνιο ενέργειας EN(1)=1167.92 keV. Για προγραμματιστικούς λόγους όμως, η υπορουτίνα επιστρέφει στη δεύτερη περίπτωση τιμές ενέργειας και για ακόμα τρία (3) φωτόνια οι οποίες όμως είναι μηδενικές, δηλαδή EN(2)=EN(3)=EN(4)=0 keV καθώς και τον αριθμό των φωτονίων που πραγματικά εκπέμπονται, δηλαδή NF=1.

Αυτή η ιδιαιτερότητα των υπορουτινών διαγραμμάτων διάσπασης ισότοπων, δεν επηρεάζει αρνητικά με οποιοδήποτε τρόπο τον κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Όταν η προσομοίωση αναγνωρίσει μηδενικής ενέργειας φωτόνιο, κατάλληλος έλεγχος διακόπτει την παρακολούθηση της πορείας του φωτονίου αυτού και συνεχίζει με το επόμενο φωτόνιο που εμφανίζεται στην συγκεκριμένη ιστορία.

Επισημαίνεται ότι υπάρχει πιθανότητα κατά την προσομοίωση διαγράμματος διάσπασης ισότοπου, για λόγους τυχαιότητας, σε κάποια ιστορία (shower) να μετέχει μόνο ένα φωτόνιο (NF=1). Η περίπτωση αυτή δεν διαφέρει από την περίπτωση προσομοίωση μονοενεργειακής πηγής. Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 4.3.2.5.2, στην περίπτωση μονοενεργειακής πηγής η δήλωση της αρχικής ενέργειας 'SE0' του φωτονίου πραγματοποιείται μέσω του αρχείου εισόδου τύπου .in, ενώ για την περίπτωση του ισότοπου δηλώνεται ως μέγιστη αρχική ενέργεια η μέγιστη ενέργεια εκπνευόμενου ισότοπου. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει λόγος να αλλάξει ο τρόπος λειτουργίας της προσομοίωσης, επιλέχθηκε να οριστεί η αρχική ενέργεια αυτή μέσω των εντολών που φαίνονται στο Σχήμα 4.27 και η προσομοίωση να ακολουθεί τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για μονοενεργειακή πηγή.

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση που εξετάζεται διάγραμμα διάσπασης ισότοπου (ISPEC=2) και εκπέμπεται στη συγκεκριμένη ιστορία (shower) μόνο ένα φωτόνιο (NF=1), ακολουθεί ένας βρόχος επανάληψης, DO - END DO, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.27, κατά τον οποίο κάθε μία από τις ενέργειες EN(1), EN(2), EN(3) κ.τ.λ. συγκρίνεται με την προηγούμενη και βρίσκεται η μέγιστη ενέργεια που έχει επιστρέψει η υπορουτίνα στον κώδικα. Στην περίπτωση όπου εκπέμπεται ένα μόνο φωτόνιο, όλες οι υπόλοιπες ενέργειες είναι μηδενικές και άρα η μέγιστη ενέργεια είναι η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου. Για την εύρεση αυτής της ενέργειας χρησιμοποιείται η βοηθητική μεταβλητή ENM, η οποία μετά το τέλος του βρόχου επανάληψης έχει τη μέγιστη τιμή των ενεργειών EN(1), EN(2), EN(3), κ.λ.π. Στη συνέχεια η μέγιστη αυτή ενέργεια ταυτοποιείται με τη μεταβλητή αρχικής ενέργειας, E, την οποία χρησιμοποιεί ο κώδικας για να συνεχίσει τη λειτουργία της προσομοίωσης σαν να πρόκειται για μονοενεργειακή πηγή.

Με αυτό του είδους την τροποποίηση επιτυγχάνεται η σωστή λειτουργία της προσομοίωσης και στην περίπτωση που εξετάζεται διάγραμμα διάσπασης ισότοπου και προκύπτει εκπομπή ενός μόνο φωτονίου. Σημειώνεται ότι ο επαναληπτικός βρόγχος επαναλαμβάνεται για I=100 φορές, όσο και το μέγεθος του πίνακα EN(I), δηλαδή του μέγιστου αριθμού φωτονίων που μπορούν να εκπεμφθούν σε κάποια διαδρομή του σχήματος διάσπασης ισότοπου, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.3.2.4.3.

```

C ---- Isotope Subroutine ...
      IF (ISPEC.EQ.2) THEN
        RA=RAND(1.0D0)
        IF(SISOTOPE.EQ.'Co-60') THEN
          CALL SUBISOTOPECo60(RA,NF,EN(1),EN(2))
        ELSE IF(SISOTOPE.EQ.'Y-88') THEN
          CALL SUBISOTOPEY88(RA,NF,EN(1),EN(2),EN(3))
        ELSE IF(SISOTOPE.EQ.'Co-57') THEN
          CALL SUBISOTOPECo57(RA,NF,EN(1),EN(2),EN(3))
        ELSE IF(SISOTOPE.EQ.'Cs-134') THEN
          CALL SUBISOTAOPeCs134(RA,NF,EN(1),EN(2),EN(3),EN(4))
        ENDIF
        IF (NF.EQ.1) THEN
          ENM=0.0D0
          DO I=1,100
            ENM=MAX(ENM,EN(I))
          ENDDO
          E=ENM
        ENDIF
      ENDIF

```

Σχήμα 4.27 : Δεδομένα ισότοπου - Μέρος Β' (τμήμα εισαγωγής δεδομένων υπορουτίνας).

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να εντάξει υπορουτίνα για διάγραμμα διάσπασης νέου ισότοπου το οποίο δεν περιέχεται στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f, αφού ακολουθηθούν τα βήματα που περιγράφονται στην παράγραφο 4.3.2.1 όσον αφορά στη διάρθρωση της υπορουτίνας και ενημερωθεί κατάλληλα το τμήμα αρχικής ενέργειας των πρωτογενών σωματιδίων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.22, πρέπει να προστεθούν στο τμήμα του κώδικα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.26 οι κατάλληλες εντολές για την κλίση της νέας υπορουτίνας. Ακόμα, θα πρέπει να ληφθεί κατάλληλη μνεία για την περίπτωση που το νέο ισότοπο δύναται να εκπέμψει σε μία διαδρομή περισσότερα από 100 φωτόνια.

4.3.2.6.3 Επιλογή νέου φωτονίου της διάσπασης που εξετάζεται.

Μέχρι το σημείο που έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 4.3.2.6.2, στην προσομοίωση έχουν δηλωθεί πληροφορίες σχετικά με το είδος του πρωτογενούς σωματιδίου ή φωτονίου που εξετάζεται (ηλεκτρόνιο, ποζιτρόνιο ή φωτόνιο), το είδος της πηγής (μονοενεργειακή, συνεχές φάσμα ή σχήμα διάσπασης ισοτόπου) καθώς και την ενέργεια του σωματιδίου ή φωτονίου. Έχουν καθοριστεί, δηλαδή, όλα τα δεδομένα ώστε να αρχίσει η παρακολούθηση της πορείας των εξεταζόμενων σωματιδίων ή φωτονίων.

Η τροποποίηση που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.28 είναι από τις πιο σημαντικές της παρούσας Δ.Ε. καθώς στο σημεία αυτό του κώδικα ελέγχεται η ύπαρξη ή όχι φωτονίων σε σειρά, δηλαδή η ύπαρξη ή όχι του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

```
C
NPH=0                                ! Temporary variable for total photons.
IF(NF.EQ.1) GO TO 7894
9999 CALL CLEANS                        ! Secondary stack clean for every cascade photon.
NPH=NPH+1
E=EN(NPH)
IF(NPH.NE.1) THEN                    ! Cleans parameters for cascade photons.
DO I=1,3
DPRIM(I)=0.0D0
DO K=1,3
DSEC(K,I)=0.0D0
ENDDO
ENDDO
DO KB=1,NBODY
DEBO(KB)=0.0D0                       ! Energies deposited in the various bodies KB.
ENDDO
IEXIT=0
KPAR=KPARP
WGHT=WGHT0
CALL GCONE(U,V,W)                    ! Initial position and direction of the
                                     cascade photon.
X=SX0
Y=SY0
Z=SZ0
ENDIF
7894 IF(E.LT.EABS(KPAR,MAT)) GO TO 105
```

Σχήμα 4.28 : Επιλογή νέου φωτονίου.

Στο τμήμα του κώδικα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.28 ελέγχονται ξεχωριστά δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη, εξετάζεται η πορεία ενός φωτονίου, δηλαδή $NF=1$, είτε λόγω επιλογής μονοενεργειακής πηγής ενέργειας E , είτε λόγω εκπομπής μεμονωμένου φωτονίου από συγκεκριμένη διαδρομή σχήματος διάσπασης ισοτόπου. Όταν η μεταβλητή 'NF' έχει την τιμή ένα (1), ο κώδικας ελέγχει αρχικά κατά πόσο η ενέργεια 'E' που έχει το εξεταζόμενο φωτόνιο είναι μικρότερη από το κατώτερο όριο που έχει ορισθεί για την ενέργεια απορρόφησης του εξεταζόμενου σωματιδίου, $EABS(KPAR,MAT)$ – cut-off energy. Τα κατώτερα αυτά όρια ορίζονται για κάθε υλικό της κατασκευής και για κάθε είδος σωματιδίων ή φωτονίων από το χρήστη στο αρχείο εισόδου *.in*. Στη συνέχεια, η λειτουργία της προσομοίωσης είναι ακριβώς όμοια με την πρωτότυπη έκδοση του κώδικα χρήστη PENMAIN.f για μονοενεργειακή πηγή.

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται στο τμήμα του κώδικα που φαίνεται στο Σχήμα 4.28 αφορά στην προσομοίωση του σχήματος διάσπασης ισοτόπου, δηλαδή για $NF > 1$. Η αλλαγή αυτή στον κώδικα πραγματοποιείται το αντικειμενικό στόχο της παρούσας Δ.Ε. δηλαδή την προσομοίωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Ο κώδικας γνωρίζοντας τον ακριβή αριθμό φωτονίων που μετέχουν στην ιστορία (shower) που εξετάζεται, NF , και τις ενέργειες τους, $EN(1)$, $EN(2)$, $EN(3)$, παρακολουθεί την πορεία του πρώτου φωτονίου, ενέργειας $EN(1)$, και ακολούθως καταγράφει τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης του με την ύλη σε κατάλληλες μεταβλητές. Πριν τερματιστεί η παρούσα ιστορία (shower) ξεκινάει την παρακολούθηση της πορείας του επόμενου εκπεμπόμενου φωτονίου, ενέργειας $EN(2)$, και προσθέτει τα δεδομένα από τις αλληλεπιδράσεις αυτού του δεύτερου φωτονίου στα ήδη αποθηκευμένα δεδομένα από τις αλληλεπιδράσεις του πρώτου φωτονίου, χωρίς να τα αντικαθιστά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από τα εκπεμπόμενα φωτόνια. Μόνο όταν έχουν προσομοιωθεί όλα τα πρωτογενή φωτόνια που εξετάζονται στην ιστορία (shower), ο κώδικας επιστρέφει στην αρχή και προσομοιώνει καινούργια ιστορία.

Για να γίνει πράξη η λογική που αναλύεται στην ακριβώς προηγούμενη παράγραφο, εισάγεται μία βοηθητική μεταβλητή η οποία έχει το ρόλο του αύξοντα αριθμού φωτονίου που προσομοιώνεται στην εξεταζόμενη ιστορία (shower) ή αλλιώς του αύξοντα αριθμού εκπεμπόμενου φωτονίου κατά τη μία διάσπαση του προσομοιούμενου πυρήνα. Αυτή η μεταβλητή λαμβάνει την ονομασία 'NPH' και αρχικοποιείται πριν ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία για τα εκπεμπόμενα φωτόνια, παίρνοντας την τιμή μηδέν (0). Είναι προφανές ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή 'NPH' είναι ίση με τον αριθμό των φωτονίων 'NF' που έχει επιστρέψει στο κυρίως πρόγραμμα η αντίστοιχη υπορουτίνα.

Μετά την αρχικοποίηση της βοηθητικής μεταβλητής 'NPH', καλείται η υπορουτίνα CLEANS, η οποία μηδενίζει τις αρχικές τιμές της δευτεροβάθμιας στοιβάδας (secondary stack), όπως περιγράφεται την παράγραφο 3.3.6.6. Η υπορουτίνα αυτή πρέπει να καλείται κάθε φορά που αρχίζει η παρακολούθηση της πορείας ενός νέου πρωτογενούς σωματιδίου. Αποτελεί την πρώτη εντολή που εκτελείται μετά το πέρας της παρακολούθησης της πορείας του τρέχοντος φωτονίου, ακριβώς πριν την έναρξη του επόμενου πρωτογενούς. Στη συγκεκριμένη εντολή επιστρέφει η προσομοίωση, κάθε φορά που το προσομοιούμενο φωτόνιο με αύξοντα αριθμό 'NPH' < 'NF' έχει χάσει ολόκληρη την ενέργειά του ή έχει βγει εκτός των ορίων του συστήματος.

Στον πρωτότυπο κώδικα χρήστη PENMAIN.f η υπορουτίνα CLEANS καλείται όταν ξεκινάει μία καινούργια ιστορία (shower). Στο νέο κώδικα η υπορουτίνα αυτή πρέπει να καλείται σε κάθε μία από τις 'NF' προσομοιώσεις φωτονίων που συμμετέχουν στην ιστορία. Για το πρώτο φωτόνιο, $NPH=1$, των NF φωτονίων που μπορεί να λαμβάνουν μέρος στην ιστορία (shower), η υπορουτίνα CLEANS καλείται πάντα δύο φορές, μία φορά κατά το ξεκίνημα της ιστορίας και μία φορά κατά το πέρασμα από το τμήμα εισαγωγής που εμφανίζεται στο Σχήμα 4.28. Αυτή η διαδικασία δεν δημιουργεί πρόβλημα στην ορθή λειτουργία της προσομοίωσης, καθώς μέχρι εκείνο το σημείο δεν έχει αρχίσει ακόμα η παρακολούθηση

της πορείας του αρχικού πρωτογενούς φωτονίου ώστε να έχουν παραχθεί δευτερογενή σωματίδια, οπότε δεν έχουν εξαχθεί αποτελέσματα που κινδυνεύουν να χαθούν.

Εν συνεχεία, αυξάνεται κατά ένα η τιμή του χρησιμοποιούμενου μετρητή φωτονίων, $NPH=NPH+1$, ώστε να ξεκινήσει η παρακολούθηση της πορείας του επόμενου εν σειρά πρωτογενούς φωτονίου. Η μεταβλητή αρχικής ενέργειας 'E' λαμβάνει την τιμή που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο φωτόνιο, $E=EN(NPH)$, όπως αυτή έχει προκύψει από το κλίση της υπορουτίνας σχήματος διάσπασης του υπό εξέταση ισotόπου (Σχήμα 4.26). Για τα φωτόνια που εμφανίζονται στην εξεταζόμενη διαδρομή πέραν του πρώτου, $NPH \neq 1$, μηδενίζονται διάφορες παράμετροι που η προσομοίωση προβλέπει, όπως ακριβώς και στην πρωτότυπη μορφή του κώδικα χρήστη. Οι παράμετροι αυτοί σχετίζονται με τον αριθμό των πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων ή φωτονίων, τα οποία κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης είχαν την ίδια τελική κατάληξη, όπως οπισθοσκέδαση ή απορρόφηση.

Ακολούθως, για κάθε ένα από τα 'NF' εκπεμπόμενα και προσομοιούμενα φωτόνια, με $NPH > 1$, μηδενίζεται η ενέργεια που αποτίθεται στα σώματα (bodies) της διάταξης, λόγω της αλληλεπίδρασης του προηγούμενου φωτονίου με την ανιχνευτική διάταξη. Ο μηδενισμός είναι απαραίτητος καθώς σε αντίθετη περίπτωση σε κάθε σώμα (body) της διάταξης αποθηκεύεται ενέργεια πολλών φωτονίων και όχι μόνο αυτού που παρακολουθείται τη συγκεκριμένη στιγμή από την προσομοίωση, με αποτέλεσμα να εξάγονται αναξιόπιστα αποτελέσματα. Ακόμα, αρχικοποιούνται μεταβλητές που έχουν σχέση με το είδος των πρωτογενών σωματιδίων, 'KPARP', και τον παράγοντα βαρύτητάς τους, 'WGHT'. Τέλος, καλείται η υπορουτίνα 'GCONE', η οποία διασφαλίζει πως όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια της διάσπασης του πυρήνα που λαμβάνουν μέρος στην εξεταζόμενη ιστορία (shower) εκπέμπονται από τις ίδιες αρχικές συντεταγμένες, όπως τις έχει ορίσει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.

Επισημαίνεται ότι όλες οι παραπάνω ενέργειες πραγματοποιούνται και για το πρώτο φωτόνιο των 'NF' φωτονίων που εξετάζονται σε κάθε ιστορία ($NPH=1$), αλλά σε προηγούμενο σημείο του κώδικα από αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.28. Όλες οι απαιτούμενες ενέργειες για το πρώτο φωτόνιο πραγματοποιούνται στο σημείο στο οποίο επιστρέφει η προσομοίωση και ξεκινά κάθε νέα ιστορία (shower).

Συμπερασματικά, η τροποποίηση που παρουσιάζεται στην παρούσα παράγραφο ευθύνεται για το νέο τρόπο λειτουργίας του κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Ο κώδικας σε αυτή τη μορφή του μπορεί να προσομοιώνει στην ίδια ιστορία (shower) παραπάνω από ένα φωτόνια, που είναι και ο αντικειμενικός στόχος της παρούσας εργασίας. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περισσότερων από ένα φωτόνια ώστε να εξαχθούν τα ζητούμενα από το χρήστη αποτελέσματα.

4.3.2.6.4 Αρχικοποίηση μεταβλητής 'DEDE' (καταγεγραμμένη ενέργεια στον ανιχνευτή απόθεσης).

Στον πρωτότυπο κώδικα κάθε φορά που περατώνεται μία ιστορία (shower) και πριν ξεκινήσει η επόμενη, υπολογίζονται η ενέργεια που έχει καταγράψει ο ανιχνευτής απόθεσης, μεταβλητή 'DEDE', καθώς και ο αριθμός των σωματιδίων που εναποθέτουν ενέργεια σε συγκεκριμένο κανάλι 'KE', μεταβλητή 'DET'. Η ίδια λογική ακολουθείται και στον τροποποιημένο κώδικα, με μία μικρή αλλαγή στη λειτουργία του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detector).

Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η τροποποίηση που αφορά στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την παρακολούθηση των φωτονίων. Στην περίπτωση ύπαρξης ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, δηλαδή $NDEDEF > 0$, ο κώδικας μηδενίζει τη μεταβλητή 'DEDE', δηλαδή την ενέργεια που έχει καταγράψει ο ανιχνευτής στο προηγούμενο shower, για το πρώτο φωτόνιο οποιασδήποτε ιστορίας (shower) που προσομοιώνεται. Η μεταβλητή 'DEDE' δεν αναφέρεται στη συνολική αποτιθέμενη ενέργεια που καταγράφεται στον ανιχνευτή, αλλά στην ενέργεια που καταγράφηκε στη συγκεκριμένη ιστορία. Συνεπώς, κάθε φορά που ο κώδικας βρίσκεται σε καινούργια ιστορία, επιλέγεται να μηδενιστούν τα δεδομένα που υπήρχαν αποθηκευμένα στη συγκεκριμένη μεταβλητή από την προηγούμενη ιστορία (shower). Πρέπει να τονισθεί πως στην περίπτωση σχήματος διάσπασης ισότοπου με περισσότερα του ενός φωτόνια να λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση ($NF > 1$), δεν πρέπει να μηδενίζεται το περιεχόμενο της μεταβλητής 'DEDE' για τα φωτόνια πέραν του πρώτου. Στην περίπτωση προσομοίωσης ισότοπου ενδιαφέρει η συνολική ενέργεια που έχει καταγραφεί στον ανιχνευτή απόθεσης από όλα τα φωτόνια της διάσπασης του προσομοιούμενου πυρήνα.

Τονίζεται ότι η τροποποίηση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.29 δεν αλλάζει καθόλου τον τρόπο λειτουργίας του κώδικα για την περίπτωση μονοενεργειακής πηγής φωτονίων.

```
C
C   ****  Energies deposited in different bodies.
C
      IF(NDEDEF.GT.0) THEN
      IF((NF.EQ.1).OR.((NF.NE.1).AND.(NPH.EQ.1))) THEN
      DO KD=1,NDEDEF
      DEDE(KD)=0.0D0
      ENDDO
      ENDIF
      ENDIF
      ...
```

Σχήμα 4.29 : Αρχικοποίηση μεταβλητής 'DEDE' (τμήμα επεξεργασίας δεδομένων προσομοίωσης κώδικα PENMAIN.f).

4.3.2.6.5 Έλεγχος μη-προσομοιωμένου πρωτογενούς φωτονίου.

Στην περίπτωση εξέτασης διαγράμματος διάσπασης ισότοπου κατά το πέρας της προσομοίωσης κάθε πρωτογενούς φωτονίου πραγματοποιείται έλεγχος για την ύπαρξη ή όχι επόμενου πρωτογενούς

φωτονίου το οποίο να προέρχεται από την ίδια διάσπαση του ραδιενεργού πυρήνα, δηλαδή να ανήκει στην ίδια ιστορία που προσομοιώνεται.

Όταν το προσομοιούμενο πρωτογενές φωτόνιο χάσει ολόκληρη την ενέργειά του ή βγει εκτός του εξεταζόμενου συστήματος, υπολογίζεται η ενέργεια που έχει καταγράψει ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας που έχει ορίσει ο χρήστης. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή 'DEDE' και στη συνέχεια πραγματοποιείται έλεγχος εάν για το συγκεκριμένο shower εκκρεμούν πρωτογενή φωτόνια που δεν έχουν προσομοιωθεί ακόμα.

Το τμήμα του κώδικα όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος αυτός φαίνεται στο Σχήμα 4.30, όπου στην περίπτωση κατά την οποία σε μία ιστορία που λαμβάνουν μέρος περισσότερα του ενός πρωτογενή φωτόνια, δηλαδή $NF > 1$, και ο αύξων αριθμός του εξεταζόμενου φωτονίου είναι μικρότερος του συνολικού αριθμού φωτονίων του συγκεκριμένου shower, δηλαδή $NPH < NF$, η προσομοίωση συνεχίζεται μέσω του αριθμού εντολής '9999' στην παρακολούθηση του επόμενου φωτονίου ($NPH = NPH + 1$), επανερχόμενη στο σημείο του κώδικα όπου ξεκινά η προσομοίωση και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.28. Συνεπώς, πριν το τέλος κάθε ιστορίας, ο κώδικας επιστρέφει στην αρχή για να προσομοιώσει το επόμενο φωτόνιο μέχρι να προσομοιωθούν όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια, δηλαδή και τα 'NF'.

```
C  
IF((NF.NE.1).AND.(NPH.LT.NF)) GO TO 9999
```

Σχήμα 4.30 : Έλεγχος ύπαρξης μη-προσομοιωμένου πρωτογενούς φωτονίου (τμήμα επεξεργασίας δεδομένων προσομοίωσης κώδικα PENMAIN.f).

4.3.2.6.6 Υπολογισμός συνολικά καταγραφόμενης ενέργειας στον ανιχνευτή απόθεσης.

Αφού προσομοιωθούν όλα τα πρωτογενή φωτόνια που μετέχουν στην ιστορία, υπολογίζεται η συνολική αποτιθέμενη ενέργεια που έχει καταγράψει ο ανιχνευτής καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται σταδιακά. Κάθε φορά που προσομοιώνεται ένα φωτόνιο, αποθηκεύεται η ενέργεια που αυτό απέθεσε στον ανιχνευτή απόθεσης τη μεταβλητή 'TDED'. Όταν φτάσει στο τέλος η προσομοίωση του επόμενου εν σειρά φωτονίου, τότε η ενέργεια που το δεύτερο φωτόνιο αποθέτει στον ανιχνευτή προστίθεται στην ενέργεια που έχει αποθέσει το πρώτο με την εντολή που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.31.

```

C **** Tallying the spectra from energy-deposition detectors.
C
  IF(NDEDEF.GT.0) THEN
    DO KD=1,NDEDEF
      TDED(KD)=TDED(KD)+DEDE(KD)
      TDED2(KD)=TDED2(KD)+DEDE(KD)**2
      IF(DEDE(KD).GT.1.0D-5) THEN
        KE=1.0D0+(DEDE(KD)-EDEL(KD))/BDEE(KD)
        IF(KE.GT.0.AND.KE.LE.NDECH(KD)) THEN
          DET(KD,KE)=DET(KD,KE)+WGHT0
          DET2(KD,KE)=DET2(KD,KE)+WGHT0**2
        ENDIF
      ENDIF
    ENDDO
  ENDIF

```

Σχήμα 4.31 : Υπολογισμός συνολικά αποτιθέμενης ενέργειας (τμήμα επεξεργασίας δεδομένων προσομοίωσης κώδικα PENMAIN.f).

Εκτός από τη συνολικά αποτιθέμενη ενέργεια στον ανιχνευτή απόθεσης, μεταβλητή 'TDED', υπολογίζεται τόσο το ενεργειακό κανάλι στο οποίο καταγράφεται η ενέργεια αυτή, μεταβλητή 'KE', όσο και ο αριθμός των σωματιδίων που έχουν εναποθέσει ενέργεια σε αυτόν, μεταβλητή 'DET'.

Μετά από όλους αυτούς του υπολογισμούς, ο κώδικας ελέγχει εάν έχουν ξεπεραστεί τα χρονικά όρια ή ο μέγιστος αριθμός ιστοριών που έχει θέσει ο χρήστης μέσω του αρχείου εισόδου τύπου *.in* και εν συνεχεία καταγράφονται όλα τα δεδομένα στα κατάλληλα αρχεία εξόδου και εξάγονται όλα τα απαραίτητα για το χρήστη αποτελέσματα. Το εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας προκύπτει μέσω του αρχείου δεδομένων *rm_spc_enddet_#.dat*. Η δίσηση στην κωδική του ονομασία αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, όπως ακριβώς έχει ορισθεί στο αρχείο εισόδου τύπου *.in*.

4.4 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f

Στην παράγραφο 3.3.5.2 περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής όπως προκύπτει από τα εξαγόμενα δεδομένα του αρχείου εξόδου *rm_spc_enddet_#.dat* του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f. Στην παρούσα παράγραφο αναλύεται ο τρόπος προσδιορισμού της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω των αποτελεσμάτων του τροποποιημένου κώδικα χρήστη.

Η απόδοση φωτοκορυφής, με βάση τον τρόπο υπολογισμού της από τα δεδομένα της προσομοίωσης, προσδιορίζεται ως το πλήθος των φωτονίων που απόθεσαν πλήρως την ενέργεια τους στον ανιχνευτή απόθεσης προς το γινόμενο της ενεργειακής διαμέρισης (energy bin) επί το πλήθος των συνολικών φωτονίων που προσομοιώθηκαν. Υπενθυμίζεται πως η βασική διαφορά του πρωτότυπου με τον τροποποιημένο κώδικα είναι η έννοια της ιστορίας (shower). Στο νέο κώδικα ως ιστορία αναφέρεται η διάσπαση του πυρήνα του εξεταζόμενου ισότοπου, και όχι η μεμονωμένη εκπομπή ενός φωτονίου όπως είναι στον πρωτότυπο κώδικα. Σε κάθε ιστορία του νέου κώδικα, επομένως, το πλήθος των ιστοριών που προσομοιώνονται δεν ισοδυναμεί με το πλήθος των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που

εκπέμφθηκαν, αλλά με το πλήθος των διασπάσεων που προσομοιώθηκαν. Τα δύο μεγέθη, προσομοιούμενη διάσπαση και εκπεμπόμενα φωτόνια, συνδέονται μεταξύ τους μέσω του ποσοστού εκπομπής (yield). Ως εκ τούτου, κατά τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης με χρήση του νέου κώδικα πρέπει να συνυπολογίζεται και το συνολικό ποσοστό εκπομπής (yield) του εξεταζόμενου φωτονίου.

Για τον ορθό υπολογισμό του μεγέθους απόδοσης φωτοκορυφής, όπως και στην περίπτωση προσομοίωσης με τον πρωτότυπο κώδικα, πρέπει να ληφθούν υπόψη, από το αρχείο *pm_spc_enddet_#.dat*, εκτός από το περιεχόμενο του ενεργειακού καναλιού που αντιστοιχεί στην αρχική ενέργεια του προσομοιούμενου φωτονίου, και το περιεχόμενο επιπλέον καναλιών του συγκεκριμένου αρχείου εξόδου [Karforoulou K. and Anagnostakis M., 2010]. Η σχέση υπολογισμού του συνολικού πλήθους καναλιών είναι η εξής :

$$n = \frac{1.5 \cdot \text{FWHM}}{\text{bin width}} \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

όπου n: το συνολικό πλήθος καναλιών που πρέπει να συνυπολογιστούν, bin width: το πλάτος του καναλιού σε eV και FWHM⁹: η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε eV.

Συνοψίζοντας, με χρήση του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f, η σχέση υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής θα δίνεται από τη σχέση :

$$\text{Eff}_E = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{probability density})_i}{\text{yield}} \times \text{bin width} \quad (\text{Σχέση 4.2})$$

ενώ η σχετική αβεβαιότητα της τιμής της απόδοσης όπως προκύπτει από την προσομοίωση, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ, υπολογίζεται μέσω του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της τρίτης στήλης όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.3.5.2 :

$$\text{unc}_{\text{sim}} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{statistical uncertainty})_i^2}}{\sum_{i=1}^n (\text{probability density})_i} \quad (\text{Σχέση 4.3})$$

όπου :

- unc_{sim} , είναι η σχετική αβεβαιότητα της τιμής της απόδοσης φωτοκορυφής (3σ),
- n, είναι το πλήθος καναλιών που συνυπολογίζονται για την εξεταζόμενη ενέργεια φωτονίου,
- $\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{statistical uncertainty})_i^2}$, είναι το στατιστικό άθροισμα των 'n' τιμών της τρίτης στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, με βάση το νόμο διάδοσης αβεβαιοτήτων ,

⁹ Εύρος ημίσειας ύψους, πρόκειται για απόδοση του αγγλικού όρου Full Width at Half Maximum. Όσο μικρότερο είναι το εύρος αυτό τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα αναπρόκρισης του ανιχνευτή [Λεωνίδου Δ., 1990]

- $\sum_{i=1}^n (\text{probability density})_i$, είναι το άθροισμα των 'n' σειρών των τιμών της δεύτερης στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat* για τη συγκεκριμένη ενέργεια,
- yield, είναι το ποσοστό εκπομπής του εξεταζόμενου φωτονίου, όπου για τις περιπτώσεις προσομοίωσης των ισοτόπων ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του Πίνακα 4.1,
- bin width, είναι εύρος ενεργειακού καναλιού (eV) η αλλιώς η ενεργειακή διαμέριση.

Τονίζεται ότι όλες οι αλλαγές που παρουσιάστηκαν εκτενώς στις προηγούμενες παραγράφους επετεύχθησαν μετά από μεγάλο αριθμό δοκιμών και επαληθεύσεων και βασίστηκαν στη λεπτομερή και εις βάθος κατανόηση του κώδικα χρήστη PENMAIN.f καθώς και του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Στη συνέχεια, ο τροποποιημένος αυτός κώδικας χρησιμοποιείται για την προσομοίωση πραγματικών σεναρίων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα με σκοπό την επαλήθευσή τους.

Σχήματα Κεφαλαίου 4.

```
C *****
C                                     SUBROUTINE SUBISOTOPECo60
C *****
C     SUBROUTINE SUBISOTOPECo60 (RA,NF,E1,E2)
C
C     This subroutine reads one random number, simulates a decay scheme
C     and gives the number of photons emitted and their energies
C     respectively.
C
C     IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER*4 (I-N)
C
C     EXTERNAL RAND
C
C     NF=0
C     E1=1173.240*1000.0D0 ! The energy of the 1st photon of Co-60
C     E2=1332.508*1000.0D0 ! The energy of the 2nd photon of Co-60
C
C     IF (RA.LE.0.9988D0) THEN
C         NF=2             ! Number of photons to be simulated
C                        ! in the disintegration
C     ELSE
C         NF=1
C         E1=0             ! Only one photon is emitted
C     ENDIF
C     RETURN
C     END
```

Σχήμα 4.4 : Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης ^{60}Co .

```
C *****
C                                     SUBROUTINE SUBISOTOPEY88
C *****
C     SUBROUTINE SUBISOTOPEY88 (RA,NF,E1,E2,E3)
C
C     This subroutine reads one random number, simulates a decay scheme
C     and gives the number of photons emitted and their energies
C     respectively.
C
C     IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER*4 (I-N)
C
C     EXTERNAL RAND
C     RB=RAND(2.0D0)
C
C     NF=0
C     E1=898.041*1000.0D0 ! The energy of the 1st photon of Y-88
C     E2=1836.073*1000.0D0 ! The energy of the 2nd photon of Y-88
C     E3=2734.114*1000.0D0 ! The energy of the 3rd photon of Y-88
C
C     IF(RA.LE.0.9475515D0)THEN
C         IF(RB.LE.0.9931D0)THEN
C             E3=0
C             NF=2             ! Number of photons to be simulated in
C                        ! the disintegration
C         ELSE
C             E1=0
C             E2=0
C             NF=1             ! Only one photon is emitted
C         ENDIF
C     ELSE
C         E1=0
C         E3=0
C         NF=1             ! Only one photon is emitted
C     ENDIF
C     END
```

Σχήμα 4.6 : Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης ^{88}Y .

```

C *****
C                               SUBROUTINE SUBISOTOPECo57
C *****
C     SUBROUTINE SUBISOTOPECo57 (RA,NF,E1,E2,E3)
C
C     This subroutine reads one random number, simulates a decay scheme
C     and gives the number of photons emitted and their energies
C     respectively.
C
C     IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER*4 (I-N)
C
C     EXTERNAL RAND
C     RB=RAND(2.0D0)
C
C     NF=0
C     E1=122.06079*1000.0D0      ! The energy of the 1st photon of Co-57
C     E2=14.41295*1000.0D0      ! The energy of the 2nd photon of Co-57
C     E3=136.47374*1000.0D0      ! The energy of the 3rd photon of Co-57
C
C     IF (RA.LE.0.99990) THEN
C       IF (RB.LE.0.85668D0) THEN
C         E3=0
C         NF=2                    ! Number of photons to be simulated in the
disintegration
C         ELSE
C           E1=0
C           E2=0
C           NF=1                    ! Only one photon is emitted
C         ENDIF
C       ELSE
C         E1=0
C         E3=0
C         NF=1                    ! Only one photon is emitted
C       ENDIF
C     END

```

Σχήμα 4.8 : Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης ^{57}Co .

```

C *****
C                               SUBROUTINE SUBISOTOPECS134
C *****
C   SUBROUTINE SUBISOTOPECS134 (RA,NF,E1,E2,E3,E4)
C
C   This subroutine reads one random number, simulates a decay scheme
C   and gives the number of photons emitted and their energies
C   respectively.
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER*4 (I-N)
C
C   EXTERNAL RAND
C   RB=RAND(2.0D0)
C   RC=RAND(3.0D0)
C   RD=RAND(4.0D0)
C
C   NF=0
C   E1=326.59*1000.0D0 ! The energy of the 1st photon of Cs-134.
C   E2=569.31*1000.0D0 ! The energy of the 2nd photon of Cs-134.
C   E3=801.93*1000.0D0 ! The energy of the 3rd photon of Cs-134.
C   E4=1365.16*1000.0D0 ! The energy of the 4th photon of Cs-134.
C   E5=242.72*1000.0D0 ! The energy of the 5th photon of Cs-134.
C   E6=475.34*1000.0D0 ! The energy of the 6th photon of Cs-134.
C   E7=1038.57*1000.0D0 ! The energy of the 7th photon of Cs-134.
C   E8=795.85*1000.0D0 ! The energy of the 8th photon of Cs-134.
C   E9=563.23*1000.0D0 ! The energy of the 9th photon of Cs-134.
C   E10=1167.92*1000.0D0 ! The energy of the 10th photon of Cs-134.
C   E11=604.69*1000.0D0 ! The energy of the 11th photon of Cs-134.
C
C   IF(RA.LE.0.2721)THEN
C     IF(RB.LE.0.0005D0)THEN
C       E1=326.59*1000.0D0
C       IF(RC.LE.0.00836D0)THEN
C         E2=242.72*1000.0D0
C         E3=795.85*1000.0D0
C         E4=604.69*1000.0D0
C         NF=4 ! Number of photons to be simulated in the
C             disintegration.
C       ELSEIF((RC.GT.0.00836D0).AND.(RC.LE.0.6055D0))THEN
C         E2=475.34*1000.0D0
C         IF(RD.LE.0.08238D0)THEN
C           E3=563.23*1000.0D0
C           E4=604.69*1000.0D0
C           NF=4 ! Number of photons to be simulated in the
C               disintegration.
C         ELSE
C           E3=1167.92*1000.0D0
C           E4=0
C           NF=3 ! Number of photons to be simulated in the
C               disintegration.
C         ENDIF
C       ELSE
C         E2=1038.57*1000.0D0
C         E3=604.69*1000.0D0
C         E4=0
C         NF=3 ! Number of photons to be simulated in the
C               disintegration.
C       ENDIF
C     ELSEIF((RB.GT.0.0005D0).AND.(RB.LE.0.568D0))THEN
C       E1=569.31*1000.0D0
C       E2=795.85*1000.0D0
C       E3=604.69*1000.0D0
C       E4=0
C       NF=3 ! Number of photons to be simulated in the
C           disintegration.

```

```

ELSEIF((RB.GT.0.568D0).AND.(RB.LE.0.888D0))THEN
  E1=801.93*1000.0D0
  IF(RD.LE.0.8238D0)THEN
    E2=563.23*1000.0D0
    E3=604.69*1000.0D0
    E4=0
    NF=3           ! Number of photons to be simulated in the
                  ! disintegration.
  ELSE
    E2=1167.92*1000.0D0
    E3=0
    E4=0
    NF=2           ! Number of photons to be simulated in the
                  ! disintegration.
  ENDIF
ELSEIF((RA.GT.0.2721D0).AND.(RA.LE.0.29712D0))THEN
  IF(RC.LE.0.00836D0)THEN
    E1=242.72*1000.0D0
    E2=795.85*1000.0D0
    E3=604.69*1000.0D0
    E4=0
    NF=3           ! Number of photons to be simulated in the
                  ! disintegration.
  ELSEIF((RC.GT.0.00836D0).AND.(RC.LE.0.6055D0))THEN
    E1=475.34*1000.0D0
    IF(RD.LE.0.8238)THEN
      E2=563.23*1000.0D0
      E3=604.69*1000.0D0
      E4=0
      NF=3           ! Number of photons to be simulated in the
                    ! disintegration.
    ELSE
      E2=1167.92*1000.0D0
      E3=0
      E4=0
      NF=2           ! Number of photons to be simulated in the
                    ! disintegration.
    ENDIF
  ELSE
    E1=1038.57*1000.0D0
    E2=604.69*1000.0D0
    E3=0
    E4=0
    NF=2           ! Number of photons to be simulated in the
                  ! disintegration.
  ENDIF
ELSEIF((RA.GT.0.29715D0).AND.(RA.LE.0.99952D0))THEN
  E1=795.85*1000.0D0
  E2=604.69*1000.0D0
  E3=0
  E4=0
  NF=2           ! Number of photons to be simulated in the
                ! disintegration.
ELSEIF((RA.GT.0.99952D0).AND.(RA.LE.0.99992D0))THEN
  IF(RD.LE.0.8238D0)THEN
    E1=563.23*1000.0D0
    E2=604.69*1000.0D0
    E3=0
    E4=0
    NF=2           ! Number of photons to be simulated in the
                  ! disintegration.
  ELSE
    E1=1167.92*1000.0D0
    E2=0
    E3=0
    E4=0
    NF=1           ! Only one photon is emitted.
  ENDIF
ELSE
  E1=604.69*1000.0D0
  E2=0
  E3=0
  E4=0
  NF=1           ! Only one photon is emitted.
ENDIF
END

```

Σχήμα 4.10 : Υπορουτίνα σχήματος διάσπασης ^{134}Cs .

```

PROGRAM EMISSION RATE
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
EXTERNAL RAND
C
NF=0
E1=1173.24D0 !The energy of the 1st photon of Co-60.
E2=1332.508D0 !The energy of the 2nd photon of Co-60.
C1=0 !Counter of emerged photons with E1 energy.
C2=0 !Counter of emerged photons with E2 energy.
ER1=0 !Emission rate of the 1st photon.
ER2=0 !Emission rate of the 2nd photon.
C
OPEN(1, FILE='Results.DAT')
DO I=1,10000
RA=RAND(1.0D0)
NF=0
E1=1173.24D0 !The energy of the 1st photon of Co-60.
E2=1332.508D0 !The energy of the 2nd photon of Co-60.
IF (RA.LE.0.9988D0) THEN
NF=2
C1=C1+1
C2=C2+1
1111 WRITE(1,1111) NF,E1,E2
FORMAT(I1,3X,F8.3,3X,F8.3)
ELSE
NF=1
E1=0
C2=C2+1
WRITE(1,1111) NF,E1,E2
ENDIF
ENDDO
1112 WRITE(1,1112) C1,C2
FORMAT(F8.1,3X,F8.1)
ER1=C1/I
ER2=C2/I
1113 WRITE(1,1113) ER1,ER2
FORMAT(F8.5,3X,F8.3)
CLOSE(1)
STOP
END

```

Σχήμα 4.11 : Εξωτερικό πρόγραμμα ελέγχου ορθής λειτουργίας υπορουτίνας 'SUBISOTOPECo60'.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΧΡΗΣΤΗ PENMAIN.f

5.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύθηκαν οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα χρήστη PENMAIN.f, ώστε να εμπεριέχεται στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη και το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Περιγράφηκαν οι καθαρά προγραμματιστικοί έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του κώδικα ως προς αυτόν τον τομέα, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος των υπορουτινών διαγράμματος διάσπασης (παράγραφος 4.3.2.2).

Στο παρόν κεφάλαιο ο τροποποιημένος κώδικας χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ρεαλιστικών σεναρίων και παρουσιάζεται αναλυτικά ο έλεγχος των αποτελεσμάτων σε σχέση με αντίστοιχα δεδομένα από πειράματα σε γ-φασματοσκοπικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με πραγματικές πηγές. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν μόνο πηγές του ισότοπου ^{60}Co , καθώς στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. διατίθενται τέτοιες πιστοποιημένες πηγές σε διάφορες γεωμετρίες. Αρχικά, περιγράφονται οι διαθέσιμες ραδιενεργές πηγές ^{60}Co , ενώ στη συνέχεια αναλύονται τα πειράματα που διενεργήθηκαν με αυτές. Κάθε σενάριο πειράματος προσομοιώνεται με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f και τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά, όσον αφορά στις αποδόσεις φωτοκορυφής για τα δύο φωτόνια του εξεταζόμενου ισότοπου, ενέργειας 1173 keV και 1332 keV.

Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, κατά την ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας, για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενός ισότοπου που υπόκειται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης χρησιμοποιείται το πρόγραμμα TrueCoinc, για τη διόρθωση της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής (area) πριν την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση τόσο άμεσα όσο και μετά τη διόρθωση, με τα δεδομένα που εξάγονται από προσομοιώσεις με χρήση του τροποποιημένου κώδικα και του πρωτότυπου, αντίστοιχα, πραγματοποιείται ακόμη ένας έλεγχος του νέου κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, ο τροποποιημένος κώδικας οδηγεί σε αποτελέσματα ανάλογα με εκείνα του πειράματος, πριν τη διόρθωση για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Αντίστοιχα, ο πρωτότυπος κώδικας οδηγεί σε αποτελέσματα ανάλογα με εκείνα που προκύπτουν μετά τη διόρθωση των πειραματικών δεδομένων για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τέτοιων προσομοιώσεων για συγκεκριμένες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή με χρήση τόσο του νέου κώδικα όσο και του πρωτότυπου. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται μεταξύ τους με βάση τους συντελεστές διόρθωσης που προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc για κάθε μία από αυτές τις γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε. συνέβη ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό της Fukushima Daiichi, στην Ιαπωνία (Μάρτιος 2011). Το ατύχημα αυτό είχε ως συνέπεια να ανιχνευθούν στην περιοχή του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., εκτός των άλλων, ίχνη ^{134}Cs σε φίλτρα αέρα. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως πηγές όγκου και να χρησιμοποιηθούν για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f για το ισότοπο ^{134}Cs , χωρίς βέβαια να αποτελούν πιστοποιημένη πηγή. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου δίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής.

5.2 Πιστοποιημένες πηγές ^{60}Co που διατίθενται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Από τα ισότοπα για τα οποία κατασκευάστηκαν υπορουτίνες σχήματος διάσπασης, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αντίστοιχα πειραματικά μόνο το ισότοπο ^{60}Co . Η επιλογή αυτή στηρίχθηκε στο γεγονός ότι στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. διατίθενται πιστοποιημένες πηγές ^{60}Co σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες. Αυτές είναι μία σημειακή πρότυπη πηγή, καθώς και δύο πηγές όγκου. Τα χαρακτηριστικά κάθε μίας από τις πηγές αυτές αναλύονται ακολούθως.

5.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1μCi.

Η σημειακή πηγή Cobalt-60 (^{60}Co) της Αγγλικής εταιρείας 'Amersham', με χρόνο ημιζωής 5.27 χρόνια, έχει ενεργότητα 1.183μCi στην ημερομηνία αναφοράς, δηλαδή την 1η Ιανουαρίου 1981. Όπως φαίνεται στο πιστοποιητικό της πηγής, Σχήμα 5.1 στο τέλος του κεφαλαίου, το ολικό σφάλμα που συνοδεύει την τιμή της ενεργότητας της πηγής, όπως έχει εκτιμηθεί από την κατασκευάστρια εταιρεία, ανέρχεται σε $\pm 3.9\%$ (3σ). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όσον αφορά στη συγκεκριμένη πηγή, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα δύο φωτόνια ενέργειας 1173 keV και 1332 keV, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.

Με χρήση της σημειακής πηγής ^{60}Co πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. σε τέσσερις (4) γεωμετρίες :

- η πηγή τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe,
- η πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 78mm κεντρικά από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe,
- η πηγή τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa,
- η πηγή τοποθετημένη σε απόσταση και 73mm κεντρικά από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η διάταξη από Plexiglas που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη κεντρικά σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe. Για την περίπτωση κατά την οποία η πηγή τοποθετείται κεντρικά σε απόσταση 73mm από το καπάκι του ανιχνευτή XtRa, έχει χρησιμοποιηθεί ένα άδειο δοχείο όπως εκείνο της γεωμετρίας '2', οι διαστάσεις του οποίου περιγράφονται στην ακριβώς επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 5.2 : Πρότυπη σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 78mm από την ανιχνευτική διάταξη HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

5.2.2 Πηγές όγκου.

Πιστοποιημένες πηγές όγκου διατίθενται στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. σε δύο γεωμετρίες, οι οποίες έχουν τις κωδικές ονομασίες γεωμετρία '2' και '8'. Και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για κυλινδρικό δοχείο συνολικού όγκου 282cm^3 , ύψους 69mm και κυμαινόμενης διαμέτρου, κατασκευασμένο από πλαστικό υλικό πάχους 1mm. Το υλικό κατασκευής του δοχείου αυτού παρουσιάζει πολύ χαμηλή εξασθένιση για τα φωτόνια της ραδιενεργούς πηγής που εκπέμπονται από το εσωτερικό του. Το δοχείο εμφανίζει κωνικότητα η οποία περιγράφεται από τη συνάρτηση [Αναγνωστάκης Μ., 1998] :

$$R = 0.029h + 3.54 \quad (\text{Σχέση } 5.1)$$

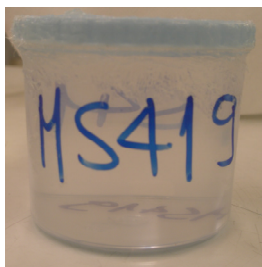
όπου h : το ύψος του δοχείου [cm] και R : η ακτίνα του στο συγκεκριμένο ύψος [cm].

Οι δύο πηγές όγκου που χρησιμοποιήθηκαν έχουν προκύψει από αραιώση πιστοποιημένης ραδιενεργού πηγής που δόθηκε στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. στα πλαίσια άσκησης διαβαθμονόμησης που διοργανώθηκε από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) το έτος 2006 (1η Ιουλίου 2006). Η πιστοποιημένη αυτή πηγή περιέχει διάφορα ισότοπα στην ενεργειακή περιοχή 59.54 keV έως 1836 keV και αποτελεί διάλυμα 2M HCl.

5.2.2.1 Πηγή όγκου γεωμετρίας '2'.

Η πρώτη γεωμετρία πηγής αντιστοιχεί σε όγκο δείγματος 282cm^3 , δηλαδή όσος και ο εκμεταλλεύσιμος όγκος του δοχείου. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια, η ενεργότητα των ισωτόπων που περιέχονται στο διάλυμα, σε gammas/sec, όπως έχει προκύψει μετά την

αραίωση, συνοδευόμενη από την αβεβαιότητά της σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Επισημαίνεται ότι οι τιμές της ενεργότητας δεν έχουν στρογγυλοποιηθεί στο σωστό αριθμό σημαντικών ψηφίων για αποφυγή εισαγωγής σφαλμάτων στους υπολογισμούς αποδόσεων φωτοκορυφών. Μεταξύ των φωτονίων που εκπέμπονται από τη συγκεκριμένη πηγή, περιέχονται και τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV και 1332 keV του ισότοπου ^{60}Co , στη μελέτη των οποίων εστιάστηκαν τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Στην Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η πρότυπη πηγή όγκου ΕΕΑΕ γεωμετρίας '2' του Ε.Π.Τ-Ε.Μ.Π. με κωδική ονομασία MS 419. Στην Σχήμα 5.4, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το πιστοποιητικό του αρχικού διαλύματος.



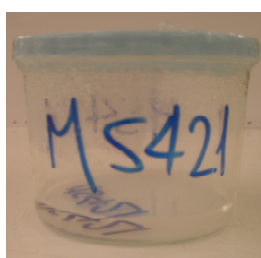
Σχήμα 5.3 : Πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2'.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ενεργότητα (gammas/sec)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ,%)
^{241}Am	59.54	225.18	3.0
^{109}Cd	88.03	317.89	3.0
^{57}Co	122.1	278.65	3.1
^{139}Ce	165.9	328.86	3.0
^{203}Hg	279.2	1030.80	3.0
^{113}Sn	391.7	1103.01	3.0
^{85}Sr	541.0	2003.72	3.0
^{137}Cs	661.6	1225.94	3.0
$^{88}\gamma$	898.0	3065.39	3.0
^{60}Co	1173	1728.11	3.0
^{60}Co	1333	1730.31	3.0
$^{88}\gamma$	1836	3241.78	3.0

Πίνακας 5.1 : Ισότοπα πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2'.

5.2.2.1 Πηγή όγκου γεωμετρίας '8'.

Η ραδιενεργός πηγή ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8' διαφέρει από τη γεωμετρία '2' ως προς τον όγκο του διαλύματος που περιέχεται εντός του δοχείου. Για τη δημιουργία της γεωμετρίας 8, το αραιωμένο διάλυμα γεμίζει το κυλινδρικό δοχείο μέχρι ύψος ίσο με ένα εκατοστό (1cm). Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια, η ενεργότητα των ισοτόπων που περιέχονται στο διάλυμα, σε gammas/sec, όπως έχει προκύψει μετά την αραιώση, καθώς και η αβεβαιότητα της τιμής αυτής σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Τονίζεται ότι ούτε και αυτές οι τιμές της ενεργότητας δίνονται με το σωστό αριθμό σημαντικών ψηφίων καθώς αποτελούν ενδιάμεσες τιμές για τον υπολογισμό αποδόσεων φωτοκορυφής. Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται η πρότυπη πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8' του Ε.Π.Τ-Ε.Μ.Π. με κωδική ονομασία MS 421.



Σχήμα 5.5 : Πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8'.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ενεργότητα (gammas/sec)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ,%)
^{241}Am	59.54	52.95	3.0
^{109}Cd	88.03	74.75	3.0
^{57}Co	122.1	65.52	3.1
^{139}Ce	165.9	77.33	3.0
^{203}Hg	279.2	242.37	3.0
^{113}Sn	391.7	259.35	3.0
^{85}Sr	541.0	471.13	3.0
^{137}Cs	661.6	288.25	3.0
^{88}Y	898.0	720.76	3.0
^{60}Co	1173	406.33	3.0
^{60}Co	1333	406.85	3.0
^{88}Y	1836	762.24	3.0

Πίνακας 5.2 : Ισότοπα πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8'.

5.3 Προσομοιώσεις ρεαλιστικών σεναρίων για τις ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f με στόχο να συγκριθούν με ρεαλιστικά πειραματικά δεδομένα. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε υπολογιστή Pentium(R) Dual-Core E6300 CPU, 2.80GHz, εγκατεστημένης μνήμης 1 GB RAM. Η διάρκεια όλων των προσομοιώσεων ήταν τόση, ώστε η αβεβαιότητα της πυκνότητας πιθανότητας για κάθε υπό μελέτη ενέργεια να είναι μικρότερη από 3%. Σε αυτοτελείς παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις προσομοιωμένες ανιχνευτικές διατάξεις HPGe και XtRa.

5.3.1 Ανιχνευτική διάταξη HPGe.

Χρησιμοποιήθηκε αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo που περιγράφει τον ανιχνευτή HPGe, το οποίο κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. βασιζόμενο σε διαστάσεις του ανιχνευτή που έχουν προκύψει τόσο από τον κατασκευαστή όσο και από προηγούμενη Δ.Ε. [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008]. Πιο συγκεκριμένα, οι διαστάσεις του ανιχνευτή οι οποίες δεν παρουσιάζονται στο πιστοποιητικό του κατασκευαστή (Πίνακας 2.1), προσδιορίστηκαν μέσω κατάλληλης μεθοδολογίας συγκρίνοντας πειραματικά δεδομένα με αποτελέσματα προσομοίωσης για πηγή όγκου. Αναλυτικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προσομοιωμένου ανιχνευτή HPGe που δεν δίνονται από τον κατασκευαστή είναι τα εξής [Δ.Ε. Βασιλοπούλου Θ., 2008] :

- πάχος dead layer : 760μm στην άνω πλευρά και 700μm περιφερειακά
- πάχος παραθύρου Al : 1.5mm
- ύψος οπής : 50mm
- διάμετρος οπής : 12mm

Σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, προσομοιώνεται το διάγραμμα διάσπασης του ραδιενεργού ισότοπου ^{60}Co το οποίο περιγράφεται από την αντίστοιχη υποροουτίνα που βρίσκεται στις βιβλιοθήκες του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f και παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.3.2.1.1. Οι προσομοιώσεις έγιναν με ενεργειακή διαμέριση 1000 καναλιών (channels), ενώ για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής λήφθηκε υπόψη το απαραίτητο πλήθος καναλιών από το αρχείο εξόδου, το οποίο προκύπτει από την παρακάτω σχέση [Karforoulous K. and Anagnostakis M., 2010] :

$$n = \frac{1.5 \times \text{FWHM}}{\text{bin width}} \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή που απαιτείται στη Σχέση 4.1, λαμβάνεται από τη συνάρτηση βαθμονόμησης εύρους ημίσειας ύψους. Για τον ανιχνευτή HPGe, είναι γνωστή η συνάρτηση βαθμονόμησης εύρους ενός δεκάτου του ύψους :

$$FW.1.M = 0.8921283 + 0.5014219 \cdot ch - 9.031341 \cdot 10^{-8} \cdot ch^2 \quad (\text{Σχέση 5.2})$$

όπου ch : είναι το κανάλι του φάσματος που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη ενέργεια και προκύπτει από την ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή :

$$E = 0.8921283 + 0.5014219 \cdot ch - 9.03 \cdot 10^{-8} \cdot ch^2 \quad (\text{Σχέση 5.3})$$

Για κατανομή Gauss είναι γνωστό πως τα δύο μεγέθη FWHM και FW.1M συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης [Debertin K and Helmer R. 1988] :

$$\frac{FW.1M}{FWHM} = 1.82 \quad (\text{Σχέση 5.4})$$

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει πως το πλήθος των καναλιών που πρέπει να συνυπολογισθεί κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είναι τρία (3) κανάλια τόσο για το φωτόνιο ενέργειας 1173 keV όσο και για το φωτόνιο ενέργειας 1332 keV του ισότοπου ^{60}Co .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις τέσσερις (4) διαφορετικές γεωμετρικές πηγής - ανιχνευτή.

5.3.1.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Προσομοιώθηκε σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο καπάκι του ανιχνευτή HPGe. Χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψαν έπειτα παρακολούθηση τόσων ιστοριών (showers) ώστε η αβεβαιότητα που συνοδεύει την πυκνότητα πιθανότητας για τα δύο φωτόνια του ^{60}Co να είναι μικρότερη από 3% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Για τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφών έγινε χρήση της Σχέσης 4.2 με συνυπολογισμό των περιεχομένων 3 καναλιών, ενώ οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν προέκυψαν μέσω της Σχέσης 4.3.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)</i>
^{60}Co	1173	0.0301	1.20
	1332	0.0267	1.23

Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co πάνω στο κάλυμμα του HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.1 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{60}Co , τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο καπάκι του ανιχνευτή HPGe. Στο φάσμα

εμφανίζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 310 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-2×511 keV),
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- αιχμή περί τα 2290 keV, η οποία οφείλεται στην ταυτόχρονη ανίχνευση του φωτονίου 1173 keV με το Compton σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1332 keV (1173 keV+1117 keV), όπως και λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης του φωτονίου 1332 keV με το Compton σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1173 keV (1332 keV+963 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

Επισημαίνεται ότι δεν εμφανίζεται στο φάσμα αιχμή στην ενέργεια (1173 - 511) keV, καθώς παρόλο που το συγκεκριμένο φωτόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το κατώφλι για την πραγματοποίηση του φαινομένου της δίδυμης γένεσης (1022 keV), η πιθανότητα πραγματοποίησης του φαινομένου αυτού παραμένει μικρή. Αντίθετα, το δεύτερο φωτόνιο του ^{60}Co έχει ενέργεια που αντιστοιχεί σε περιοχή όπου η συνεισφορά της δίδυμης γένεσης στις αλληλεπιδράσεις του φωτονίου με την ύλη δεν είναι αμελητέα. Ως εκ τούτου, εμφανίζονται στο φάσμα αιχμές που αντιστοιχούν στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 1132 keV με δίδυμη γένεση.

5.3.1.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σημειακής πηγής ^{60}Co σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe. Ο υπολογισμός των αποδόσεων φωτοκορυφής για τις ενέργειες των 1173 keV και 1332 keV προκύπτει από τη Σχέση 4.2, ενώ οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν από τη Σχέση 4.3, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.00309	1.55
	1332	0.00276	1.64

Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.2 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co , τοποθετημένη κεντρικά σε απόσταση 78mm από το καπάκι του ανιχνευτή HPGe, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές του συγκεκριμένου φάσματος :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 310 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-2×511 keV),
- αιχμή στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- ασθενής φωτοκορυφή στην ενέργεια 1994 keV, λόγω άθροισης ενός πλήρως απορροφούμενου φωτονίου του ^{60}Co και ενός φωτονίου του που αλληλεπίδρασε με δίδυμη γένεση [1173+(1332-511) ή 1332+(1173-511), δηλαδή (2505 keV-511 keV)],
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

Επισημαίνεται ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.2, είναι μεγαλύτερη από ότι η αντίστοιχη αιχμή για την περίπτωση κατά την οποία η σημειακή πηγή τοποθετείται επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe. Αυτό εξηγείται καθώς όταν η πηγή βρίσκεται σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή βρίσκεται πιο κοντά στη θωράκιση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα των φωτονίων της πηγής ^{60}Co να οπισθοσκεδασθούν.

5.3.1.3 Πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Για να είναι εφικτή η προσομοίωση πηγής όγκου γεωμετρίας '2' απαιτείται κατάλληλη τροποποίηση του πρωτότυπου κώδικα χρήστη [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006]. Στο αντίστοιχο σημείο του νέου κώδικα χρήστη PENMAIN.f, εισάγονται οι ίδιες τροποποιήσεις με τον πρωτότυπο κώδικα ώστε να μελετάται η συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής όγκου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του διαλύματος της ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2', σχετικά με τις αποδόσεις φωτοκορυφών και τις αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν για τις ενέργειες των 1173 keV και 1332 keV, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0071	1.50
	1332	0.0063	1.59

Πίνακας 5.5 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.3 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα που προέκυψε από την προσομοίωση του διαλύματος της ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές που παρατηρούνται κατά την ανάλυση του.

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 310 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-2×511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

5.3.1.4 Πηγή όγκου γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.

Σε αντιστοιχία με τα όλα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.1.3 για τη γεωμετρία '2', επειδή ο κώδικας χρήστη PENMAIN.f είναι δομημένος για προσομοίωση σημειακών πηγών, πραγματοποιείται κατάλληλη αλλαγή του τμήματος όπου υπολογίζεται το σημείο εκπομπής φωτονίων, ώστε να μπορούν να μελετηθούν και πηγές όγκου γεωμετρίας '8'.

Κατά την προσομοίωση παρακολούθηθηκαν τόσες ιστορίες (showers) ώστε η αβεβαιότητα που συνοδεύει την πυκνότητα πιθανότητας για τα δύο φωτόνια του ^{60}Co να είναι μικρότερη από 3% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Υπολογίστηκαν οι αποδόσεις των ενδιαφερόμενων φωτοκορυφών μαζί με τις

αντίστοιχες αβεβαιότητες τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.6.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)</i>
^{60}Co	1173	0.0162	1.61
	1332	0.0138	1.74

Πίνακας 5.6 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.4 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' για τον ανιχνευτή HPGe. Στο φάσμα παρουσιάζονται αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 310 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-2×511 keV),
- αιχμή στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

Παρατηρείται ότι σε όρους πυκνότητας πιθανότητας, η αθροιστική φωτοκορυφή που εμφανίζεται στην ενέργεια 2505 keV, είναι πιο έντονη στη γεωμετρία '8' σε σχέση με την αντίστοιχη αιχμή στη γεωμετρία '2'. Η αιχμή στην ενέργεια αυτή οφείλεται μόνο στην άθροιση των δύο εκπεμπόμενων φωτονίων του ^{60}Co και αποτελεί ένδειξη του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στο οποίο υπόκειται το ισότοπο. Επομένως, είναι αναμενόμενο στη γεωμετρία '8' καθώς πρόκειται για γεωμετρία μικρότερου όγκου σε σχέση με τη γεωμετρία '2', δηλαδή το ραδιενεργό διάλυμα βρίσκεται πιο κοντά στον ανιχνευτή και η σχηματιζόμενη στερεά γωνία είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης να είναι πιο έντονο.

5.3.2 Ανιχνευτική διάταξη XtRa.

Για τις προσομοιώσεις που σχετίζονται με τον ανιχνευτή XtRa χρησιμοποιήθηκε αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo, το οποίο δημιουργήθηκε σε παλαιότερη εργασία [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006], ενώ σε μεταγενέστερη εργασία το αρχείο γεωμετρίας τροποποιήθηκε ώστε να περιγράφονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του *deal layer* [Δ.Ε. Σάββα Μ., 2009]. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του διαγράμματος διάσπασης του ραδιενεργού ισότοπου ^{60}Co για τέσσερις (4) γεωμετρικές πηγής - ανιχνευτή. Οι προσομοιώσεις έγιναν με ενεργειακή διαμέριση 1000 καναλιών (channels), ενώ όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.4, για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής πρέπει να ληφθεί υπόψη το απαραίτητο πλήθος καναλιών από το αρχείο εξόδου με βάση τη Σχέση 4.1. Για τον ανιχνευτή XtRa, είναι γνωστή η συνάρτηση βαθμονόμησης εύρους ενός δεκάτου του ύψους εύρους και προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$FW.1M = 4.221486 + 1.65428 \cdot 10^{-3} \cdot ch + 3.982454 \cdot 10^{-8} \cdot ch^2 \quad (\text{Σχέση 5.5})$$

όπου *ch*: είναι το κανάλι του φάσματος που αντιστοιχεί στην εξεταζόμενη ενέργεια και προκύπτει από την ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή :

$$E = 3.818661 \cdot 10^{-4} + 0.4909674 \cdot ch - 2.6918 \cdot 10^{-8} \cdot ch^2 \quad (\text{Σχέση 5.6})$$

Προκύπτει, όπως και στην περίπτωση του ανιχνευτή HPGe, πως το πλήθος των καναλιών που πρέπει να συνυπολογισθεί κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον ανιχνευτή XtRa, είναι τρία (3) κανάλια, τόσο για το φωτόνιο ενέργειας 1173 keV, όσο και για το φωτόνιο ενέργειας 1332 keV, του ισότοπου ^{60}Co .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τέσσερις (4) διαφορετικές γεωμετρικές πηγής - ανιχνευτή.

5.3.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.

Προσομοιώθηκε η σημειακή πηγή ^{60}Co , τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa. Χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f, ενώ κατά την προσομοίωση παρακολουθήθηκε επαρκής αριθμός ιστοριών (showers) ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής να μην ξεπερνούν το 3% (1σ). Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ενώ οι αποδόσεις φωτοκορυφών υπολογίστηκαν μέσω της Σχέσης 4.2 και οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν προέκυψαν μέσω της Σχέσης 4.3, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)</i>
^{60}Co	1173	0.0513	0.51
	1332	0.0468	0.54

Πίνακας 5.7 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co πάνω στο κάλυμμα του ΧtRa.

Στο Διάγραμμα 5.5 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{60}Co , τοποθετημένης κεντρικά πάνω στο καπάκι του ανιχνευτή ΧtRa. Στο φάσμα εμφανίζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή απλής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- στην ενέργεια 1994 keV, λόγω άθροισης ενός πλήρως απορροφούμενου φωτονίου του ^{60}Co και ενός φωτονίου του που αλληλεπίδρασε με δίδυμη γένεση [1173+(1332-511) ή 1332+(1173-511)], δηλαδή (2505 keV-511 keV)],
- αιχμή στα 2290 keV, η οποία οφείλεται στην ταυτόχρονη ανίχνευση του φωτονίου 1173 keV με το Compton σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1332 keV (1173 keV+1117 keV), όπως και λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης του φωτονίου 1332 keV με το Compton σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1173 keV (1332 keV+963 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

5.3.2.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της σημειακής πηγής ^{60}Co σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa. Ο υπολογισμός των αποδόσεων φωτοκορυφής για τις ενέργειες των 1173 keV και 1332 keV, προκύπτει από τη Σχέση 4.2, ενώ οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν από τη Σχέση 4.3. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)</i>
^{60}Co	1173	0.0095	1.27
	1332	0.0081	1.36

Πίνακας 5.7 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.

Στο Διάγραμμα 5.6 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{60}Co , τοποθετημένη κεντρικά σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές του συγκεκριμένου φάσματος :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- αιχμή στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- αιχμή περί τα 2290 keV, η οποία οφείλεται στην ταυτόχρονη ανίχνευση του φωτονίου 1173 keV με το σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1117 keV που προκύπτει από το φαινόμενο Compton για το φωτόνιο των 1332 keV (1173 keV+1117 keV), όπως και λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης του φωτονίου 1332 keV με το σκεδαζόμενο φωτόνιο των 963 keV που προκύπτει από το φαινόμενο Compton για το φωτόνιο των 1173 keV (1332 keV+963 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

Επισημαίνεται ότι, όπως και στην περίπτωση του ανιχνευτή HPGe, η αιχμή οπισθοσκέδασης είναι μεγαλύτερη από ότι η αντίστοιχη αιχμή για την περίπτωση κατά την οποία η σημειακή πηγή τοποθετείται επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa. Αυτό εξηγείται καθώς όταν η πηγή τοποθετείται σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή βρίσκεται πιο κοντά στη θωράκιση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα των φωτονίων της πηγής ^{60}Co να οπισθοσκεδασθούν.

5.3.2.3 Πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Το διάγραμμα διάσπασης του ισότοπου ^{60}Co προσομοιώθηκε για επαρκή αριθμό ιστοριών ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής να μην ξεπερνούν το 3%, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη γεωμετρία '2' στον ανιχνευτή ΧtRa, όσον αφορά στις αποδόσεις φωτοκορυφών και οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν για τις ενέργειες των 1173 keV και 1332 keV, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)</i>
^{60}Co	1173	0.0165	1.44
	1332	0.0151	1.50

Πίνακας 5.9 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Στο Διάγραμμα 5.7 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα που προέκυψε από την προσομοίωση της πηγής της ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' για το ^{60}Co , ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές που παρατηρούνται :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV,
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- φωτοκορυφή στα 2290 keV, η οποία οφείλεται στην ταυτόχρονη ανίχνευση του φωτονίου 1173 keV με το σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1117 keV που προκύπτει από το φαινόμενο Compton για το φωτόνιο των 1332 keV (1173 keV+1117 keV), όπως και λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης του φωτονίου 1332 keV με το σκεδαζόμενο φωτόνιο των 963 keV που προκύπτει από το φαινόμενο Compton για το φωτόνιο των 1173 keV (1332 keV+963 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

5.3.2.4 Πηγή όγκου γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Προσομοιώθηκε πηγή όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή ΧtRa. Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ενώ οι αποδόσεις φωτοκορυφών

υπολογίστηκαν μέσω της Σχέσης 4.2 και οι αβεβαιότητες (1σ) που τις συνοδεύουν προέκυψαν με βάση τη Σχέση 4.3.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0348	1.47
	1332	0.0317	1.54

Πίνακας 5.10 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή XtRa.

Στο Διάγραμμα 5.8 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το φάσμα της προσομοίωσης της πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' για τον ανιχνευτή XtRa. Εμφανίζονται αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη, οι οποίες είναι οι εξής :

- στην ενεργειακή περιοχή 210 –215 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV,
- στην ενέργεια 310 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-2×511 keV),
- αιχμή στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 821 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1332 keV (1333 keV-511 keV),
- στην ενέργεια 963 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1173 keV,
- στην ενέργεια 1117 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1332 keV
- φωτοκορυφή 1173 keV,
- φωτοκορυφή 1332 keV,
- φωτοκορυφή στα 2290 keV, η οποία οφείλεται στην ταυτόχρονη ανίχνευση του φωτονίου 1173 keV με το σκεδαζόμενο φωτόνιο των 1117 keV που προκύπτει από το φαινόμενο Compton για το φωτόνιο των 1332 keV (1173 keV+1117 keV), όπως και λόγω της ταυτόχρονης ανίχνευσης του φωτονίου 1332 keV με το σκεδαζόμενο φωτόνιο των 963 keV που προκύπτει από το φαινόμενο Compton για το φωτόνιο των 1173 keV (1332 keV+963 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 2505 keV (1173 keV+1332 keV).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα ανάλογα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. για όλες τις γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή, και για τις δύο προαναφερθείσες ανιχνευτικές διατάξεις. Σκοπός της πραγματοποίησης των πειραμάτων αυτών είναι ο ποσοτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με χρήση τιμών που προκύπτουν από πειράματα με πιστοποιημένες ραδιενεργές πηγές ^{60}Co .

5.4 Πειράματα στις ανιχνευτικές διατάξεις του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. και σύγκριση με τα αποτελέσματα του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.

Στην παρούσα παράγραφο αναπτύσσεται η πρώτη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον ποσοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων που εξάγει ο νέος κώδικας χρήστη PENMAIN.f. Εκτελέστηκαν πειράματα στις ανιχνευτικές διατάξεις HPGe και XtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. για τις συγκεκριμένες γεωμετρίες πηγών για τις οποίες παρουσιάστηκαν προσομοιώσεις παραπάνω (παράγραφος 5.3). Δόθηκε προσοχή στην εμφάνιση και κύμανση των φωτοκορυφών 1173 keV και 1332 keV του ισότοπου ^{60}Co , καθώς και στον υπολογισμό των αποδόσεων τους και των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων.

Η σύγκριση των τιμών της απόδοσης φωτοκορυφής που προκύπτουν μέσω προσομοίωσης σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα για κάθε γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή, πραγματοποιείται με τρεις (3) διαφορετικούς τρόπους :

- μέσω ελέγχου του λόγου των δύο τιμών για την απόδοση φωτοκορυφής,
- μέσω της απόκλισης των δύο μεγεθών,
- μέσω στατιστικού ελέγχου U-Test, ο οποίος παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.4.1.

Σημειώνεται πως στην περίπτωση πειραμάτων, ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής προκύπτει από τη Σχέση 2.3, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2. Η αβεβαιότητα της πειραματικής απόδοσης, unc_{Eff} , εξαρτάται από την αβεβαιότητα της επιφάνεια φωτοκορυφής, unc_{cps} , που προκύπτει από το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα, καθώς και από την αβεβαιότητα της ενεργότητας του δείγματος, $\text{unc}_{\text{activity}}$, όπως αυτή δίνεται στο πιστοποιητικό της είναι η εξής :

$$\text{unc}_{\text{Eff}} = \sqrt{\text{unc}_{\text{cps}}^2 + \text{unc}_{\text{activity}}^2} \quad (\text{Σχέση 5.7})$$

Τονίζεται πως οι αβεβαιότητες επιφανειών φωτοκορυφής, unc_{cps} , υπολογίζονται κατά την ανάλυση του γ-φάσματος της εξεταζόμενης πηγής, με χρήση του κώδικα SPUNAL του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Επισημαίνεται ότι η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ανάλυση αυτή δίνεται σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1.65σ και επομένως πραγματοποιείται κατάλληλη αναγωγή στο 1σ [Δ.Ε. Σάββα Μ., 2009].

5.4.1 Στατιστικός έλεγχος U-Test.

Με το στατιστικό έλεγχο U-Test, ελέγχεται το κατά πόσο δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, όταν είναι γνωστές οι τιμές τους και οι αβεβαιότητές που τις συνοδεύουν. Ο στατιστικός έλεγχος στηρίζεται στη σύγκριση της μεταβλητής ελέγχου U με δεδομένη τιμή η οποία προκύπτει από την υπόθεση ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή ($\mu=0$, $\sigma=1$) και το επίπεδο εμπιστοσύνης που επιλέγεται, 95% για την παρούσα εργασία [Δ.Ε. Σάββα Μ., 2009].

Η τιμή της μεταβλητής U προκύπτει από τη σχέση :

$$U = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (\text{Σχέση 5.8})$$

όπου :

- x_1 , είναι η πρώτη συγκρινόμενη τιμή,
- x_2 , είναι η δεύτερη συγκρινόμενη τιμή,
- σ_1 και σ_2 , είναι οι απόλυτες αβεβαιότητες των τιμών x_1 και x_2 , αντίστοιχα.

Για να μην διαφέρουν στατιστικά σημαντικά οι συγκρινόμενες τιμές x_1 και x_2 , πρέπει η τιμή της μεταβλητής U να είναι μικρότερη από την τιμή 1.96, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ακόμα, εάν η τιμή του U είναι μεγαλύτερη από 2.57 (επίπεδο εμπιστοσύνης 99%), τότε οι δύο τιμές έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Για τις ενδιάμεσες τιμές της μεταβλητής U , δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των πειραματικών αποδόσεων φωτοκορυφών για τις ενέργειες 1173 keV και 1332 keV για τις τέσσερις (4) γεωμετρίες πηγής – ανιχνευτή για κάθε μία από τις χρησιμοποιούμενες ανιχνευτικές διατάξεις. Επίσης πραγματοποιείται σύγκριση των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις με χρήση του νέου κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

5.4.2 Ανιχνευτική διάταξη HPGe.

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. και γίνεται σύγκριση των εξαγόμενων δεδομένων με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων για τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις ανιχνευτή – πηγής :

- σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi , τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe,
- σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi , τοποθετημένη κεντρικά σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe,
- πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe,
- πηγή όγκου γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.

5.4.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi , τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Πραγματοποιήθηκε γ -φασματοσκοπική ανάλυση της σημειακής πηγής ^{60}Co , τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Το πείραμα εκτελέστηκε στα πλαίσια της παρούσας

Δ.Ε., την 23η Ιουνίου 2011, και το προκύπτον φάσμα έλαβε την ονομασία CO60002 (κωδικός SPUNAL 16/ 0.268). Το πείραμα διήρκησε 61325 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιώντας την τιμή της επιφάνειας φωτοκορυφής (Area) που υπολογίζεται μέσω του κώδικα SPUNAL, καθώς και της ενεργότητας της πηγής την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος, υπολογίζεται η απόδοση των φωτοκορυφών 1173 keV και 1332 keV του ισότοπου ^{60}Co για τη συγκεκριμένη διάταξη πηγής - ανιχνευτή.

Πιο αναλυτικά, για το μέγεθος 'area', καταγράφηκαν :

- 1417245 counts \pm 0.12% (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 1267262 counts \pm 0.12% (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1332keV.

Μέσω του προγράμματος RADIATION DECAY (version 3), το οποίο διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο, υπολογίστηκε η ενεργότητα της πηγής την ημέρα εκτέλεσης του πειράματος. Από το πιστοποιητικό της πρότυπης πηγής (Σχήμα 5.1) είναι γνωστή η τιμή της ραδιενέργειας (1.183 μCi) σε ημερομηνία αναφοράς 1η Ιανουαρίου 1981. Λόγω του νόμου ραδιενεργού διάσπασης, την ημέρα διεξαγωγή του πειράματος (23 Ιουνίου 2011) η ενεργότητα της πηγής ήταν 795.95 Bq, που αντιστοιχεί στο 1.82% της αρχικής ποσότητας.

Στον Πίνακα 5.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe για τις δύο ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1 σ . Οι υπολογισμοί έγιναν μέσω των Σχέσεων (2.3) και (5.7) αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1σ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.029	0.12	3.90	3.90
	1332	0.026	0.12	3.90	3.90

Πίνακας 5.11 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, σημειακής πηγής ^{60}Co 1.183 μCi , τοποθετημένη στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ενώ παράλληλα δίνεται η τιμή του λόγου της πειραματικής απόδοσης προς την αντίστοιχη απόδοση της προσομοίωσης, η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων καθώς και η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test ¹⁰
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)			
⁶⁰ Co	1173	0.029	3.90	0.0301	1.20	0.9634	-3.67%	0.926
	1332	0.026	3.90	0.0267	1.23	0.9709	-2.99%	0.657

Πίνακας 5.12 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για σημειακή πηγή ⁶⁰Co πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.12 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 3% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια 1173 keV είναι της τάξης του 4%. Επισημαίνεται ότι η τιμή του U-Test είναι μικρότερη του 1.96 και για τα δύο φωτόνια, επομένως, οι αποδόσεις, όπως αυτές υπολογίζονται από τα δεδομένα του πειραμάτων και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους.

5.4.2.2 Σημειακή πηγή ⁶⁰Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση της σημειακής πηγής ⁶⁰Co, τοποθετημένη σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Μέσω κυλινδρικής κατασκευής κατασκευασμένη από υλικό Plexiglas, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.2.1. Το πείραμα εκτελέστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. την 24η Ιουλίου 2011, το φάσμα συλλέχθηκε για 233228 δευτερόλεπτα και έλαβε την ονομασία CO60782 (κωδικός SPUNAL 16/ 0.271). Λειτουργώντας με όμοιο τρόπο, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.2.1, για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής χρειάζονται οι τιμές του μεγέθους 'area'. Το μέγεθος 'area', με βάση τα αποτελέσματα του κώδικα SPUNAL, έλαβε τις εξής τιμές :

- 560882 counts ± 0.18% (1σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 507829 counts ± 0.18% (1σ) για την φωτοκορυφή των 1332keV.

Μέσω του προγράμματος RADIATION DECAY (version 3) υπολογίζεται πως την ημέρα διεξαγωγή του πειράματος (24 Ιουλίου 2011) η ενεργότητα της πηγής είναι 787.13 Bq, που αντιστοιχεί στο 1.80% της αρχικής ποσότητας.

Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής της συγκεκριμένης γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή για τις δύο

¹⁰ Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς του λόγου και της απόκλισης των δύο εξεταζόμενων αποδόσεων καθώς και κατά την εκτέλεση του στατιστικού ελέγχου U-Test, χρησιμοποιήθηκαν όλα τα ψηφία των τιμών των αποδόσεων προσομοίωσης και πειράματος, παρόλο που στον πίνακα οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στρογγυλοποιημένες με το κατάλληλο πλήθος σημαντικών ψηφίων, όπως προβλέπεται από τη βιβλιογραφία [Σιμόπουλος Σ. 1989].

ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Οι υπολογισμοί έγιναν μέσω των Σχέσεων (2.3) και (5.7) αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1σ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0030	0.18	3.90	3.90
	1332	0.0028	0.18	3.90	3.90

Πίνακας 5.13 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, σημειακής πηγής ^{60}Co 1.183μCi, τοποθετημένη σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.14 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ενώ παράλληλα δίνεται η τιμή του λόγου της πειραματικής απόδοσης προς την απόδοση της προσομοίωσης. Επίσης, υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων, καθώς και η αντίστοιχη τιμή U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test'
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)			
^{60}Co	1173	0.0030	3.90	0.00309	1.55	0.987	·1.32%	0.313
	1332	0.0028	3.90	0.00276	1.64	1.001	0.09%	0.022

Πίνακας 5.14 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη σε απόσταση 78mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.14 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 0.1% για το φωτόνιο ενέργειας 1332 keV, ενώ για το φωτόνιο ενέργειας 1173 keV είναι της τάξης του 1.5%. Από τις τιμές του λόγου των αποδόσεων και του αποτελέσματος του U-Test, προκύπτει πως οι αποδόσεις φωτοκορυφής μέσω πειράματος και προσομοίωσης δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Ειδικά για την περίπτωση του φωτονίου 1332 keV, παρατηρείται πως η τιμή της μεταβλητής U είναι πάρα πολύ κοντά στην τιμή 0 για την οποία ισχύει ότι οι δύο συγκρινόμενες τιμές στατιστικά ταυτίζονται.

5.4.2.3 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση του μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος που είχε διατεθεί από την ΕΕΑΕ, γεωμετρίας '2' με την κωδική ονομασία MS419, τοποθετημένου πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Το πείραμα εκτελέστηκε στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., την 24η Ιουλίου 2011 ενώ το φάσμα συλλέχθηκε για 8074 δευτερόλεπτα και έλαβε την ονομασία QCYG2D2 (κωδικός SPUNAL 16/ 0.269). Όπως ειπώθηκε στην παράγραφο 5.2.2, η συγκεκριμένη πηγή

όγκου περιέχει πλήθος ραδιονουκλιδίων με διάφορους χρόνους ημιζωής. Κατά την παρούσα ανάλυση έμφαση δόθηκε στις δύο φωτοκορυφές του ισότοπου ^{60}Co . Για το μέγεθος 'area', υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα SPUNAL του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. :

- 47809 κρούσεις $\pm 0.55\%$ (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 43682 κρούσεις $\pm 0.48\%$ (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1332 keV.

Από το πιστοποιητικό της πηγής ΕΕΑΕ (2M HCl) (Σχήμα 5.4) είναι γνωστή η τιμή της συγκέντρωσης, σε όρους gammas/(sec gr), για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια της πηγής, στην ημερομηνία αναφοράς, 1η Ιουλίου 2006. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργότητας, σε όρους gammas/sec, που προέκυψαν μετά την αραίωση, ενώ μέσω του προγράμματος RADIATION DECAY (version 3) υπολογίστηκε η τιμή της ραδιενέργειας της πηγής για την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος (24 Ιουλίου 2011), ίση με 889.23 Bq.

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς των πειραματικών αποδόσεων φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, για τις δύο ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν (1 σ).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)
^{60}Co	1173	0.0066	0.55	3.00	3.05
	1332	0.0061	0.48	3.00	3.04

Πίνακας 5.15 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2', στον ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.16 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ενώ παράλληλα δίνεται η τιμή του λόγου της πειραματικής απόδοσης προς την απόδοση της προσομοίωσης και η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων. Για να διαπιστωθεί αν οι συγκρινόμενες τιμές διαφέρουν μεταξύ τους στατιστικά σημαντικά υπολογίζεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)			
^{60}Co	1173	0.0066	3.05	0.0071	1.50	0.9363	·6.81%	1.976
	1332	0.0061	3.04	0.0063	1.59	0.9664	·3.48%	1.007

Πίνακας 5.16 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.16 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 7% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV, ενώ για τα φωτόνια 1332 keV είναι της τάξης του 3.5%. Για το φωτόνιο ενέργειας 1173 keV ο στατιστικός έλεγχος μέσω του U-Test, δίνει τιμή οριακά μεγαλύτερη της αποδεκτής. Επομένως για τη συγκεκριμένη ενέργεια δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το αν οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης και πειράματος διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Εν αντιθέσει, στην περίπτωση του φωτονίου ενέργειας 1332 keV τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης μπορεί να θεωρηθεί πως δεν διαφέρουν, αφού ο λόγος των αποδόσεων τους είναι κοντά στην μονάδα, αλλά και το U-Test δίνει στατιστικά αποδεκτή διαφορά μεταξύ των δύο μεγεθών.

5.4.2.4 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.

