



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

**Παραμετρική Μελέτη Υποστρώματος Ανιχνευτικών
Διατάξεων Γερμανίου Με Χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης
Monte Carlo**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του Χαίντούτη Χαρίδημου**

Επιβλέπων: Μάριος Αναγνωστάκης,
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος, 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία (ΜΕ) διενεργήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) “Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές” του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ).

Σκοπός της παρούσας ΜΕ ήταν η καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που συντελούν στην παραγωγή του φάσματος σε μία γ-φασματοσκοπική διάταξη. Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών θα μπορούσε να οδηγήσει στη λήψη μέτρων για τη βελτίωση των συνθηκών συλλογής του φάσματος, που θα επέτρεπαν την καλύτερη αξιοποίησή του. Ειδικότερα, αντικείμενο της ΜΕ ήταν η παραμετρική μελέτη του υποστρώματος ανιχνευτικών διατάξεων Γερμανίου, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Η ΜΕ εστιάζει στο υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης που προέρχεται από την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το ίδιο το αναλυόμενο δείγμα. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η συνεισφορά στη δημιουργία αυτού του υποστρώματος των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης. Η γνώση αυτή είναι δυνατό να βοηθήσει στη μείωση του υποστρώματος, με χρήση απλών λύσεων, όπως π.χ. φίλτρων κλπ. Καθώς το δείγμα το οποίο αναλύεται είναι πιθανόν να εκπέμπει τόσο φωτονιακή ακτινοβολία, όσο και ακτινοβολία-β, στα πλαίσια της ΜΕ εξετάσθηκε η συνεισφορά και των δύο ειδών ακτινοβολίας στη δημιουργία του συνεχούς υποστρώματος, είτε λόγω σκέδασης των φωτονίων, είτε λόγω πέδησης των σωματιδίων-β.

Η μελέτη που έγινε αφορά σε πραγματικό ανιχνευτή και συγκεκριμένα στο ανιχνευτικό σύστημα XtRa (eXtended Range Germanium detector) του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Ο κώδικας προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο κώδικας PENELOPE που προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις φωτονίων και σωματιδίων-β με την ύλη. Όσον αφορά στις πηγές που προσομοιώθηκαν, επιλέχθηκε μία σειρά από πηγές ^{40}K με διαφορετικές γεωμετρίες. Το ισότοπο ^{40}K επελέγη διότι, αφενός μεν πρόκειται για ένα ισότοπο που εκπέμπει μόνο ένα φωτόνιο αρκετά υψηλής ενέργειας καθώς και σωματίδια-β με αρκετά υψηλή μέση ενέργεια, και αφετέρου διότι το ^{40}K απαντάται πρακτικά σε όλα τα περιβαλλοντικά δείγματα.

ABSTRACT

This Thesis was conducted under the Postgraduate Program "Physics and Technological Applications" of the National Technical University of Athens (NTUA). The purpose of the Thesis was to contribute to the better understanding of the mechanisms of gamma spectrum production in a gamma ray detector. Understanding these mechanisms could lead to measures for improving the spectrum collection, which would allow for the detector's better utilization.

The Thesis was focused on the parametric study of the Germanium detectors background, which is produced by the radiations emitted from the analyzed sample, using Monte Carlo simulation techniques. Other sources of background were not taken into consideration during this work. Since the sample being analyzed is likely to emit both: photon radiation and beta-particles, the contribution of both types of radiation – due to photon scattering and bremsstrahlung radiation – in the creation of the continuous background was examined. For this purpose the XtRa (eXtended Range Germanium detector) of the NTUA Nuclear Engineering Laboratory was simulated using the Monte Carlo simulation code PENELOPE, which simulates the interactions of photons and β -particles with matter.

Several source-to-detector geometries were simulated (cylindrical, point sources etc). In all cases, the radionuclide that was chosen for simulation was ^{40}K , since it emits photons and β -particles with significant energies and it is also found in virtually all environmental samples and the background of Ge detectors.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Σκοπός – Αντικείμενο της εργασίας.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΩΤΟΝΙΑΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ.....	4
2.1 Ακτινοβολία γ και ακτίνες X.....	4
2.2 Αλληλεπιδράσεις φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη.....	5
2.2.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	5
2.2.2 Σκέδαση Compton.....	7
2.2.3 Δίδυμη γένεση.....	8
2.3 Η Φασματοσκοπία των φωτονίων.....	9
2.3.1 Επίδραση του μεγέθους του ανιχνευτή.....	9
2.3.1.1 Ανιχνευτές μεγάλου μεγέθους.....	9
2.3.1.2 Ανιχνευτές μικρού μεγέθους.....	10
2.3.1.3 Ανιχνευτές μέσου μεγέθους.....	11
2.3.2 Ανάλυση πρότυπου φάσματος “πραγματικού” ανιχνευτή.....	12
2.3.2.1 Οπισθοσκεδαζόμενες ακτίνες- γ	13
2.3.2.2 Ακτινοβολία εξαϋλωσης.....	14
2.3.2.3 Αιχμές διαφυγής ακτίνων-X.....	14
2.3.2.4 Χαρακτηριστικές ακτίνες-X (θωράκισης).....	15
2.3.2.5 Διαφυγή ηλεκτρονίων.....	16
2.3.2.6 Ακτινοβολία πέδησης.....	16
2.3.2.7 Περιβάλλοντα υλικά.....	17
2.4 Η ακτινοβολία υποβάθρου και η ιδιαίτερη επίδραση της θωράκισης.....	17
2.4.1 Πηγές ακτινοβολίας υποβάθρου.....	17
2.4.1.1 Ραδιενέργεια που προέρχεται από συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά.....	18
2.4.1.2 Κοσμική ακτινοβολία.....	20
2.4.2 Η ακτινοβολία υποβάθρου στα φάσματα γ -ακτινοβολίας.....	21
2.4.2.1 Σχετική συνεισφορά	21
2.4.2.2 Ακτινοβολία υποβάθρου που συνδέεται με την πηγή.....	21
2.4.3 Υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή θωρακίσεων.....	22
2.4.3.1 Συνηθισμένα υλικά για θωρακίσεις χαμηλού υποβάθρου.....	22
2.4.3.2 Θωράκιση νετρονίων.....	24
2.4.4 Ενεργητικές μέθοδοι μείωσης της ακτινοβολίας υποβάθρου.....	25
2.4.4.1 Anti-coincidence Shielding	25
2.4.4.2 Coincidence counting.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Ο κώδικας προσομοίωσης αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας & ύλης PENELOPE .	27
3.1 Μέθοδος προσομοίωσης MONTE CARLO.....	27
3.2 Ο κώδικας PENELOPE.....	28
3.2.1 Δομή και χρήση του κώδικα PENELOPE.....	29
3.2.2 Οι υπορουτίνες του κώδικα PENELOPE	30
3.2.3 Κυρίως πρόγραμμα.....	30
3.2.4 Αρχεία εισόδου.....	31
3.2.4.1 Εικονικοί ανιχνευτές.....	34
3.2.4.2 Αρχείο γεωμετρίας.....	36
3.2.4.3 Αρχείο υλικών.....	41
3.2.5 Αρχεία εξόδου.....	41
3.3 Τα βοηθητικά προγράμματα gview και wgnuplot.....	48