Από την ανάλυση του μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος που είχε διατεθεί από την ΕΕΑΕ γεωμετρίας '8', στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., στον ανιχνευτή HPGe του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., συλλέχθηκε φάσμα την 24η Ιουλίου 2011 και έλαβε την ονομασία QCYG8D2 (κωδικός SPUNAL - 16/ 0.270). Η διάρκεια ανάλυσης του πειράματος ήταν 5471 δευτερόλεπτα, χρόνος κατά τον οποίο οι ενδιαφερόμενες φωτοκορυφές 1173 keV και 1332 keV του ισότοπου ^{60}Co απέκτησαν ικανοποιητική στατιστική ακρίβεια. Από τα δεδομένα του φάσματος οι καταγραφόμενες κρούσεις στη μονάδα χρόνου με την αβεβαιότητά τους είναι οι εξής :

- 17803 κρούσεις $\pm 0.91\%$ (1σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 15799 κρούσεις $\pm 0.85\%$ (1σ) για την φωτοκορυφή των 1332 keV.

Στον Πίνακα 5.17 εμφανίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe για τις δύο ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ , μέσω των σχέσεων (2.3) και (5.7) αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας ($1\sigma, \%$)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης ($1\sigma, \%$)	Αβεβαιότητα απόδοσης ($1\sigma, \%$)
^{60}Co	1173	0.0155	0.91	3.00	3.14
	1332	0.0138	0.85	3.00	3.12

Πίνακας 5.17 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8', στον ανιχνευτή HPGe.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής από την προσομοίωση. Στον Πίνακα 5.18 δίνονται οι τιμές του λόγου και της απόκλισης των αποδόσεων για τα ενδιαφερόμενα φωτόνια και τέλος δίνεται η τιμή της μεταβλητής U προκειμένου να είναι δυνατός ο στατιστικός έλεγχος των τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφής.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)			
⁶⁰ Co	1173	0.0155	3.14	0.0162	1.61	0.9627	·3.88%	1.089
	1332	0.0138	3.12	0.0138	1.74	0.9991	·0.08%	0.002

Πίνακας 5.18 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή HPGe.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.18 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 0.1% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV είναι της τάξης του 4%. Προκύπτει από τις τιμές του λόγου των αποδόσεων και του αποτελέσματος του U-Test, πως οι αποδόσεις φωτοκορυφής από το πείραμα και την προσομοίωση δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Ειδικά για την περίπτωση του φωτονίου 1332 keV, παρατηρείται πως η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής από την προσομοίωση είναι σχεδόν ταυτόσημη με την αντίστοιχη τιμή του πειράματος.

5.4.3 Ανιχνευτική διάταξη ΧtRa.

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον ανιχνευτή ΧtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. και γίνεται ποσοτική σύγκριση των εξαγόμενων δεδομένων με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων τις για τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις ανιχνευτή – πηγής :

- σημειακή πηγή ⁶⁰Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi, τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa,
- σημειακή πηγή ⁶⁰Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi, τοποθετημένη κεντρικά σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa,
- μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa,
- μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή ΧtRa.

5.4.3.1 Σημειακή πηγή ⁶⁰Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi, τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.

Πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση της σημειακής πηγής ⁶⁰Co, τοποθετημένη επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Το πείραμα εκτελέστηκε την 9η Σεπτεμβρίου 2010, διήρκεσε 244 δευτερόλεπτα και το προκύπτον φάσμα έλαβε την ονομασία CO6000A (κωδικός SPUNAL 16/ 0.33). Χρησιμοποιώντας την τιμή της επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής (area), που

υπολογίζεται μέσω του κώδικα SPUNAL, καθώς και της ενεργότητας της πηγής την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος, υπολογίζεται η απόδοση των φωτοκορυφών 1173 keV και 1332 keV του ισότοπου ^{60}Co για τη συγκεκριμένη διάταξη πηγής – ανιχνευτή, όπως έγινε και στην περίπτωση του ανιχνευτή HPGe.

Πιο αναλυτικά, για το μέγεθος 'area' καταγράφηκαν :

- 11009 counts \pm 1.09% (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 9831 counts \pm 1.09% (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1332keV.

Από το πιστοποιητικό της πρότυπης πηγής (Σχήμα 5.1) είναι γνωστή η τιμή της ραδιενέργειας (1.183 μCi) στην ημερομηνία αναφοράς, δηλαδή την 1η Ιανουαρίου 1981. Μέσω του προγράμματος RADIATION DECAY (version 3) υπολογίστηκε πως την ημέρα διεξαγωγή του πειράματος (09 Σεπτεμβρίου 2010) η ενεργότητα της πηγής ήταν 882.62 Bq, που αντιστοιχεί στο 2.02% της αρχικής ποσότητας.

Στον Πίνακα 5.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή ΧtRa για τις δύο ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1 σ . Οι υπολογισμοί έγιναν μέσω των σχέσεων (2.3) και (5.7) αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)
^{60}Co	1173	0.051	1.09	3.90	4.05
	1332	0.046	1.09	3.90	4.05

Πίνακας 5.19 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, σημειακής πηγής ^{60}Co 1.183 μCi , τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.

Στον Πίνακα 5.20 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη απόσταση σημειακής πηγής - ανιχνευτή, ενώ παράλληλα δίνεται η τιμή του λόγου της πειραματικής απόδοσης προς την απόδοση της προσομοίωσης, η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων καθώς και η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)			
^{60}Co	1173	0.051	4.05	0.0513	0.51	0.9951	-0.49%	0.121
	1332	0.046	4.05	0.0468	0.54	0.9733	-2.74%	0.670

Πίνακας 5.20 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για σημειακή πηγή ^{60}Co πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.20 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 3% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια 1173 keV είναι της τάξης του 0.5%.

Επίσης οι τιμές των λόγων των αποδόσεων φωτοκορυφής που εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα είναι πολύ κοντά στη μονάδα, ενώ η τιμή της μεταβλητής U είναι μικρότερη του 1.96 και για τα δύο φωτόνια. Προκύπτει, επομένως, ότι οι αποδόσεις δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους και άρα για τη σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa , η προσομοίωση εξάγει αποτελέσματα που δεν διαφέρουν από τα δεδομένα του αντίστοιχου πειράματος.

5.4.3.2 Σημειακή πηγή ^{60}Co ονομαστικής ραδιενέργειας 1 μCi , σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa .

Πραγματοποιήθηκε γ -φασματοσκοπική ανάλυση σημειακής πηγής ^{60}Co , τοποθετημένη σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Όπως ειπώθηκε και στην παράγραφο 5.2.1, η πηγή τοποθετείται επάνω σε ένα άδειο δοχείο γεωμετρίας '2' και έτσι βρίσκεται σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή. Το πείραμα εκτελέστηκε την 9η Σεπτεμβρίου 2010 και το προκύπτον φάσμα, με ονομασία CO6073A (κωδικός SPUNAL 16/ 0.34), συλλέχθηκε για 1360 δευτερόλεπτα. Για το μέγεθος 'area', καταγράφηκαν και υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα SPUNAL του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. :

- 10608 counts \pm 1.03% (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 9836 counts \pm 1.03% (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1332keV.

Μέσω του προγράμματος RADIATION DECAY (version 3) υπολογίστηκε πως την ημέρα διεξαγωγή του πειράματος (9 Σεπτεμβρίου 2010) η ενεργότητα της πηγής ήταν 882.62 Bq, που αντιστοιχεί στο 2.02% της αρχικής ποσότητας.

Στον Πίνακα 5.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής της συγκεκριμένης γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή για τις δύο ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν (1 σ). Οι υπολογισμοί έγιναν μέσω των σχέσεων (2.3) και (5.7), αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)
^{60}Co	1173	0.0088	1.03	3.90	4.03
	1332	0.0082	1.03	3.90	4.03

Πίνακας 5.21 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, σημειακής πηγής ^{60}Co 1.183 μCi , τοποθετημένη σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa .

Στον Πίνακα 5.22 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης για τη σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa , ενώ παράλληλα δίνεται η τιμή του λόγου της πειραματικής απόδοσης προς την απόδοση φωτοκορυφής όπως

υπολογίζεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων καθώς και η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)			
⁶⁰ Co	1173	0.0088	4.03	0.0095	1.27	0.93	·7.01%	1.646
	1332	0.0082	4.03	0.0081	1.36	1.00091	0.09%	0.021

Πίνακας 5.22 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για σημειακή πηγή ⁶⁰Co τοποθετημένη σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.22 γίνεται εμφανές ότι οι αποδόσεις αποκλίνουν κατά τάξη μεγέθους 0.1% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια 1173 keV τάξη μεγέθους 7%. Από τις τιμές του λόγου των αποδόσεων και της τιμής της μεταβλητής U, προκύπτει πως οι αποδόσεις φωτοκορυφής από το πείραμα και την προσομοίωση δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Για την περίπτωση του φωτονίου ενέργειας 1332 keV, μάλιστα οι δύο τιμές των αποδόσεων είναι σχεδόν ταυτόσημες.

5.4.3.3 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση του μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος γεωμετρίας '2' (με την κωδική ονομασία MS 419) στον ανιχνευτή XtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Το πείραμα εκτελέστηκε την 8η Σεπτεμβρίου 2010 και το προκύπτον φάσμα, με ονομασία QMS419J (κωδικός SPUNAL 16/ 0.27), συλλέχθηκε για 5122 δευτερόλεπτα. Όπως και στην περίπτωση του πειράματος με την ίδια πηγή γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις δύο φωτοκορυφές του ισότοπου ⁶⁰Co για τις οποίες σε όρους επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής καταγράφηκαν :

- 81315 κρούσεις \pm 0.36% (1σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 75532 κρούσεις \pm 0.36% (1σ) για την φωτοκορυφή των 1332keV.

Από το πιστοποιητικό της πηγής ΕΕΑΕ (2M HCl) (Σχήμα 5.4) είναι γνωστή η τιμή της συγκέντρωσης, σε όρους gammas/(sec·gr), για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια της πηγής, σε ημερομηνία αναφοράς 1η Ιουλίου 2006. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργότητας, σε όρους gammas/sec, που προέκυψαν μετά την αραίωση, ενώ μέσω του προγράμματος RADIATION DECAY (version 3) υπολογίστηκε πως την ημέρα διεξαγωγή του πειράματος η τιμή της ραδιενέργειας της πηγής ήταν 996.18 Bq.

Στον Πίνακα 5.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς της πειραματικής απόδοσης φωτοκορυφής της συγκεκριμένης γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή για τις δύο

ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1σ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1σ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
⁶⁰ Co	1173	0.0159	0.36	3.00	3.02
	1332	0.0148	0.36	3.00	3.02

Πίνακας 5.23 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Στον Πίνακα 5.24 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ενώ παράλληλα δίνεται η τιμή του λόγου της πειραματικής απόδοσης προς την απόδοση της προσομοίωσης, η ποσοστιαία απόκλιση των δύο αυτών τιμών καθώς και η τιμή της μεταβλητής U προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι συγκρινόμενες τιμές διαφέρουν μεταξύ τους στατιστικά σημαντικά.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)			
⁶⁰ Co	1173	0.0159	3.02	0.0165	1.44	0.96	-3.71%	1.099
	1332	0.0148	3.02	0.0151	1.50	0.98	-2.31%	0.683

Πίνακας 5.24 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.24 είναι εμφανές ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι τάξης 3.7% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV, ενώ για τα φωτόνια 1332 keV είναι τάξης μεγέθους 2.5%. Και στις δύο περιπτώσεις των εξεταζόμενων φωτονίων τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης μπορούν να θεωρηθούν πως δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, αφού τόσο ο λόγος των αποδόσεων τους είναι κοντά στη μονάδα, αλλά και το U-Test δίνει στατιστικά αποδεκτή διαφορά μεταξύ των δύο μεγεθών.

5.4.3.4 Μικτό ραδιενεργό παρασκεύασμα γεωμετρίας γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Από την ανάλυση του μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος γεωμετρίας '8' (με κωδική ονομασία MS 421) στον ανιχνευτή ΧtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., συλλέχθηκε φάσμα, την 8η Σεπτεμβρίου 2011, με την ονομασία QMS421G (κωδικός SPUNAL - 16/ 0.29). Η διάρκεια ανάλυσης του δείγματος ήταν 5339 δευτερόλεπτα, χρόνος κατά τον οποίο οι ενδιαφερόμενες φωτοκορυφές 1173 keV και 1332 keV του

ισοτόπου ^{60}Co , σε όρους καταγραφόμενων κρούσεων στη μονάδα του χρόνου, απέκτησαν ικανοποιητική στατιστική ακρίβεια της τάξης του 0.5 :

- 43273 κρούσεις $\pm 0.54\%$ (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1173 keV,
- 39371 κρούσεις $\pm 0.54\%$ (1 σ) για την φωτοκορυφή των 1332keV.

Η τιμή της συγκέντρωσης, σε όρους gammas/(sec gr), δίνεται στο πιστοποιητικό της πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) (Σχήμα 5.4) σε ημερομηνία αναφοράς 1η Ιουλίου 2006. Μέσω του υπολογιστικού προγράμματος RADIATION DECAY (version 3) προσδιορίζεται πως την ημέρα διεξαγωγή του πειράματος η ραδιενέργεια της πηγής ήταν 234.23 Bq. Στον Πίνακα 5.25 εμφανίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή ΧtRa για τις δύο ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες (1 σ), μέσω των σχέσεων (2.3) και (5.7), αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση πειράματος	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα συγκέντρωσης (1 σ ,%)	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)
^{60}Co	1173	0.0346	0.54	3.00	3.05
	1332	0.0314	0.54	3.00	3.05

Πίνακας 5.25 : Πειραματική απόδοση φωτοκορυφής, πηγής όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8', στον ανιχνευτή ΧtRa.

Εν συνεχεία, στον Πίνακα 5.26 παρουσιάζεται η ποσοτική σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής από την προσομοίωση. Επίσης, δίνονται οι τιμές του λόγου των δύο συγκρινόμενων μεγεθών και τα αποτελέσματα των αποκλίσεων των αποδόσεων για τα ενδιαφερόμενα φωτόνια. Τέλος, δίνεται η τιμή της μεταβλητής U, προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα εάν το πείραμα και η προσομοίωση βγάζουν αποτελέσματα που διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πείραμα		Προσομοίωση		Λόγος αποδόσεων	Απόκλιση αποδόσεων	U-Test
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1 σ ,%)			
^{60}Co	1173	0.0346	3.05	0.0348	1.47	0.9923	-0.77%	0.228
	1332	0.0314	3.05	0.0317	1.54	0.9897	-1.04%	0.303

Πίνακας 5.26 : Σύγκριση απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.26 παρατηρείται ότι η απόκλιση των αποδόσεων είναι της τάξης του 1% τόσο τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV όσο και τα φωτόνια 1173 keV. Από τις τιμές του λόγου των αποδόσεων και του αποτελέσματος του U-Test, προκύπτει πως οι αποδόσεις φωτοκορυφής από το πείραμα και την προσομοίωση δεν διαφέρουν μεταξύ τους στατιστικά σημαντικά.

Συνοψίζοντας, ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f εξάγει αποτελέσματα τα οποία στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από τα αντίστοιχα πειραματικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διαφορά είναι μικρότερη του 4%. Για όλες τις γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή που αναλύθηκαν στις παραγράφους 5.3 και 5.4, οι αποδόσεις φωτοκορυφών των φωτονίων 1173 keV και 1332 keV του ισοτόπου ^{60}Co που υπολογίστηκαν μέσω του νέου κώδικα δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά από τα αποτελέσματα των αντίστοιχων πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν δύο σενάρια. Το πρώτο είναι αυτό της σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa, όπου παρόλο που η απόκλιση των τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφής είναι της τάξης του 7% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV, ο στατιστικός έλεγχος U-test για τα φωτόνια αυτά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δύο τιμές δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Δεύτερη περίπτωση αποτελεί η πηγή όγκου της ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe, όπου η τιμή της μεταβλητής U έλαβε τιμή 1.976, οριακά μεγαλύτερη από τη μέγιστη αποδεκτή τιμή (1.96). Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο νέος κώδικας χρήστη PENMAIN.f, οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία συμφωνούν με τα αντίστοιχα πειραματικά όχι μόνο ποιοτικά – καθώς διαπιστώνεται στο φάσμα προσομοίωσης μία σειρά από φωτοκορυφές οι οποίες είναι αποτέλεσμα άθροισης – αλλά και ποσοτικά.

5.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τον πρωτότυπο και τον τροποποιημένο κώδικα PENMAIN.f.

Στις παραγράφους 5.3 και 5.4 πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από προσομοίωση μέσω του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f με αντίστοιχα πειραματικά, όσον αφορά στις αποδόσεις των φωτοκορυφών 1173 keV και 1332 keV του ραδιενεργού ισοτόπου ^{60}Co . Η σύγκριση έγινε για οκτώ (8) διαφορετικές γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή και προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f προσομοιώνει τις πειραματικές διατάξεις, εξάγοντας αποτελέσματα τα οποία αντιμετωπίζουν την επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης με τρόπο αντίστοιχο των πραγματικών διατάξεων.

Στην παρούσα παράγραφο πραγματοποιείται σύγκριση του πρωτότυπου κώδικα χρήστη με τον τροποποιημένο. Ο πρωτότυπος κώδικας PENMAIN.f δεν εμπεριέχει στη λειτουργία του την επίδραση από το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης σε αντίθεση με τον τροποποιημένο κώδικα. Σκοπός της παρούσας σύγκρισης είναι έλεγχος του λόγου των αποδόσεων που προκύπτουν από τους δύο κώδικες με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc, όπως θα αναλυθεί ακριβώς παρακάτω.

Επιλέχθηκε να προσομοιωθούν οι πιο ακραίες περιπτώσεις, όσον αφορά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, γεωμετρίες πηγής – ανιχνευτή. Με άλλα λόγια, επιλέχθηκαν από τις γεωμετρίες

που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, εκείνες που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, για τις δύο ανιχνευτικές διατάξεις:

- σημειακή πηγή τοποθετημένη στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe,
- σημειακή πηγή τοποθετημένη στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa,
- πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe,
- πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Για τις γεωμετρίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για το μεν τροποποιημένο κώδικα τα διαγράμματα διάσπασης των ισοτόπων ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs , για το δε πρωτότυπο κώδικα οι αντίστοιχες ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων των ισοτόπων αυτών. Υπολογίστηκαν οι τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφών για όλες τις περιπτώσεις και για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια και προσδιορίστηκε η τιμή του λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μέσω του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από τον πρωτότυπο κώδικα. Ο λόγος των αποδόσεων αυτών είναι μια ποσοτικοποίηση της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στην εκάστοτε γεωμετρία. Τουλάχιστον όπως αυτό προσομοιώνεται. Ο λόγος αυτό επομένως θα πρέπει να συγκρίνεται, με την τιμή του συντελεστή διόρθωσης της επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής, που έχει προκύψει για τις αντίστοιχες συνθήκες, μέσω του προγράμματος TrueCoinc (True Coincidence Correction - T.C.C.), όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 2.4.3. Στη συνέχεια, σε ανεξάρτητες παραγράφους, ανάλογα με τη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή που χρησιμοποιείται, παρατίθενται τα αποτελέσματα αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα και παρουσιάζεται η σύγκριση του λόγου τους με τους αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης T.C.C.

5.5.1 Ανιχνευτική διάταξη HPGe.

Για την ανιχνευτική διάταξη του HPGe προσομοιώθηκαν με χρήση του νέου κώδικα χρήστη PENMAIN.f τα σχήματα διάσπασης των ισοτόπων ^{60}Co , ^{88}Y και ^{134}Cs , ενώ μέσω του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f στις αντίστοιχες ενέργειες (1173 keV, 1332 keV του ισοτόπου ^{60}Co , 898 keV, 1836 keV, 2734 keV του ισοτόπου ^{88}Y , 563 keV, 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV του ισοτόπου ^{134}Cs). Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για σημειακές πηγές όσο και πηγές όγκου γεωμετρίας '2', όπως αναλύθηκε στην εισαγωγή της παρούσας παραγράφου.

Το ισότοπο ^{57}Co επιλέχθηκε να μην προσομοιωθεί για την ανιχνευτική διάταξη του HPGe, λόγω του φωτονίου χαμηλής ενέργειας 14.4 keV που εκπέμπει. Για το συγκεκριμένο ισότοπο τα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια ενέργειας 122 keV και 14.4 keV δύναται να ανιχνευτούν ταυτόχρονα και να καταγραφούν ως ένα αθροιστικό φωτόνιο ενέργειας 136 keV. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ανιχνευτική διάταξη διαθέτει παράθυρο από αλουμίνιο (Al), με αποτέλεσμα τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών, όπως αυτό των 14.4 keV, να απορροφώνται πλήρως στο παράθυρο αυτό χωρίς να υπάρχει πιθανότητα να το

διαπεράσουν και να ανιχνευτούν από τον κρύσταλλο του HPGe. Συνεπώς, στην περίπτωση ανάλυσης του ισότοπου ^{57}Co στον ανιχνευτή HPGe, δεν υπάρχει περίπτωση να υπάρξει επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στο εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα.

5.5.1.1 Συντελεστές διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc για τον ανιχνευτή HPGe.

Για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενης φωτοκορυφής μέσω του προγράμματος TrueCoinc, απαιτείται ο προσδιορισμός της καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης αιχμής πλήρους απορρόφησης (full energy peak efficiency), καθώς και ο προσδιορισμός της καμπύλης του λόγου ολικής απόδοσης προς την απόδοση φωτοκορυφής (total efficiency / peak efficiency) συναρτήσει της ενέργειας για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.4.3. Οι εν λόγω καμπύλες βαθμονόμησης για την περίπτωση της σημειακής πηγής πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe, προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., ενώ για την περίπτωση της γεωμετρίας '2' προσδιορίστηκαν σε υπό εκπόνηση διδακτορική διατριβή του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π [Καρφόπουλος Κ. υπό εκπόνηση].

Στον Πίνακα 5.27 παρουσιάζονται οι συντελεστές διόρθωσης που υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος TrueCoinc για τις υπόψη γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή. Σημειώνεται πως η σχετική αβεβαιότητα των συντελεστών διόρθωσης είναι της τάξης του 2% [Καρφόπουλος Κ. υπό εκπόνηση].

True Coincidence Corrections για την ανιχνευτική διάταξη HPGe			
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.C.C.	
		Σημειακή πηγή επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή	Γεωμετρία '2'
^{60}Co	1173	0.819	0.958
	1332	0.818	0.957
^{88}Y	898	0.817	0.960
	1836	0.823	0.956
	2734	9.425	2.455
^{134}Cs	242.7	0.650	0.906
	326.6	0.580	0.882
	475.3	0.671	0.913
	563.2	0.649	0.906
	569.3	0.651	0.906
	604.7	0.772	0.942
	795.9	0.773	0.942
	801.9	0.672	0.913
	1038.6	0.942	0.976
	1167.9	1.292	1.039
1365.2	1.460	1.076	

Πίνακας 5.27 : Συντελεστές διόρθωσης T.C.C. για την ανιχνευτική διάταξη HPGe.

5.5.1.2 Ισότοπο ^{60}Co .

Ακολούθως παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις της ανιχνευτικής διάταξης HPGe όσον αφορά σημειακή πηγή ^{60}Co , και γεωμετρία όγκου ^{60}Co . Για κάθε είδος πηγής δίνονται τα αποτελέσματα του πρωτότυπου κώδικα και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από το νέο κώδικα (παράγραφος 5.3.1.1).

5.5.1.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Για την περίπτωση σημειακής πηγής ^{60}Co τοποθετημένης πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe, τα αποτελέσματα των αποδόσεων φωτοκορυφής που προκύπτουν με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f δίνονται στον Πίνακα 5.3. Για την ίδια διάταξη πραγματοποιήθηκαν δύο (2) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ^{60}Co . Στον Πίνακα 5.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό, με βάση τα αρχεία εξόδου του πρωτότυπου κώδικα, της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe για τις δύο εξεταζόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητές τους (1σ). Οι υπολογισμοί της απόδοσης φωτοκορυφής βασίζονται στη Σχέση (3.2).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0394	1.36
	1332	0.0341	1.02

Πίνακας 5.28 : Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπο κώδικα για τα φωτόνια σημειακής πηγής ^{60}Co πάνω στο κάλυμμα του HPGe.

Στον Πίνακα 5.29 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{60}Co , μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Επιπλέον, υπολογίζεται ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής της εκάστοτε ενέργειας όπως υπολογίζεται από το νέο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή του πρωτότυπου κώδικα. Ακόμα δίνεται η αβεβαιότητα του λόγου αυτού, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ .

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0394	1.36	0.0301	1.20	0.7640	1.81
	1332	0.0341	1.02	0.0267	1.23	0.7830	1.60

Πίνακας 5.29 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα φωτόνια του ^{60}Co (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Στον Πίνακα 5.30 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.), όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc για τα δεδομένα της παρούσας γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης, ενώ τέλος, δίνεται η τιμή της μεταβλητής U προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι συγκρινόμενες τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁶⁰ Co	1173	0.764	1.81	0.819	2.00	6.72%	2.566
	1332	0.783	1.60	0.818	2.00	4.28%	1.698

Πίνακας 5.30 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.30 παρατηρείται ότι η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών είναι της τάξης του 4% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια 1173 keV είναι της τάξης του 7%. Σημειώνεται πως οι τιμές της μεταβλητής U που προκύπτουν από το στατιστικό έλεγχο U-Test είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων ($U < 1.96$) για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV ο στατιστικός έλεγχος οδηγεί σε περιοχή αβεβαιότητας και δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.

5.5.1.2.2 Πηγή όγκου ⁶⁰Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αποδόσεων φωτοκορυφής που προκύπτουν με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f για την περίπτωση πηγής όγκου ⁶⁰Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe. Παράλληλα εκτελέστηκαν δύο ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ⁶⁰Co για την εξεταζόμενη γεωμετρία '2'. Στον Πίνακα 5.31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe για τη γεωμετρία '2' και τις ενέργειες 1332 keV και 1173 keV καθώς και οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, μέσω του πρωτότυπου κώδικα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
⁶⁰ Co	1173	0.0074	2.00
	1332	0.0067	2.00

Πίνακας 5.31 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγών όγκου γεωμετρίας '2', ενέργειας 1173 keV και 1332 keV, στον ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.32 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη συγκεκριμένη γεωμετρία μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f καθώς επίσης υπολογίζεται και ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα. Τέλος, δίνονται και οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν το λόγο αυτό, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
⁶⁰ Co	1173	0.0074	2.00	0.0071	1.50	0.97	2.50
	1332	0.0067	2.00	0.0063	1.59	0.94	2.55

Πίνακας 5.32 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα φωτόνια του ⁶⁰Co (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe).

Στον Πίνακα 5.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του λόγου των αποδόσεων τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. που αντιστοιχούν για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή. Επίσης, παρατίθεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁶⁰ Co	1173	0.97	2.50	0.958	2.00	·0.85%	0.2633
	1332	0.94	2.55	0.957	2.00	1.59%	0.4944

Πίνακας 5.33 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe).

Παρατηρείται ότι η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών είναι της τάξης του 1.5% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV είναι της τάξης του 1%. Επίσης μέσω του στατιστικού ελέγχου U-Test προκύπτει το συμπέρασμα πως τα συγκρινόμενα μεγέθη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά. Συνεπώς, η τιμή του λόγου αποδόσεων του τροποποιημένου κώδικα προς τον πρωτότυπο είναι παραπλήσια με την τιμή του συντελεστή διόρθωσης που προκύπτει από το υπολογιστικό πρόγραμμα TrueCoinc, για την περίπτωση της γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή που παρουσιάστηκε στην παρούσα παράγραφο.

Και για τις δύο εξεταζόμενες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή που σχετίζονται με το ραδιενεργό ισότοπο ^{60}Co , συμπεραίνεται πως ο λόγος των αποδόσεων φωτοκορυφής μεταξύ τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα χρήστη PENMAIN.f, δεν διαφέρει περισσότερο από 7% από τους αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών που προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc.

5.5.1.3 Ισότοπο ^{88}Y .

Για το ισότοπο ^{88}Y δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια 898 keV και 1836 keV, τα οποία δύναται να ανιχνευτούν ταυτόχρονα από τη γ-φασματοσκοπική διάταξη και να αθροιστούν ως ένα ενέργειας 2734 keV. Υπενθυμίζεται πως με βάση το σχήμα διάσπασης του συγκεκριμένου ισοτόπου, υπάρχει πιθανότητα 0.64% να εκπεμφθεί και τρίτο φωτόνιο ενέργειας 2734 keV. Για το λόγο αυτό προσομοιώθηκαν με χρήση του πρωτότυπου κώδικα χρήστη PENMAIN.f σημειακές πηγές και πηγές όγκου γεωμετρίας '2' ενέργειας 898 keV, 1836 keV και 2734 keV. Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο του πρωτότυπου όσο και του νέου. Ακόμα, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα φάσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις για το ισότοπο ^{88}Y με χρήση του τροποποιημένου κώδικα, καθώς στην παράγραφο 5.3 έχουν παρουσιαστεί και σχολιαστεί μόνο διαγράμματα του ισοτόπου ^{60}Co .

5.5.1.3.1 Σημειακή πηγή ^{88}Y τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Αρχικά προσομοιώθηκε σημειακή πηγή ^{88}Y τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe. Χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψαν έπειτα από παρακολούθηση τόσων ιστοριών (shows) ώστε η αβεβαιότητα που συνοδεύει την πυκνότητα πιθανότητας για τα δύο φωτόνια του ^{88}Y να είναι μικρότερη από 2% (1σ) για τις δύο φωτοκορυφές και 5% (1σ) για την αθροιστική κορυφή. Στον Πίνακα 5.34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Για τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφών έγινε χρήση της Σχέσης 4.2, ενώ οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ , προέκυψαν μέσω της Σχέσης 4.3.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ ,%)
^{88}Y	898	0.0412	0.84
	1836	0.0219	1.12
	2734	0.1966	4.74

Πίνακας 5.34 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y πάνω στο κάλυμμα του HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.9 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe. Στο φάσμα αυτό εμφανίζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη:

- στην ενεργειακή περιοχή 200–235 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 898 keV, 1836 keV και 2734 keV,
- στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 699 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 898 keV,
- στην ενέργεια 814 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1836 keV ($1836 \text{ keV} - 2 \times 511 \text{ keV}$),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 898 keV,
- στην ενέργεια 1325 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1836 keV ($1836 \text{ keV} - 511 \text{ keV}$),
- στην ενέργεια 1612 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1836 keV,
- φωτοκορυφή 1836 keV,
- στην ενέργεια 2501 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 2734 keV
- φωτοκορυφή 2734 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 2734 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 898 keV και 1836 keV.

Για την αιχμή που εμφανίζεται στην ενέργεια 2223 keV πρέπει να αναφερθεί ότι μπορεί να προκύψει και από ταυτόχρονη άθροιση του φωτονίου ενέργειας 898 keV με το φωτόνιο μονής διαφυγής ενέργειας ($1836 - 511$) keV. Ωστόσο, η ενέργεια των 1836 keV είναι μεν μεγαλύτερη από το κατώφλι ενέργειας για το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης, αλλά η πιθανότητα να εμφανιστεί το φαινόμενο αυτό στη συγκεκριμένη ενέργεια είναι μικρή. Έτσι θεωρείται ότι η αιχμή στην ενέργεια 2223 keV οφείλεται στην περίπτωση του φωτονίου ενέργειας 2734 keV που υπόκεινται δίδυμη γένεση.

Για την ίδια διάταξη πηγής - ανιχνευτή πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ^{88}Y . Στον Πίνακα 5.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe για τις ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν (1σ), από τα δεδομένα εξόδου του πρωτότυπου κώδικα. Οι υπολογισμοί αυτοί της απόδοσης φωτοκορυφής για τον πρωτότυπο κώδικα έγιναν μέσω των σχέσεων (3.2) και (3.3) αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.0489	1.04
	1836	0.0259	1.46
	2734	0.0175	1.62

Πίνακας 5.35 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακών μονοενεργειακών πηγών 898 keV, 1836 keV και 2734 keV τοποθετημένες πάνω στο κάλυμμα του HPGe.

Στον Πίνακα 5.36 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όσον αφορά την απόδοση φωτοκορυφής για τη σημειακή πηγή ⁸⁸Υ επάνω στον ανιχνευτή HPGe, μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Παράλληλα δίνεται ο λόγος απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τον τροποποιημένο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα, συνοδευόμενος από την αντίστοιχη αβεβαιότητα (1σ).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.0489	1.04	0.0412	0.84	0.84	1.37
	1836	0.0259	1.46	0.0219	1.12	0.85	1.84
	2734	0.0175	1.62	0.1966	4.74	11.2	5.01

Πίνακας 5.36 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα για τα φωτόνια του ⁸⁸Υ (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Τέλος, στον Πίνακα 5.37 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.) που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης και παρουσιάζεται η τιμή της μεταβλητής U προκειμένου να γίνει έλεγχος U-Test.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁸⁸ Υ	898	0.8417	1.37	0.817	2.00	3.02%	1.232
	1836	0.8460	1.84	0.823	2.00	2.80%	1.015
	2734	11.2497	5.01	9.425	2.00	19.36%	3.069

Πίνακας 5.37 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με τον αντίστοιχο συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc για τα φωτόνια του ⁸⁸Υ (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.37 παρατηρείται ότι η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών είναι της τάξης του 3% για τα φωτόνια ενέργειας 898 keV, για τα φωτόνια ενέργειας 1836 keV είναι της τάξης του 2.8%, ενώ για τα φωτόνια 2734 keV είναι της τάξης του 20%. Σημειώνεται πως οι τιμές της

μεταβλητής U που προκύπτουν από το στατιστικό έλεγχο U-Test, είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων για τα φωτόνια ενέργειας 898 keV και 1836 keV, δηλαδή $U < 1.96$. Συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως τα δύο συγκρινόμενα μεγέθη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για τα συγκεκριμένα φωτόνια, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Στην περίπτωση του φωτονίου ενέργειας 2734 keV παρατηρείται πως υπάρχει σημαντική απόκλιση των μετρούμενων μεγεθών και στατιστικά σημαντική διαφορά, η οποία επιβεβαιώνεται από την τιμή της μεταβλητής U. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο πολύ χαμηλό ποσοστό εκπομπής του συγκεκριμένου φωτονίου, αλλά και στην υψηλή τιμή του συντελεστή διόρθωσης (9.42) για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης που προκύπτει από το υπολογιστικό πρόγραμμα TrueCoinc.

5.5.1.3.2 Πηγή όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου ^{88}Y προσομοιώθηκε για επαρκή αριθμό ιστοριών ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής με υψηλά ποσοστά εκπομπής (898 keV με 94.12% και 1836 keV με 99.36%) να μην ξεπερνούν το 2%, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Στον ίδιο αριθμό ιστοριών η αβεβαιότητα της απόδοσης φωτοκορυφής του φωτονίου 2734 keV είναι της τάξης του 15% (1σ) και η δυσκολία ανίχνευσης οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό εκπομπής του καθώς και στη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή¹¹ που χρησιμοποιείται. Το συγκεκριμένο φωτόνιο μπορεί να εκπεμφθεί ως πρωτογενές από τον πυρήνα του ισοτόπου ^{88}Y , αλλά και να ανιχνευθεί ως ένα αθροιστικό φωτόνιο λόγω ταυτόχρονης καταγραφής των πρωτογενών φωτονίων ενέργειας 898 keV και 1836 keV. Σημειώνεται πως έχει συνολικό ποσοστό εκπομπής του είναι 0.64%.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σχετικά με τις αποδόσεις φωτοκορυφών και τα σφάλματα που τις συνοδεύουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, για τις ενέργειες των 898 keV, 1836 keV και 2734 keV παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.38.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)</i>
^{88}Y	898	0.0083	1.44
	1836	0.0049	1.83
	2734	0.0113	15.08

Πίνακας 5.38 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.10 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα που προέκυψε κατά τη προσομοίωση της συγκεκριμένης γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή με χρήση του τροποποιημένου

¹¹ Υπενθυμίζεται πως η περίπτωση εξέτασης πηγής όγκου γεωμετρίας '2' εμφανίζει την μικρότερη επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης από τις υπάρχουσες γεωμετρίες πηγών που διαθέτει το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

κώδικα PENMAIN.f, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές που παρατηρούνται κατά την ανάλυση του.

- στην ενεργειακή περιοχή 200–235 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 898 keV, 1836 keV και 2734 keV,
- στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 699 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 898 keV,
- στην ενέργεια 814 keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1836 keV (1836 keV - 2×511 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 898 keV,
- στην ενέργεια 1325 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1836 keV (1836 keV - 511 keV),
- στην ενέργεια 1612 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1836 keV,
- φωτοκορυφή 1836 keV,
- στην ενέργεια 2223 keV, η οποία οφείλεται λόγω αιχμής μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 2734 keV (2734 keV-511 keV) και λόγω άθροισης πλήρως απορροφούμενου φωτονίου ενέργειας 898 keV και φωτονίου ενέργειας 1836 keV που αλληλεπίδρασε με δίδυμη γένεση [898+(1836-511)],
- στην ενέργεια 2501 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 2734 keV,
- φωτοκορυφή 2734 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 2734 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 898 keV και 1836 keV.

Επισημαίνεται ότι σε όρους πυκνότητας πιθανότητας, η φωτοκορυφή που εμφανίζεται στην ενέργεια 2734 keV, είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη στην περίπτωση σημειακής πηγής πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe σε σχέση με την αντίστοιχη αιχμή στη γεωμετρία '2'. Η αιχμή στην ενέργεια αυτή οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος σχετίζεται με την εκπομπή πρωτογενούς φωτονίου ενέργειας 2734 keV από τον πυρήνα του ισοτόπου ^{88}Y και ο δεύτερος οφείλεται στην άθροιση των υπολοίπων δύο εκπεμπόμενων φωτονίων του ^{88}Y , ενέργειας 898 keV και 1836 keV. Συνεπώς, το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι εντονότερο στην περίπτωση της σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 0 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή από ότι στην περίπτωση της γεωμετρίας '2'. Γεγονός που είναι αναμενόμενο, αφού η σημειακή πηγή είναι πιο κοντά στον ανιχνευτή και ως εκ τούτου και η σχηματιζόμενη στερεά γωνία μεγαλύτερη.

Παράλληλα εκτελέστηκαν τρεις (3) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισοτόπου ^{88}Y για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή. Στον Πίνακα 5.39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe για τις πηγές όγκου γεωμετρίας '2'

ενέργειας 898 keV, 1836 keV και 2734 keV καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν, και υπολογίστηκαν μέσω του πρωτότυπου κώδικα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.0087	1.20
	1836	0.0051	1.94
	2734	0.0036	1.53

Πίνακας 5.39 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγών όγκου γεωμετρίας '2', ενέργειας 898 keV, 1836 keV και 2734 keV, στον ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.40 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f καθώς υπολογίζεται και ο λόγος απόδοσης τους μαζί με τις αβεβαιότητες που το συνοδεύουν.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.0087	1.20	0.0083	1.44	0.96	1.87
	1836	0.0051	1.94	0.0049	1.83	0.95	2.67
	2734	0.0036	1.53	0.0113	15.08	3.1	15.15

Πίνακας 5.40 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ⁸⁸Υ (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe).

Στον Πίνακα 5.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αποδόσεων τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. που αντιστοιχούν για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁸⁸ Υ	898	0.9598	1.87	0.960	2.00	0.02%	0.007
	1836	0.9488	2.67	0.956	2.00	0.76%	0.228
	2734	3.1117	15.15	2.455	2.00	-26.75%	1.385

Πίνακας 5.41 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ⁸⁸Υ (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe).

Παρατηρείται, από τον Πίνακα 5.41, ότι η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών είναι τάξης του 0.02% για το φωτόνιο ενέργειας 898 keV ενώ για το φωτόνιο ενέργειας 1836 keV είναι της τάξης του 1% Επίσης, ο στατιστικός έλεγχος U-Test δίνει μία ένδειξη πως τα συγκρινόμενα μεγέθη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά. Συνεπώς η τιμή του λόγου αποδόσεων του τροποποιημένου προς τον

πρωτότυπο κώδικα PENMAIN.f, για τα φωτόνια ενέργειας 898 keV και 1836 keV είναι παραπλήσια με την τιμή του συντελεστή διόρθωσης που υπολογίζει το πρόγραμμα TrueCoinc, για την περίπτωση της γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή που παρουσιάστηκε στην παρούσα παράγραφο. Για την περίπτωση του φωτονίου ενέργειας 2734 keV, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα όσο αφορά τη σύγκριση των δύο εξεταζόμενων μεγεθών. Παρόλο που η μεταβλητή U παίρνει τιμή που υποδεικνύει πως δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διάφορα, η απόκλιση των τιμών των δύο μεγεθών είναι ιδιαίτερα υψηλή, της τάξεως του 25%.

5.5.1.4 Ισότοπο ^{134}Cs .

Για το ισότοπο ^{134}Cs μελετήθηκαν τα εκπεμπόμενα φωτόνια 563 keV, 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV. Μέσω του πρωτότυπου κώδικα χρήστη PENMAIN.f προσομοιώθηκαν σημειακές πηγές και πηγές όγκου γεωμετρίας '2' για τις ενέργειες που αναφέρθηκαν, ενώ παράλληλα μέσω του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f προσομοιώθηκε το διάγραμμα διάσπασης του ^{134}Cs για τις αντίστοιχες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή. Σημειώνεται πως κατά τη δημιουργία της υπορουτίνας που περιγράφει το διάγραμμα διάσπασης του συγκεκριμένου ισότοπου και εντάχθηκε στις βιβλιοθήκες του νέου κώδικα PENMAIN.f (παράγραφος 4.3.2.1.4), συμπεριλήφθηκαν και τα φωτόνια ενέργειας 242 keV, 326 keV και 475 keV. Επιλέχθηκε να μην συγκριθούν οι αποδόσεις φωτοκορυφών μέσω πρωτότυπου και τροποποιημένου κώδικα, για τα συγκεκριμένα φωτόνια, διότι λόγω του πολύ μικρού ποσοστού εκπομπής τους, της τάξης του 0.1%, αλλά και της χαμηλής ενέργειάς τους, δεν δύναται η διάκριση τους από το ενεργειακό υπόστρωμα που σχηματίζεται στα εξαγόμενα φάσματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

5.5.1.4.1 Σημειακή πηγή ^{134}Cs τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Προσομοιώθηκε σημειακή πηγή ^{134}Cs τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο καπάκι του ανιχνευτή HPGe. Χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f, ενώ κατά την προσομοίωση παρακολούθηθηκε επαρκής αριθμός ιστοριών (showers) ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής να βρίσκονται στο εύρος τιμών $1\pm 6\%$ (1σ). Η αβεβαιότητα της κάθε απόδοσης φωτοκορυφής εξαρτάται από το πλήθος των προσομοιούμενων φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας. Δεδομένου ότι προσομοιώνεται σχήμα διάσπασης και όχι μεμονωμένα φωτόνια, το πλήθος αυτό είναι ανάλογο των ποσοστών εκπομπής. Ως εκ τούτου, για την ίδια προσομοίωση τα πιο πιθανά να εκπεμφθούν φωτόνια έχουν χαμηλότερες αβεβαιότητες από ότι τα λιγότερα πιθανά και για το λόγο αυτό τέθηκε ως όριο για το πλήθος των προσομοιούμενων ιστοριών εύρος αβεβαιοτήτων και όχι συγκεκριμένη τιμή. Στον Πίνακα 5.42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ενώ οι

αποδόσεις φωτοκορυφών υπολογίστηκαν μέσω της Σχέσης 4.2 και οι αβεβαιότητες (1σ) που τις συνοδεύουν προέκυψαν μέσω της Σχέσης 4.3.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.0825	1.37
	569	0.0570	1.29
	604	0.0537	0.65
	795	0.0413	0.79
	801	0.0363	0.76
	1038	0.0344	5.67
	1167	0.0644	4.44
	1365	0.0493	3.97

Πίνακας 5.42 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{134}Cs πάνω στο κάλυμμα του HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.11 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{134}Cs τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο καπάκι του ανιχνευτή HPGe. Στο φάσμα εμφανίζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη:

- στην ενεργειακή περιοχή 180 –205 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 604 keV, 795 keV, και 801 keV,
- στην ενέργεια 387 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 563 keV,
- στην ενέργεια 425 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 475 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 563 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 569 keV,
- στην ενέργεια 602 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 801 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 1038 keV,
- φωτοκορυφή 1167 keV, η οποία σχηματίζεται τόσο λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1167 keV, όσο και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 563 keV και 604 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1173 keV (569 keV + 604 keV),
- φωτοκορυφή 1365 keV, η οποία σχηματίζεται τόσο λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1365 keV, όσο και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 569 keV και 795 keV και ομοίως των 801 keV και 563 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1399 keV (604keV + 795 keV),

- αθροιστική φωτοκορυφή 1407 keV (604 keV + 801 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 1642 keV, η οποία σχηματίζεται με πληθώρα συνδυαζόμενων φωτονίων [(242 keV + 604 keV + 795 keV), (475 keV + 563 keV + 604 keV), (475 keV + 1167 keV), (604 keV + 1038 keV)],
- αθροιστική φωτοκορυφή 1969 keV, η οποία σχηματίζεται με πληθώρα συνδυαζόμενων φωτονίων [(326 keV + 242 keV + 795 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 563 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 1167 keV), (569 keV + 795 keV + 604 keV), (563 keV + 604 keV + 801 keV), (801 keV + 1167 keV), (604 keV + 1365 keV)].

Για την ίδια διάταξη πραγματοποιήθηκαν οχτώ (8) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων του ισότοπου ^{134}Cs που μελετήθηκαν με τον τροποποιημένο κώδικα. Στον Πίνακα 5.43 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό, με βάση τα αρχεία εξόδου του πρωτότυπου κώδικα, της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή HPGe καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες τις συνοδεύουν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης (1 σ). Οι υπολογισμοί της απόδοσης φωτοκορυφής και της αντίστοιχης αβεβαιότητας βασίζονται στις σχέσεις (3.2) και (3.3), αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.0714	0.93
	569	0.0698	0.96
	604	0.0668	0.89
	795	0.0543	1.10
	801	0.0521	1.15
	1038	0.0430	1.15
	1167	0.0386	1.26
	1365	0.0325	1.19

Πίνακας 5.43 : Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπο κώδικα για τα εκπεμπόμενα φωτόνια σημειακής πηγής ^{134}Cs πάνω στο κάλυμμα του HPGe.

Στον ακόλουθο Πίνακα 5.44 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{134}Cs , μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Επιπλέον, υπολογίζεται ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής της εκάστοτε ενέργειας όπως προσδιορίζεται από το νέο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή του πρωτότυπου κώδικα. Ακόμα δίνεται η αβεβαιότητα του λόγου αυτού (1 σ).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
¹³⁴ Cs	563	0.0714	0.93	0.0825	1.37	1.16	1.66
	569	0.0698	0.96	0.0570	1.29	0.82	1.61
	604	0.0668	0.89	0.0537	0.65	0.805	1.10
	795	0.0543	1.10	0.0413	0.79	0.76	1.36
	801	0.0521	1.15	0.0363	0.76	0.695	1.37
	1038	0.0430	1.15	0.0344	5.67	0.80	5.79
	1167	0.0386	1.26	0.0644	4.44	1.67	4.62
	1365	0.0325	1.19	0.0493	3.97	1.52	4.14

Πίνακας 5.44 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα φωτόνια του ¹³⁴Cs (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Στον Πίνακα 5.45 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.), όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc για τα δεδομένα της παρούσας γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης, ενώ τέλος, δίνεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
¹³⁴ Cs	563	1.1556	1.66	0.650	2.00	78.05%	21.913
	569	0.8171	1.61	0.580	2.00	25.51%	8.972
	604	0.8045	1.10	0.671	2.00	4.21%	1.826
	795	0.7607	1.36	0.649	2.00	-1.59%	0.662
	801	0.6953	1.37	0.651	2.00	3.47%	1.415
	1038	0.8006	5.79	0.772	2.00	15.01%	2.828
	1167	1.6694	4.62	0.773	2.00	29.21%	4.644
	1365	1.5177	4.14	0.672	2.00	3.95%	0.832

Πίνακας 5.45 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (σημειακή πηγή ¹³⁴Cs πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Από τον Πίνακα 5.45 μπορούν να εξαχθούν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρείται πως για τα φωτόνια ενέργειας 604 keV, 795 keV, 801 keV και 1365 keV, τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό εκπομπής, η απόκλιση των τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφών τους μεταξύ τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f είναι της τάξης του 3%. Οι αντίστοιχες τιμές της μεταβλητής U, είναι εντός των αποδεκτών ορίων, με αποτέλεσμα να μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα

πως οι δύο συγκρινόμενες τιμές δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, για τα φωτόνια αυτά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις των φωτονίων ενέργειας 563 keV και 569 keV. Στο πραγματικό ενεργειακό φάσμα οι δύο φωτοκορυφές εμφανίζονται ως μία ενιαία λόγω της πολύ μικρής ενεργειακής διαφοράς τους. Παράλληλα στο φάσμα προσομοίωσης για το ισότοπο ^{134}Cs , ενδεχομένως υπάρχει επίδραση των σκεδάσεων του φωτονίου των 569 keV στις κρούσεις που καταγράφονται στα κανάλια που αντιστοιχούν στο γειτονικό φωτόνιο ενέργειας 563 keV. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας αποτελεί η αλλοίωση της πληροφορίας που απαιτείται για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής των συγκεκριμένων φωτονίων και ως εκ τούτου αναμένεται απόκλιση από τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης που προκύπτουν μέσω του προγράμματος TrueCoinc. Τέλος, για τις περιπτώσεις των φωτονίων ενέργειας 1038 keV και 1167 keV, παρατηρείται απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών της τάξης του 15% και 30% αντίστοιχα, λόγω του χαμηλού ποσοστού εκπομπής τους, μικρότερου του 2%, με αποτέλεσμα τη σημαντική στατιστική διαφορά τους.

5.5.1.4.2 Πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Η τελευταία προσομοίωση για την ανιχνευτική διάταξη HPGe, αφορά στην ανάλυση πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2'. Το διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου ^{134}Cs προσομοιώθηκε για επαρκή αριθμό ιστοριών ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν την τιμή της πυκνότητας πιθανότητας για τις εξεταζόμενες ενέργειες να μην ξεπερνά το 4% (1σ), για φωτόνια με ποσοστά εκπομπής μεγαλύτερα του 8%. Στην περίπτωση των πρωτογενών φωτονίων υψηλότερης ενέργειας, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV, οι αβεβαιότητες των τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφών, κατά το ίδιο πλήθος προσομοιούμενων ιστοριών, είναι της τάξης του 8%, γεγονός που οφείλεται στα, συγκριτικά με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα φωτόνια, χαμηλά ποσοστά εκπομπής τους, τα οποία κυμαίνονται περί το 1.5%. Στον Πίνακα 5.46 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)</i>
^{134}Cs	563	0.0180	2.82
	569	0.0140	2.40
	604	0.0112	1.05
	795	0.0086	1.28
	801	0.0088	3.95
	1038	0.0058	10.31
	1167	0.0112	8.91
	1365	0.0072	7.54

Πίνακας 5.46 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Στο Διάγραμμα 5.12, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2', που προκύπτει από το αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, μέσω του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Στο εν λόγω φάσμα εντοπίζονται οι εξής αιχμές :

- στην ενεργειακή περιοχή 180 –205 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 242 keV, 326 keV 604 keV, 795 keV και 801 keV
- στην ενέργεια 387 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 563 keV,
- στην ενέργεια 425 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 475 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 563 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 569 keV,
- στην ενέργεια 602 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 801 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 1038 keV,
- φωτοκορυφή 1167 keV, η οποία σχηματίζεται τόσο λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1167 keV όσο και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 563 keV και 604 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1173 keV (569 keV + 604 keV),
- φωτοκορυφή 1365 keV, η οποία σχηματίζεται τόσο λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1365 keV όσο και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 569 keV και 795 keV και ομοίως των 801 keV και 563 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1399 keV (604keV + 795 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 1407 keV (604 keV + 801 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 1642 keV, η οποία σχηματίζεται με πλήθος συνδυαζόμενων φωτονίων [(242 keV + 604 keV + 795 keV), (475 keV + 563 keV + 604 keV), (475 keV + 1167 keV), (604 keV + 1038 keV)],
- αθροιστική φωτοκορυφή 1969 keV, η οποία σχηματίζεται με πλήθος συνδυαζόμενων φωτονίων [(326 keV + 242 keV + 795 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 563 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 1167 keV), (569 keV + 795 keV + 604 keV), (563 keV + 604 keV + 801 keV), (801 keV + 1167 keV), (604 keV + 1365 keV)].

Σημειώνεται ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης στην περίπτωση της πηγής όγκου γεωμετρίας '2' είναι αισθητά μεγαλύτερη από ότι η αντίστοιχη αιχμή για την περίπτωση της σημειακής πηγής τοποθετημένη επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe, συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 5.11 και 5.12. Το γεγονός αυτό

είναι αναμενόμενο καθώς η πηγή όγκου γεωμετρίας '2' είναι πιο κοντά στη θωράκισή του, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα των φωτονίων της πηγής ^{134}Cs να οπισθοσκεδασθούν.

Ακολούθως, στον Πίνακα 5.47 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν για πηγές όγκου γεωμετρίας '2' με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f. Καταγράφεται η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για κάθε εξεταζόμενη ενέργεια, συνοδευόμενη από την αντίστοιχη αβεβαιότητα (1σ).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.0122	1.36
	569	0.0123	1.43
	604	0.0115	1.52
	795	0.0096	1.22
	801	0.0094	1.46
	1038	0.0080	1.37
	1167	0.0074	0.98
	1365	0.0065	1.11

Πίνακας 5.47 : Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπο κώδικα για πηγές όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.48 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη συγκεκριμένη γεωμετρία '2' μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f καθώς επίσης υπολογίζεται και ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα. Τέλος, δίνονται και οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν το λόγο αυτό, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.0122	1.36	0.0180	2.82	1.49	3.13
	569	0.0123	1.43	0.0140	2.40	1.12	2.80
	604	0.0115	1.52	0.0112	1.05	0.98	1.85
	795	0.0096	1.22	0.0086	1.28	0.90	1.77
	801	0.0094	1.46	0.0088	3.95	0.94	4.21
	1038	0.0080	1.37	0.0058	10.31	0.72	10.40
	1167	0.0074	0.98	0.0112	8.91	1.5	8.96
	1365	0.0065	1.11	0.0072	7.54	1.11	7.62

Πίνακας 5.48 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ^{134}Cs (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe).

Τέλος, στον Πίνακα 5.49 πραγματοποιείται σύγκριση των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφής (τροποποιημένου προς πρωτότυπου κώδικα) σε σχέση με τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.), όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc για τα δεδομένα της παρούσας γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
¹³⁴ Cs	563	1.4791	3.13	0.906	2.00	-63.26%	11.5314
	569	1.1175	2.80	0.906	2.00	-23.35%	5.8538
	604	0.9757	1.85	0.942	2.00	-3.58%	1.2943
	795	0.9023	1.77	0.942	2.00	4.21%	1.6073
	801	0.9391	4.21	0.913	2.00	-2.86%	0.5985
	1038	0.7212	10.40	0.976	2.00	26.10%	3.2851
	1167	1.5181	8.96	1.039	2.00	-46.11%	3.4810
	1365	1.1141	7.62	1.076	2.00	-3.54%	0.4354

Πίνακας 5.49 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (σημειακή πηγή ¹³⁴Cs πάνω στον ανιχνευτή HPGe).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.49, προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα με την περίπτωση της σημειακής πηγής ¹³⁴Cs τοποθετημένης πάνω στον ανιχνευτή HPGe, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.5.1.4.1. Συνοπτικά αναφέρεται πως για τα φωτόνια ενέργειας 604 keV, 795 keV, 801 keV και 1365 keV, με υψηλά ποσοστά εκπομπής (άνω του 3%), η απόκλιση των τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφών τους μεταξύ τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f είναι μικρότερη του 4.5%. Σε συνδυασμό με τις εντός ορίων τιμές της μεταβλητής U (U<1.96), μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα πως ο λόγος των αποδόσεων μεταξύ τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης T.C.C. δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για τα συγκεκριμένα φωτόνια. Για τα φωτόνια ενέργειας 563 keV και 569 keV, παρατηρείται πολύ μεγάλη απόκλιση των δύο συγκρινόμενων μεγεθών, άνω του 20%, καθώς και πολύ υψηλές τιμές της μεταβλητής U. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.5.1.4.1, οι συγκεκριμένες δύο φωτοκορυφές έχουν πολύ μικρή ενεργειακή διαφορά με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται δυσκολίες κατά την προσομοίωσή τους, όπως αναλύθηκε και στην περίπτωση της σημειακής πηγής ¹³⁴Cs. Ως εκ τούτου μπορεί να παρατηρηθεί απόκλιση των λόγων αποδόσεων από τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης που προκύπτουν μέσω του προγράμματος TrueCoinc. Για τα φωτόνια ενέργειας 1038 keV και 1167 keV, λόγω του χαμηλού ποσοστού εκπομπής τους, που δεν ξεπερνούν το 2%, παρατηρείται απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αποκλίσεις της γεωμετρίας σημειακής πηγής ¹³⁴Cs στον ανιχνευτή HPGe.

5.5.2 Ανιχνευτική διάταξη XtRa.

Για την ανιχνευτική διάταξη XtRa προσομοιώθηκαν με χρήση του νέου κώδικα χρήστη PENMAIN.f τα σχήματα διάσπασης των ισοτόπων ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs , ενώ μέσω του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f στις αντίστοιχες ενέργειες (1173 keV, 1332 keV του ισοτόπου ^{60}Co , 898 keV, 1836 keV, 2734 keV του ισοτόπου ^{88}Y , 14.4 keV, 1836 keV και 2734 keV του ισοτόπου ^{57}Co 563 keV, 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV του ισοτόπου ^{134}Cs). Αντίστοιχα με την περίπτωση της ανιχνευτικής διάταξης HPGe, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για σημειακές πηγές τοποθετημένες πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa και για πηγές όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται οι συντελεστές διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc για τις συνθήκες γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή που εξετάζονται. Έπειτα, ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης των συντελεστών διόρθωσης με τους λόγους αποδόσεων φωτοκορυφής που προκύπτουν από τον τροποποιημένο κώδικα προς τις αντίστοιχες τιμές του πρωτότυπου κώδικα.

5.5.2.1 Συντελεστές διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc για τον ανιχνευτή XtRa.

Οι απαιτούμενες, για τον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης, καμπύλες βαθμονόμησης για την περίπτωση της σημειακής πηγής πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa, προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.. Για την περίπτωση της γεωμετρίας '2' προσδιορίστηκαν σε υπό εκπόνηση διδακτορική διατριβή του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π [Καρφόπουλος Κ., υπό εκπόνηση]. Στον Πίνακα 5.50 παρουσιάζονται οι συντελεστές διόρθωσης που υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος TrueCoinc για τις ενδιαφερόμενες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή, ενώ σημειώνεται πως η σχετική αβεβαιότητα των συντελεστών διόρθωσης είναι της τάξης του 2% [Καρφόπουλος Κ., υπό εκπόνηση].

True Coincidence Corrections για την ανιχνευτική διάταξη ΧtRa			
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	T.C.C.	
		Σημειακή πηγή επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή	Γεωμετρία '2'
^{60}Co	1173	0.785	0.930
	1332	0.784	0.928
^{88}Y	898	0.709	0.933
	1836	0.715	0.928
	2734	2.450	4.308
^{60}Co	14.4	0.669	0.902
	122	0.982	1.000
	136	1.139	1.000
^{134}Cs	242.7	0.595	0.848
	326.6	0.521	0.812
	475.3	0.619	0.858
	563.2	0.594	0.847
	569.3	0.596	0.848
	604.7	0.733	0.905
	795.9	0.734	0.905
	801.9	0.621	0.858
	1038.6	0.936	0.967
	1167.9	1.375	1.095
1365.2	1.610	1.166	

Πίνακας 5.50 : Συντελεστές διόρθωσης T.C.C. για την ανιχνευτική διάταξη ΧtRa.

5.5.2.2 Ισότοπο ^{60}Co .

Το πρώτο ισότοπο που εξετάζεται είναι το ^{60}Co . Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρωτότυπου κώδικα και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από το νέο κώδικα όπως αναλύθηκαν στη παράγραφο 5.3.2.

5.5.2.2.1 Σημειακή πηγή ^{60}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe.

Στον Πίνακα 5.7 δίνονται τα αποτελέσματα των αποδόσεων φωτοκορυφής που προκύπτουν με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f για την περίπτωση σημειακής πηγής ^{60}Co τοποθετημένης πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa. Στη συνέχεια, με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f πραγματοποιήθηκαν δύο (2) ανεξάρτητες προσομοιώσεις, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ^{60}Co . Στον Πίνακα 5.51 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή ΧtRa, με βάση τα αρχεία εξόδου του πρωτότυπου

κώδικα, για τις δύο εξεταζόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητές τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Σημειώνεται πως οι υπολογισμοί της απόδοσης φωτοκορυφής και της αντίστοιχης αβεβαιότητας βασίζονται στις σχέσεις (3.2) και (3.2), αντίστοιχα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0640	0.86
	1332	0.0593	0.89

Πίνακας 5.51 : Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπο κώδικα για τα φωτόνια σημειακής πηγής ^{60}Co πάνω στο κάλυμμα του ΧtRa.

Ακολούθως, στον Πίνακα 5.52 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{60}Co στον ανιχνευτή ΧtRa, μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Υπολογίζεται ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής της εκάστοτε ενέργειας όπως προσδιορίζεται από τον τροποποιημένο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή του πρωτότυπου κώδικα. Ακόμα δίνεται η αβεβαιότητα του λόγου αυτού, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0640	0.86	0.0513	0.51	0.8025	1.00
	1332	0.0593	0.89	0.0468	0.54	0.794	1.04

Πίνακας 5.52 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα φωτόνια του ^{60}Co (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή ΧtRa).

Τέλος, στον Πίνακα 5.53 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.), όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc για τα δεδομένα της παρούσας απόστασης πηγής – ανιχνευτή. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης, ενώ ακόμα δίνεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
^{60}Co	1173	0.8025	1.00	0.785	2.00	-2.23%	0.992
	1332	0.7904	1.04	0.784	2.00	-0.81%	0.359

Πίνακας 5.53 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή ΧtRa).

Παρατηρείται ότι η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών είναι της τάξης του 1% για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV, ενώ για τα φωτόνια 1173 keV είναι της τάξης του 2.5%. Σημειώνεται πως οι τιμές της

μεταβλητής U που προκύπτουν από το στατιστικό έλεγχο U-Test είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων ($U < 1.96$). Συνεπώς, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως τα δύο συγκρινόμενα μεγέθη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

5.5.2.2 Πηγή όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Στον Πίνακα 5.9 της παραγράφου 5.3.2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αποδόσεων φωτοκορυφής που προκύπτουν με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f για την περίπτωση πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa. Εκτελέστηκαν, στη συνέχεια, δύο (2) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ^{60}Co για την εξεταζόμενη γεωμετρία '2'. Στον Πίνακα 5.54 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφής του ανιχνευτή ΧtRa για τη γεωμετρία '2' και τις ενέργειες 1332 keV και 1173 keV καθώς και οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ , μέσω του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f (σχέσεις (3.2) και (3.3), αντίστοιχα).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0178	0.94
	1332	0.0168	1.03

Πίνακας 5.54 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγών όγκου γεωμετρίας '2', ενέργειας 1173 keV και 1332 keV, στον ανιχνευτή ΧtRa.

Στον Πίνακα 5.55 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για γεωμετρία '2', μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f καθώς επίσης υπολογίζεται και ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα. Τέλος, δίνονται και οι αβεβαιότητες (1σ) που συνοδεύουν το λόγο αυτό.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
^{60}Co	1173	0.0178	0.94	0.0165	1.44	0.93	1.72
	1332	0.0168	1.03	0.0151	1.50	0.90	1.82

Πίνακας 5.55 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα φωτόνια του ^{60}Co (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧtRa).

Στον Πίνακα 5.56 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του λόγου των αποδόσεων τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή. Επίσης, παρατίθεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁶⁰ Co	1173	0.9287	1.72	0.930	2.00	0.14%	0.054
	1332	0.8996	1.82	0.928	2.00	3.06%	1.147

Πίνακας 5.56 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa).

Παρατηρείται ότι η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών είναι της τάξης του 0.1% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV, ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 1332 keV είναι της τάξης του 3%. Επίσης μέσω του στατιστικού ελέγχου U-Test προκύπτει το συμπέρασμα πως τα συγκρινόμενα μεγέθη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά.

5.5.2.3 Ισότοπο ⁸⁸Y.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.5.1.3. για το ισότοπο ⁸⁸Y μελετήθηκε η συμπεριφορά των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων ενέργειας 898 keV και 1836 keV, τα οποία μπορεί να ανιχνευτούν ταυτόχρονα από τη γ-φασματοσκοπική διάταξη και να αθροιστούν ως ένα ενέργειας 2734 keV. Επίσης υπάρχει περίπτωση με συνολικό ποσοστό εκπομπής 0.64% να εκπεμφθεί πρωτογενές φωτόνιο ενέργειας 2734 keV. Με χρήση του τροποποιημένου κώδικα προσομοιώθηκε το διάγραμμα διάσπασης του ισότοπου ⁸⁸Y, ενώ με χρήση του πρωτότυπου κώδικα χρήστη PENMAIN.f προσομοιώθηκαν σημειακές πηγές και πηγές όγκου γεωμετρίας '2' ενέργειας 898 keV, 1836 keV και 2734 keV. Στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο του πρωτότυπου όσο και του νέου κώδικα. Τέλος, παρατίθενται τα ενεργειακά φάσματα που έχουν προκύψει από τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις, ενώ σχολιάζεται η μορφή τους και οι εμφανιζόμενες αιχμές.

5.5.2.3.1 Σημειακή πηγή ⁸⁸Y τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.

Αρχικά προσομοιώθηκε σημειακή πηγή ⁸⁸Y, η οποία τοποθετήθηκε σε απόσταση 0 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, προέκυψαν έπειτα από παρακολούθηση τόσων ιστοριών (showers) ώστε η

αβεβαιότητα που συνοδεύει την πυκνότητα πιθανότητας να είναι μικρότερη από 2.5% (1σ) για όλες τις φωτοκορυφές που οφείλονται στα πρωτογενή εκπεμπόμενα φωτόνια του συγκεκριμένου ισότοπου. Στον Πίνακα 5.57 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ενώ για τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφών έγινε χρήση της Σχέσης 4.2, και για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων (1σ) που τις συνοδεύουν έγινε χρήση της Σχέσης 4.3.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)</i>
^{88}Y	898	0.0628	0.59
	1836	0.0336	0.75
	2734	0.089	2.43

Πίνακας 5.57 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y πάνω στο κάλυμμα του ΧtRa.

Στο Διάγραμμα 5.13 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa. Στο φάσμα αυτό εμφανίζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη :

- στην ενεργειακή περιοχή 200–235 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 898 keV, 1836 keV και 2734 keV,
- στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 699 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 898 keV,
- στην ενέργεια 814keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1836 keV (1836 keV - 2×511 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 898 keV,
- στην ενέργεια 1325 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1836 keV (1836 keV - 511 keV),
- στην ενέργεια 1612 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1836 keV,
- φωτοκορυφή 1836 keV,
- στην ενέργεια 2223 keV, η οποία οφείλεται λόγω αιχμής μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 2734 keV (2734 keV-511 keV) και λόγω άθροισης πλήρως απορροφούμενου φωτονίου ενέργειας 898 keV και φωτονίου ενέργειας 1836 keV που αλληλεπιδράσε με δίδυμη γένεση [898+(1836-511)],
- στην ενέργεια 2501 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 2734 keV
- φωτοκορυφή 2734 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 2734 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 898 keV και 1836 keV.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ^{88}Y . Στον Πίνακα 5.58 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τις ενδιαφερόμενες ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν (1σ), από τα δεδομένα εξόδου του πρωτότυπου κώδικα. Οι υπολογισμοί αυτοί της απόδοσης φωτοκορυφής για τον πρωτότυπο κώδικα έγιναν μέσω της σχέσης (3.2).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης ($1\sigma, \%$)
^{88}Y	898	0.0858	0.45
	1836	0.0464	0.92
	2734	0.0344	0.81

Πίνακας 5.58 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακών μονοενεργειακών πηγών 898 keV, 1836 keV και 2734 keV τοποθετημένες πάνω στο κάλυμμα του XtRa.

Στον Πίνακα 5.59 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όσον αφορά την απόδοση φωτοκορυφής για τη σημειακή πηγή ^{88}Y επάνω στον ανιχνευτή XtRa, μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Παράλληλα δίνεται ο λόγος απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τον τροποποιημένο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα, συνοδευόμενος από την αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ .

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης ($1\sigma, \%$)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης ($1\sigma, \%$)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου ($1\sigma, \%$)
^{88}Y	898	0.0858	0.45	0.0628	0.59	0.732	0.74
	1836	0.0464	0.92	0.0336	0.75	0.725	1.19
	2734	0.0344	0.81	0.089	2.43	2.57	2.56

Πίνακας 5.59 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα για τα φωτόνια του ^{88}Y (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή XtRa).

Τέλος, στον Πίνακα 5.60 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών (T.C.C.) που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης και παρουσιάζεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁸⁸ Υ	898	0.732	0.74	0.709	2.00	-3.20%	1.497
	1836	0.725	1.19	0.715	2.00	-1.29%	0.554
	2734	2.57	2.56	2.450	2.00	-5.03%	1.499

Πίνακας 5.60 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με τον αντίστοιχο συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc για τα φωτόνια του ⁸⁸Υ (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή XtRa).

Παρατηρείται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.60, πως οι τιμές των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα αποκλίνουν λιγότερο από 5% από τις τιμές των αντίστοιχων συντελεστών διόρθωσης T.C.C. και για τις τρεις εξεταζόμενες ενέργειες. Σημειώνεται πως οι τιμές της μεταβλητής U είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων, δηλαδή $U < 1.96$. Συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως τα δύο συγκρινόμενα μεγέθη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για τα συγκεκριμένα φωτόνια, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

5.5.2.3.2 Πηγή όγκου ⁸⁸Υ γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Το διάγραμμα διάσπασης του ισότοπου ⁸⁸Υ προσομοιώθηκε για επαρκή αριθμό ιστοριών ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής να μην υπερβαίνουν το 3% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σχετικά με τις αποδόσεις φωτοκορυφών και τα σφάλματα που τις συνοδεύουν (1σ), για τις ενέργειες των 898 keV, 1836 keV και 2734 keV παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.61.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.02051	0.42
	1836	0.01192	0.53
	2734	0.045	2.71

Πίνακας 5.61 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ⁸⁸Υ γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Στο Διάγραμμα 5.14 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα που προέκυψε κατά τη προσομοίωση της συγκεκριμένης γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές που παρατηρούνται κατά την ανάλυση του.

- στην ενεργειακή περιοχή 200 –235 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 898 keV, 1836 keV και 2734 keV,
- στην ενέργεια 511 keV, λόγω ανίχνευσης τους ενός εκ των δύο φωτονίων της δίδυμης γένεσης,
- στην ενέργεια 699 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 898 keV,
- στην ενέργεια 814keV, αιχμή διπλής διαφυγής (double escape peak) του φωτονίου 1836 keV (1836 keV - 2×511 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 898 keV,
- στην ενέργεια 1325 keV, αιχμή μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 1836 keV (1836 keV - 511 keV),
- στην ενέργεια 1612 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 1836 keV,
- φωτοκορυφή 1836 keV,
- στην ενέργεια 2223 keV, η οποία οφείλεται λόγω αιχμής μονής διαφυγής (single escape peak) του φωτονίου 2734 keV (2734 keV-511 keV) και λόγω άθροισης πλήρως απορροφούμενου φωτονίου ενέργειας 898 keV και φωτονίου ενέργειας 1836 keV που αλληλεπίδρασε με δίδυμη γένεση [898+(1836-511)],
- στην ενέργεια 2501 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 2734 keV
- φωτοκορυφή 2734 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 2734 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 898 keV και 1836 keV.

Συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 5.12 και 5.13, παρατηρείται πως οι αιχμές οπισθοσκέδασης οι οποίες εμφανίζονται στην ενεργειακή περιοχή 201 keV έως 233 keV, είναι αισθητά πιο έντονες στην περίπτωση της γεωμετρίας '2' από ότι στην περίπτωση της σημειακής πηγής τοποθετημένης πάνω στον ανιχνευτή XtRa. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πηγή όγκου είναι πλησιέστερα της θωράκισης από ότι η σημειακή πηγή, με αποτέλεσμα φωτόνια όλων των εκπεμπόμενων ενεργειών του ισότοπου να σκεδάζονται στα υλικά της θωράκισης και στη συνέχεια να ανιχνεύονται από τον XtRa. Παράλληλα εκτελέστηκαν τρεις (3) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ⁸⁸Υ για την περίπτωση πηγής όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa. Στον Πίνακα 5.62 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εν λόγω προσομοιώσεων.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.0212	1.53
	1836	0.0134	1.47
	2734	0.0099	1.47

Πίνακας 5.62 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγών όγκου γεωμετρίας '2', ενέργειας 898 keV, 1836 keV και 2734 keV, στον ανιχνευτή XtRa.

Στον Πίνακα 5.63 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη γεωμετρία '2' στον ανιχνευτή XtRa, μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f καθώς υπολογίζεται και ο λόγος απόδοσης τους μαζί με τις αβεβαιότητες που τον συνοδεύουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
⁸⁸ Υ	898	0.0212	1.53	0.02051	0.42	0.97	1.59
	1836	0.0134	1.47	0.01192	0.53	0.89	1.56
	2734	0.0099	1.47	0.045	2.71	4.6	3.08

Πίνακας 5.63 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ⁸⁸Υ (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa).

Στον Πίνακα 5.64 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αποδόσεων του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα όσον αφορά στους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. που αντιστοιχούν για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁸⁸ Υ	898	0.97	1.59	0.933	2.00	-3.64%	1.407
	1836	0.89	1.56	0.928	2.00	3.96%	1.583
	2734	4.6	3.08	4.308	2.00	-6.35%	1.653

Πίνακας 5.64 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ⁸⁸Υ (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa).

Η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών δεν ξεπερνάει το 6.5% για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Επίσης, ο στατιστικός έλεγχος U-Test δίνει μία ένδειξη πως τα συγκρινόμενα μεγέθη δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά, αφού η τιμή U είναι μικρότερη της μέγιστης αποδεκτής τιμής (U<1.96), σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Συνεπώς, για την εξεταζόμενη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή, η τιμή του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής του τροποποιημένου προς τον πρωτότυπο κώδικα PENMAIN.f, για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ισότοπου ⁸⁸Υ είναι παραπλήσια με την τιμή του συντελεστή διόρθωσης που υπολογίζει το πρόγραμμα TrueCoinc.

5.5.2.4 Ισότοπο ^{57}Co .

Το ισότοπο ^{57}Co , στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., αναλύεται μόνο στην ανιχνευτική διάταξη ΧtRa. Αυτό συμβαίνει διότι σε αντίθεση με τον ανιχνευτή HPGe που διαθέτει παράθυρο από αλουμίνιο (Al), ο ανιχνευτής ΧtRa έχει παράθυρο κατασκευασμένο από ανθρακονήματα (carbon fibers), με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών όπως αυτό των 14.4 keV που εκπέμπει το ραδιενεργό ισότοπο ^{57}Co . Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για σημειακές πηγές και πηγές όγκου γεωμετρίας '2' ενεργειών 14.4 keV, 122 keV και 136 keV μέσω του πρωτότυπου κώδικα, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοίωση του διαγράμματος διάσπασης του ισότοπου ^{57}Co μέσω του τροποποιημένου κώδικα για τις ίδιες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή.

5.5.2.4.1 Σημειακή πηγή ^{57}Co τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa.

Με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f προσομοιώθηκε σημειακή πηγή ^{57}Co , η οποία τοποθετήθηκε πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, προέκυψαν έπειτα από παρακολούθηση τόσων ιστοριών (showers) ώστε η αβεβαιότητα που συνοδεύει την πυκνότητα πιθανότητας να είναι μικρότερη από 1% (1σ) για όλες τις φωτοκορυφές που οφείλονται στα πρωτογενή εκπεμπόμενα φωτόνια του συγκεκριμένου ισότοπου, δηλαδή για τις φωτοκορυφές 14.4 keV, 122 keV και 136 keV. Στον ακόλουθο Πίνακα 5.65 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ενώ για τον υπολογισμό των αποδόσεων φωτοκορυφών έγινε χρήση της Σχέσης 4.2 και για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων (1σ) που τις συνοδεύουν έγινε χρήση της Σχέσης 4.3.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)</i>
^{57}Co	14.4	0.0921	0.05
	122	0.2722	0.03
	136	0.2912	0.06

Πίνακας 5.65 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{57}Co πάνω στο κάλυμμα του ΧtRa.

Στο Διάγραμμα 5.15 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{57}Co επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa. Στο φάσμα αυτό εμφανίζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη :

- στην ενέργεια 3.4 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 14.4 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-Χ του Γερμανίου, ενέργειας 11 keV ($K\beta$) (14.4 keV - 11 keV),

- στην ενέργεια 4.6 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 14.4 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 9.8 keV (K_{α}) (14.4 keV - 9.8 keV),
- στην ενέργεια 9.8 keV, χαρακτηριστικές ακτίνες-X του Γερμανίου (K_{α}),
- στην ενέργεια 11 keV, χαρακτηριστικές ακτίνες-X του Γερμανίου (K_{α}),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 14.4 keV,
- στην ενέργεια 39.42 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 122 keV,,
- στην ενέργεια 111 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 122 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 11 keV (K_{β}) (122 keV - 11 keV),
- στην ενέργεια 112 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 122 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 9.8 keV (K_{α}) (122 keV - 9.8 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 122 keV,
- στην ενέργεια 126 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 136 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 11 keV (K_{β}) (136 keV - 11 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 136 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 136 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 14.4 keV και 122 keV.

Παρατηρείται πως είναι η πρώτη φορά που στο ενεργειακό φάσμα προσομοίωσης εμφανίζονται ευδιάκριτα αιχμές που σχετίζονται με τις ακτίνες -X που εκπέμπει το υλικό του κρυστάλλου του ανιχνευτή (γερμάνιο). Αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή διαμέριση που έχει επιλεχθεί, αφού η ενεργειακή περιοχή 0-140 keV καλύπτεται από 1000 κανάλια (channels), καθώς και από το γεγονός ότι στην περίπτωση του ^{57}Co δεν εμφανίζονται ούτε πρωτογενή αλλά ούτε αθροιστικά φωτόνια υψηλότερης ενέργειας των 140 keV. Επίσης, σημειώνεται πως αιχμές οι οποίες εμφανίζονταν στα φάσματα προσομοίωσης των υπολοίπων εξεταζόμενων ισοτόπων και σχετίζονται με το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης (αιχμές μονής και διπλής διαφυγής ή η αιχμή στην ενέργεια 511 keV) δεν εντοπίζονται στο φάσμα του ισοτόπου ^{57}Co . Η διαπίστωση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων του συγκεκριμένου ισοτόπου είναι μικρότερες από το κατώφλι ενέργειας των 1022 keV που απαιτείται για την εμφάνιση του φαινομένου της δίδυμης γένεσης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισοτόπου ^{57}Co (14.4 keV, 122 keV και 136 keV). Στον Πίνακα 5.66 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τις ενδιαφερόμενες

ενέργειες και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ, με βάση τις Σχέσεις 3.2 και 3.3.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
^{57}Co	14.4	0.1345	0.14
	122	0.2698	0.21
	136	0.2610	0.23

Πίνακας 5.66 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακών μονοενεργειακών πηγών 14.4 keV, 122 keV και 136 keV τοποθετημένες πάνω στο κάλυμμα του ΧtRa.

Στον Πίνακα 5.67 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όσον αφορά την απόδοση φωτοκορυφής για τη σημειακή πηγή ^{57}Co τοποθετημένη σε απόσταση 0 mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa, μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Ακόμα δίνεται ο λόγος απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τον τροποποιημένο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα, συνοδευόμενος από την αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
^{57}Co	14.4	0.1345	0.14	0.0921	0.05	0.685	0.15
	122	0.2698	0.21	0.2722	0.03	1.009	0.22
	136	0.2610	0.23	0.2912	0.06	1.115	0.24

Πίνακας 5.67 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα για τα φωτόνια του ^{57}Co (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή ΧtRa).

Τέλος, στον Πίνακα 5.68 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών T.C.C. που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης και παρουσιάζεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
^{57}Co	14.4	0.685	0.15	0.669	2.00	-2.40%	1.195
	122	1.009	0.22	0.982	2.00	-2.72%	1.352
	136	1.115	0.24	1.139	2.00	2.08%	1.031

Πίνακας 5.68 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με τον αντίστοιχο συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc για τα φωτόνια του ^{57}Co (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή ΧtRa).

Η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών (λόγοι απόδοσης και συντελεστές διόρθωσης T.C.C.) παρατηρείται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.68 πως είναι μικρότερες του 3% και για τις τρεις (3) εξεταζόμενες περιπτώσεις φωτονίων. Επίσης, οι τιμές της μεταβλητής U είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($U < 1.96$), με αποτέλεσμα να μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως για την εξεταζόμενη απόσταση πηγής - ανιχνευτή οι τιμές των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

5.5.2.4.2 Πηγή όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Η δεύτερη γεωμετρία που εξετάστηκε αναφορικά με το ισότοπο ^{57}Co , είναι αυτή της πηγής όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa. Το διάγραμμα διάσπασης του συγκεκριμένου ισότοπου προσομοιώθηκε για επαρκή αριθμό ιστοριών ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής να μην υπερβαίνουν το 1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σχετικά με τις αποδόσεις φωτοκορυφών και τα σφάλματα που τις συνοδεύουν (1σ), για τις ενέργειες των 14.4 keV, 122 keV και 136 keV παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.69.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)</i>
^{57}Co	14.4	0.0408	0.05
	122	0.0567	0.04
	136	0.0601	0.08

Πίνακας 5.69 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Στο Διάγραμμα 5.16 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα που προέκυψε κατά τη προσομοίωση της συγκεκριμένης γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι ευδιάκριτες αιχμές που παρατηρούνται κατά την ανάλυση του.

- στην ενέργεια 3.4 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 14.4 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 11 keV (K_{β}) (14.4 keV - 11 keV),
- στην ενέργεια 4.6 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 14.4 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 9.8 keV (K_{α}) (14.4 keV - 9.8 keV),
- στην ενέργεια 9.8 keV, χαρακτηριστικές ακτίνες-X του Γερμανίου (K_{α}),
- στην ενέργεια 11 keV, χαρακτηριστικές ακτίνες-X του Γερμανίου (K_{α}),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 14.4 keV,
- στην ενέργεια 39.42 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 122 keV,

- στην ενέργεια 111 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 122 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 11 keV (K_{β}) (122 keV - 11 keV),
- στην ενέργεια 112 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 122 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 9.8 keV (K_{α}) (122 keV - 9.8 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 122 keV,
- στην ενέργεια 126 keV, αιχμή που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτονίου ενέργειας 136 keV και την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X του Γερμανίου, ενέργειας 11 keV (K_{β}) (136 keV - 11 keV),
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 136 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 136 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 14.4 keV και 122 keV.

Παράλληλα εκτελέστηκαν τρεις (3) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου του ισότοπου ^{57}Co για την περίπτωση πηγής όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa. Στον Πίνακα 5.70 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εν λόγω προσομοιώσεων.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
^{57}Co	14.4	0.0470	1.46
	122	0.0591	0.40
	136	0.0576	0.40

Πίνακας 5.70 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγών όγκου γεωμετρίας '2', ενέργειας 14.4 keV, 122 keV και 136 keV, στον ανιχνευτή XtRa.

Στον Πίνακα 5.71 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f καθώς υπολογίζεται και ο λόγος απόδοσης φωτοκορυφής όπως προκύπτει από τον τροποποιημένο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή του πρωτότυπο κώδικα, καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες (1 σ).

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
⁵⁷ Co	14.4	0.0470	1.46	0.0408	0.05	0.87	1.46
	122	0.0591	0.40	0.0567	0.04	0.959	0.40
	136	0.0576	0.40	0.0601	0.08	1.043	0.41

Πίνακας 5.71 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ⁵⁷Co (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧiRa).

Τέλος, στον Πίνακα 5.72 συγκρίνονται οι αποδόσεις τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. που αντιστοιχούν για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
⁵⁷ Co	14.4	0.87	1.46	0.902	2.00	3.72%	1.522
	122	0.959	0.40	1.000	2.00	4.09%	2.009
	136	1.043	0.41	1.000	2.00	-4.32%	2.111

Πίνακας 5.72 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ⁵⁷Co (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧiRa).

Η απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών δεν ξεπερνάει το 4.5% για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η μεταβλητή U όμως στην περίπτωση των φωτονίων ενέργειας 122 keV και 136 keV δίνει τιμές μεγαλύτερες της αποδεκτής (1.96). Η απόκλιση αυτή ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές για το συντελεστή διόρθωσης όπως υπολογίζεται από το πρόγραμμα TrueCoinc, για τα δύο αυτά φωτόνια είναι ίσες με 1. Αυτή η ισότητα όμως δεν συμβαδίζει με το συντελεστή 0.902 για τα φωτόνια ενέργειας 14.4 keV, όπου υποδεικνύεται ότι τα φωτόνια αυτά υπόκεινται σε summing out φαινόμενο. Σε αυτή την περίπτωση, που είναι και η προσομοιούμενη, οι συντελεστές διορθώσεις θα πρέπει να υποδεικνύουν summing out φαινόμενο (T.C.C.<1) για τα φωτόνια ενέργειας 122 keV και summing in φαινόμενο (T.C.C.>1) για τα φωτόνια ενέργειας 136 keV. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της παρούσας σύγκρισης δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρως αξιόπιστα λόγω των συντελεστών που προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc.