3.3.1 Το πρόγραμμα gview.....	49
3.3.1.1 Το πρόγραμμα gview2d.....	49
3.3.1.2 Το πρόγραμμα gview3d.....	50
3.3.2 Το πρόγραμμα wgnuplot.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO.....	52
4.1 Εισαγωγή.....	52
4.2 Περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών της μελέτης.....	52
4.2.1 Ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ και η ανάπτυξη του σχετικού μοντέλου	52
4.2.2 Η θωράκιση του ανιχνευτή XtRa και η ανάπτυξη του μοντέλου της	54
4.2.3 Η χρησιμοποιούμενη πηγή 40K και η ανάπτυξη του μοντέλου της	56
4.2.3.1 Γεωμετρία της πηγής 40K	56
4.2.3.2 Εισαγωγή της ραδιενεργού πηγής στον κώδικα προσομοίωσης	60
4.3 Η μεθοδολογία της παραμετρικής μελέτης	62
4.4 Προσομοίωση γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης κυλινδρικών πηγών όγκου.....	65
4.4.1 Υλικό πηγής H ₂ O - γεωμετρία 2.....	65
4.4.2 Υλικό πηγής H ₂ O - γεωμετρία 5.....	67
4.4.3 Υλικό πηγής SiO ₂ – γεωμετρίες «2» & «5»	69
4.5 Προσομοίωση γ-φάσματος σφαιρικής πηγής.....	71
4.6 Προσομοίωση γ-φάσματος σημειακής πηγής.....	73
4.6.1 Μελέτη της επίδρασης της απόστασης πηγής-ανιχνευτή	74
4.6.2 Μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών της θωράκισης.....	75
4.6.3 Επίδραση της παρουσίας φίλτρων μεταξύ πηγής και ανιχνευτή και της επένδυσης της θωράκισης στο συνεχές φάσμα πέδησης	78
4.6.3.1 Χρήση φίλτρου από Be (Βηρύλλιο) πάχους 0.4 cm	79
4.6.3.2 Χρήση φίλτρου από πολυπροπυλένιο πάχους 0.4 cm.....	79
4.6.3.3 Χρήση φίλτρου από Al (Αλουμίνιο) πάχους 0.4cm.....	80
4.6.3.4 Χρήση επένδυσης της θωράκισης από Plexiglas πάχους 0.3 cm	81
4.6.3.5 Χρήση επένδυσης από πολυπροπυλένιο πάχους 2 cm στη θωράκιση.....	83
4.6.3.6 Χρήση επένδυσης από Be (Βηρύλλιο) πάχους 0.65 cm	83
4.6.3.7 Τοποθέτηση της πηγής σε περίβλημα από Be (Βηρύλλιο) πάχους 0.5 cm.....	85
4.6.3.8 Συνδυασμένη χρήση φίλτρου Al και επένδυσης από Be.....	85
4.7 Συμπεράσματα.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ «ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΠΕΔΗΣΗΣ».....	91
5.1 Εισαγωγή.....	91
5.2 Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (Impact Detector).....	91
5.3 Μελέτη του φάσματος πέδησης.....	92
5.3.1 Προκαταρκτικές προσομοιώσεις.....	92
5.3.2 Προσομοίωση της ολοκληρωμένης γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης.....	93
5.3.3 Διερεύνηση του βαθμού συμμετοχής των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης στη δημιουργία της ακτινοβολίας πέδησης.....	94
5.3.4 Φάσμα σωματιδίων-β χωρίς το κάλυμμα από πολυστυρένιο.....	97
5.3.5 Φάσμα σωματιδίων-β χωρίς θωράκιση και κάλυμμα από πολυστυρένιο.....	98
5.3.6 Φάσμα σωματιδίων-β χωρίς κάλυμμα, θωράκιση και παράθυρο ανθρακονημάτων	99
5.3.7 Φάσμα χωρίς κάλυμμα πολυστυρενίου, θωράκιση, παράθυρο και κρουστάτη αλουμινίου	100
5.3.8 Φάσμα χωρίς κάλυμμα πολυστυρενίου, θωράκιση, παράθυρο από ανθρακονήματα, κρουστάτη αλουμινίου και δακτύλιο στήριξης χαλκού.....	102
5.4 Συμπεράσματα.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	104

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Χαρακτηριστικά των στοιχείων της διάταξης.....	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΡΧΕΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Αναλυτικά Διαγράμματα γ-ακτινοβολίας (ENDDET).....	237
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΤΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΑΡΧΕΙΑ pm_geometry.rep ΚΑΙ pengeom_tree.rep	258

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός – Αντικείμενο της εργασίας

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας (ΜΕ) ήταν η καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που συντελούν στην παραγωγή του φάσματος σε μία γ-φασματοσκοπική διάταξη. Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει στη λήψη μέτρων για τη βελτίωση των συνθηκών συλλογής του φάσματος, που θα επέτρεπαν την καλύτερη αξιοποίησή του. Ειδικότερα, αντικείμενο της ΜΕ ήταν η παραμετρική μελέτη του υποστρώματος ανιχνευτικών διατάξεων Γερμανίου, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση με ανιχνευτές υψηλής διακριτικής ικανότητας, το υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης έχει εξαιρετικά μεγάλη σημασία – ιδιαίτερα στην περίπτωση ανάλυσης δειγμάτων χαμηλής ραδιενέργειας – καθώς καθορίζει τα κατώτερα επίπεδα ανίχνευσης της διάταξης. Το υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης – συνεχές ή διακριτό – μπορεί να οφείλεται, στην κοσμική ακτινοβολία, σε ραδιενεργά ισότοπα τα οποία βρίσκονται στο περιβάλλον της διάταξης και τα οποία η θωράκιση του ανιχνευτή δεν είναι σε θέση να εξαφανίσει, ή τέλος να οφείλεται στο ίδιο το δείγμα το οποίο αναλύεται. Στα πλαίσια της ΜΕ το ενδιαφέρον εστιάζεται στο τελευταίο αυτό είδος υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης, το οποίο παράγεται εξαιτίας της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει το ίδιο το αναλυόμενο δείγμα. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η συνεισφορά στη δημιουργία αυτού του υποστρώματος των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης. Η γνώση αυτή είναι δυνατό να βοηθήσει στη μείωση του υποστρώματος, με χρήση απλών λύσεων, όπως π.χ. φίλτρων κλπ.

Καθώς το δείγμα το οποίο αναλύεται είναι πιθανόν να εκπέμπει τόσο φωτονιακή ακτινοβολία, όσο και ακτινοβολία-β, στα πλαίσια της ΜΕ εξετάσθηκε η συνεισφορά και των δύο ειδών ακτινοβολίας στη δημιουργία του συνεχούς υποστρώματος, είτε λόγω σκέδασης των φωτονίων, είτε λόγω πέδησης των σωματιδίων-β. Η μελέτη που έγινε αφορά σε πραγματικό ανιχνευτή και συγκεκριμένα στο ανιχνευτικό σύστημα XtRa (eXtended Range Germanium detector) του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Ο κώδικας προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο κώδικας PENELOPE που προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις φωτονίων και σωματιδίων-β με την ύλη. Όσον αφορά στις πηγές που προσομοιώθηκαν, επιλέχθηκε μία σειρά από πηγές ^{40}K με διαφορετικές γεωμετρίες. Το ισότοπο ^{40}K επελέγη διότι, αφενός μεν πρόκειται για ένα ισότοπο που εκπέμπει μόνο ένα φωτόνιο αρκετά υψηλής ενέργειας καθώς και σωματίδια-β με αρκετά υψηλή μέση ενέργεια, και αφετέρου διότι το ^{40}K απαντάται πρακτικά σε όλα τα περιβαλλοντικά δείγματα.

Στο 2^ο Κεφάλαιο της ΜΕ γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις φωτονιακές ακτινοβολίες καθώς και την φασματοσκοπία τους. Αρχικά, περιγράφεται η φύση των ακτινοβολιών γ και X και οι αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη. Στη συνέχεια, αναλύεται ένα πρότυπο φάσμα “πραγματικού” ανιχνευτή και εξετάζεται η επίδραση που έχει το μέγεθος του ανιχνευτή στη μορφή του συλλεγόμενου φάσματος. Τέλος, αναλύεται θεωρητικά η ιδιαίτερη επίδραση της θωράκισης και της ακτινοβολίας υποβάθρου στα φάσματα γ -ακτινοβολίας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά ο κώδικας προσομοίωσης ακτινοβολίας και ύλης PENELOPE. Το Κεφάλαιο ξεκινά με μια ιστορική αναφορά στη μέθοδο Monte Carlo, στη συνέχεια περιγράφονται η δομή, οι υπορουτίνες και τα κυρίως προγράμματα του κώδικα PENELOPE. Επίσης περιγράφονται διεξοδικά τα αρχεία εισόδου του κώδικα (εικονικοί ανιχνευτές, αρχεία γεωμετρίας, αρχεία υλικών) καθώς και τα αρχεία εξόδου. Το Κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση των βοηθητικών προγραμμάτων `gview` και `wgnuplot`, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γραφικών αποτελεσμάτων του κώδικα PENELOPE.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κύριος όγκος της παραμετρικής μελέτης που έγινε στα πλαίσια της ΜΕ με τη χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Για την πραγματοποίηση της μελέτης παρήχθησαν με προσομοίωση και συγκρίθηκαν μία σειρά από φάσματα πηγών όγκου και σημειακών πηγών. Για την παραγωγή των φασμάτων αυτών χρησιμοποιήθηκαν εικονικοί ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (Energy Deposition Detector). Αρχικά παρουσιάζονται οι κύριες συνιστώσες της μελέτης που πραγματοποιήθηκε καθώς και η ανάπτυξη των μοντέλων τους (ανιχνευτής XtRa – θωράκιση – πηγή ^{40}K). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε στα γ -φάσματα που προκύπτουν κατά την ανάλυση πηγών όγκου, σφαιρικών και σημειακών και σχολιάζεται η επίδραση που έχει στη μορφή του φάσματος, τόσο η γεωμετρία της πηγής, όσο και το υλικό της πηγής. Για την περίπτωση των σημειακών πηγών μελετάται περαιτέρω η επίδραση που έχουν στο φάσμα η χρήση κατάλληλων φίλτρων, καθώς και η χρήση συνθετικών υλικών για την εσωτερική επικάλυψη της θωράκισης της ανιχνευτικής διάταξης.

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται μία ενδελεχής διερεύνηση με στόχο την ερμηνεία της φύσης του συνεχούς φάσματος γ -ακτινοβολίας, η οποία ανιχνεύεται στον ανιχνευτή και η οποία οφείλεται αποκλειστικά στην εκπομπή της ακτινοβολίας- β της πηγής. Συγκεκριμένα, διερευνάται κατά πόσον το συνεχές αυτό φάσμα οφείλεται στην ακτινοβολία- β ή σε ακτινοβολία πέδησης η οποία ανιχνεύεται απευθείας από τον ανιχνευτή, ή σε ακτινοβολία πέδησης η οποία έχει προηγουμένως υποστεί σκέδαση. Επιπλέον διερευνάται η επίδραση που έχουν συνιστώσες της διάταξης, όπως το κάλυμμα του ανιχνευτή, ο κρουστάτης κλπ στην παραγωγή ή και στην αποκοπή του συνεχούς φάσματος γ -ακτινοβολίας. Η μελέτη γίνεται με τη βοήθεια εικονικού ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (Impact Detector) αντί για τον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που κυρίως χρησιμοποιήθηκε στο

4^ο Κεφάλαιο.

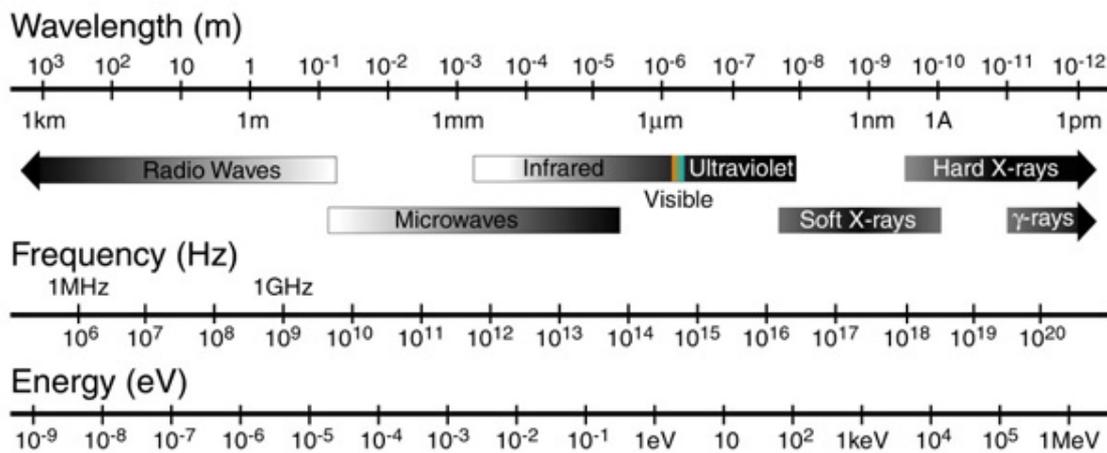
Τέλος στο 6^ο Κεφάλαιο της ΜΕ γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της εργασίας καθώς και προτάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της παραμετρικής μελέτης και τη διερεύνηση του φαινομένου της πέδησης.