5.5.2.5 Ισότοπο ¹³⁴Cs.

Ενεργώντας όμοια με την περίπτωση της ανιχνευτικής διάταξης HPGe, έτσι και για τον ανιχνευτή ΧiRa πραγματοποιήθηκαν ανεξάρτητες προσομοιώσεις για σημειακές πηγές και πηγές όγκου γεωμετρίας

'2' ενεργειών 563 keV, 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV, μέσω του πρωτότυπου κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Παράλληλα, προσομοιώθηκε μέσω του τροποποιημένου κώδικα το πλήρες σχήμα διάσπασης του ισότοπου ^{134}Cs για τις αντίστοιχες γεωμετρικές πηγής - ανιχνευτή. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκρίνονται οι λόγοι των αποδόσεων φωτοκορυφών μεταξύ νέου και πρωτότυπου κώδικα με τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης που προκύπτουν μέσω του προγράμματος TrueCoinc για τις ίδιες συνθήκες.

5.5.2.5.1 Σημειακή πηγή ^{134}Cs τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa.

Προσομοιώθηκε σημειακή πηγή ^{134}Cs τοποθετημένη κεντρικά πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa. Χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f, ενώ κατά την προσομοίωση παρακολούθηθηκε επαρκής αριθμός ιστοριών (showers) ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφών να βρίσκονται στο εύρος 1-3% (1σ). Στον Πίνακα 5.73 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ενώ οι αποδόσεις φωτοκορυφών υπολογίστηκαν μέσω της Σχέσης 4.2 και οι αβεβαιότητες (1σ) που τις συνοδεύουν προέκυψαν μέσω της Σχέσης 4.3.

<i>Ισότοπο</i>	<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)</i>
^{134}Cs	563	0.0886	1.12
	569	0.0725	0.93
	604	0.0750	0.35
	795	0.0603	0.42
	801	0.0540	1.39
	1038	0.061	2.94
	1167	0.083	2.15
	1365	0.093	1.86

Πίνακας 5.73 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{134}Cs πάνω στο κάλυμμα του XtRa.

Στο Διάγραμμα 5.17 στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{134}Cs στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa. Αναλύοντας το φάσμα, παρουσιάζονται οι εξής αιχμές που υπόκεινται σε διάφορους φυσικούς μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη :

- στην ενεργειακή περιοχή 180 – 205 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 604 keV, 795 keV και 801 keV,
- στην ενέργεια 387 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 563 keV,
- στην ενέργεια 425 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 475 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 563 keV,

- φωτοκορυφή στην ενέργεια 569 keV,
- στην ενέργεια 602 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 801 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 1038 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1079 keV (475 keV + 604 keV)
- φωτοκορυφή 1167 keV, η οποία σχηματίζεται τόσο λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1167 keV όσο και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 563 keV και 604 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1173 keV (569 keV + 604 keV),
- φωτοκορυφή 1365 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1365 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 569 keV και 795 keV και ομοίως των 801 keV και 563 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1399 keV (604keV + 795 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 1407 keV (604 keV + 801 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 1642 keV, η οποία σχηματίζεται με πλήθος συνδυαζόμενων φωτονίων [(242 keV + 604 keV + 795 keV), (475 keV + 563 keV + 604 keV), (475 keV + 1167 keV), (604 keV + 1038 keV)],
- αθροιστική φωτοκορυφή 1969 keV, η οποία σχηματίζεται με πλήθος συνδυαζόμενων φωτονίων [(326 keV + 242 keV + 795 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 563 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 1167 keV), (569 keV + 795 keV + 604 keV), (563 keV + 604 keV + 801 keV), (801 keV + 1167 keV), (604 keV + 1365 keV)].

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν οχτώ (8) ανεξάρτητες προσομοιώσεις με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f, μία για κάθε ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων του ισότοπου ^{134}Cs που παρουσιάζουν ενδιαφέρον ανάλυσης (563 keV, 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV). Στον Πίνακα 5.74 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή XtRa για τις ενδιαφερόμενες ενέργειες καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες τις συνοδεύουν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης (1σ). Οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται στις Σχέσεις 3.2 και 3.3.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.105	1.09
	569	0.1038	0.82
	604	0.102	0.78
	795	0.0822	0.91
	801	0.0840	0.95
	1038	0.0701	1.17
	1167	0.0644	1.21
	1365	0.0565	1.04

Πίνακας 5.74 : Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπο κώδικα για τα εκπεμπόμενα φωτόνια σημειακής πηγής ^{134}Cs πάνω στο κάλυμμα του ΧtRa.

Στον ακόλουθο Πίνακα 5.75 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της σημειακής πηγής ^{134}Cs τοποθετημένη πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή ΧtRa, μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f. Ακόμα, υπολογίζεται ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής της εκάστοτε ενέργειας όπως προσδιορίζεται από το νέο κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή του πρωτότυπου κώδικα.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.105	1.09	0.0886	1.12	0.84	1.57
	569	0.1038	0.82	0.0725	0.93	0.698	1.24
	604	0.102	0.78	0.0750	0.35	0.734	0.86
	795	0.0822	0.91	0.0603	0.42	0.734	1.01
	801	0.0840	0.95	0.0540	1.39	0.64	1.69
	1038	0.0701	1.17	0.061	2.94	0.87	3.17
	1167	0.0644	1.21	0.083	2.15	1.29	2.47
	1365	0.0565	1.04	0.093	1.86	1.65	2.13

Πίνακας 5.75 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα φωτόνια του ^{134}Cs (σημειακή πηγή πάνω στον ανιχνευτή ΧtRa).

Στον Πίνακα 5.76 δίνονται οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.), όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc για τα δεδομένα της παρούσας γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή. Υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση του λόγου αποδόσεων από τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης, ενώ τέλος, δίνεται η τιμή της μεταβλητής U.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
¹³⁴ Cs	563	0.84	1.57	0.595	2.00	-41.60%	13.928
	569	0.698	1.24	0.521	2.00	-17.19%	6.957
	604	0.734	0.86	0.619	2.00	-0.11%	0.049
	795	0.734	1.01	0.594	2.00	0.05%	0.021
	801	0.64	1.69	0.596	2.00	-3.41%	1.285
	1038	0.87	3.17	0.733	2.00	6.74%	1.890
	1167	1.29	2.47	0.734	2.00	6.07%	1.984
	1365	1.65	2.13	0.621	2.00	-2.62%	0.885

Πίνακας 5.76 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (σημειακή πηγή ¹³⁴Cs πάνω στον ανιχνευτή XtRa).

Παρατηρείται από τον Πίνακα 5.76 πως για όλα τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ισότοπου ¹³⁴Cs, εκτός των ενεργειακά γειτονικών 563 keV και 569 keV, οι τιμές της μεταβλητής U είναι εντός των αποδεκτών ορίων (U<1.96). Επίσης, οι αποκλίσεις των δύο συγκρινόμενων μεγεθών τους (λόγων απόδοσης και συντελεστών διόρθωσης T.C.C.) είναι μικρότερες από 7%. Στην περίπτωση των φωτονίων ενέργειας 563 keV και 569 keV, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.5.1.4, αναμένεται απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών λόγω της πολύ μικρής ενεργειακής διαφοράς τους, αφού ενδέχεται κρούσεις που καταγράφονται στα κανάλια που αντιστοιχούν στο φωτόνιο ενέργειας 563 keV να οφείλονται σε σκεδάξεις του ενεργειακά γειτονικού φωτονίου 569 keV.

5.5.2.5.2 Πηγή όγκου ¹³⁴Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Το διάγραμμα διάσπασης του ισότοπου ¹³⁴Cs προσομοιώθηκε για επαρκή αριθμό ιστοριών ώστε οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των αποδόσεων φωτοκορυφής να μην ξεπερνούν το 4.5% (1σ). Όπως αναλύθηκε και στην περίπτωση της διάταξης HPGe, έτσι και για τον ανιχνευτή XtRa, η προσοχή επικεντρώθηκε στα εκπεμπόμενα φωτόνια με υψηλά ποσοστά εκπομπής και ενέργειες άνω των 450 keV (563 keV, 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV). Στον Πίνακα 5.77 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση προσομοίωσης	Αβεβαιότητα προσομοίωσης (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.0388	1.33
	569	0.0320	1.09
	604	0.0242	0.44
	795	0.0210	0.53
	801	0.0193	1.69
	1038	0.0170	4.38
	1167	0.0180	3.27
	1365	0.0176	2.77

Πίνακας 5.77 : Αποτελέσματα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Στο Διάγραμμα 5.18 στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa, που προκύπτει από το αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, μέσω του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Μέσω ανάλυσης του εν λόγω φάσματος εντοπίζονται οι εξής αιχμές :

- στην ενεργειακή περιοχή 120 – 205 keV, αιχμή οπισθοσκέδασης των φωτονίων 242 keV, 326 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV και 1038 keV,
- στην ενέργεια 425 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 475 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 563 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 569 keV,
- στην ενέργεια 602 keV, αιχμή Compton του φωτονίου 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 604 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 795 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 801 keV,
- φωτοκορυφή στην ενέργεια 1038 keV,
- φωτοκορυφή 1167 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1167 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 563 keV και 604 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1173 keV (569 keV + 604 keV),
- φωτοκορυφή 1365 keV, η οποία σχηματίζεται λόγω του εκπεμπόμενου φωτονίου 1365 keV καθώς και λόγω άθροισης των διαδοχικά εκπεμπόμενων φωτονίων 569 keV και 795 keV και ομοίως των 801 keV και 563 keV,
- αθροιστική φωτοκορυφή 1399 keV (604keV + 795 keV),
- αθροιστική φωτοκορυφή 1407 keV (604 keV + 801 keV),

- αθροιστική φωτοκορυφή 1642 keV, η οποία σχηματίζεται με πλήθος συνδυαζόμενων φωτονίων [(242 keV + 604 keV + 795 keV), (475 keV + 563 keV + 604 keV), (475 keV + 1167 keV), (604 keV + 1038 keV)],
- αθροιστική φωτοκορυφή 1969 keV, η οποία σχηματίζεται με πλήθος συνδυαζόμενων φωτονίων [(326 keV + 242 keV + 795 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 563 keV + 604 keV), (326 keV + 475 keV + 1167 keV), (569 keV + 795 keV + 604 keV), (563 keV + 604 keV + 801 keV), (801 keV + 1167 keV), (604 keV + 1365 keV)].

Σημειώνεται, πως όπως και σε όλες τις άλλες περιπτώσεις πηγής όγκου γεωμετρίας '2', παρατηρείται ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης είναι αισθητά εντονότερη από ότι η αντίστοιχη αιχμή για την περίπτωση της σημειακής πηγής επάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή.

Στον Πίνακα 5.78 παραθέτονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν για πηγές όγκου γεωμετρίας '2' με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f. Καταγράφεται η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για κάθε εξεταζόμενη ενέργεια η οποία υπολογίζεται μέσω της Σχέσης 3.2, συνοδευόμενη από την αντίστοιχη αβεβαιότητα (1σ) με βάση τη Σχέση 3.3.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής πρωτότυπου PENMAIN.f	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)
^{134}Cs	563	0.0265	1.66
	569	0.0260	1.57
	604	0.0257	1.56
	795	0.0222	1.60
	801	0.0219	1.55
	1038	0.0192	1.80
	1167	0.0176	1.42
	1365	0.0159	1.42

Πίνακας 5.78 : Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπο κώδικα για πηγές όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή ΧiRa.

Στον Πίνακα 5.79 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη συγκεκριμένη γεωμετρία μέσω του πρωτότυπου και του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, καθώς επίσης υπολογίζεται ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τα αποτελέσματα του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή της απόδοσης από τον πρωτότυπο κώδικα. Τέλος, δίνονται οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν το λόγο αυτό, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Πρωτότυπος κώδικας		Νέος κώδικας		Λόγος αποδόσεων	
		Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Απόδοση	Αβεβαιότητα απόδοσης (1σ,%)	Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
¹³⁴ Cs	563	0.0265	1.66	0.0388	1.33%	1.46	2.18
	569	0.0260	1.57	0.0320	1.09%	1.23	1.91
	604	0.0257	1.56	0.0242	0.44%	0.94	1.62
	795	0.0222	1.60	0.0210	0.53%	0.95	1.69
	801	0.0219	1.55	0.0193	1.69%	0.88	2.30
	1038	0.0192	1.80	0.0170	4.38%	0.89	4.73
	1167	0.0176	1.42	0.0180	3.27%	1.03	3.57
	1365	0.0159	1.42	0.0176	2.77%	1.10	3.11

Πίνακας 5.79 : Προσδιορισμός λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του ¹³⁴Cs (πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa).

Τέλος, στον Πίνακα 5.80 πραγματοποιείται σύγκριση των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφής (τροποποιημένου προς πρωτότυπου κώδικα) σε σχέση με τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης (T.C.C.), όπως αυτοί υπολογίζονται από το πρόγραμμα TrueCoinc για τα δεδομένα της παρούσας γεωμετρίας πηγής – ανιχνευτή.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Λόγος αποδόσεων		Πρόγραμμα TrueCoinc		Απόκλιση τιμών	U-Test
		Λόγος	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)	T.C.C.	Αβεβαιότητα T.C.C. (1σ,%)		
¹³⁴ Cs	563	1.46	2.18	0.848	2.00	-72.62%	17.367
	569	1.23	1.91	0.812	2.00	-45.43%	13.252
	604	0.94	1.62	0.858	2.00	-3.98%	1.521
	795	0.95	1.69	0.847	2.00	-4.56%	1.711
	801	0.88	2.30	0.848	2.00	-2.60%	0.842
	1038	0.89	4.73	0.905	2.00	8.02%	1.674
	1167	1.03	3.57	0.905	2.00	6.33%	1.625
	1365	1.10	3.11	0.858	2.00	5.40%	1.519

Πίνακας 5.80 : Σύγκριση λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μεταξύ του τροποποιημένου και του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f με το συντελεστή T.C.C. του προγράμματος TrueCoinc (σημειακή πηγή ¹³⁴Cs πάνω στον ανιχνευτή XtRa).

Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 5.5.2.5.1 αναμένεται απόκλιση των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφών μεταξύ τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. για τα ενεργειακά γειτονικά φωτόνια 563 keV και 569 keV. Παρατηρείται από τον Πίνακα 5.80, πως για τα υπόλοιπα εκπεμπόμενα φωτόνια του ισότοπου ¹³⁴Cs (604 keV, 795 keV,

801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV) οι αποκλίσεις των δύο συγκρινόμενων μεγεθών είναι μικρότερες από 8%, ενώ οι τιμές της μεταβλητής U είναι όλες μικρότερες του 1.96. Συνεπώς, για τα φωτόνια ενέργειας 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1038 keV, 1167 keV και 1365 keV, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως τα εξεταζόμενα μεγέθη τους (λόγοι απόδοσης και συντελεστές διόρθωσης T.C.C.) δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, διαπίστωση όμως που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί και για τα φωτόνια ενέργειας 563 keV και 569 keV.

5.6 Πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '10' στον ανιχνευτή XtRa.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Δ.Ε. συνέβη ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi της Ιαπωνίας (Μάρτιος 2011). Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας, ελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα διάφορα ραδιενεργά ισότοπα όπως ^{131}I , ^{134}Cs και ^{137}Cs . Τα συγκεκριμένα ισότοπα ανιχνεύτηκαν σε δείγματα όπως ατμοσφαιρικός αέρας, βρόχινο νερό και γάλα σε διάφορες περιοχές της υφελίου όπως στην Ελλάδα [Manolopoulou M. et al., 2011], στη Γερμανία [Pittauerova D. et al., 2011], στη Ρωσία και στην Αμερική [Bolsunovsky A. and Dementyev D., 2011].

Τη χρονική περίοδο κατά την οποία το ραδιενεργό νέφος από το ατύχημα στη Fukushima έφτανε στην Ελλάδα, πραγματοποιήθηκαν συστηματικές και επαναλαμβανόμενες δειγματοληψίες στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. τόσο ατμοσφαιρικού αέρα όσο και βρόχινου νερού. Για τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο δειγματοληψίας και ανάλυσης φίλτρων αέρα, όπως έχει προκύψει από παλαιότερη εργασία [Δ.Ε. Σάββα Μ., 2009]. Το πρωτόκολλο περιλαμβάνει τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα με χρήση αντλίας υψηλής παροχής αέρα τύπου DH-50810E της εταιρείας F&J Specialty Products Inc, η οποία είναι εγκατεστημένη στην ταράτσα του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας αέρα, είναι από ίνες γυαλιού (glass-fiber) τυποποιημένων διαστάσεων 8x10" τύπου FR810M της εταιρείας F&J Specialty Products Inc. Μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας το φίλτρο απομακρύνεται από την αντλία και διπλώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τελικές του διαστάσεις να είναι 64x52x9 mm. Πρόκειται για γεωμετρία όγκου η οποία έχει την κωδική ονομασία γεωμετρία '10'. Τα φίλτρα που δειγματολήφθηκαν την περίοδο αυτή, αναλύθηκαν στην ανιχνευτική διάταξη XtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των φίλτρων γεωμετρίας '10', ανιχνεύτηκε συγκέντρωση του ραδιενεργού ισότοπου ^{134}Cs . Το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. δεν διαθέτει πρότυπη ραδιενεργή πηγή όγκου ^{134}Cs , συνεπώς τα συγκεκριμένα φίλτρα γεωμετρίας '10', μπορούν να θεωρηθούν ως πηγές όγκου και να χρησιμοποιηθούν για έναν ποιοτικό έλεγχο της λειτουργίας του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f για το ισότοπο ^{134}Cs . Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη πηγή όγκου δεν αποτελεί πιστοποιημένη πηγή, με αποτέλεσμα να μην είναι γνωστή η τιμή της ραδιενέργειας. Συνεπώς δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός των αποδόσεων των φωτοκορυφών της.

Από τις αναλύσεις των φίλτρων κατά το χρονικό διάστημα 23/03/2011 - 27/04/2011, παρατηρήθηκε αύξηση και στη συνέχεια μείωση της συγκέντρωσης του ^{134}Cs στον ατμοσφαιρικό αέρα. Επιλέχθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας να χρησιμοποιηθεί το φίλτρο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση, ώστε στα πειραματικά δεδομένα να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη στατιστική, δηλαδή μικρότερη αβεβαιότητα στις υπολογιζόμενες τιμές.

Το φίλτρο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ^{134}Cs είναι το φίλτρο με κωδική ονομασία A0431 το οποίο συλλέχθηκε την 5η Απριλίου 2011. Η ανάλυση του φάσματος με χρήση του κώδικα SPUNAL έδωσε για το συγκεκριμένο ισότοπο, με βάση τη φωτοκορυφή στην ενέργεια 604 keV, συγκέντρωση ίση $175 \mu\text{Bq m}^{-3}$ με αβεβαιότητα 6% (1σ). Με σκοπό να ανιχνευθούν όσο το δυνατόν περισσότερες φωτοκορυφές, αποφασίστηκε, δεδομένης και της πολύ χαμηλής συγκέντρωσης του ^{134}Cs , το φίλτρο να αναλυθεί ξανά για περισσότερο χρόνο, ίσο με 500 000 δευτερόλεπτα. Το φίλτρο αναλύθηκε στον ανιχνευτή XtRa στις 22/7/2011 (ονομασία φάσματος A0413e, κωδικός SPUNAL - 16/ 0.272). Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εμφανίστηκαν οι φωτοκορυφές του ισοτόπου ^{134}Cs που αντιστοιχούν στις ενέργειες 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1365 keV και 1407 keV. Πιο αναλυτικά, για το μέγεθος 'area', καταγράφηκαν :

- 930 counts \pm 23.21% (1σ) για την φωτοκορυφή των 569 keV,
- 6000 counts \pm 3.70% (1σ) για την φωτοκορυφή των 604 keV,
- 4826 counts \pm 3.33% (1σ) για την φωτοκορυφή των 795 keV,
- 506 counts \pm 28.79% (1σ) για την φωτοκορυφή των 801 keV,
- 275 counts \pm 42.67% (1σ) για την φωτοκορυφή των 1365 keV,
- 497 counts \pm 24.48% (1σ) για την αθροιστική φωτοκορυφή των 1407 keV

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί το πλήρες διάγραμμα διάσπασης του ισοτόπου ^{134}Cs με χρήση του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f για ίδιο αριθμό διασπάσεων με το πείραμα. Οι διασπάσεις (showers) για τις οποίες έτρεξε ο τροποποιημένος κώδικας είναι :

$$175 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \times 985.47 \text{m}^3 \times 500000 \text{sec} = 86229 \text{ διασπάσεις [Bq} \cdot \text{sec]}$$

Καθώς η πηγή όγκου αυτή δεν είναι πιστοποιημένη, επιλέχθηκε να υπολογιστούν από τα δεδομένα του πειράματος, οι λόγοι των επιφανειών φωτοκορυφής (area) των φωτονίων ενέργειας 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1365 keV και 1407 keV προς την επιφάνεια φωτοκορυφής του φωτονίου ενέργειας 604 keV, η οποία αντιστοιχεί στα φωτόνια με το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής. Αντίστοιχα, υπολογίστηκε για την προσομοίωση με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, από τα αποτελέσματα του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*, οι λόγοι της πυκνότητας πιθανότητας των καναλιών που αντιστοιχούν στις ενέργειες 569 keV, 604 keV, 795 keV, 801 keV, 1365 keV και 1407 keV προς την πυκνότητα πιθανότητας του καναλιού που αντιστοιχεί στην ενέργεια 604 keV. Στον Πίνακα 5.73

παρατίθενται οι τιμές των λόγων για όλες τις ενδιαφερόμενες ενέργειες, όπως υπολογίζονται από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ στον Πίνακα 5.74 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση.

Πείραμα				
Ενέργεια (keV)	Επιφάνεια φωτοκορυφής - area (κρούσεις)	Αβεβαιότητα επιφάνειας (1σ,%)	Λόγος (area ενέργειας / area 604keV)	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
569	930	23.21	0.155	23.50
604	6000	3.70	1.000	5.240
795	4826	3.33	0.804	4.98
801	506	28.79	0.084	29.03
1365	275	42.67	0.046	42.83
1407	497	24.48	0.083	24.76

Πίνακα 5.73 : Αποτελέσματα πειράματος για πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '10' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f				
Ενέργεια (keV)	Πυκνότητα πιθανότητας (pdf) [1/(eV.particle)]	Αβεβαιότητα πυκνότητας πιθανότητας (1σ,%)	Λόγος (pdf ενέργειας / pdf 604keV)	Αβεβαιότητα λόγου (1σ,%)
569	3.98672E-06	6.46	0.163	6.95
604	2.44061E-05	2.56	1.000	3.62
795	1.70357E-05	3.08	0.698	4.00
801	1.62484E-06	10.14	0.067	10.46
1365	3.18268E-07	22.93	0.013	23.07
1407	1.62484E-06	10.14	0.067	10.46

Πίνακα 5.74 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '10' στον ανιχνευτή ΧtRa.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση του λόγου προσομοίωσης σε σχέση με τον πειραματικό λόγο για κάθε ενέργεια και υπολογίζεται η απόκλιση των τιμών αυτών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.75.

<i>Energy (keV)</i>	<i>Λόγος προσομοίωσης / Λόγος πειράματος</i>	<i>Απόκλιση λόγου</i>
569	1.054	5.39%
604	1.000	0.00%
795	0.868	-13.22%
801	0.789	-21.06%
1365	0.285	-71.55%
1407	0.804	-19.63%

Πίνακα 5.75 : Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης για πηγή όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '10' στον ανιχνευτή XtRa

Καταρχήν πρέπει να επισημανθεί ότι η τιμή του λόγου για τα φωτόνια ενέργειας 604 keV είναι εξ ορισμού ίση με 1. Για τη φωτοκορυφή 569 keV, η προσομοίωση από το πείραμα διαφέρει κατά ~5%, ενώ ο αντίστοιχος λόγος (προσομοίωση προς πείραμα) είναι κοντά στη μονάδα. Η περίπτωση των φωτονίων ενέργειας 795 keV παρουσιάζει τη μικρότερη αβεβαιότητα από όλα τα άλλα εκπεμπόμενα φωτόνια για το ενδιαφερόμενο μέγεθος 'επιφάνειας φωτοκορυφής' που προκύπτει από το πείραμα. Τα δύο εξεταζόμενα μεγέθη για τη συγκεκριμένη ενέργεια (λόγος προσομοίωσης και λόγος πειράματος) έχουν απόκλιση της τάξης του 13%. Για το εκπεμπόμενο φωτόνιο ενέργειας 801 keV παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση των μελετούμενων μεγεθών, της τάξης του 21%, σε σχέση με τα φωτόνια ενέργειας 569 keV και 795 keV. Σημειώνεται πως η φωτοκορυφή των 801 keV στο πειραματικό φάσμα έχει υψηλή αβεβαιότητα της τάξης του 30%, η οποία ενδεχομένως ευθύνεται για τη διαφορά των δύο λόγων απόδοσης προσομοίωσης και πειράματος. Η αθροιστική φωτοκορυφή των 1407 keV παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη φωτοκορυφή των 801 keV που αναλύθηκε προηγουμένως. Είναι η μοναδική αθροιστική φωτοκορυφή η οποία εμφανίζεται στο πειραματικό φάσμα στον ανιχνευτή XtRa και οφείλεται στην ταυτόχρονη ανίχνευση των πρωτογενών φωτονίων 604 keV και 801 keV. Τέλος, η φωτοκορυφή στα 1365 keV, η οποία οφείλεται στο υψηλότερης ενέργειας εκπεμπόμενο φωτόνιο του ισότοπου ^{134}Cs , παρουσιάζει τη μεγαλύτερη, από τα εξεταζόμενα φωτόνια, απόκλιση του λόγου απόδοσης μέσω προσομοίωσης σε σχέση με το λόγο απόδοσης μέσω πειράματος, της τάξης του 70%. Η τιμή της απόκλισης οφείλεται τόσο στην υψηλή τιμή της πειραματικής επιφάνειας φωτοκορυφής (area) η οποία είναι της τάξης του 40% (1σ), όπως προκύπτει από την ανάλυση του προγράμματος SPUNAL, όσο και στη μεγάλη τιμή της υπολογιστικής αβεβαιότητας της πυκνότητας πιθανότητας η οποία είναι της τάξης του 25% (1σ), όπως προκύπτει από επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, δεν είναι δυνατόν να προκύψει ασφαλές συμπέρασμα κυρίως λόγω της υψηλής αβεβαιότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων, κάτι που είναι φυσικό λόγω της πολύ χαμηλής ραδιενέργειας του δείγματος.

5.7 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.

Συγκεντρωτικά στην παρούσα παράγραφο παραθέτονται τα συμπεράσματα των συγκρίσεων που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Αρχικά, προσομοιώθηκαν ρεαλιστικά σενάρια για το ισότοπο ^{60}Co στις ανιχνευτικές διατάξεις HPGe και XtRa του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. με χρήση του τροποποιημένου κώδικα. Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις αυτές συγκρίθηκαν ποσοτικά με αντίστοιχα αποτελέσματα από πειράματα που διεξήχθησαν υπό τις ίδιες συνθήκες, σε όρους απόδοσης φωτοκορυφής για τις δύο ενέργειες φωτονίων (1173 keV και 1332 keV) του συγκεκριμένου ισότοπου. Διαπιστώθηκε ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα αποτελέσματα αυτά δεν διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο από 4%. Επιπλέον, κατά το στατιστικό έλεγχο U-test, στις περισσότερες συγκρίσεις το τεστ οδήγησε σε αποδοχή, δηλαδή οι συγκρινόμενες αποδόσεις φωτοκορυφής δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους. Η μοναδική περίπτωση κατά την οποία εμφανίστηκε μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων μεγεθών, είναι το σενάριο σημειακής πηγής ^{60}Co τοποθετημένης σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa, όπου η απόκλιση των τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφής είναι της τάξης του 7% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV. Ακόμα, στην περίπτωση ανάλυσης μικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe παρατηρήθηκε πως η μεταβλητή U έλαβε τιμή οριακά μεγαλύτερη από τη μέγιστη αποδεκτή (1.96), με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για τη στατιστική διαφορά των αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης και μέσω πειράματος για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή.

Εν συνεχεία, συγκρίθηκε η λειτουργία του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f σε σχέση με τον τροποποιημένο κώδικα. Επειδή ο πρωτότυπος κώδικας δεν εμπεριέχει στη λειτουργία του την επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης σε αντίθεση με το νέο κώδικα επιλέχθηκε να συγκριθεί ο λόγος των αποδόσεων φωτοκορυφών που προκύπτουν από τους δύο κώδικες με τις αντίστοιχες τιμές συντελεστών διόρθωσης που προκύπτουν από το πρόγραμμα TrueCoinc.

- Για την περίπτωση του ισότοπου ^{60}Co , παρατηρήθηκε πως για όλες τις εξεταζόμενες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή, οι συγκρινόμενες τιμές του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής για τα εκπεμπόμενα φωτόνια μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc, δεν παρουσιάζουν απόκλιση περισσότερο από 4%. Το μοναδικό σενάριο κατά το οποίο δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, αφορά την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe, όπου παρατηρήθηκε απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών της τάξης του 7%, ενώ ταυτόχρονα η μεταβλητή U έλαβε την τιμή 1.902.

- Για την περίπτωση του ισοτόπου ^{88}Y , παρατηρήθηκε πως για τα εκπεμπόμενα φωτόνια ενέργειας 898 keV και 1836 keV οι τιμές των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoin δεν αποκλίνουν περισσότερο από 1%. Στο σενάριο πηγής όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την στατιστική διαφορά των μετρούμενων μεγεθών αφού η τιμή της μεταβλητής U πήρε την τιμή 2.67. Αναφορικά με τη σύγκριση του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στην ενέργεια 2734 keV μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. παρατηρήθηκε πως υπήρχε απόκλιση των τιμών για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια που έφτασε έως και 15%. Η απόκλιση αυτή ενδεχομένως οφείλεται στους πολύ υψηλούς συντελεστές T.C.C. που υπολογίζονται μέσω του προγράμματος TrueCoins.
- Για την περίπτωση του ισοτόπου ^{57}Co , παρατηρήθηκε πως στο σενάριο σημειακή πηγής πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtiRa τα μεγέθη, λόγοι απόδοσης φωτοκορυφών και συντελεστές διόρθωσης T.C.C. απέκλιναν λιγότερο από 3%, για όλα τα εξεταζόμενα εκπεμπόμενα φωτόνια. Στην περίπτωση πηγής όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtiRa, παρατηρήθηκε πως τα συγκρινόμενα μεγέθη για τα εκπεμπόμενα φωτόνια ενέργειας 122 keV και 136 keV, απέκλιναν περισσότερο του 4% ενώ μέσω του U-Test δεν ήταν δυνατόν να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για τη στατιστικά σημαντική διαφορά τους. Για την ίδια γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή, η απόκλιση του λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoin για το φωτόνιο ενέργειας 14.4 keV, δεν υπερέβη το 4% και η τιμή της μεταβλητής U ήταν μικρότερη της μέγιστης αποδεκτής. Σημειώνεται πως δεν πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του συγκεκριμένου ισοτόπου στον ανιχνευτή HPGe.
- Για την περίπτωση του ισοτόπου ^{134}Cs , διαπιστώθηκε πως στα περισσότερα σενάρια γεωμετρίας πηγής - ανιχνευτή, δεν υπήρχε στατιστική σημαντική διαφορά μεταξύ των λόγων αποδόσεων φωτοκορυφών που προκύπτουν από τον τροποποιημένου και τον πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoins για τα εκπεμπόμενα φωτόνια.

Διαγράμματα Κεφαλαίου 5.



The Radiochemical Centre Amersham England

Certificate of measurement of radioactive gamma reference source

TA 6422

Description	Principal radionuclide: Cobalt-60	Product code: CKR.121
		Source number: 7U238
Measurement	Reference time: 1200 GMT on 1st January 1981	
	Activity of the principal radionuclide: 1.183 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 $\pm 3.9\%$	

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 9LL
telephone: Little Chalfont
(024 04)
4444

cables: Activity
Amersham
telex: 83141

Εικόνα 5.1 : Πιστοποιητικό σημειακή πηγής ^{60}Co , 1.183 μCi .



**Isotope Products
Laboratories**

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

An Eckert & Ziegler Company

Tel 661•309•1010
Fax 661•257•8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION MULTINUCLIDE STANDARD SOLUTION

Customer: ECKERT & ZIEGLER/ISOTOPE PROD. EUROPE	Source No.:	1195-22-11
P.O. No.: 34168	Reference Date:	1-Jul-06 12:00 PST
Catalog No.: 7601	Contained Radioactivity:	1.084 μ Ci 40.11 kBq

Physical Description:

A. Mass of solution:	10.25743 grams in 10 mL flame-sealed ampoule
B. Chemical form:	Multinuclide in 2M HCl
C. Carrier content:	See attached sheet
D. Density:	1.033 g/mL @ 20°C

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Conc. (nCi/g)	Gammas per second per gram	Total Uncert.
60	Am-241	432.17 \pm 0.66 years	36.0	3.067	40.85	3.0 %
88	Cd-109	462.6 \pm 0.7 days	3.63	42.94	57.67	3.0 %
122	Co-57	271.79 \pm 0.09 days	85.6	1.596	50.55	3.1 %
166	Ce-139	137.640 \pm 0.023 days	79.9	2.018	59.66	3.0 %
279	Hg-203	46.595 \pm 0.013 days	81.5	6.201	187.0	3.0 %
392	Sn-113	115.09 \pm 0.04 days	64.9	8.335	200.1	3.0 %
514	Sr-85	64.849 \pm 0.004 days	98.4	9.983	363.5	3.0 %
662	Cs-137	30.17 \pm 0.16 years	85.1	7.064	222.4	3.0 %
898	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	94.0	15.99	556.1	3.0 %
1173	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.86	8.485	313.5	3.0 %
1333	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.98	8.485	313.9	3.0 %
1836	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	99.4	15.99	588.1	3.0 %

Method of Calibration:

This source was prepared from weighed aliquots of solutions whose concentrations in μ Ci/g were determined by gamma spectrometry.

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- IPL participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- Overall uncertainty is calculated at the 99% confidence level.
- This source has a working life of 1 year.


Quality Control

16-Jun-06
Date

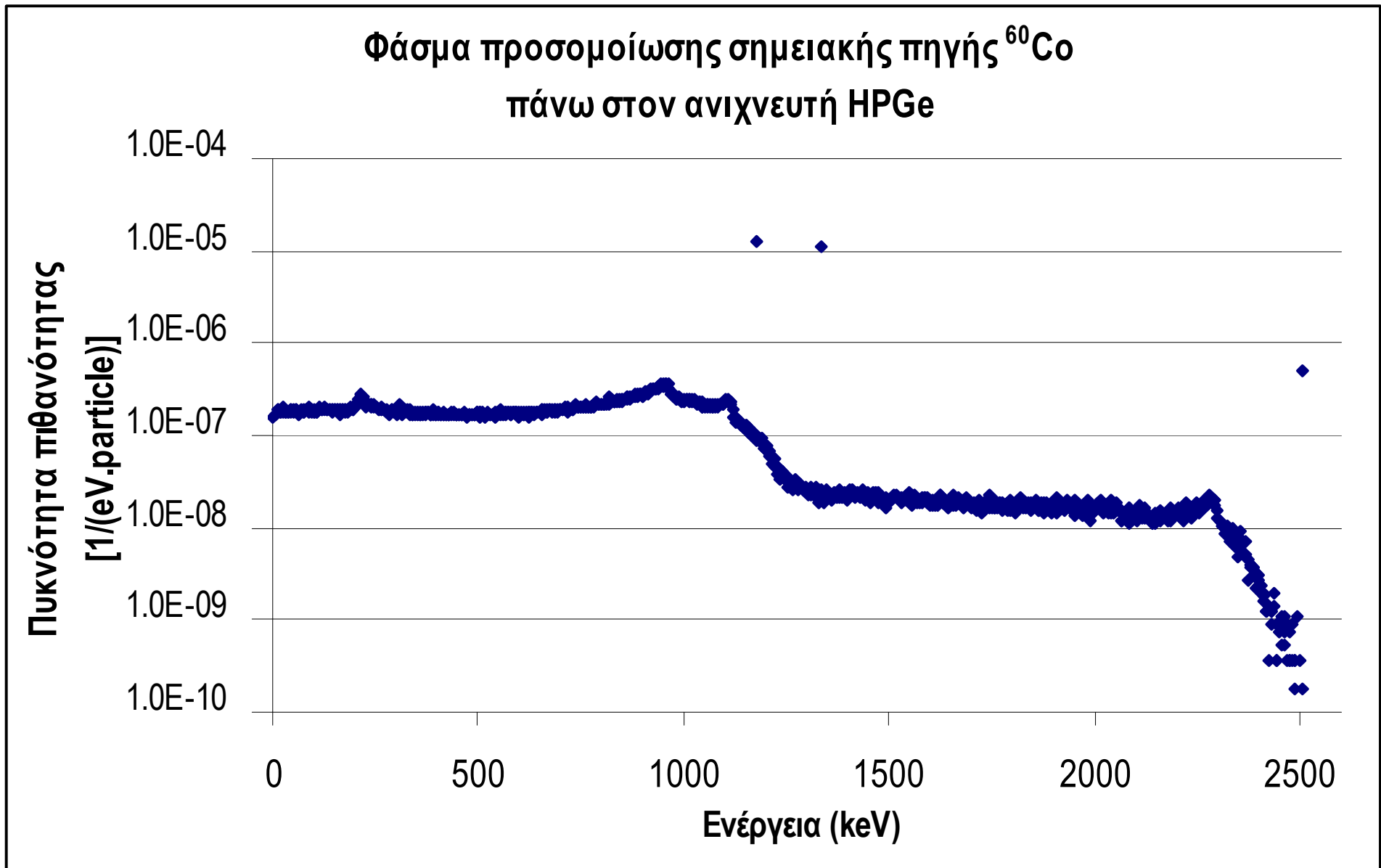
IPL Ref. No.: 1195-22

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

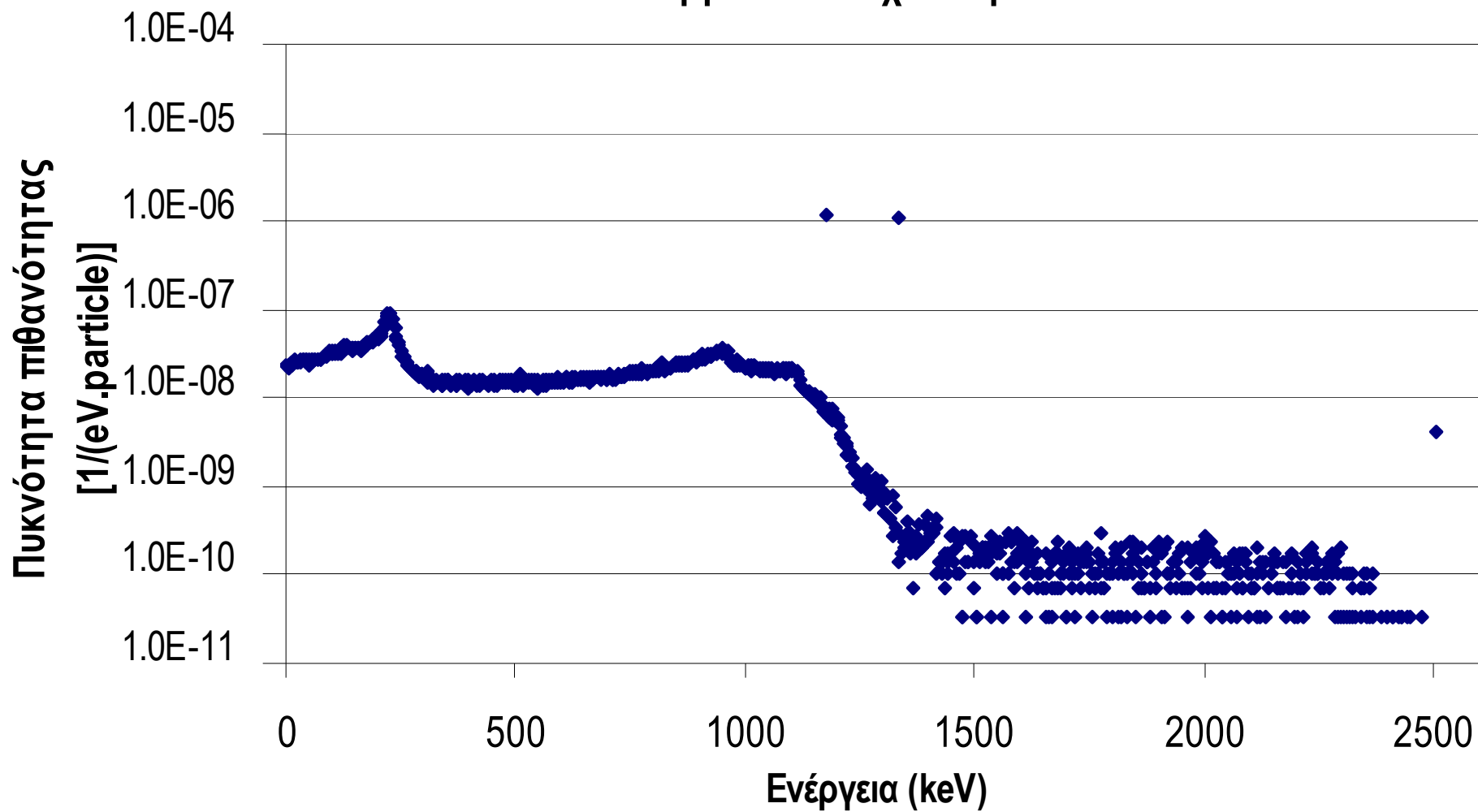
Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Εικόνα 5.4 : Πιστοποιητικό διαλύματος ΕΕΑΕ (2M HCl).