Η Μεταπτυχιακή Εργασία ολοκληρώνεται με μια σειρά από τέσσερα παραρτήματα, στα οποία παρατίθενται τα πιστοποιητικά της ανιχνευτικής διάταξης, τα αρχεία γεωμετρίας τα οποία δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις, τα αρχεία αποτελεσμάτων, αναλυτικά γ-φάσματα αποτιθέμενης ενέργειας, καθώς και περιγραφή των βοηθητικών αρχείων “pm_geometry.rep” και “pengeom_tree.rep”.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΩΤΟΝΙΑΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ

2.1 Ακτινοβολία γ και ακτίνες X

Η ακτινοβολία γ και οι ακτίνες X (φωτόνια γ ή X) είναι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας οι οποίες τοποθετούνται στην περιοχή υψηλών ενεργειών του φάσματος (περιοχή μικρού μήκους κύματος). Τα πρώτα χρόνια ανακάλυψής τους ο διαχωρισμός μεταξύ τους γινόταν με βάση την ενέργειά τους. Οι ακτίνες γ τοποθετούνταν σε υψηλότερες ενέργειες και οι ακτίνες X σε χαμηλότερες. Όμως ένας τέτοιος τρόπος διαχωρισμού είναι λανθασμένος καθώς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, υπάρχει μια περιοχή στην οποία υπάρχει επικάλυψη των δύο ακτινοβολιών. Έτσι πλέον ο διαχωρισμός μεταξύ ακτινοβολίας γ και X έχει να κάνει πρωτίστως με την προέλευσή τους.

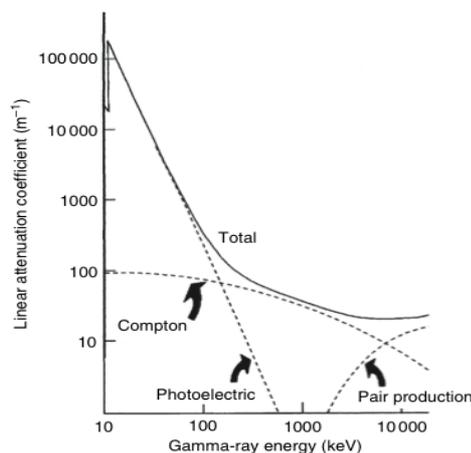


Σχήμα 2.1: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Σχετικά με την προέλευση της κάθε μιας ακτινοβολίας, μπορεί να λεχθεί πολύ συνοπτικά, ότι η ακτινοβολία γ προκύπτει ως αποτέλεσμα της αποδιέγερσης του πυρήνα ενός ατόμου σε χαμηλότερη στάθμη, μέσω της αποβολής περίσσειας ενέργειας ενώ οι ακτίνες X είναι το αποτέλεσμα της αναδιάταξης των ηλεκτρονίων στο άτομο μετά από τη διέγερση ή τον ιονισμό του, τις διαδικασίες της εσωτερικής μετατροπής (internal conversion, IC) ή της σύλληψης ηλεκτρονίου (electron capture, EC). Ακτίνες X εκπέμπονται ακόμα κατά την επιβράδυνση φορτισμένων σωματιδίων (κυρίως ηλεκτρονίων) ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής τους με το πεδίο του πυρήνα ενός ατόμου. Στη συνέχεια, οποτεδήποτε γίνεται αναφορά σε φωτονιακή ακτινοβολία θα εννοούνται αδιακρίτως ακτίνες γ και ακτίνες X (καθώς π.χ. για έναν ανιχνευτή φωτονίων δεν έχουν καμία διαφορά) εκτός αν γίνεται ρητή αναφορά στο είδος της ακτινοβολίας.

2.2 Αλληλεπιδράσεις φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη

Από τους πολλούς τρόπους αλληλεπίδρασης της φωτονιακής ακτινοβολίας με την ύλη μόνο τρεις έχουν πραγματικά μεγάλη σημασία στην γ-φασματοσκοπία: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton και η δίδυμη γένεση. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις δεν είναι το ίδιο πιθανό να συμβούν γενικά και η σχετική πιθανότητα τους εξαρτάται από την ενεργειακή περιοχή στην οποία αναφερόμαστε καθώς και από τον ατομικό αριθμό του μέσου. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κυριαρχεί στις χαμηλές ενέργειες (μερικές εκατοντάδες keV), η δίδυμη γένεση στις υψηλές ενέργειες (πάνω από 5-10 MeV), ενώ η σκέδαση Compton είναι η πιο πιθανή αλληλεπίδραση στις ενδιάμεσες ενέργειες. Η συνολική εξασθένηση της ακτινοβολίας γ μέσα σε ένα υλικό προκύπτει ως αποτέλεσμα των τριών παραπάνω αλληλεπιδράσεων και είναι εντονότερη για υλικά υψηλού Z. Μία άλλη αλληλεπίδραση - η ελαστική σκέδαση - έχει σημασία για πολύ χαμηλές ενέργειες, και για το λόγο αυτό η συνεισφορά της συχνά αμελείται. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο συντελεστής γραμμικής εξασθένησης του γερμανίου καθώς και οι συνιστώσες από τις οποίες προέρχεται.

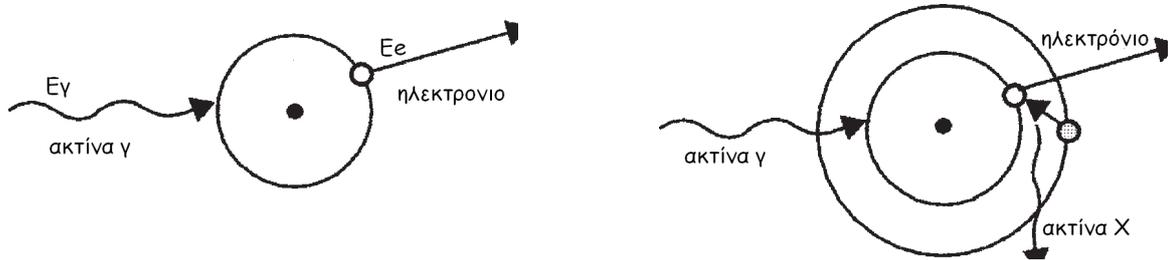


Σχήμα 2.2: Συντελεστής γραμμικής εξασθένησης γερμανίου

2.2.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια αλληλεπίδραση κατά την οποία το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας του ατόμου του απορροφητή. Το ηλεκτρόνιο αποβάλλεται με κινητική ενέργεια εκείνη του προσπίπτοντος φωτονίου ελαττωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου (E_b). Για τυπικές ενέργειες φωτονίων το ηλεκτρόνιο που αποβάλλεται (φωτοηλεκτρόνιο) είναι πιο πιθανό να αποσπαστεί από την στοιβάδα K, της οποίας οι τυπικές ενέργειες σύνδεσης κυμαίνονται από μερικά keV μέχρι δεκάδες keV, ανάλογα με τον ατομικό αριθμό του υλικού. Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της ορμής κατά την

αλληλεπίδραση αυτή το άτομο διατηρεί ένα πολύ μικρό ποσό της ενέργειας το οποίο όμως μπορεί να αγνοηθεί. Το άτομο πλέον είναι διεγερμένο κατά ένα ποσό ενέργειας που είναι ίσο με την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου που αποβλήθηκε. Η ισορροπία μπορεί να επανέλθει με δύο τρόπους.



Σχήμα 2.3: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας-X

Το κενό που δημιουργείται στην στοιβάδα καλύπτεται με αναδιάταξη των ηλεκτρονίων. Κατά τη διαδικασία αυτή η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των ενεργειών σύνδεσης των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στην αναδιάταξη απελευθερώνεται με τη μορφή ακτίνων X χαρακτηριστικής ενέργειας. Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι η απορρόφηση ενός τμήματος της ενέργειας που απελευθερώνεται από ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου (ηλεκτρόνιο Auger) το οποίο διαφεύγει από το άτομο, με συνέπεια τον περαιτέρω ιονισμό του ατόμου. Τα ηλεκτρόνια Auger έχουν πολύ μικρή εμβέλεια λόγω της χαμηλής τους ενέργειας. Οι χαρακτηριστικές ακτίνες X, έχουν εμβέλεια η οποία εξαρτάται από το μέσο στο οποίο έγινε η αρχική αλληλεπίδραση και είναι πιθανόν να απορροφηθούν ξανά μέσω φωτοηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων με ασθενέστερα δεσμευμένα ηλεκτρόνια του μέσου. Παρόλο που η πιθανότητα διαφυγής των χαρακτηριστικών ακτίνων X μπορεί να είναι σημαντική, συχνά γίνεται η υπόθεση ότι αυτές απορροφώνται στο μέσο πλήρως. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή την περιγραφή, κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εκπέμπεται ένα φωτοηλεκτρόνιο το οποίο φέρει υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας το μεγαλύτερο τμήμα της ενέργειας του αρχικού φωτονίου, καθώς και μία η περισσότερες χαρακτηριστικές ακτίνες X. Υπό την προϋπόθεση ότι κανένα σωματίδιο η φωτόνιο δεν διαφεύγει από το μέσο, η συνολική ενέργεια που αποτίθεται στο μέσο ισούται με την ενέργεια του αρχικού προσπίπτοντος φωτονίου.

Για τις αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούνται πολύ κοντά στην επιφάνεια του απορροφητή, υπάρχει αξιόλογη πιθανότητα κάποιες από τις ακτίνες X που εκπέμπονται να διαφύγουν από το μέσο. Τότε, η ενέργεια που θα αποτεθεί στο μέσο θα είναι μειωμένη κατά το ποσό ενέργειας που έφερε η ακτίνα X. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως διαφυγή ακτίνας X.

Στην περίπτωση που ο απορροφητής των φωτονίων είναι ένας ανιχνευτής φωτονιακής ακτινοβολίας, η διαφυγή ακτίνας X έχει ως συνέπεια την καταγραφή στο ενεργειακό του φάσμα,

πέραν της αιχμής πλήρους απόθεσης ενέργειας (full energy peak) και αιχμής χαμηλότερης ενέργειας από αυτήν του αρχικού φωτονίου, κατά την ενέργεια της ακτίνας X, η οποία καλείται αιχμή διαφυγής (escape peak).

2.2.2 Σκέδαση Compton

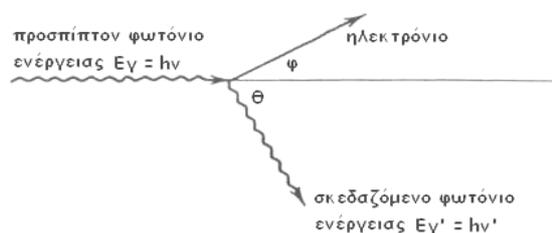
Σκέδαση Compton είναι η αλληλεπίδραση κατά την οποία ένα φωτόνιο ενέργειας $E_\gamma (=h\nu)$ αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο – συνήθως ασθενώς συνδεδεμένο – μεταφέροντας του μέρος της ενέργειας του. Η ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου $E_{\gamma'} (=h\nu')$ συναρτηθεί της γωνίας σκέδασης θ δίνεται από τη σχέση:

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

όπου $m_0 c^2$ είναι η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (0.511 MeV).

Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου που απελευθερώνεται είναι:

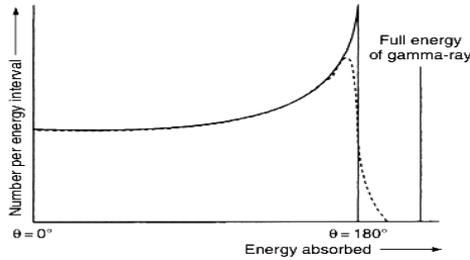
$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + E_\gamma (1 - \cos \theta / m_0 c^2) \right]} \right\}$$



Σχήμα 2.4: Σκέδαση Compton

Με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατό να διακριθούν δύο ακραίες περιπτώσεις:

- Γωνία σκέδασης $\theta = 0^\circ$. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε $h\nu' = h\nu$ και $E_e = 0$, άρα το ηλεκτρόνιο Compton έχει μηδενική ενέργεια και το σκεδαζόμενο φωτόνιο έχει ενέργεια ίση ενέργεια με το προσπίπτον.
- Γωνία σκέδασης $\theta = \pi$. Εδώ το φωτόνιο οπισθοσκεδάζεται προς την κατεύθυνση από την οποία ήρθε, ενώ το ηλεκτρόνιο συνεχίζει στην αρχική διεύθυνση του φωτονίου. Αυτή είναι η περίπτωση κατά την οποία έχουμε τη μέγιστη μεταφορά ενέργειας στο ηλεκτρόνιο.