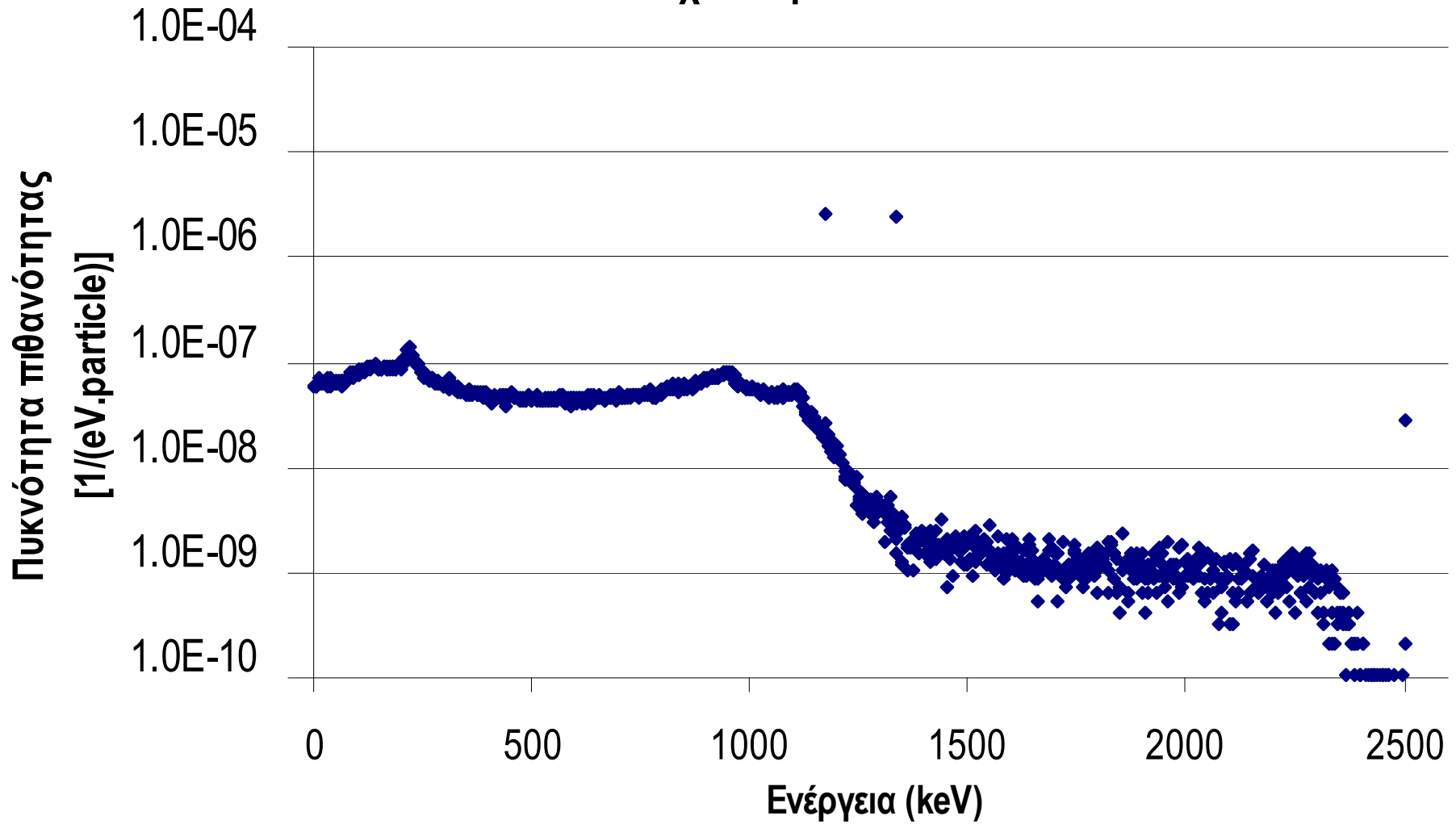
Διάγραμμα 5.1 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co στα 0mm από το κάλυμμα του HPGe.

Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co σε απόσταση 78mm
από το κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe



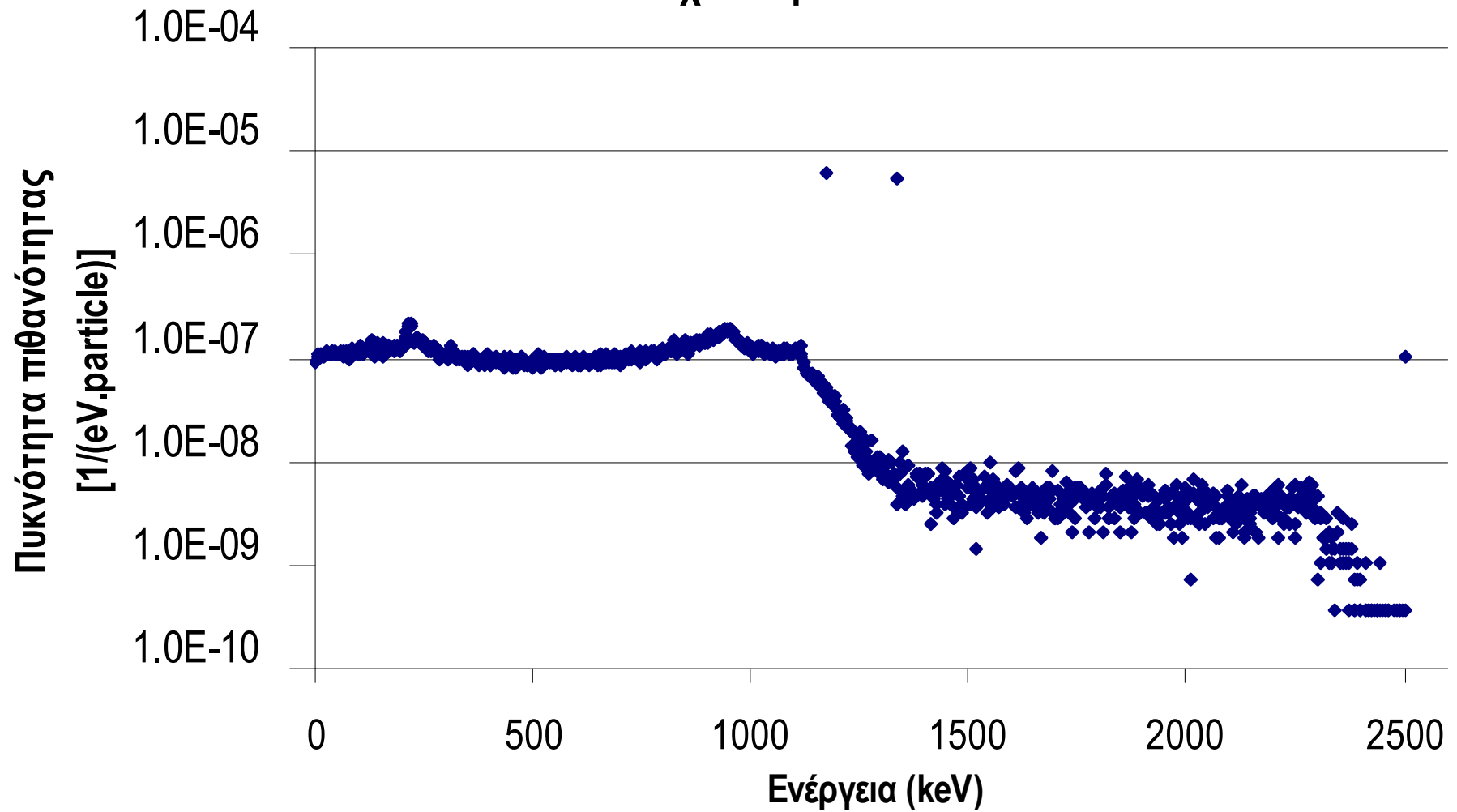
Διάγραμμα 5.2 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co στα 78mm από το κάλυμμα του HPGe.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον
ανιχνευτή HPGe

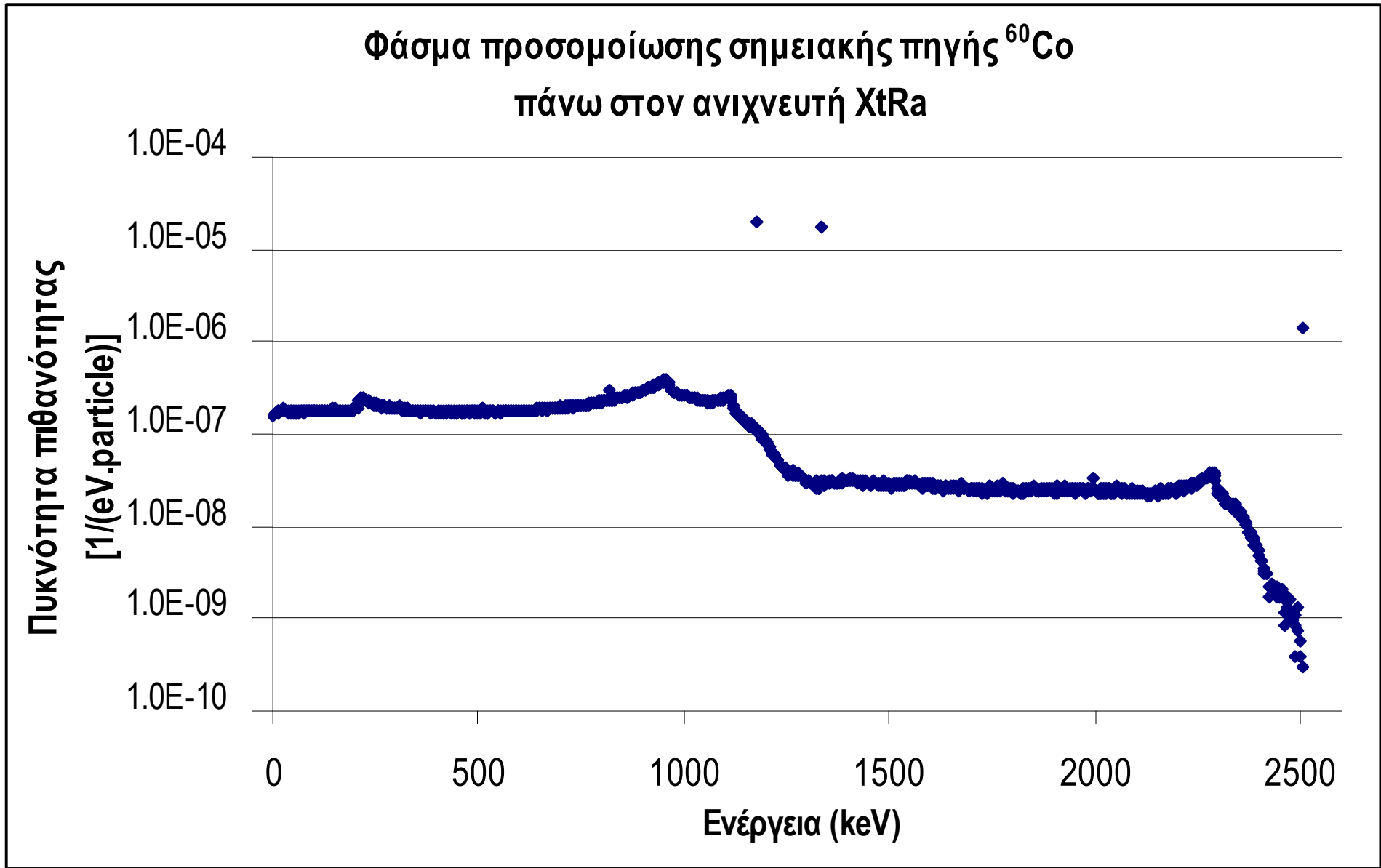


Διάγραμμα 5.3 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2'.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' στον
ανιχνευτή HPGe

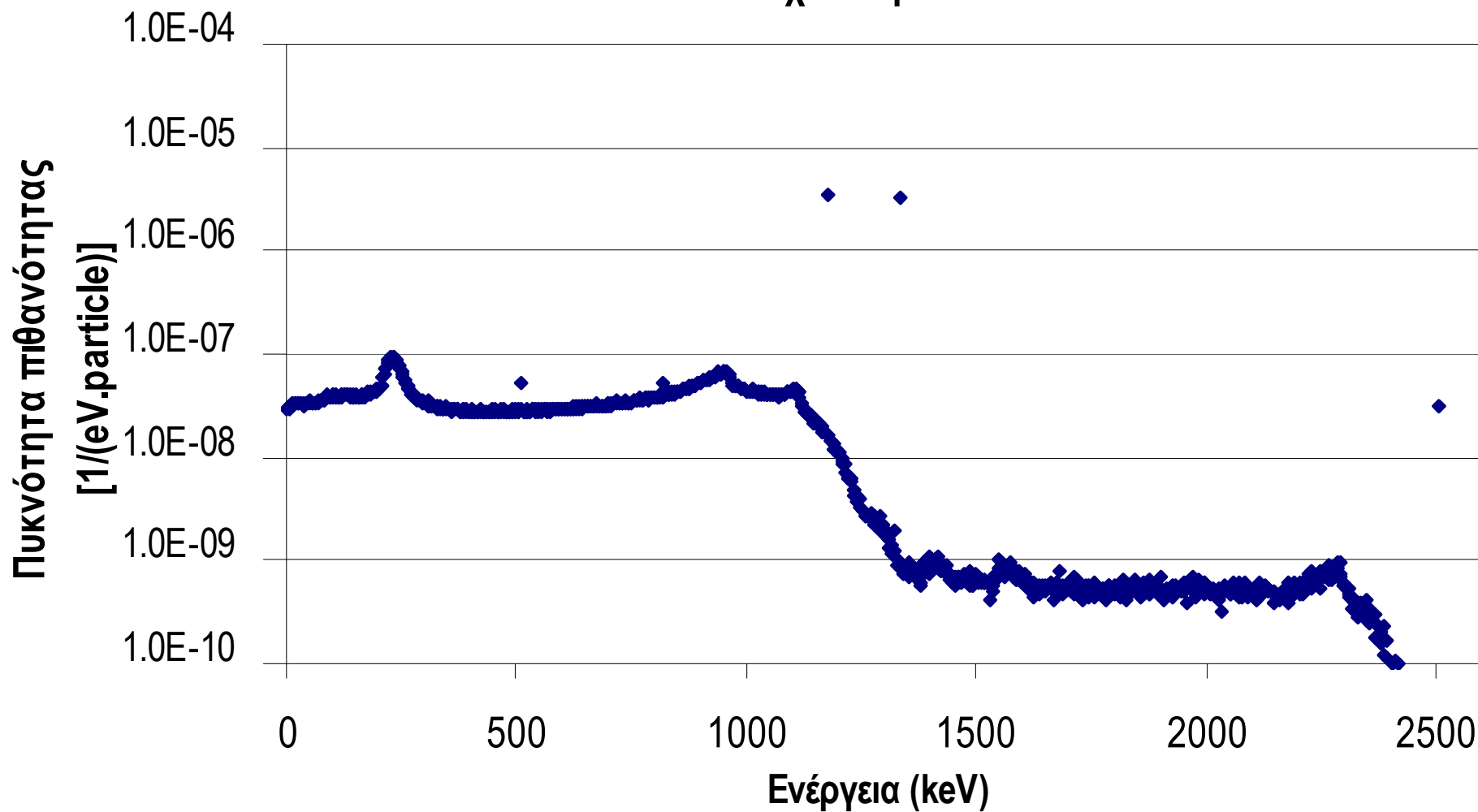


Διάγραμμα 5.4 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8'.



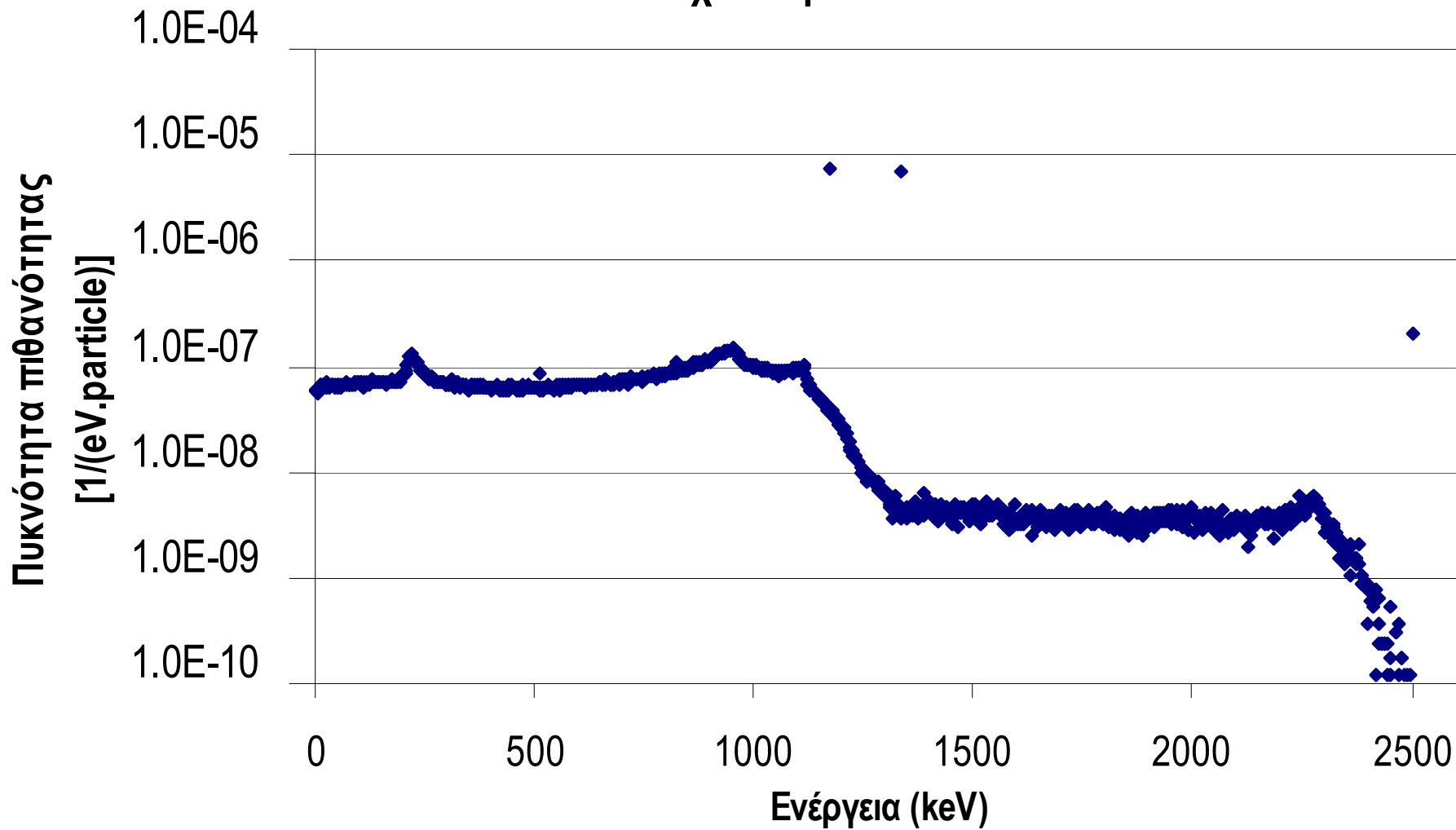
Διάγραμμα 5.5 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co στα 0mm από το κάλυμμα του XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co σε απόσταση 73mm
από τον ανιχνευτή XtRa



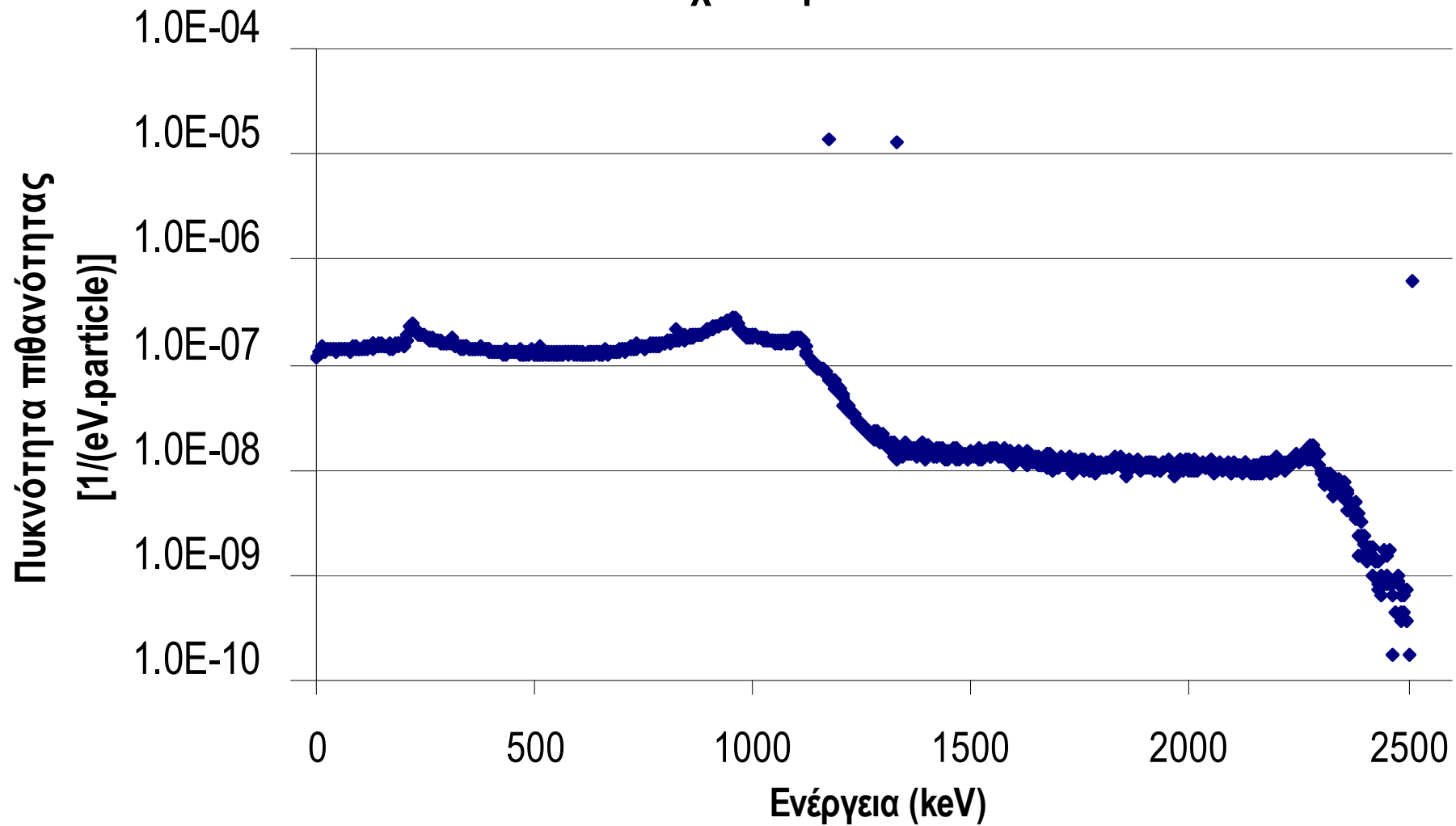
Διάγραμμα 5.6 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{60}Co στα 0mm από το κάλυμμα του XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa



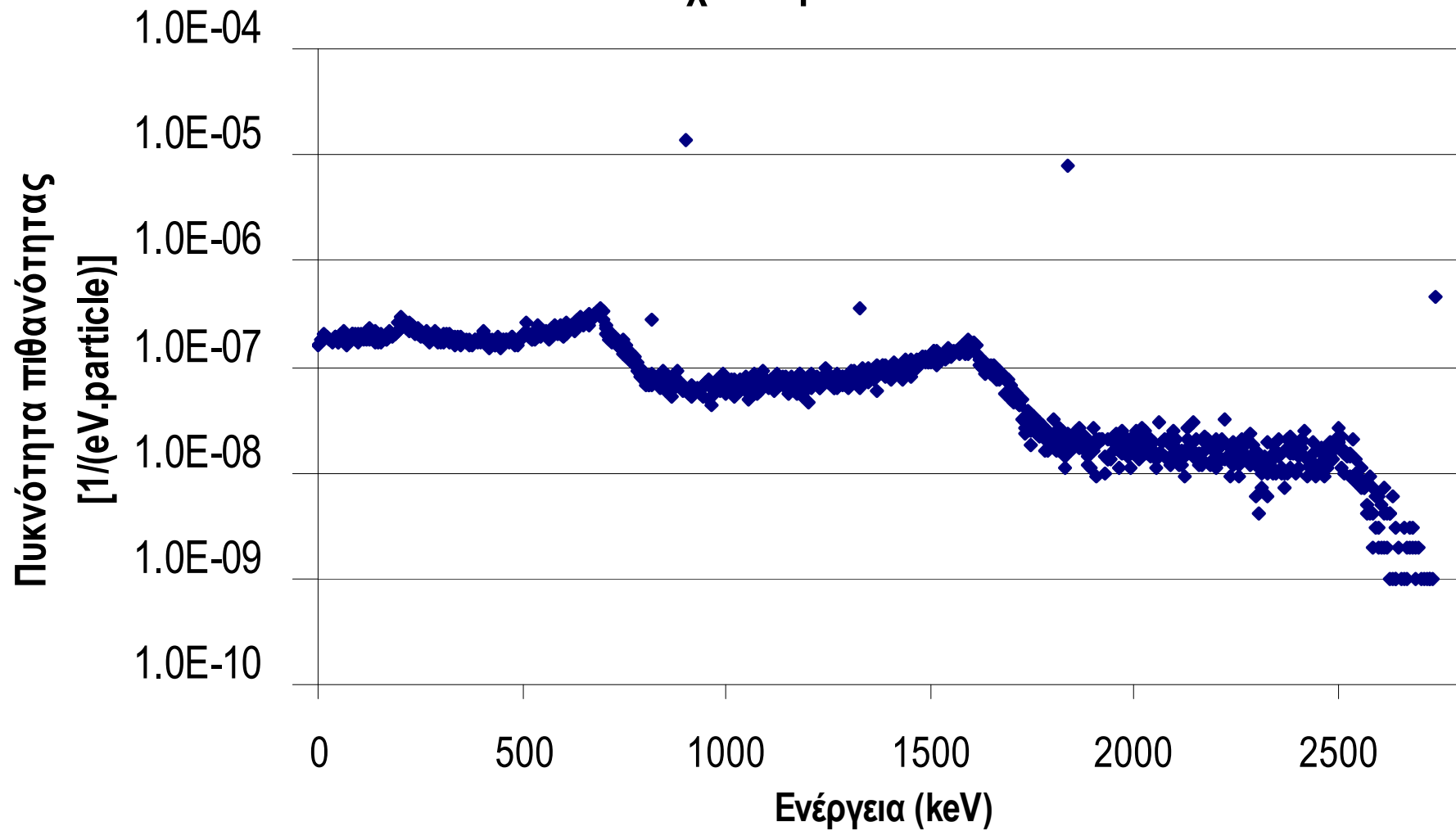
Διάγραμμα 5.7 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή XtRa



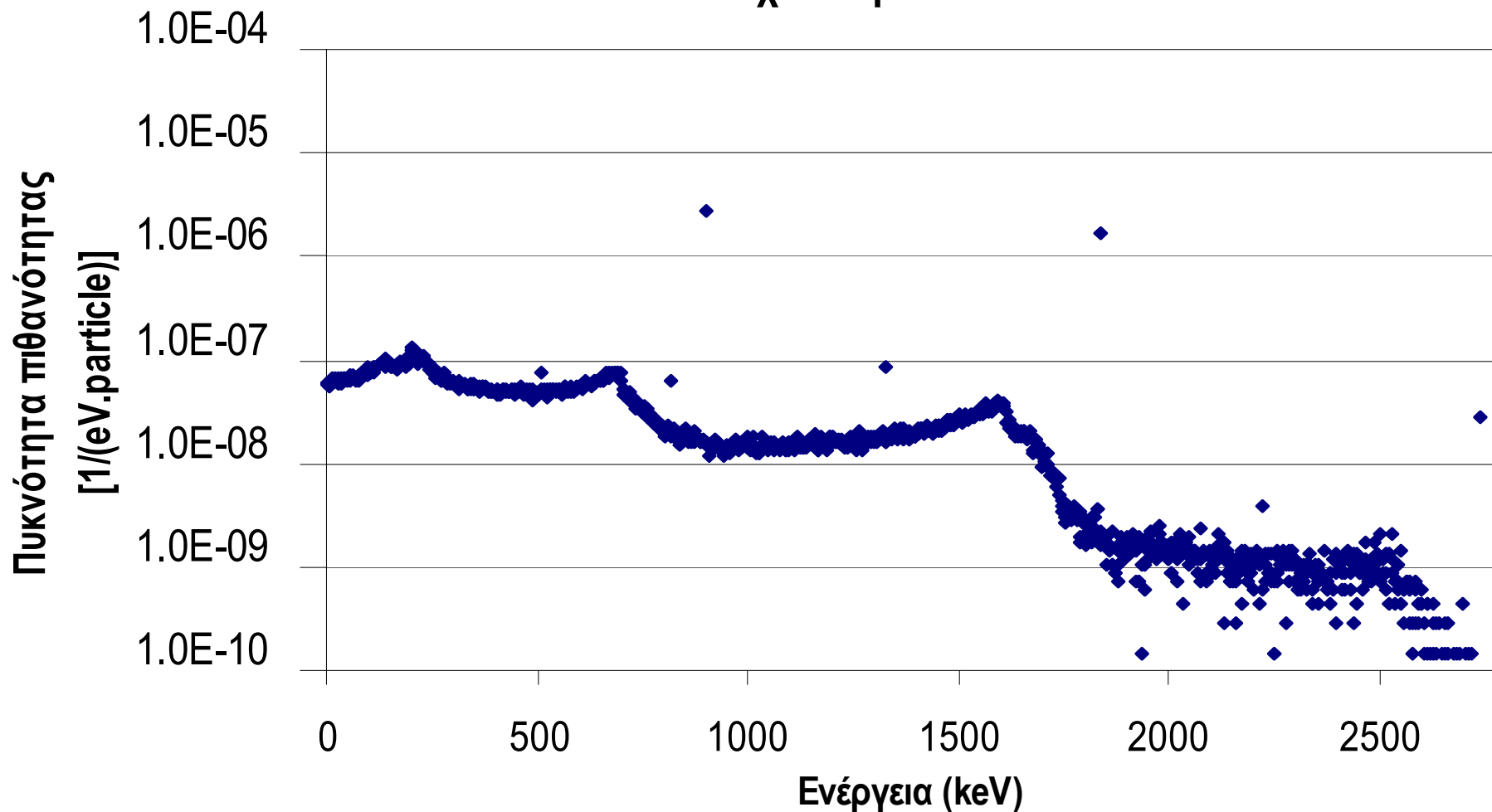
Διάγραμμα 5.8 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{60}Co γεωμετρίας '8' στον ανιχνευτή XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y πάνω στον
ανιχνευτή HPGe

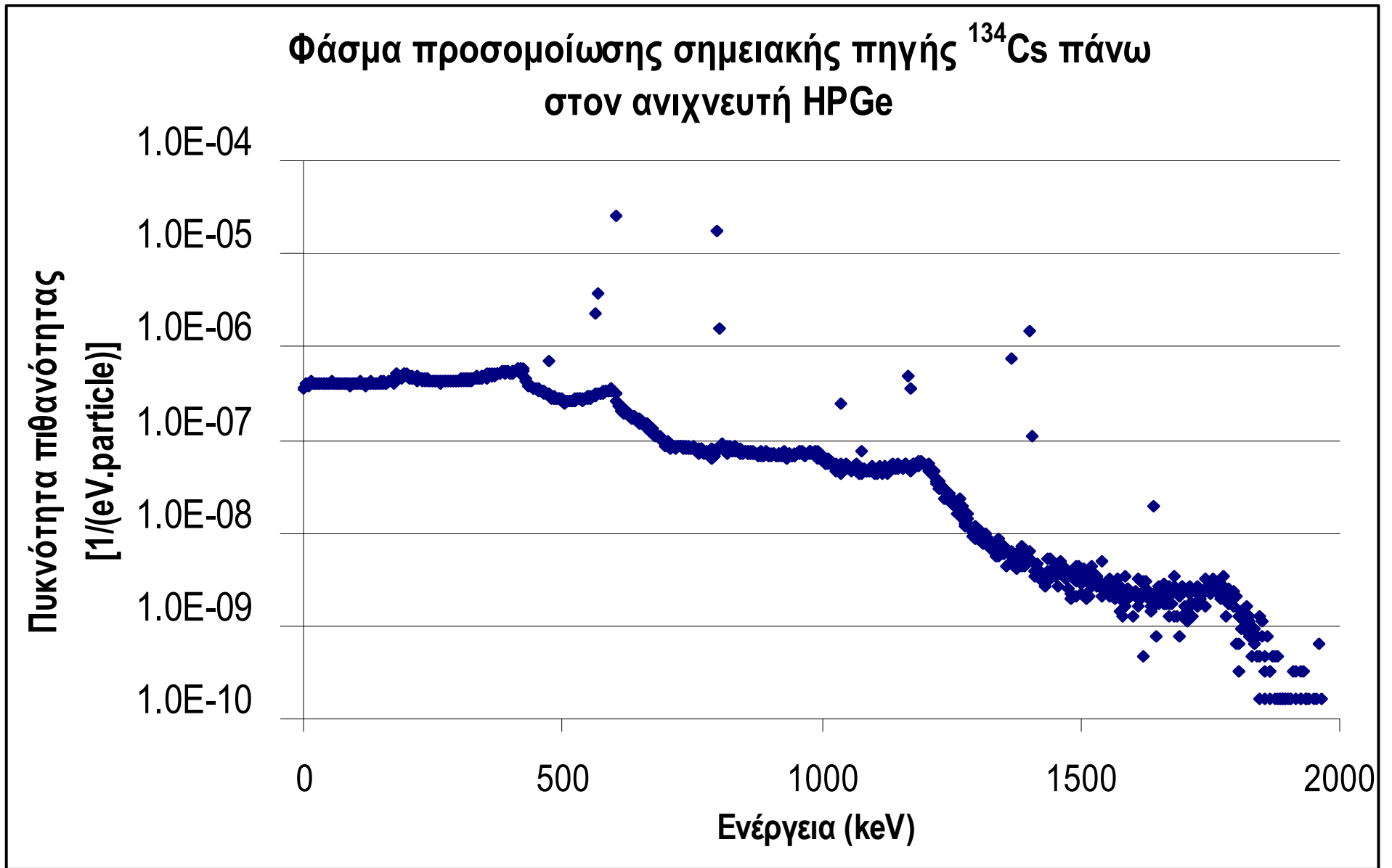


Διάγραμμα 5.9 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y στα 0mm από το κάλυμμα του HPGe.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2'
στον ανιχνευτή HPGe

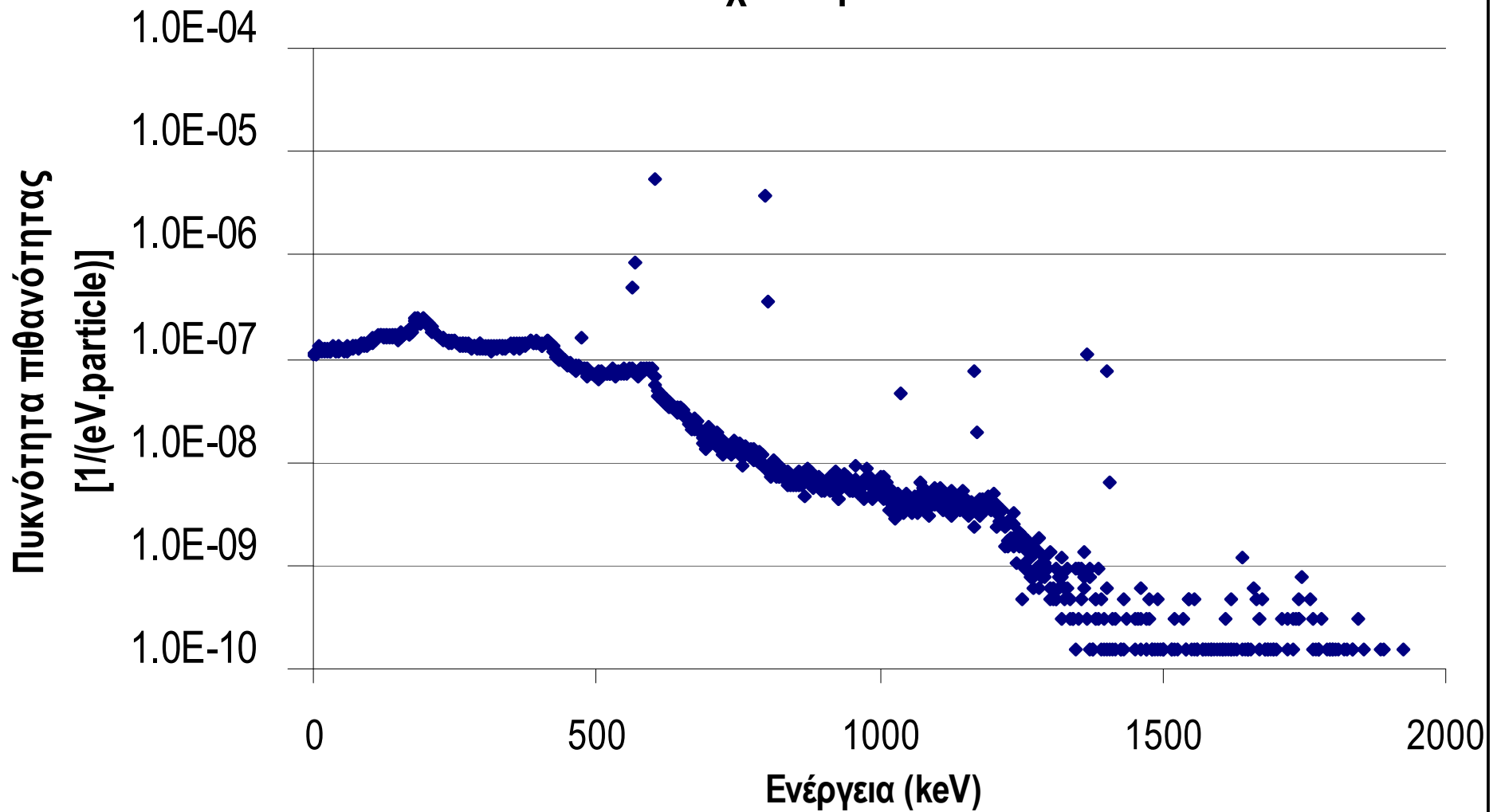


Διάγραμμα 5.10 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2'.

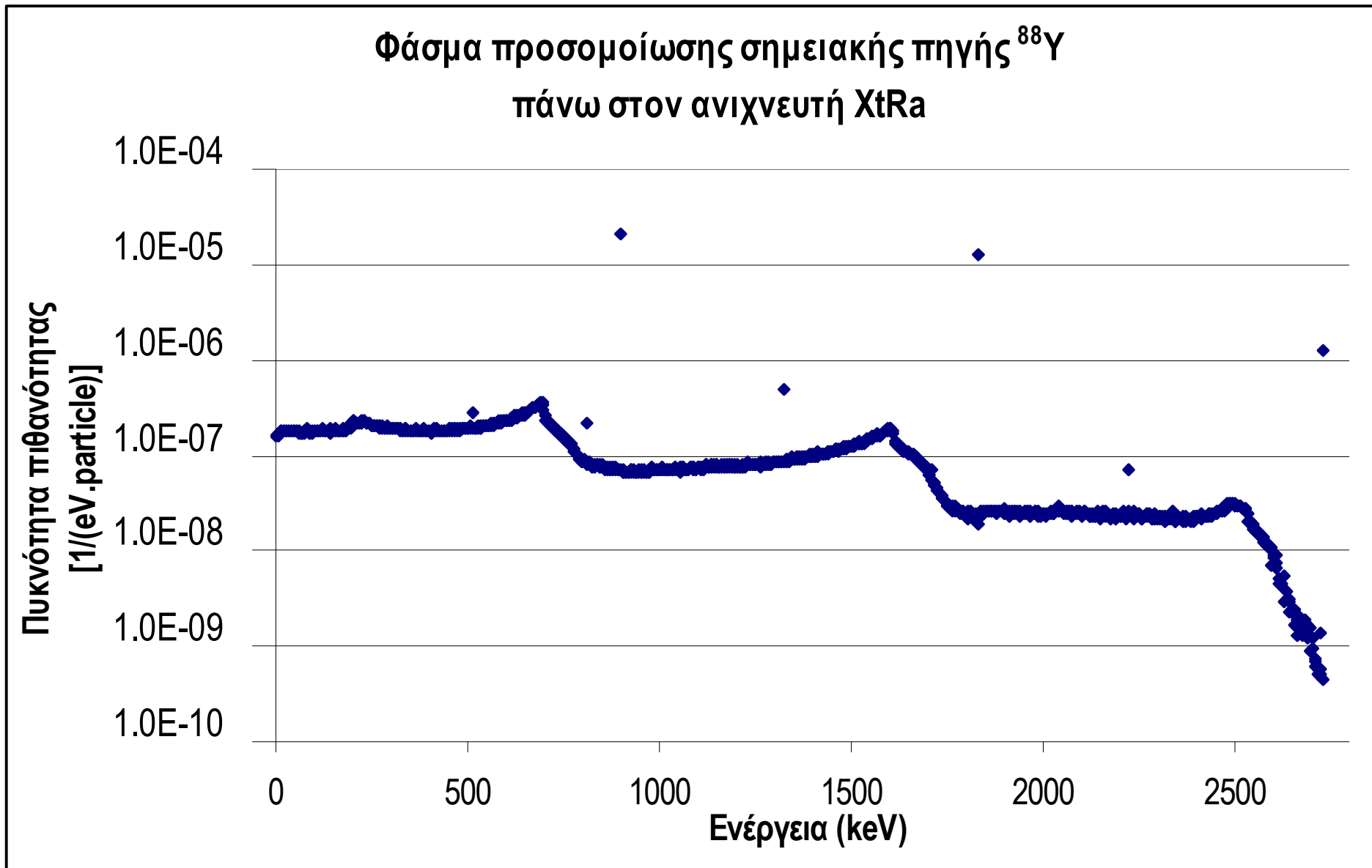


Διάγραμμα 5.11 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{134}Cs στα 0mm από το κάλυμμα του HPGe.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2'
στον ανιχνευτή HPGe

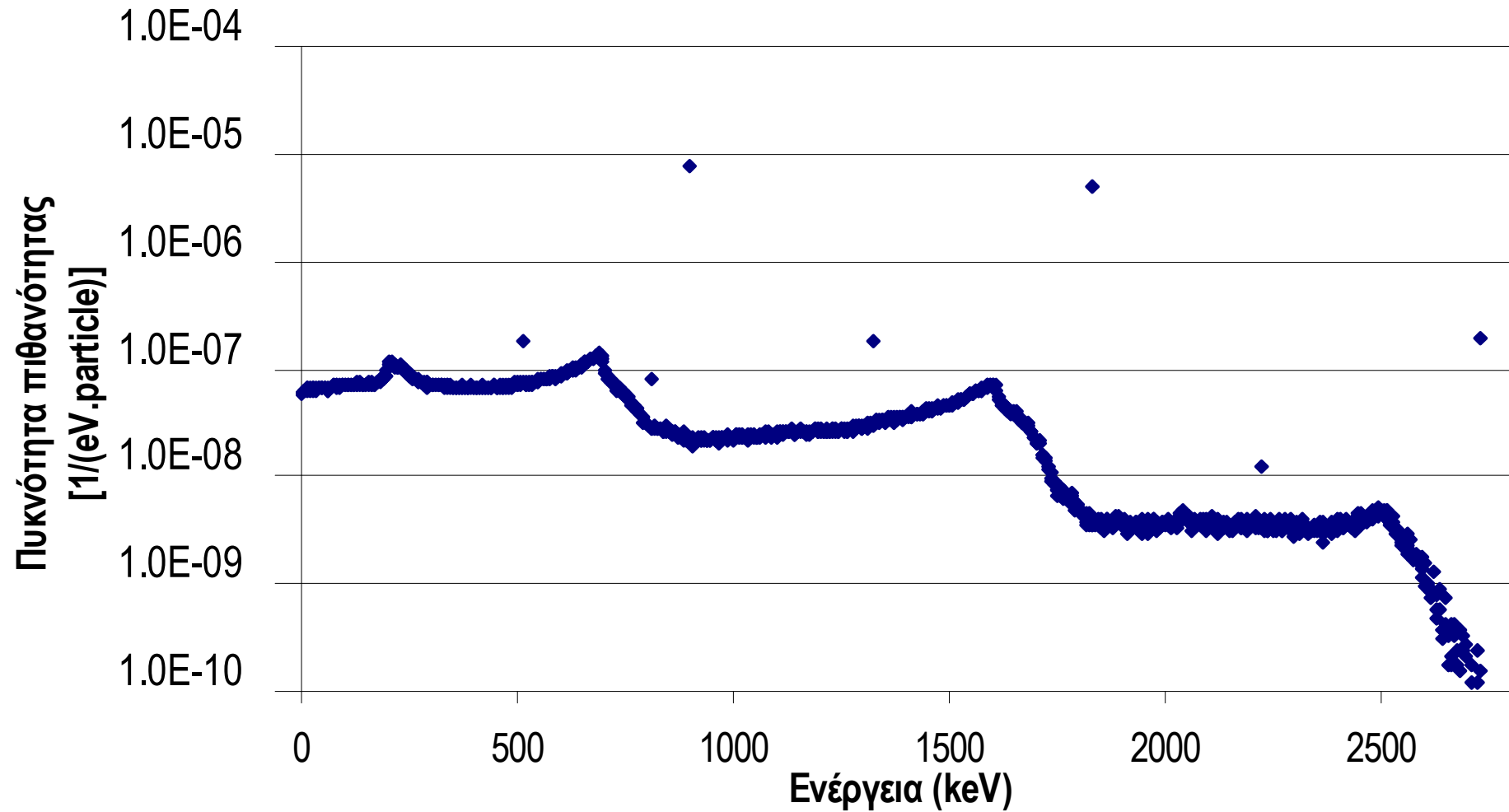


Διάγραμμα 5.12 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2'.