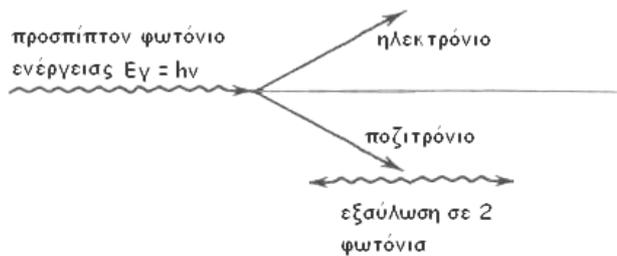


Σχήμα 2.5: Ενέργεια λόγω σκέδασης Compton συναρτήσει της γωνίας σκέδασης

Κατά τη σκέδαση Compton εμφανίζονται όλες οι γωνίες σκέδασης. Για αυτό το λόγο η ενέργεια που μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο θα παίρνει συνεχείς τιμές μεταξύ της τιμής 0 και της μέγιστης.

2.2.3 Δίδυμη γένεση

Η τρίτη σημαντική αλληλεπίδραση της φωτονιακής ακτινοβολίας είναι η δίδυμη γένεση. Για την πραγματοποίηση της αλληλεπίδρασης αυτής απαιτείται η ύπαρξη ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτό που σχηματίζεται κοντά στον πυρήνα, εξαιτίας των πρωτονίων του. Η αλληλεπίδραση συνεπάγεται την εξαύλωση του φωτονίου και τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου. Καθώς για να δημιουργηθεί το ζεύγος χρειάζεται ενέργεια $2m_0c^2$ τα φωτόνια θα πρέπει να έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από 1.022 MeV. Η πλεονάζουσα μοιράζεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας στο ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου.



Σχήμα 2.6: Δίδυμη γέννηση

Καθώς το ποζιτρόνιο δεν είναι σταθερό σωματίδιο, όταν η κινητική του ενέργεια ελαττωθεί πολύ (σε σχέση με την θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων στο μέσο) το ποζιτρόνιο εξαυλώνεται με ένα ηλεκτρόνιο του μέσου. Η ενέργεια της εξαύλωσης των δύο σωματιδίων (2×0.511 MeV) εκπέμπεται υπό μορφή δύο αντιδιαμετρικά εκπεμπομένων φωτονίων. Ο χρόνος που χρειάζεται για να εξαυλωθεί το ποζιτρόνιο είναι πάρα πολύ μικρός έτσι τα φωτόνια της εξαύλωσης εμφανίζονται πρακτικά ταυτόχρονα με την αρχική αλληλεπίδραση.

2.3 Η Φασματοσκοπία των φωτονίων

Οι μεταβάσεις από μια ενεργειακή στάθμη σε μια άλλη, τόσο στον πυρήνα όσο και στο άτομο, είναι με ακρίβεια γνωστές. Για αυτό και τα φωτόνια (ακτίνες γ) καθώς και οι ακτίνες X που προκύπτουν από τέτοιες διαδικασίες έχουν συγκεκριμένη ενέργεια. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ενέργεια των ακτίνων- γ και X μπορούν να προσδιορισθούν με μεγάλη ακρίβεια, είναι η βάση που κάνει δυνατή την φασματοσκοπία των φωτονίων. Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά ο μηχανισμός προσδιορισμού του ενεργειακού φάσματος των φωτονίων- γ και X .

Τόσο τα φωτόνια- γ όσο και τα φωτόνια- X δεν είναι φορτισμένα κι έτσι δεν προκαλούν άμεσο ιονισμό ή διέγερση του υλικού από το οποίο διέρχεται. Έτσι, η ανίχνευση του φωτονίου εξαρτάται από το κατά πόσον θα αλληλεπιδράσει το φωτόνιο με ένα ηλεκτρόνιο στο ενεργό υλικό του ανιχνευτή, μεταφέροντας το σύνολο ή μέρος της ενέργειάς του σε αυτό. Καθώς τα προσπίπτοντα στον ανιχνευτή φωτόνια είναι “αόρατα” για αυτόν, μόνο τα ταχέα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται κατά την αλληλεπίδραση μπορούν να παρέχουν κάποιο στοιχείο για τα προσπίπτοντα φωτόνια. Αυτά τα ηλεκτρόνια έχουν μέγιστη ενέργεια ίση με εκείνη του προσπίπτοντος φωτονίου και επιβραδύνονται χάνοντας την ενέργειά τους όπως κάθε άλλο σωματίδιο- β . Αυτή η απώλεια λοιπόν γίνεται μέσω ιονισμών και διεγέρσεων στο υλικό καθώς και μέσω ακτινοβολίας πέδησης. Άρα το ηλεκτρικό σήμα που τελικά καταγράφει ο ανιχνευτής εξαρτάται από τα ηλεκτρόνια που παράγονται, τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο θα αλληλεπιδράσει το φωτόνιο με το ενεργό υλικό του ανιχνευτή. Παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία είναι η ενέργεια του φωτονίου, ο ατομικός αριθμός του υλικού και η γωνία μεταξύ προσπίπτουσας και σκεδαζόμενης ακτίνας γ (για το φαινόμενο Compton). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το φωτόνιο συνήθως δεν χάνει όλη την ενέργεια του με μια αλληλεπίδραση, γίνεται κατανοητή η μεγάλη σημασία που έχει η περιοχή του ανιχνευτή όπου γίνεται η αλληλεπίδραση αυτή, καθώς και το μέγεθος του ανιχνευτή.

Προκύπτει λοιπόν πως ένας ανιχνευτής ακτινοβολίας πρέπει να εκτελεί επιτυχώς δύο διαφορετικές λειτουργίες. Πρέπει να παρέχει μια πολύ καλή πιθανότητα τα φωτόνια να αλληλεπιδράσουν και να δώσουν ταχέα ηλεκτρόνια, ενώ παράλληλα να λειτουργεί και ως ανιχνευτής για τα ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους του ανιχνευτή στη διαδικασία ανίχνευσης.