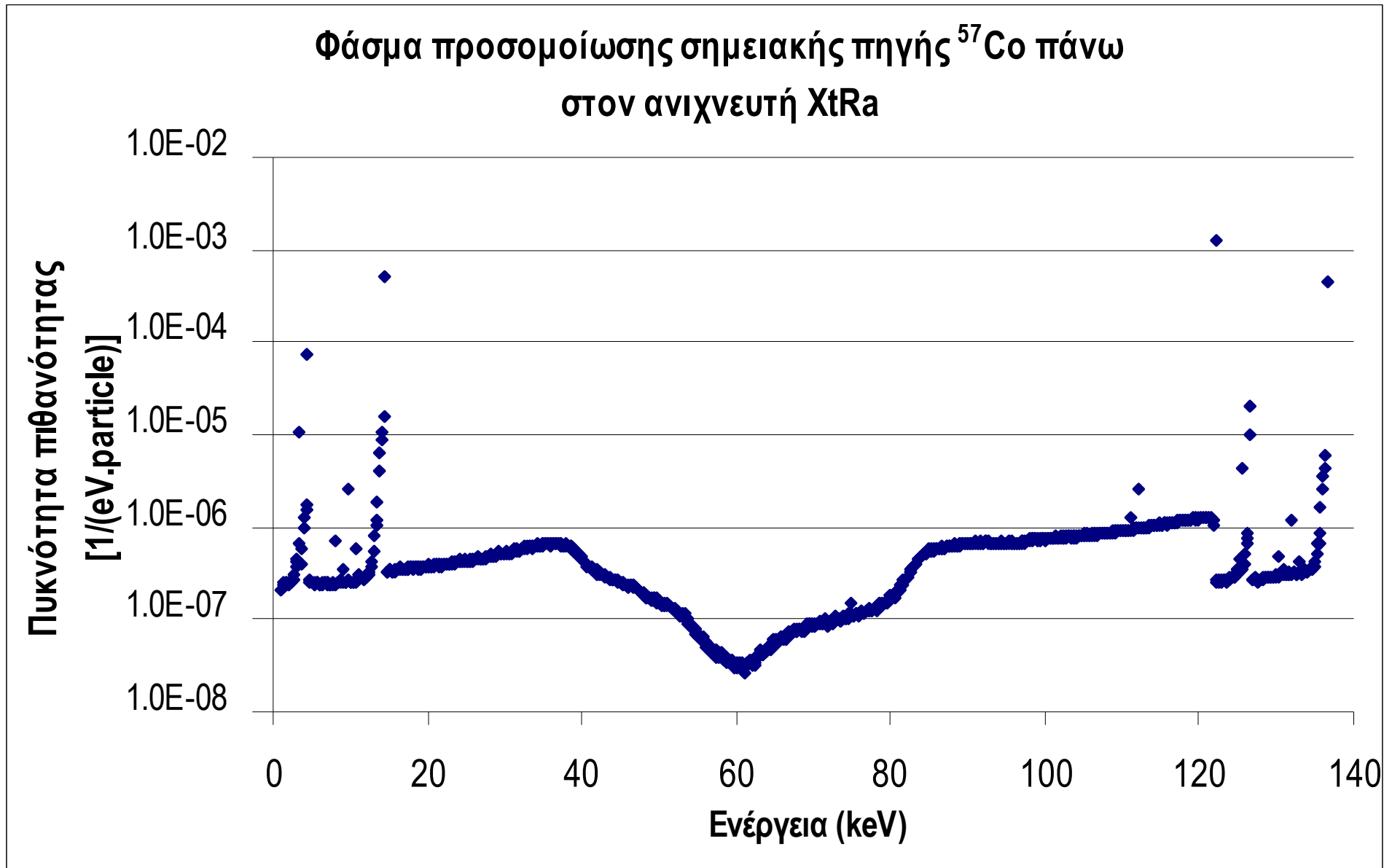


Διάγραμμα 5.13 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{88}Y στα 0mm από το κάλυμμα του XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2'
στον ανιχνευτή XtRa

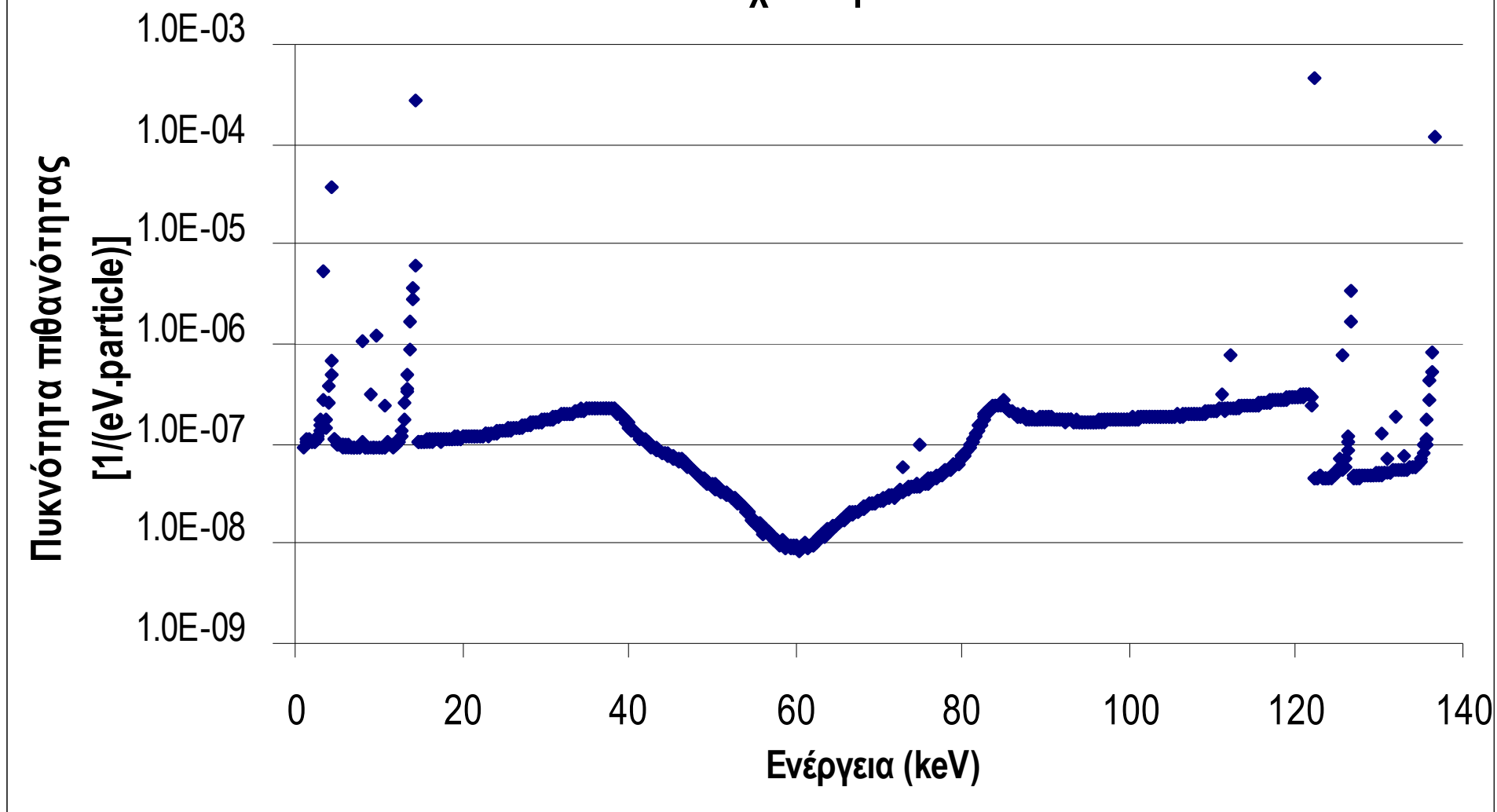


Διάγραμμα 5.14 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2'.

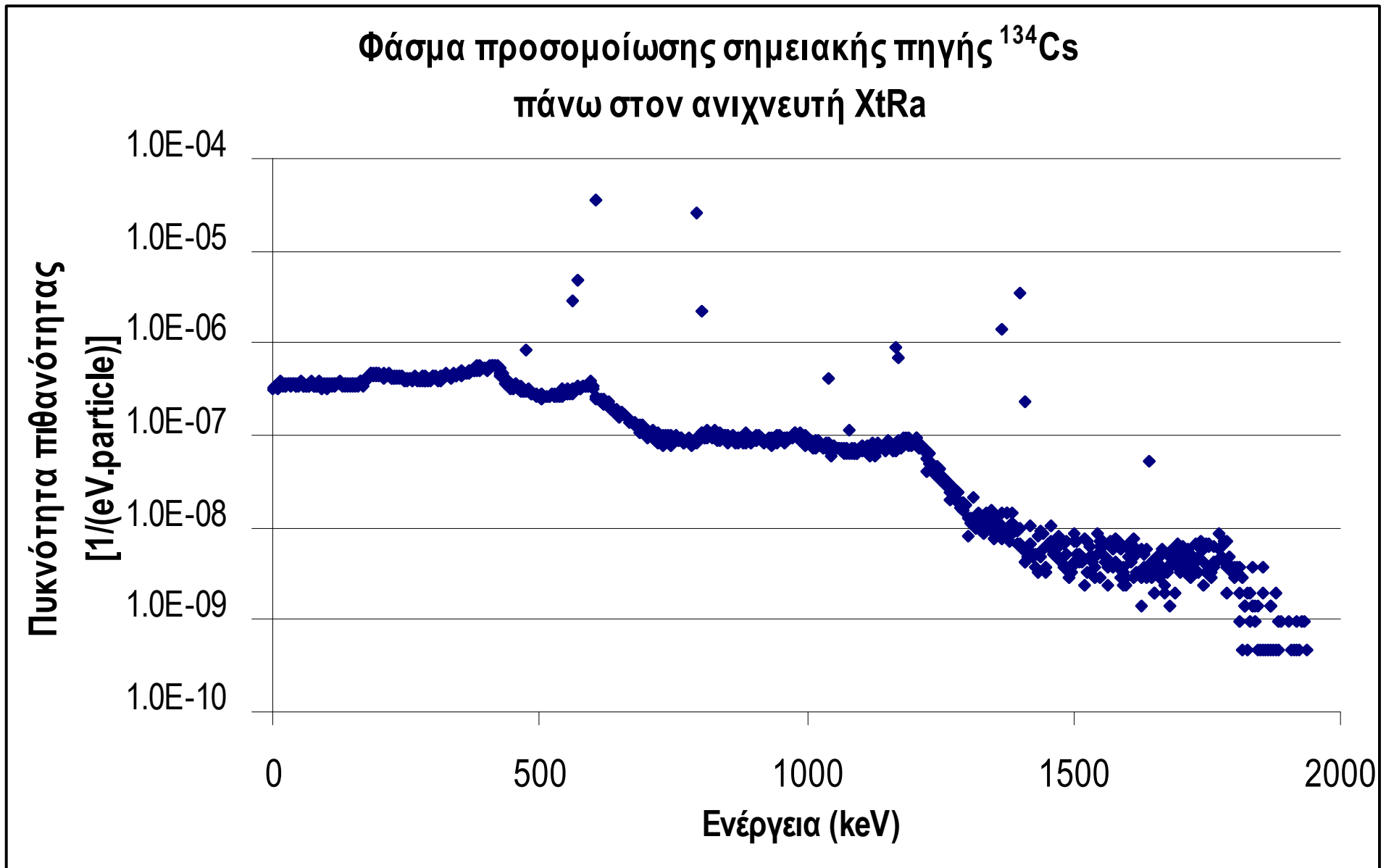


Διάγραμμα 5.15 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{57}Co στα 0mm από το κάλυμμα του XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2'
στον ανιχνευτή XtRa

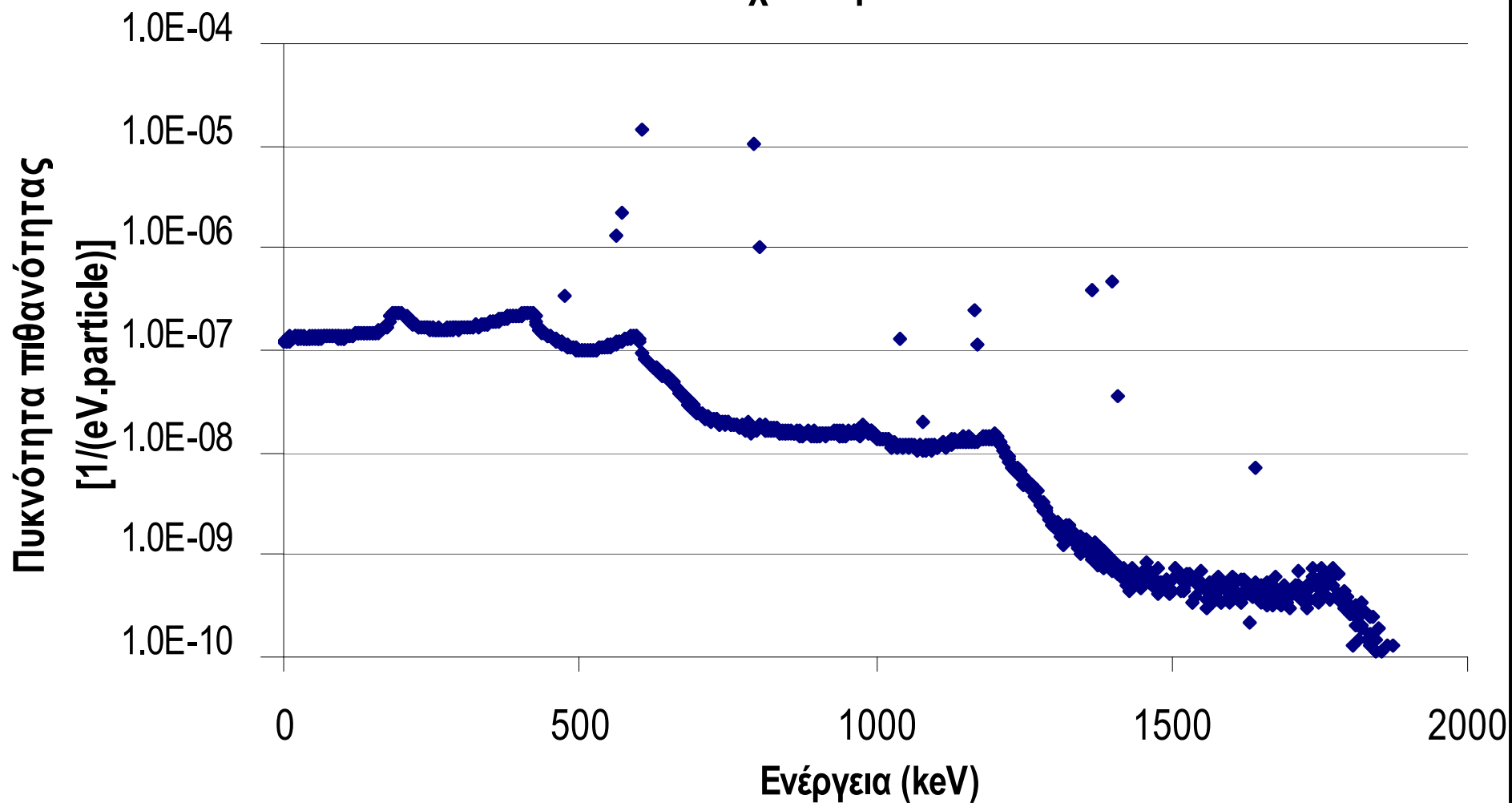


Διάγραμμα 5.16 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2'.



Διάγραμμα 5.17 : Φάσμα προσομοίωσης σημειακής πηγής ^{134}Cs στα 0mm από το κάλυμμα του XtRa.

Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας
στον ανιχνευτή XtRa



Διάγραμμα 5.18 : Φάσμα προσομοίωσης πηγής όγκου ^{134}Cs γεωμετρίας '2'

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται μία επιγραμματική περιγραφή της Διπλωματικής Εργασίας και παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτήν. Σχολιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα της με βάση τους αρχικούς στόχους που είχαν τεθεί. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντικές εργασίες, οι οποίες μπορούν να στηριχτούν στα αποτελέσματα της παρούσας.

Βασικός στόχος της παρούσας Δ.Ε. ήταν ο υπολογισμός των συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence) με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo και συγκεκριμένα μέσω του κώδικα προσομοίωσης PENELOPE (έκδοση 2005) ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π.

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιήθηκε μία αναλυτική περιγραφή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και παρουσιάστηκαν οι παράγοντες που κάνουν έντονη της επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ραδιενεργού δείγματος. Παρουσιάστηκε μία βιβλιογραφική αναδρομή στις μεθόδους προσδιορισμού κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και η ανάλυση επικεντρώθηκε στη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από το Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. Πιο συγκεκριμένα, μετά από κατάλληλη διαδικασία βαθμονόμησης προκύπτουν οι καμπύλες απόδοσης ανιχνευτή (full energy peak efficiency) και ολικής απόδοσης ανιχνευτή (total efficiency) και με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος TrueCoinc προσδιορίζονται οι συντελεστές διόρθωσης απόδοσης φωτοκορυφής. Εν συνεχεία, μέσω της διορθωμένης καμπύλης βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή, ως προς το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, και της καμπύλης βαθμονόμησης ολικής απόδοσης ανιχνευτή προσδιορίζονται μέσω του προγράμματος TrueCoinc κατάλληλοι συντελεστές διόρθωσης επιφάνειας σχηματιζόμενων φωτοκορυφών. Επομένως, για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας αναλυόμενου δείγματος σε γ-φασματοσκοπική ανάλυση πραγματοποιείται ο εξής διαχωρισμός :

- στην περίπτωση που το εξεταζόμενο φωτόνιο συμμετέχει στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, τότε χρησιμοποιείται κατάλληλος συντελεστής διόρθωσης για το μέγεθος επιφάνεια σχηματιζόμενης φωτοκορυφής,
- στην περίπτωση που το εξεταζόμενο φωτόνιο δεν συμμετέχει στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης δεν απαιτείται καμία διόρθωση του όρου 'επιφάνεια φωτοκορυφής'.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 αναλύθηκε ο κώδικας PENELOPE (έκδοση 2005) ο οποίος βασίζεται στην τεχνική προσομοίωσης Monte-Carlo και είναι κατασκευασμένος από το Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης. Η βασική φιλοσοφία του κώδικα βασίζεται στην παρακολούθηση της πορείας σωματιδίου ή φωτονίου μέσα στην ύλη για μεγάλο αριθμό ιστοριών (showers). Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στη λειτουργία ενός από τους τρεις κώδικες χρήστη που διαθέτει, του PENMAIN.f. Ο συγκεκριμένος κώδικας έχει σχεδιαστεί για να επιλύει προβλήματα αλληλεπίδρασης σωματιδίων και ακτινοβολίας για σύνθετες και πολύπλοκες γεωμετρίες. Κατά την παρούσα Δ.Ε. πραγματοποιήθηκε ενδελεχής κατανόηση της δομής λειτουργίας του κώδικα χρήστη PENMAIN.f, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά τόσο στο Κεφάλαιο 3 όσο και στο Παράρτημα Β υπό μορφή λογικού διαγράμματος.

Η εμπειριστατωμένη ανάλυση του κώδικα χρήστη PENMAIN.f ήταν αναγκαία, ώστε στους ήδη υπάρχοντες φυσικούς νόμους και μηχανισμούς που διέπουν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης να είναι εφικτή η ορθή ένταξη της λειτουργίας του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Η έννοια του όρου 'ιστορία προσομοίωσης (shower)' άλλαξε και πλέον στο νέο κώδικα χρήστη PENMAIN.f, μπορεί να προσομοιωθεί ολόκληρο σχήμα διάσπασης ραδιενεργού ισότοπου. Κατά την εκτέλεση, δηλαδή, μίας ιστορίας είναι εφικτή η παρακολούθηση περισσότερων του ενός πρωτογενών φωτονίων. Για την επιτυχή ένταξη της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στη λειτουργία του κώδικα χρήστη PENMAIN.f πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες τροποποιήσεις οι οποίες περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Επιγραμματικά οι αλλαγές αυτές είναι :

- Ένταξη υπορουτίνας η οποία περιγράφει το διάγραμμα διάσπασης του εξεταζόμενου ισότοπου. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. κατασκευάστηκαν υπορουτίνες για τα ραδιενεργά ισότοπα ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs .
- Τροποποίηση του αρχείου εισόδου τύπου *.in*, ώστε να είναι εφικτή η προσομοίωση του διαγράμματος διάσπασης του εξεταζόμενου ισότοπου.
- Σύνδεση υπορουτινών σχημάτων διάσπασης ισότοπου με το κυρίως πρόγραμμα του κώδικα χρήστη PENMAIN.f και καθορισμός του συνολικού πλήθους των διαδοχικά εκπεμπόμενων πρωτογενών φωτονίων που προσομοιώνονται σε κάθε ιστορία καθώς και οι τιμές των αντίστοιχων ενεργειών.
- Προσομοίωση της πορείας όλων των διαδοχικών εκπεμπόμενων πρωτογενών φωτονίων που μετέχουν στη διάσπαση του πυρήνα στα πλαίσια της ίδιας ιστορίας.
- Καταγραφή μετά το πέρας κάθε ιστορίας των συνολικών αποτελεσμάτων σε κατάλληλους μετρητές, τα οποία προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις όλων των διαδοχικά εκπεμπόμενων πρωτογενών φωτονίων της διάσπασης του εξεταζόμενου ραδιενεργού πυρήνα.

Για κάθε τροποποίηση πραγματοποιήθηκαν καθαρά προγραμματιστικοί έλεγχοι ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του κώδικα ως προς αυτόν τον τομέα. Στο τέλος του 4ου Κεφαλαίου αναλύεται ο τρόπος προσδιορισμού της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω των αποτελεσμάτων του τροποποιημένου κώδικα

χρήστη όπου πλέον πρέπει να συνυπολογίζεται και το συνολικό ποσοστό εκπομπής (yield) του εξεταζόμενου φωτονίου.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων με χρήση του τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f. Αρχικά προσομοιώθηκαν σημειακές πηγές ^{60}Co και πηγές όγκου γεωμετρίας '2' και '8' στις ανιχνευτικές διάταξης HPGe και XtRa. Εκτελέστηκαν πειράματα με τις συγκεκριμένες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν όσον αφορά στην απόδοση φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης και πειράματος με τρεις τρόπους :

- μέσω ελέγχου του λόγου των δύο τιμών για την απόδοση φωτοκορυφής,
- μέσω της απόκλισης των δύο μεγεθών,
- μέσω στατιστικού ελέγχου U-Test.

Συγκεντρωτικά, προέκυψαν αποτελέσματα από τον τροποποιημένο κώδικα PENMAIN.f όπου στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η διαφορά τους από τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα δεν υπερβαίνει το 4%. Τα μοναδικά σενάρια στα οποία παρατηρήθηκε απόκλιση των τιμών αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης και πειράματος ήταν δύο. Πρώτον, η περίπτωση της σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 73mm από το κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa, όπου διαπιστώθηκε απόκλιση των συγκρινόμενων τιμών των αποδόσεων φωτοκορυφής να είναι της τάξης του 7% για τα φωτόνια ενέργειας 1173 keV, ενώ από το στατιστικό έλεγχο U-Test προέκυψε το συμπέρασμα πως τα δύο μεγέθη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Το δεύτερο σενάριο αφορά την πηγή όγκου ΕΕΑΕ (2M HCl) γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe, όπου η τιμή της μεταβλητής U έλαβε τιμή οριακά μεγαλύτερη από τη μέγιστη αποδεκτή τιμή (1.96). Συνοψίζοντας, προέκυψε το συμπέρασμα πως τόσο σε ποιοτικό όσο και σε ποσοτικό επίπεδο, ο τροποποιημένος κώδικας χρήστη PENMAIN.f εξάγει αποτελέσματα τα είναι παραπλήσια με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων σχετικά με τις αποδόσεις φωτοκορυφής που εξάγονται από το νέο κώδικα σχετικά με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από τον τροποποιημένο κώδικα PENMAIN.f. Προσομοιώθηκαν τα διαγράμματα διάσπασης ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs με χρήση του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f στις εξής τέσσερις γεωμετρίες (4) πηγής - ανιχνευτή:

- σημειακή πηγή τοποθετημένη στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe,
- σημειακή πηγή τοποθετημένη στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa,
- πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe,
- πηγή όγκου γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa.

Τα συγκεκριμένα σενάρια επιλέχθηκαν διότι αποτελούν τις γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, αντίστοιχα, όσον αφορά στις γ-φασματοσκοπικές διατάξεις HPGe και XtRa. Εκτελέστηκαν ανεξάρτητες

προσομοιώσεις για τα αντίστοιχα σενάρια και για το σύνολο των εκπεμπόμενων φωτονίων των ισοτόπων ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs με χρήση του πρωτότυπου κώδικα PENMAIN.f. Ακολούθως, προσδιορίστηκε η τιμή του λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μέσω του νέου κώδικα προς την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από τον πρωτότυπο κώδικα με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό της ποσοτικοποίησης της επίδρασης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης στην εκάστοτε γεωμετρία. Οι τιμές του λόγου συγκρίθηκαν με τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης επιφανειών σχηματιζόμενων φωτοκορυφών, όπως προκύπτουν από το υπολογιστικό πρόγραμμα TrueCoinc για τις αντίστοιχες γεωμετρίες πηγής - ανιχνευτή.

Στα σενάρια που προσομοιώθηκαν για πηγές ^{60}Co , παρατηρήθηκε πως οι τιμές του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής για τα εκπεμπόμενα φωτόνια μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc, δεν διαφέρουν περισσότερο από 4%. Μοναδική περίπτωση όπου παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση είναι το σενάριο σημειακής πηγής τοποθετημένης στο κάλυμμα του ανιχνευτή HPGe. Διαπιστώθηκε απόκλιση των συγκρινόμενων μεγεθών της τάξης του 7%, ενώ ταυτόχρονα η μεταβλητή U έλαβε την τιμή 1.902, η οποία είναι οριακά υψηλότερη της αποδεκτής (1.96), με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την στατιστική διαφορά μεταξύ του λόγου αποδόσεων και του συντελεστή διόρθωσης T.C.C για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Το επόμενο ισότοπο που αναλύθηκε ήταν το ^{88}Y . Κατά τη σύγκριση του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στην ενέργεια 2734 keV μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τους συντελεστές διόρθωσης T.C.C. παρατηρήθηκε πως υπήρχε απόκλιση των τιμών για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια που έφτασε έως και 15%. Οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών U ήταν μεγαλύτερες του 2.576 με αποτέλεσμα να προκύπτει το συμπέρασμα πως τα συγκρινόμενα μεγέθη (λόγος απόδοσης και συντελεστής διόρθωσης T.C.C.) διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Παρατηρήθηκε πως οι συντελεστές διόρθωσης που προκύπτουν από το υπολογιστικό πρόγραμμα TrueCoinc για το φωτόνιο ενέργειας 2734 keV είναι αρκετά μεγαλύτεροι σε σχέση με τους συντελεστές που υπολογίζονται για τα υπόλοιπα εκπεμπόμενα φωτόνια των εξεταζόμενων ισοτόπων. Η διαπίστωση αυτή ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι οι καμπύλες βαθμονόμησης απόδοσης ανιχνευτή και ολικής απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των συντελεστών διόρθωσης T.C.C. προέκυψαν με χρήση μονοενεργειακών πηγών στην ενεργειακή περιοχή 59.54 keV (^{241}Am) έως 1460.75 keV (^{40}K). Συνεπώς, για την περίπτωση του φωτονίου ενέργειας 2734 keV, το πρόγραμμα TrueCoinc εξάγει τιμές συντελεστών διόρθωσης οι οποίοι προκύπτουν από επέκταση (extrapolation) των καμπύλων βαθμονόμησης. Για τα εκπεμπόμενα φωτόνια ενέργειας 898 keV και 1836 keV παρατηρήθηκε πως οι αποκλίσεις του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc δεν αποκλίνουν περισσότερο από 1%. Ωστόσο, στην περίπτωση πηγής όγκου ^{88}Y γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή HPGe, η τιμή της μεταβλητής U

πήρε την τιμή 2.67 με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την στατιστική διαφορά των μετρούμενων μεγεθών της συγκεκριμένης περίπτωσης.

Το ισότοπο ^{57}Co αναλύθηκε μόνο για δύο σενάρια. Ειδικότερα εξετάστηκαν οι περιπτώσεις σημειακή πηγής ^{57}Co πάνω στο κάλυμμα του ανιχνευτή XtRa και πηγής όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa. Στο πρώτο σενάριο οι αποκλίσεις των συγκρινόμενων μεγεθών (λόγος απόδοσης φωτοκορυφών και συντελεστής διόρθωσης T.C.C.) για τα φωτόνια 14.4 keV, 122 keV και 136 keV δεν υπερέβη το 3%, ενώ παράλληλα οι μεταβλητές U ήταν μικρότερες της μέγιστης αποδεκτής. Προέκυψε το συμπέρασμα πως τα δύο συγκρινόμενα μεγέθη δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Για την περίπτωση πηγής όγκου ^{57}Co γεωμετρίας '2' στον ανιχνευτή XtRa, διαπιστώθηκε πως για το φωτόνιο ενέργειας 14.4 keV, η απόκλιση του λόγου απόδοσης φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoin, ήταν μικρότερη από 4% και η τιμή της μεταβλητής U μικρότερη του 1.96. Ωστόσο, τα αντίστοιχα μεγέθη για τα εκπεμπόμενα φωτόνια ενέργειας 122 keV και 136 keV, απέκλιναν περισσότερο του 4% και παράλληλα μέσω του στατιστικός έλεγχος U-Test δεν ήταν δυνατόν να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για τη στατιστικά σημαντική διαφορά των μεγεθών λόγος απόδοσης φωτοκορυφών και συντελεστής διόρθωσης T.C.C. Σημειώνεται πως για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή οι τιμές για το συντελεστή διόρθωσης όπως υπολογίζεται από το πρόγραμμα TrueCoinc, για τα δύο αυτά φωτόνια ενέργειας 122 keV και 136 keV είναι ίσες με 1, ενώ για το φωτόνιο ενέργειας 14.4 keV είναι 0.902, γεγονός που μπορεί να υποδεικνύει ότι οι συντελεστές αυτοί ενδεχομένως δεν είναι αξιόπιστοι.

Το τελευταίο ισότοπο που εξετάστηκε ήταν το ^{134}Cs . Συγκεντρωτικά μπορεί να διαπιστωθεί πως για τα εκπεμπόμενα φωτόνια του συγκεκριμένου ισοτόπου, στην πλειοψηφία των σεναρίων τα μεγέθη του λόγου αποδόσεων φωτοκορυφής μέσω τροποποιημένου και πρωτότυπου κώδικα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών διόρθωσης από το πρόγραμμα TrueCoinc δεν διαφέρουν σημαντικά. Σημειώνεται πως τα φωτόνια του ισοτόπου ^{134}Cs χαμηλών ενεργειών (242 keV, 326 keV και 475 keV) δεν συγκρίθηκαν διότι δεν διακρίνονται στο εξαγόμενο φάσμα προσομοίωσης μέσω του τροποποιημένου κώδικα PENMAIN.f, συνεπώς δεν ήταν αξιόπιστος ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής.

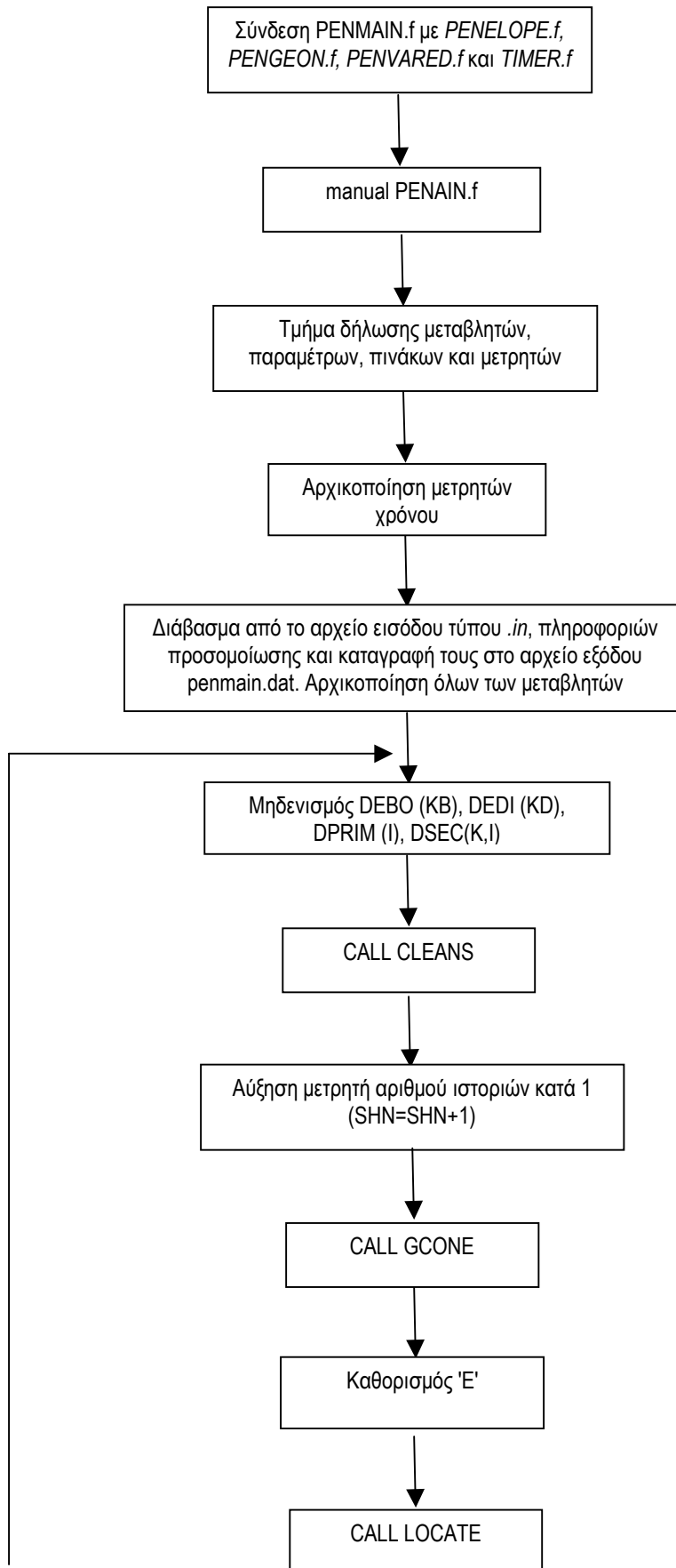
Εν κατακλείδι, ο κώδικας χρήστη PENMAIN.f τροποποιήθηκε ώστε να συμπεριλάβει την επίδραση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης και ελέγχθηκε τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Από τις διάφορες συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι για τα ισότοπα ^{60}Co , ^{88}Y , ^{57}Co και ^{134}Cs , για τα οποία δημιουργήθηκαν κατάλληλες υπορουτίνες διαγράμματος διάσπασης, ο τροποποιημένος κώδικας PENMAIN.f μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση απόδοσης των διατάξεων του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π., λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Επιπροσθέτως, η συνδυασμένη χρήση του τροποποιημένου κώδικα και του αρχικού κώδικα επιτρέπει τον προσδιορισμό συντελεστών διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

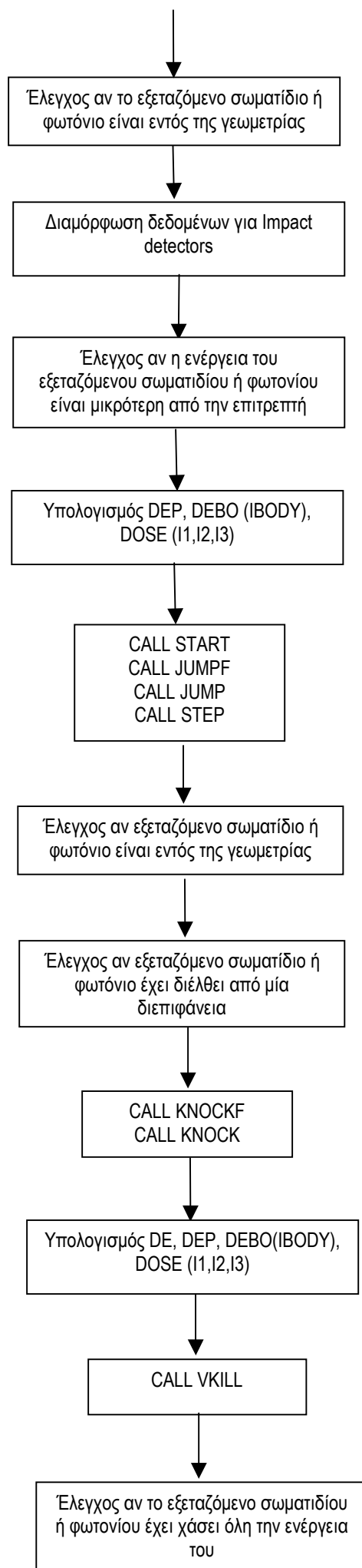
Προφανώς η Δ.Ε. αυτή δεν έχει αντιμετωπίσει ολοκληρωτικά το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. Θα μπορούσε στο μέλλον να επεκταθεί στους εξής τομείς :

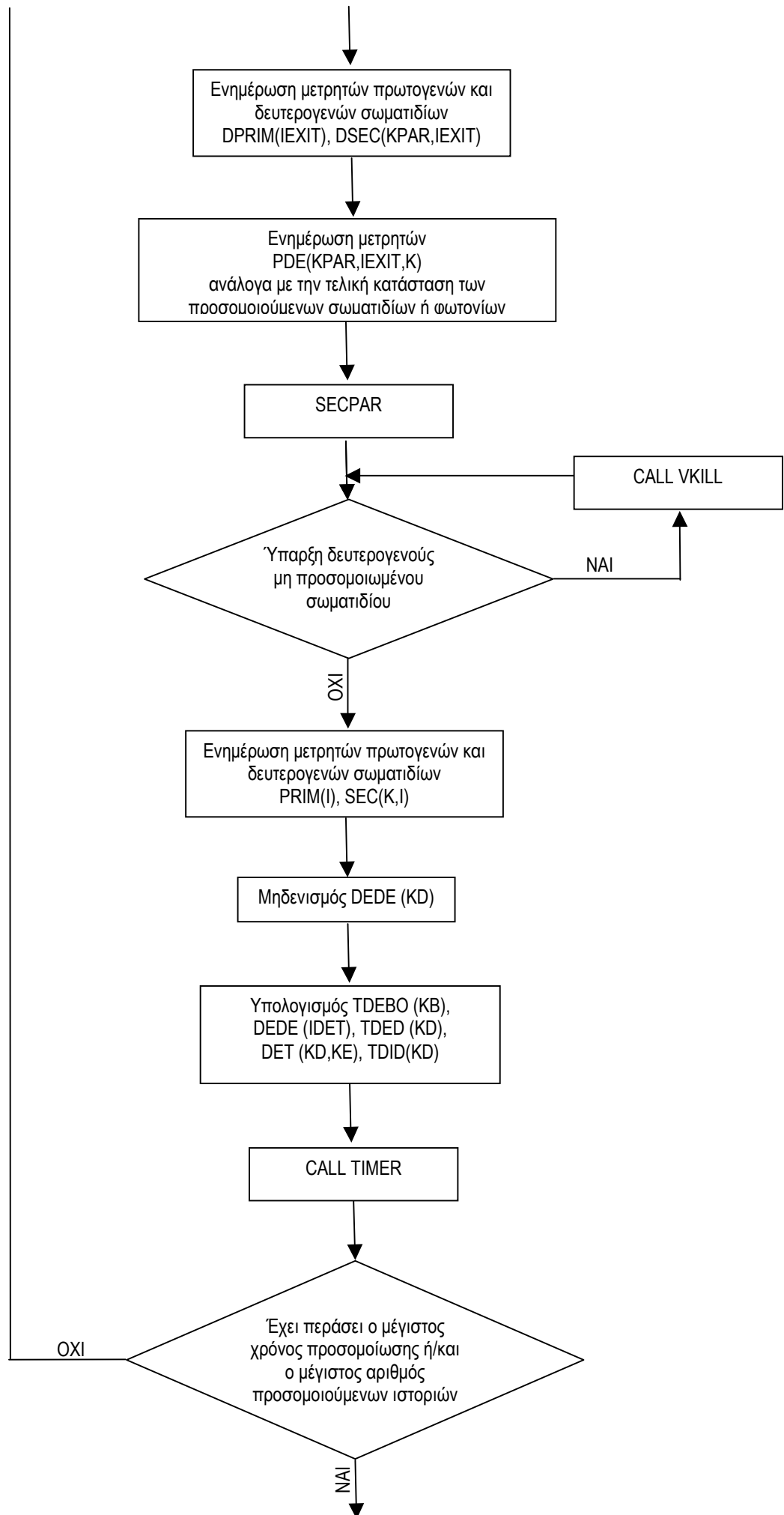
- Κατασκευή και εισαγωγή στον κώδικα νέων υπορουτινών οι οποίες να περιλαμβάνουν τα διαγράμματα διάσπασης και άλλων ισοτόπων τα οποία υπόκεινται στο συγκεκριμένο φαινόμενο.
- Οι υπορουτίνες διαγραμμάτων διάσπασης να περιλαμβάνουν και την επίδραση των χαρακτηριστικών ακτίνων-Χ που εκπέμπονται. Έτσι, η προσομοίωση προσεγγίζει ακόμα περισσότερο την πραγματικότητα.
- Επέκταση του κώδικα ώστε να λαμβάνει υπόψη και το ενδεχόμενο πραγματικής σύμπτωσης μεταξύ φωτονίου-γ και ακτίνων-Χ πέδησης η οποία εκπέμπεται από την πέδηση του σωματιδίου β, που εκπέμπεται από ραδιενεργές πηγές.
- Τροποποίηση της λειτουργίας του νέου κώδικα με στόχο να περιλαμβάνει και την περίπτωση αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου με δύο διαφορετικούς ανιχνευτές, προσομοίωση η οποία μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη κατά τη μελέτη με χρήση κωδίκων ενός συστήματος Compton Suppression.