2.3.1 Επίδραση του μεγέθους του ανιχνευτή

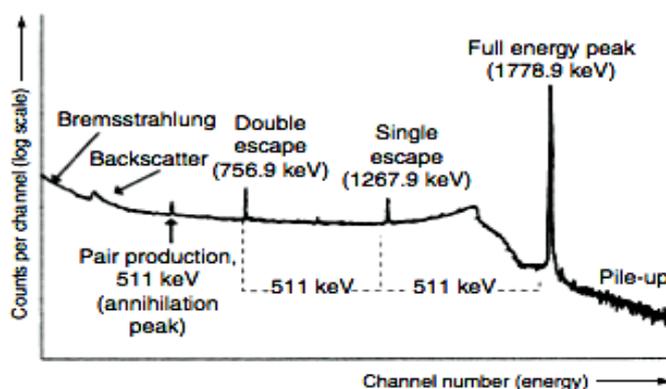
2.3.1.1 Ανιχνευτές μεγάλου μεγέθους

Ως ανιχνευτής μεγάλου μεγέθους ορίζεται ένας ανιχνευτής που ο συνολικός του όγκος είναι πολύ μεγάλος συγκριτικά με την επιφάνειά του. Σε αυτή την περίπτωση υποτίθεται πως όλες οι δευτερογενείς ακτινοβολίες που παράγονται, εάν υπάρξει ροή φωτονίων προς τον ανιχνευτή, (όπως τα φωτόνια εξαΰλωσης και τα φωτόνια σκέδασης Compton), δεν διαφεύγουν από τον ανιχνευτή. Αυτό σημαίνει πως ο ανιχνευτής αυτός θα πρέπει να έχει μέγεθος μερικών δεκάδων cm, που τον καθιστά βέβαια ακατάλληλο για τις περισσότερες χρήσεις. Ας σκιαγραφήσουμε ένα παράδειγμα. Αν το πρώτο γεγονός αλληλεπίδρασης είναι μια σκέδαση Compton, το σκεδαζόμενο φωτόνιο θα αλληλεπιδράσει σε κάποια άλλη περιοχή του ανιχνευτή. Εάν και αυτή η αλληλεπίδραση είναι σκέδαση Compton, θα προκύψει ένα φωτόνιο ακόμα χαμηλότερης ενέργειας. Έτσι τελικά κάποια στιγμή θα υπάρξει πιθανότητα και φωτοηλεκτρική απορρόφηση μέσα στον ανιχνευτή. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να πραγματοποιηθούν όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι σημαντικά μικρότερο από το χρόνο απόκρισης πρακτικά όλων των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στη γ-φασματοσκοπία. Έτσι, το συνδυασμένο αποτέλεσμα θα είναι τα ηλεκτρόνια σε κάθε σκέδαση και το τελικό φωτοηλεκτρόνιο να καταγραφούν ταυτόχρονα. Το αποτέλεσμα θα είναι ένας παλμός που θα αποτυπώνει τη συνολική ενέργεια όλων των ηλεκτρονίων. Επειδή τίποτα δεν διαφεύγει από τον ανιχνευτή, αυτή η ενέργεια πρέπει να είναι η αρχική ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της “ζωής” του. Άρα, το τελικό αποτέλεσμα στον ανιχνευτή είναι το ίδιο σαν το προσπίπτον φωτόνιο να είχε υποστεί φωτοηλεκτρική απορρόφηση στο πρώτο του βήμα. Αν τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από 1022 keV είναι δυνατή και η αλληλεπίδραση της δίδυμης γένεση. Στην περίπτωση αυτή, τα φωτόνια εξαΰλωσης που παράγονται όταν σταματά το ποζιτρόνιο αλληλεπιδρούν με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ή σε δύο φάσεις, με σκέδαση Compton και εν συνεχεία φωτοηλεκτρικό, μέσα στο σώμα του ανιχνευτή. Και σε αυτή την περίπτωση το άθροισμα της κινητικής ενέργειας του ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου και των φωτονίων εξαΰλωσης ισούται με την αρχική ενέργεια του φωτονίου.

Τελικά συμπεραίνουμε πως αν ο ανιχνευτής είναι αρκετά μεγάλος, τότε τα σήματα που παράγονται για φωτόνια της ίδιας ενέργειας, θα είναι ίδια ανεξάρτητα από τις αλληλεπιδράσεις που υφίσταται κάθε ένα φωτόνιο. Τελικά, στο φάσμα καταγράφεται μία μόνο φωτοκορυφή που στη συγκεκριμένη περίπτωση ονομάζεται full energy peak (κορυφή πλήρους απόθεσης ενέργειας).

2.3.1.2 Ανιχνευτές μικρού μεγέθους

Ανιχνευτές μικρού μεγέθους θεωρούνται εκείνοι που πρακτικά στο εσωτερικό τους γίνεται μία μόνο αλληλεπίδραση από τα πρωτογενή φωτόνια. Εναλλακτικά, μπορεί να λεχθεί ότι θεωρούνται εκείνοι που έχουν μικρό μέγεθος, σε σχέση με τη μέση ελεύθερη διαδρομή των δευτερογενών ακτινοβολιών που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών. Ως δευτερογενείς ακτινοβολίες εννοούνται τα σκεδαζόμενα φωτόνια Compton καθώς και φωτόνια εξαΰλωσης που παράγονται όταν τα ποζιτρόνια φτάνουν στο τέλος της διαδρομής τους και εξαΰλώνονται. Η μέση ελεύθερη διαδρομή των δευτερογενών ακτινοβολιών είναι της τάξης των μερικών cm, άρα ο ορισμός των “μικρών ανιχνευτών” περιλαμβάνει ανιχνευτές πάχους 1-2 cm. Αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει χαμηλότερη ενέργεια από το όριο πάνω από το οποίο συμβαίνει δίδυμη γέννηση, στο φάσμα αποτυπώνεται το συνδυασμένο αποτέλεσμα της σκέδασης Compton και του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Το συνεχές φάσμα ενεργειών που αντιστοιχεί σε φωτόνια που έχουν υποστεί σκέδαση Compton ονομάζεται συνεχές υπόστρωμα Compton (Compton continuum). Αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει ενέργεια αρκετών MeV, τα αποτελέσματα της δίδυμης γέννησης είναι ορατά στο φάσμα. Για έναν μικρό ανιχνευτή υπάρχει απόθεση της ενέργειας των ηλεκτρονίων και των ποζιτρονίων ενώ τα φωτόνια εξαΰλωσης διαφεύγουν. Έτσι, στο φάσμα προστίθεται μια αιχμή διπλής διαφυγής σε ενέργεια περί τα 1.02 MeV ($2m_0c^2$) χαμηλότερα από την φωτοκορυφή. Το όνομα αντικατοπτρίζει το γεγονός πως και τα δύο φωτόνια εξαΰλωσης διαφεύγουν από τον ανιχνευτή χωρίς άλλη αλληλεπίδραση.

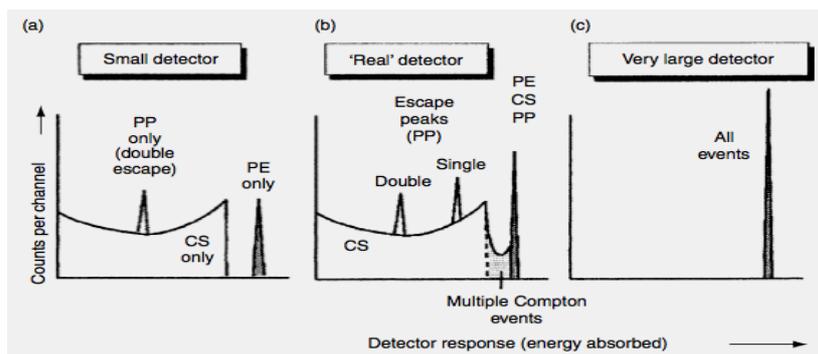


Σχήμα 2.8: Φάσμα πραγματικού ανιχνευτή από πηγή Al-28

2.3.1.3 Ανιχνευτές μέσου μεγέθους.