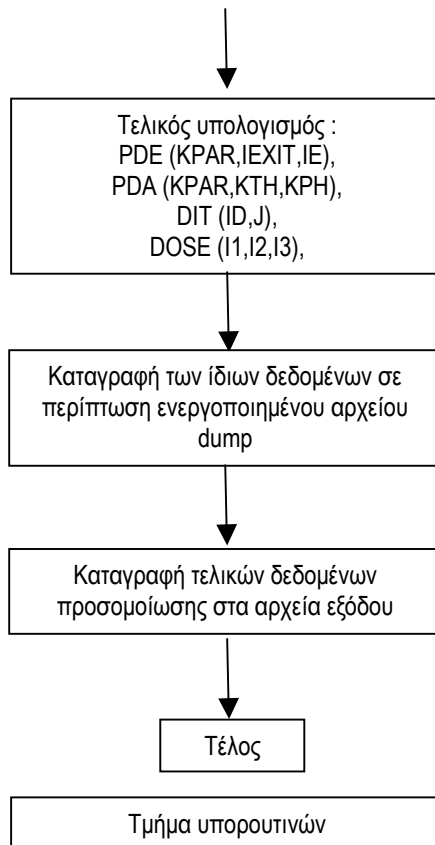
Παράρτημα Α

Λογικό διάγραμμα κώδικα χρήστη PENMAIN.f.









Παράρτημα Β

Μεταβλητές¹² κώδικα χρήστη PENMAIN.f.

BDEE	Μέγεθος του καναλιού της ενέργειας που καταγράφει ο ανιχνευτής απόθεσης
BDIE	Μέγεθος του καναλιού της ενέργειας που καταγράφει ο ανιχνευτής
BDOSE	Μέγεθος του bin του αντίστοιχου μήκους του ορθογωνίου (3D δόση)
BDOSER	Αντίστροφο του BDOSE
BSE	Μέγεθος του bin της ενέργειας
BSPH	Μέγεθος του bin της γωνιάς PHI
BSTH	Μέγεθος του bin της γωνιάς THETA
BSZ	Μέγεθος του bin της z συντεταγμένης
CPUTO	Χρόνος (σε sec) που παρήλθε από την εκκίνηση του κώδικα
CPUTA	Χρόνος που διήρκησε η προηγούμενη προσομοίωση (επανέναρξη)
DE	Αποτιθέμενη ενέργεια στο υλικό εξαιτίας της αλληλεπίδρασης που έγινε
DEBO	Αποτεθειμένη ενέργεια στο συγκεκριμένο body για το συγκεκριμένο shower
DEDE	Αποτεθειμένη ενέργεια που έχει καταγράψει ο ανιχνευτής απόθεσης για το συγκεκριμένο shower
DEDI	Ενέργεια του εισερχόμενου σωματιδίου στον ανιχνευτή για το συγκεκριμένο shower
DEP	Αποτεθειμένη ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές βαρύτητας
DET	Αριθμός των σωματιδίων που εναποθέτουν ενέργεια, στον συγκεκριμένο ανιχνευτή, που ανήκει στο κανάλι KE
DF	Αντίστροφο του TOTN
DIT	Αριθμός των σωματιδίων με ενέργεια που ανήκει στο κανάλι IE
DITP	Ποσότητα προσαύξησης της DIT που είναι ο παράγων βαρύτητας του σωματιδίου
DOSE	Συνολική δόση στη συγκεκριμένη θέση του ορθογωνίου (3D δόση)
DOSEP	Ποσότητα προσαύξησης της DOSE
DPRIM	Αριθμός πρωτογενών σωματιδίων με όμοιο IEXIT για το συγκεκριμένο shower
DS	Απόσταση που διανύει το σωματίδιο μέχρι να αλληλεπιδράσει
DSEC	Αριθμός δευτερογενών σωματιδίων KPAR με όμοιο IEXIT για το συγκεκριμένο shower
DSEF	Απόσταση που έχει διανύσει το σωματίδιο πριν αυτό αλλάξει body
DSHN	Επιθυμητός αριθμός ιστοριών (showers) που θα πραγματοποιηθούν
DSMAX	Μέγιστο επιτρεπόμενο βήμα
DUMPP	Χρονική περίοδος (σε sec) όπου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα καταγράφονται κάθε φορά στα αρχεία εξόδου ($15 \leq DUMPP \leq 86400$)
DXL(1)	x συντεταγμένη της μικρότερης κορυφής του ορθογωνίου (3D δόση)
DXL(2)	y συντεταγμένη της μικρότερης κορυφής του ορθογωνίου (3D δόση)
DXL(3)	z συντεταγμένη της μικρότερης κορυφής του ορθογωνίου (3D δόση)
DXU(1)	x συντεταγμένη της μεγαλύτερης κορυφής του ορθογωνίου (3D δόση)
DXU(2)	y συντεταγμένη της μεγαλύτερης κορυφής του ορθογωνίου (3D δόση)
DXU(3)	z συντεταγμένη της μεγαλύτερης κορυφής του ορθογωνίου (3D δόση)
E	Ενέργεια του σωματιδίου
E0	Αρχική ενέργεια (μονό-ενεργειακή πηγή)

¹² Όπως έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη εργασία [Δ.Ε. Αθανασίου Ν., 2006]

EABS	Ενέργεια απορρόφησης του σωματιδίου KPAR μέσα στο υλικό MAT
EDEL	Κάτω όριο της ενέργειας που θα καταγράψει ο ανιχνευτής απόθεσης
EDEU	Άνω όριο της ενέργειας που θα καταγράψει ο ανιχνευτής απόθεσης
EDIL	Κάτω όριο της ενέργειας που θα καταγράψει ο ανιχνευτής
EDIU	Άνω όριο της ενέργειας που θα καταγράψει ο ανιχνευτής
EINTL	Πλάτος της κάθε στήλης της ενέργειας για την περίπτωση του φάσματος ενέργειας
EMAX	Άνω όριο της ενέργειας των εξερχομένων σωματιδίων που θα καταγραφεί
EMIN	Κάτω όριο της ενέργειας των εξερχομένων σωματιδίων που θα καταγραφεί
EPMAX	Μέγιστη ενέργεια του σωματιδίου
ERR	Το σφάλμα της αντίστοιχης μεταβλητής
ES	Ενέργεια (πηγή με φάσμα)
FA	Μέση τιμή των απορροφημένων σωματιδίων
FACT	Αντίστροφο του EINTL
FB	Μέση τιμή των οπισθοσκεδαζομένων σωματιδίων
FNT	Αντίστροφο του TOTN
FORCE	Παράγοντας εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης (≥ 1)
FORCER	Παράγοντας εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης (≥ 1)
FT	Μέση τιμή των εκπεμπομένων σωματιδίων
I1	Ο αριθμός του καναλιού της x συντεταγμένης του ορθογωνίου (3D δόση)
I1M	Το κανάλι της x συντεταγμένης του ορθογωνίου που έχει τη μέγιστη δόση (3D δόση)
I2	Ο αριθμός του καναλιού της y συντεταγμένης του ορθογωνίου (3D δόση)
I2M	Το κανάλι της y συντεταγμένης του ορθογωνίου που έχει τη μέγιστη δόση (3D δόση)
I3	Ο αριθμός του καναλιού της z συντεταγμένης του ορθογωνίου (3D δόση)
I3M	Το κανάλι της z συντεταγμένης του ορθογωνίου που έχει τη μέγιστη δόση (3D δόση)
IB	Αριθμός που χαρακτηρίζει το body
IBODY	Αριθμός που χαρακτηρίζει το body
IBODYL	Αριθμός που χαρακτηρίζει το body
ICOL	Είδος της αλληλεπίδρασης
IDET	Αριθμός που χαρακτηρίζει τον ανιχνευτή
IDOSE	Δείκτης για την ενεργοποίηση της κατανομή της δόσης (0=όχι, 1=ναι)
IDUMP	Δείκτης για την δημιουργία dump αρχείου που θα επιτρέπει την επανέναρξη της προσομοίωσης
IE	Ο αριθμός του καναλιού της ενέργειας που καταγράφει ο ανιχνευτής
IFORCE	Δείκτης για την ύπαρξη εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης (0=όχι, 1=ναι)
IFORON	Δείκτης για την ύπαρξη εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης (0=όχι, 1=ναι)
ILB(1)	Δημιουργία του σωματιδίου (1=πρωτογενούς, 2=προερχόμενο από το πρωτογενή, κλπ)
ILB(2)	Είδος (KPAR) του πατρικού σωματιδίου
ILB(3)	Είδος της αλληλεπίδρασης (ICOL) από την οποία προέκυψε το σωματίδιο
ILB(4)	Μη μηδενική τιμή αναφέρεται σε σωματίδια που εκπέμφθηκαν από ατομική αποδιέγερση και περιγράφει τη μετάβαση του σωματιδίου
ILB(5)	Σήμανση για το σωματίδιο που μπορεί να καθορισθεί από το χρήστη
INTFOR	Δείκτης για την ύπαρξη εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης (0=όχι, 1=ναι)
IPSF	Δείκτης για την ενεργοποίηση της δημιουργίας psf αρχείου (ύπαρξη ανιχνευτή)

IRESUM	Δείκτης για την ύπαρξη επανέναρξης της προσομοίωσης (0=όχι, 1=ναι)
IRETRN	Δείκτης για την προσωρινή διακοπή της επαναληπτικής διαδικασίας
ISEED1	Τυχαίος αριθμός
ISEED2	Τυχαίος αριθμός
ISORP	Δείκτης που καθορίζει την ύπαρξη psf (0=όχι psf, 1=ναι psf)
ISPEC	Δείκτης για το είδος της πηγής (0=μονοενεργειακή, 1=φάσμα)
IEXIT	Δείκτης της τελικής κατάστασης του σωματιδίου
K	Ο αριθμός του καναλιού της ενέργειας των εξερχομένων σωματιδίων
KB	Το body που απαρτίζει τον ανιχνευτή
KBDE	Ο ανιχνευτής απόθεσης (ενέργειας) που αναφέρεται το συγκεκριμένο body KB
KBDI	Ο ανιχνευτής που αναφέρεται το συγκεκριμένο body KB
KDET	Ο ανιχνευτής που αναφέρεται το συγκεκριμένο body KB
KE	Ο αριθμός του καναλιού της ενέργειας που καταγράφει ο ανιχνευτής απόθεσης
KKDI	Το είδος των σωματιδίων που ανιχνεύονται από το συγκεκριμένο ανιχνευτή
KPAR	Είδος των σωματιδίων
KPARD	Είδος των σωματιδίων που ανιχνεύει ο ανιχνευτής
KPARP	Είδος των πρωτογενών σωματιδίων
KPH	Ο αριθμός του καναλιού της γωνίας PHI
KTH	Ο αριθμός του καναλιού της γωνίας THETA
LEFT	Αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στη secondary stack την στιγμή που καλείται η υπορουτίνα SECPAR
M	Αριθμός που χαρακτηρίζει το υλικό
MATER	Υλικό στο συγκεκριμένο body
MAXMAT	Μέγιστος αριθμός υλικών (=10)
NB	Μέγιστος αριθμός των bodies (=1250)
NBD(1)	Αριθμός των bins της x κατεύθυνσης του ορθογωνίου (3D δόση) (\leq NDXM)
NBD(2)	Αριθμός των bins της y κατεύθυνσης του ορθογωνίου (3D δόση) (\leq NDYM)
NBD(3)	Αριθμός των bins της z κατεύθυνσης του ορθογωνίου (3D δόση) (\leq NDZM)
NBE	Αριθμός των bins της ενέργειας των εξερχομένων σωματιδίων (=100)
NBOD	Αριθμός των bodies που έχουν οριστεί
NBODY	Αριθμός των οριζόμενων bodies
NBPH	Αριθμός των bins της αζιμουθιακής γωνίας PHI (=60)
NBTH	Αριθμός των bins της πολικής γωνίας THETA (=90)
NCROSS	Δείκτης για το αν το σωματίδιο άλλαξε body (0=όχι, 0≠ναι)
NDECH	Αριθμός των καναλιών του φάσματος εξόδου του ανιχνευτή απόθεσης (\leq 1000)
NDEDEF	Αριθμός του ανιχνευτή απόθεσης
NDICH	Αριθμός των καναλιών του φάσματος εξόδου του ανιχνευτή (\leq 1000)
NDIDEF	Αριθμός του ανιχνευτή
NDXM	Μέγιστος αριθμός των bins x κατεύθυνσης του ορθογωνίου (3D δόση)
NDYM	Μέγιστος αριθμός των bins y κατεύθυνσης του ορθογωνίου (3D δόση)
NDZM	Μέγιστος αριθμός των bins z κατεύθυνσης του ορθογωνίου (3D δόση)
NEDM	Μέγιστος αριθμός των ανιχνευτών απόθεσης (=5)
NIDM	Μέγιστος αριθμός των ανιχνευτών (=5)
NMAT	Αριθμός των διαφορετικών υλικών
NMATG	Αριθμός των διαφορετικών υλικών σε ολόκληρα τα bodies

NPINP	Αριθμός των παραμέτρων που καθορίζονται από την PARINP (≥ 0)
NPSF	Αύξων αριθμός του αρχείου psf
NPSFM	Μέγιστος αριθμός των psf (=100)
NSEB	Αριθμός της στήλης του φάσματος της ενέργειας
NSEBM	Μέγιστος αριθμός των στηλών του φάσματος της ενέργειας (=200)
NSHI	Προσαύξηση του αριθμού ιστορίας (ύπαρξη psf)
NSHJ	Αριθμός των showers που εκτελέστηκαν μέχρι να ξανά καταχωρηθούν δεδομένα στο psf εξαιτίας του ανιχνευτή
NSPLIT	Ισοδύναμα σωματίδια που θα διαχωριστεί το κάθε σωματίδιο του psf (1-50)
PDA	Αριθμός των εξερχομένων σωματιδίων KPAR με γωνίες εξόδου THETA και PHI που να ανήκουν στα κανάλια KTH και KPH αντίστοιχα
PDAP	Ποσότητα προσαύξησης της PDA που είναι ο παράγων βαρύτητας του σωματιδίου
PDE	Αριθμός των εξερχομένων σωματιδίων KPAR με όμοιο IEXIT με ενέργεια που ανήκει στο κανάλι K
PDEP	Ποσότητα προσαύξησης της PDE που είναι ο παράγων βαρύτητας του σωματιδίου
PHI	Γωνία «φ» του σωματιδίου όταν αυτό εξέρχεται του συστήματος (σε rad)
PRIM	Συνολικός αριθμός πρωτογενών σωματιδίων με όμοιο IEXIT
PSFDIO	Όνομα του psf που θα δημιουργηθεί εξαιτίας του ανιχνευτή
PSFI	Όνομα του psf αρχείου
PTOT	Άθροισμα των PTS
PTS	Πιθανότητα εμφάνισης της ενέργειας ES (πηγή με φάσμα)
QAV	Μέση τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής
QER	Το σφάλμα του QAV
RHO	Πυκνότητα μάζας του υλικού (g/cm^3)
RHOI	Αντίστροφο της πυκνότητας του υλικού
RLAST	Αριθμός του shower όταν δημιουργήθηκε το psf εξαιτίας του ανιχνευτή
RLREAD	Πόσες φορές διαβάζονται δεδομένα από το psf
RWRITE	Πόσες φορές καταχωρήθηκαν δεδομένα στο psf εξαιτίας του ανιχνευτή
SALPHA	Γωνία α του ανοίγματος της εκπεμπόμενης δέσμης
SEC	Συνολικός αριθμός δευτερογενών σωματιδίων KPAR με όμοιο IEXIT
SHIST	Αριθμός των σωματιδίων προερχόμενων από την ίδια στήλη του φάσματος ενέργειας της πηγής
SHN	Αριθμός της τρέχον ιστορίας
SHNA	Αριθμός της τρέχον ιστορίας (περίπτωση που εφαρμόζεται επανέναρξη)
SPCDEO	Όνομα του αρχείου εξόδου που περιέχει το φάσμα της ενέργειας
SPCDIO	Όνομα του αρχείου εξόδου που περιέχει το φάσμα της ενέργειας
SPHI	Γωνία φ (άξονας -x) του άξονα κατεύθυνσης της εκπεμπόμενης δέσμης
STHETA	Γωνία θ (άξονας -z) του άξονα κατεύθυνσης της εκπεμπόμενης δέσμης
SX0	x συντεταγμένη της σημειακής πηγής
SY0	y συντεταγμένη της σημειακής πηγής
SZ0	z συντεταγμένη της σημειακής πηγής
TAVS	Ταχύτητα προσομοίωσης (ιστορίες/sec)
TDEBO	Συνολική αποθεθειμένη ενέργεια στο συγκεκριμένο body
TDED	Συνολική αποθεθειμένη ενέργεια που έχει καταγράψει ο ανιχνευτής απόθεσης
TDID	Συνολική ενέργεια των εισερχομένων σωματιδίων στον ανιχνευτή
THETA	Γωνία «θ» του σωματιδίου όταν αυτό εξέρχεται του συστήματος (σε rad)

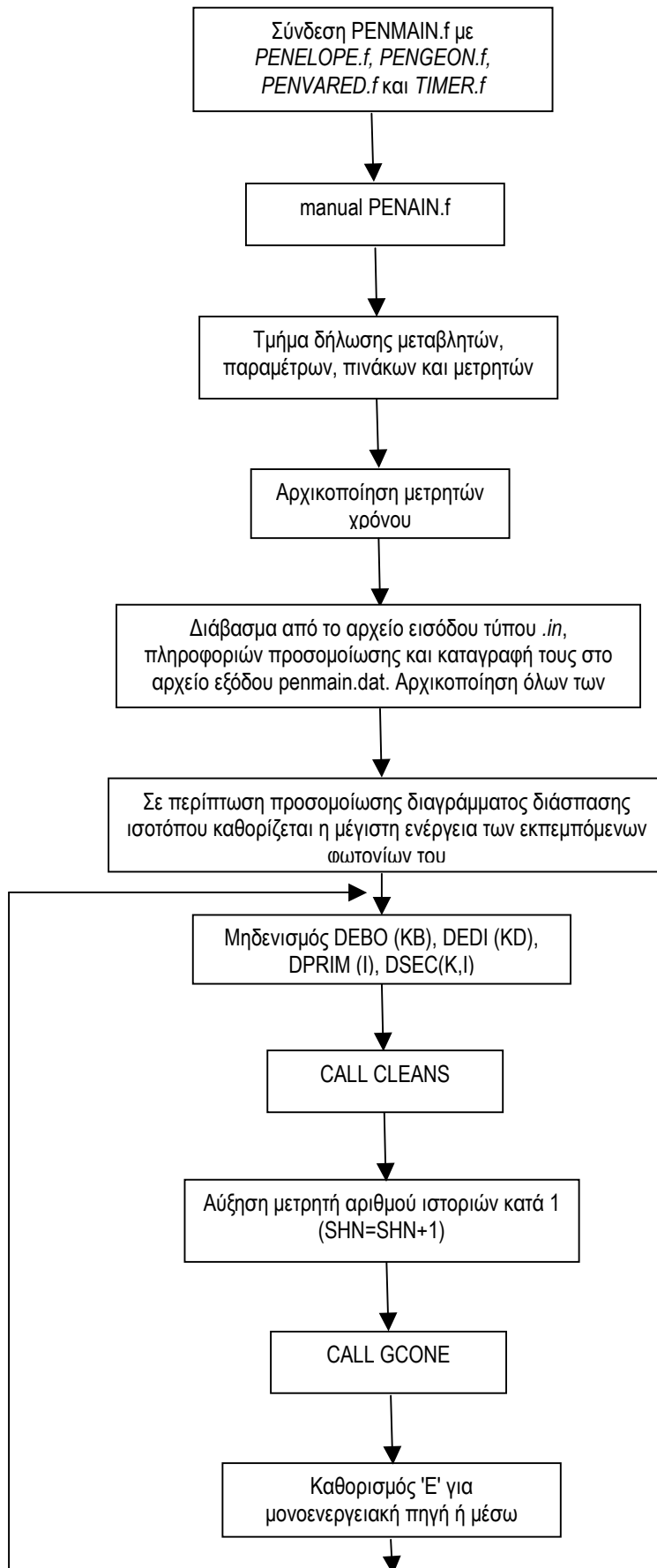
TIMEA	Ο μέγιστος υπολογιστικός χρόνος (σε sec) της προσομοίωσης
TITLE	Τίτλος της εργασίας
TOTN	Συνολικός αριθμός των ιστοριών (showers)
TSEC	Ο χρόνος από την εκκίνηση του κώδικα μέχρι το τέλος του τρέχοντος shower
TSECA	Ο μέγιστος συνολικός επιτρεπτός χρόνος (σε sec) που θα διαρκέσει η προσομοίωση
TSECAD	Ο χρόνος (σε sec) για την επεξεργασία του αρχείου εισόδου
TSECIN	Ο χρόνος (σε sec) για την επεξεργασία του αρχείου εισόδου
TSIM	Χρόνος που διήρκησε η προσομοίωση
U	Συνιμήτονο κατεύθυνσης (x)
V	Συνιμήτονο κατεύθυνσης (y)
VOXEL	Κύβος με πλευρές τα αντίστοιχα μεγέθη των bins (3D δόση)
W	Συνιμήτονο κατεύθυνσης (z)
WGHT	Παράγων βαρύτητας του σωματιδίου
WGHT0	Παράγων βαρύτητας του πρωτογενούς σωματιδίου (=1)
WHIG	Άνω όριο του παράγοντα βαρύτητας για την εξαναγκασμένη αλληλεπίδραση
WLOW	Κάτω όριο του παράγοντα βαρύτητας για την εξαναγκασμένη αλληλεπίδραση
WSEC	Μέση τιμή των δευτερογενών σωματιδίων τύπου KPAR με όμοιο IEXIT
WSEC2	Το σφάλμα του WSEC
X	x συντεταγμένη του σωματιδίου
Y	y συντεταγμένη του σωματιδίου
YAV	Μέση τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής
YERR	Το σφάλμα της αντίστοιχης μεταβλητής
Z	z συντεταγμένη του σωματιδίου

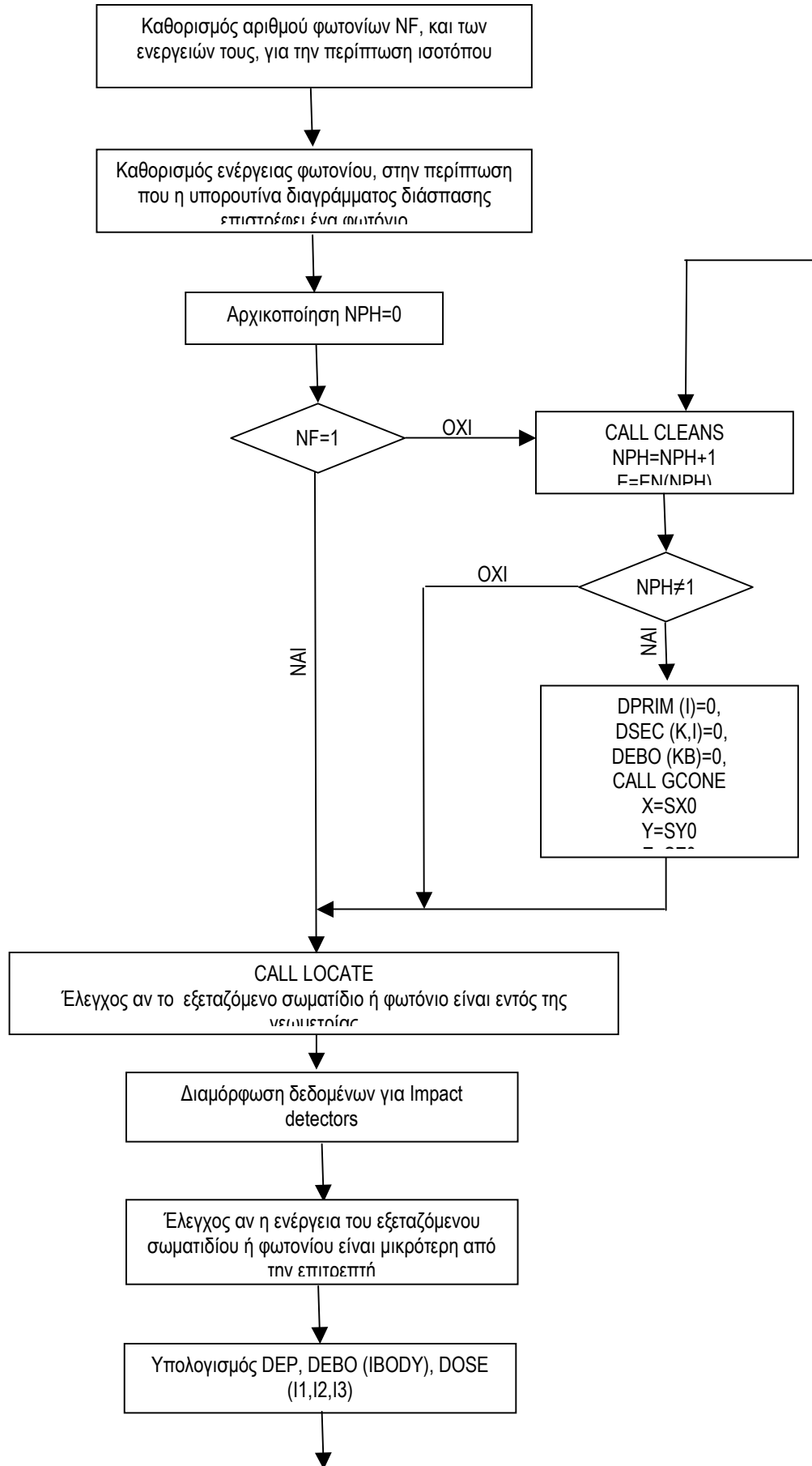
Στον τροποποιημένο κώδικα χρήστη PENMAIN.f εντάχθηκαν και οι εξής μεταβλητές :

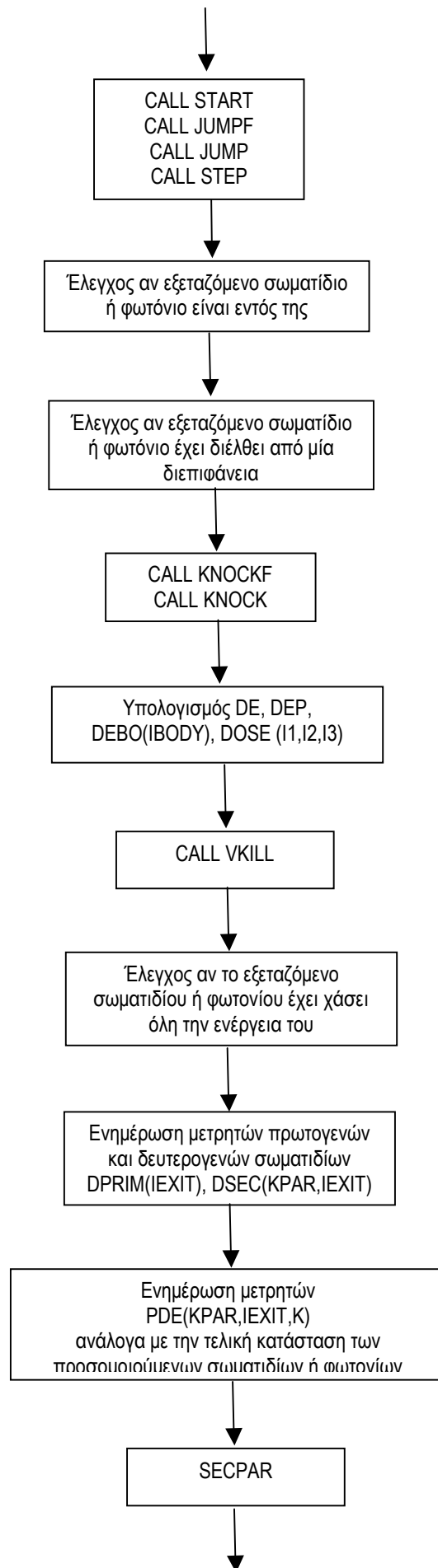
EN	Μέγιστη ενέργεια προσομοιούμενων φωτονίων κάθε ιστορίας
EN (100)	Πίνακας στον οποίον περιέχονται οι ενέργειες των προσομοιούμενων φωτονίων κάθε ιστορίας
NF	Αριθμός προσομοιούμενων φωτονίων κάθε ιστορίας
NPH	Μετρητής προσομοιούμενων φωτονίων κάθε ιστορίας (τιμές από 0 έως NF)
SISOTOPE	Όνομα εξεταζόμενου ισότοπου

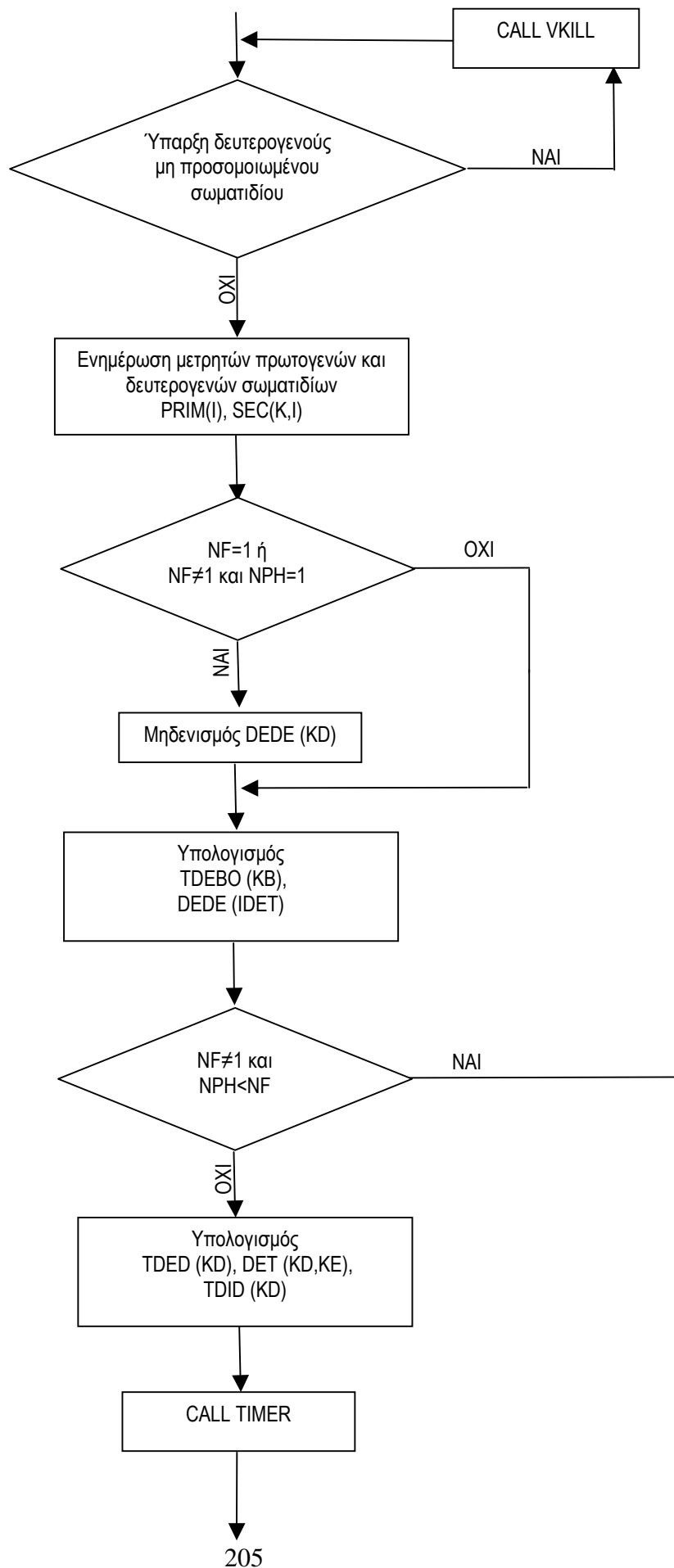
Παράρτημα Γ

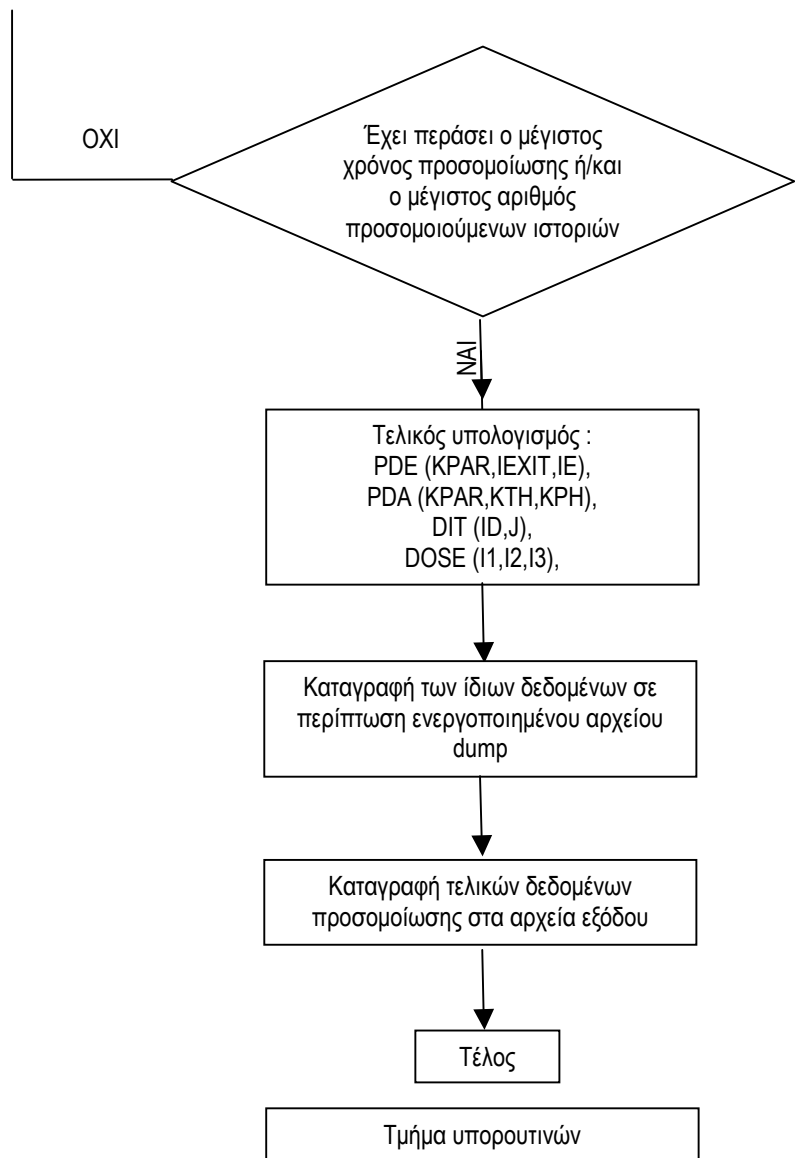
Λογικό διάγραμμα τροποποιημένου κώδικα χρήστη PENMAIN.f.











Βιβλιογραφία

1. 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.
2. Αναγνωστάκης Μ., 'γ-Φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1988.
3. Βασιλοπούλου Θ., 'Προσδιορισμός συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ανιχνευτικής διάταξης HPGe λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo', Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
4. Βιβλιοθήκη ισοτόπων Radiation Decay v.3.6 έκδοση 2001.
5. Βιβλιοθήκη ισοτόπων Isotope Explorer v.2.23 έκδοση 1999.
6. Δουλγκέρογλου Μ., 'Ανάπτυξη μεθοδολογίας προσδιορισμού της δοσιμετρική κατανομής γύρω από πηγή βραχυθεραπείας, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo' Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
7. Καρφόπουλος Κ., '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
8. Καρφόπουλος Κ., 'Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και της τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα - υπό εκπόνηση.
9. Λεωνίδου Δ., 'Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών & ύλης - Δοσιμετρία - Θωράκιση', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1984.
10. Λεωνίδου Δ., 'Μέθοδοι και όργανα ανιχνεύσεως πυρηνικών ακτινοβολιών', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1990.
11. Σάββα Μ., 'Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης γερμανίου για τον προσδιορισμό του ισοτόπου ${}^7\text{Be}$ στα ατμοσφαιρικά αερολύματα με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo', Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
12. Σιμόπουλος Σ., 'Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών (Β' Έκδοση)', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1989.
13. Χαυλής Σ., 'Μελέτη της λειτουργίας διάταξης XRF με χρήση κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo', Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
14. Andreev D.S., Erokhina K.I, Zvonov V.S and Lemberg I.Kh, Istr. Exp. Tech. USSR (English transl.), vol. 15, pp. 1358, 1972.
15. Andreev D.S., Erokhina K.I, Zvonov V.S and Lemberg I.Kh, Bull. Acad Sci. USSR Phys. Ser. (English transl.) vol. 37(8) pp. 41, 1973.

16. Bé M.-M. et al., βιβλιοθήκη ισotόπων 'Tables des Radionucléides', Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Pavillon de Breteuil, Sèvres, 2004.
(www.nucleide.org/EDDEP_WG/DDEPdata.htm)
17. Bolsunovsky A. and Dementyev D., 'Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia (Russia) following the Fukushima Nuclear Accident', Journal of Environmental Radioactivity 102 (2011) 1062-1064.
18. 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.
19. Brun R., Bruyant F., Maire M., McPherson A.C. and Zanarini P., GEANT3, CERN Data Handling Division, Geneva, 1987.
20. Debertin K. and Schotzig U., Nuclear Instruments and Methods vol.158, pp. 471, 1979.
21. Debertin K. and Helmer R., 'Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors', North Holland Press, 1988.
22. 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.
23. 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 vol. 56, pp. 117-123, 2002.
24. De Felice P., Angelini P., Fazio A. and Biagini R., 'Fast procedures for coincidence-summing correction in γ -ray spectrometry', Applied Radiation and Isotopes vol. 52, pp. 745-752, 2000.
25. Garcia-Torano E., Pozuelo M. and Salvat F., 'Monte-Carlo calculations of coincidence-summing correction for volume sources in gamma-ray spectrometry with Ge detectors' vol. 544, pp. 577-583, 2005.
26. Gilmore G. and Hemingway J.D, 'Practical Gamma-ray Spectrometry', John Wiley & Sons, Chichester 1995.
27. Hamilton D., 'On Directional Correlation of Successive Quanta', Physical Review Volume 58, 1940.
28. Haase G., Tait D. and Wiechen A., 'Monte Carlo simulation of several gamma- emitting source and detector arrangements for determining corrections of self- attenuation and coincidence summation in gamma spectrometry', Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. vol. A 329, pp. 483–492, 1993.
29. James F., 'Monte Carlo Theory and Practice Data Handling Division', CERN, Geneva, 1980.
30. Kalos M.H. and Whitlock P.A., 'Monte Carlo Methods', Wiley-Interscience, New York, 1986.
31. Karfopoulos K. and Anagnostakis M., 'Parameters affecting full energy peak efficiency determination during Monte-Carlo simulation', Applied Radiation and Isotopes vol. 68, pp. 1435-1437, 2010.
32. Knoll G.F., 'Radiation Detection and Measurement', John Wiley and Sons, 1989.

33. Korun M., and Martincic, R., 'Coincidence summing in gamma and Xray spectrometry', Nucl.Instrum.Me thodsPhys.Res. vol. A325, pp. 478–484, 1993.
34. Lepy M., Altitzoglou T., Anagnostakis M., Arnold D, Capogni M., Ceccatelli A., DeFelice p., Dersch R., Dryak P., Fazio A., Ferreux L., Guardati A.,B.Han J, Hurtado S.,Karfopoulos K.,Klemola S., Kovar P., Lee K., Ocone R., Ott O., SimaO., Sudarm S., Svec A., ChauVanTao, Tran ThienThanh and Vidmar T., 'Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry', Applied Radiation and Isotopes vol. 68, pp. 1407-1412, 2010.
35. Manolopoulou M., Vagena E., Stoulos S., Ioannidou A. and Papastefanou C., 'Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident', Journal of Environmental Radioactivity vol. 102, pp. 796-797, 2011.
36. Mazurier J., Gouriou J., Chauvenet B., and Barthe J., ' Calculation of perturbation correction factors for some reference dosimeters in high-energy photon beams with the Monte Carlo code PENELOPE', Institute of physics publishing, Physics in medicine and biology vol. 46, pp. 1707-1717, 2001.
37. Morel J., Chauvenet B., Kadachi A., 'Coincidence-summing corrections in gamma-ray spectrometry for normalized geometries'. Int. J. Applied Radiation and Isotopes, vol. 34, pp. 1115–1122, 1983.
38. Muhlberger C., 'Experiment IX : Angular correlation of gamma rays', University of Maryland, College Park, 2008.
39. 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 vol. A324, pp. 209, 1993.
40. Pittauerova D., Hettwig B. and Fischer H., ' Fukushima fallout in Northwest German environmental media', Journal of Environmental Radioactivity, vol. 102, pp. 877-880, 2011.
41. Quintana B. and Fernadez F., 'An Empirical Method to Determine Coincidence – Summing Corrections in Gamma Spectrometry', Applied Radiation and Isotopes vol. 46, pp. 961-964, 1995.
42. Rubinstein R.Y., 'Simulation and the Monte Carlo Methods', John Wiley and Sons Inc., 1981.
43. 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.
44. Semkow T.M., Mehmood G., Parekh P.P. and Virgil M., 'Coincidence Summing in Gamma-Ray Spectroscopy', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research vol. A290, pp. 437-444, 1990.
45. Shelley J., 'Essentials of FORTRAN 77', John Wiley and Sons Ltd., 1989.
46. Sinkko K. and Aaltonen H., 'Calculation of the true coincidences summing correction for different sample geometries in gamma-ray spectroscopy', In: Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, Surveillance Department, STUK-B-VALO 40, Helsinki, 1985.

47. 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.