Ως ανιχνευτής μέσου μεγέθους χαρακτηρίζεται ο “πραγματικός” ανιχνευτής που απαντάται σε συνήθεις εφαρμογές. Η περίπτωση του τοποθετείται ανάμεσα στις δύο προηγούμενες και υπ’ αυτή την έννοια συνδυάζει στοιχεία και από τις δύο. Στην περίπτωση του υποθετικού σεναρίου που

εξετάζεται, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν σκεδάσεις Compton που θα καταλήγουν σε πλήρη απορρόφηση του φωτονίου αλλά και σκεδάσεις που θα ακολουθούνται από άλλες σκεδάσεις, άρα μερική απορρόφηση ενέργειας. Το ίδιο θα συμβαίνει και στην περίπτωση της δίδυμης γέννησης. Μια σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με τις εξιδανικευμένες ακραίες καταστάσεις που περιγράφηκαν προηγουμένα είναι η εξής: Στην περίπτωση σκέδασης Compton που ακολουθείται από άλλες, με συνέπεια το φωτόνιο διαρκώς να χάνει ενέργεια, αλλά το τελικό φωτόνιο να διαφύγει, παράγεται σήμα που θα καταγραφεί μεταξύ της full energy peak και της αιχμής Compton. Στον πολύ μεγάλο ανιχνευτή θεωρήθηκε πως τίποτα δεν ξεφεύγει από τον ανιχνευτή και στον πολύ μικρό πως γίνεται μία μόνο αλληλεπίδραση μέσα στο ενεργό υλικό. Άρα αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται μόνο στον “πραγματικό” ανιχνευτή. Επίσης στην περίπτωση του πραγματικού ανιχνευτή παρατηρείται μια ακόμα διαφοροποίηση. Αν στην εξαύλωση ενός ποζιτρονίου το ένα από τα δύο φωτόνια διαφύγει, ενώ το άλλο απορροφηθεί πλήρως, στον ανιχνευτή θα καταγραφεί φωτοκορυφή με ενέργεια μειωμένη κατά 511 keV της full energy peak (αιχμή απλής διαφυγής). Αν διαφύγουν και τα δύο φωτόνια θα εμφανίζεται στο φάσμα και η αιχμή διπλής διαφυγής.



Σχήμα 2.7: Φάσματα από ανιχνευτές διαφορετικών μεγεθών

Στο πιο πάνω σχήμα φαίνονται τα φάσματα που αναμένουμε από τους τρεις τύπους ανιχνευτών. Είναι εμφανές πως όσο μεγαλύτερος είναι ο ανιχνευτής τόσο περισσότερος χώρος υπάρχει για τα φωτόνια να σκεδαστούν και άρα μεγαλύτερο ποσό ενέργειας μεταφέρεται στον ανιχνευτή, με συνέπεια μεγαλύτερες αιχμές πλήρους απόθεσης ενέργειας. Συνολικά θα λέγαμε πως σε έναν μεγάλο μεγέθους ανιχνευτή εμφανίζεται μόνο μία full energy peak που αντιστοιχεί στην ενέργεια των πρωτεύοντων φωτονίων που εκπέμπει η πηγή. Σε έναν “πραγματικό” ανιχνευτή στο φάσμα εμφανίζεται και ένα συνεχές υπόστρωμα που είναι αποτέλεσμα των τυχαίων απωλειών ενέργειας που συμβαίνουν αν δεν υπάρξει πλήρης απορρόφηση στην πρώτη αλληλεπίδραση. Αντίθετα, η απώλεια συγκεκριμένου ποσού ενέργειας καταλήγει σε κορυφές (αιχμές διπλής και απλής διαφυγής καθώς και αιχμές ακτίνων X).

2.3.2 Ανάλυση πρότυπου φάσματος “πραγματικού” ανιχνευτή.

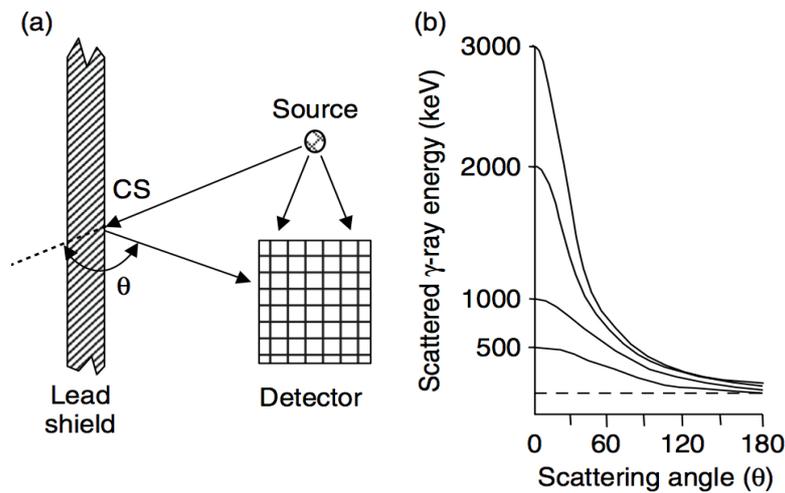
Στο σχήμα 2.7 φαίνεται ένα φάσμα πραγματικού ανιχνευτή από πηγή ^{28}Al . Μέχρι τώρα παρουσιάστηκαν όλες οι αλληλεπιδράσεις που γίνονται από τα φωτόνια μέσα στον ανιχνευτή. Στο φάσμα του σχήματος 2.7 διακρίνεται η **αιχμή πλήρους απόθεσης ενέργειας** (full energy peak) που εμφανίζεται στην ενέργεια των προσπίπτοντων φωτονίων και προκύπτει από φωτοηλεκτρική απορρόφηση κατά την οποία το φωτόνιο χάνει το σύνολο της ενέργειάς του. Επιπλέον διακρίνονται και οι **αιχμές απλής και διπλής διαφυγής** που προκύπτουν, όταν κατά την εξαύλωση του ποζιτρονίου της δίδυμης γέννησης το ένα ή και τα δύο φωτόνια διαφύγουν από τον ανιχνευτή.

Διακρίνεται τέλος και η **αιχμή Compton** καθώς και το **συνεχές υπόστρωμα Compton** ανάμεσα στην αιχμή Compton και την αιχμή πλήρους απόθεσης ενέργειας (συντά χαρακτηρίζεται και ως φωτοκορυφή). Στο πραγματικό φάσμα όμως διαπιστώνεται ότι εμφανίζονται και άλλα ευρήματα, τα οποία δεν προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της πρωτογενούς ακτινοβολίας με το ενεργό υλικό του ανιχνευτή αλλά με περιβάλλοντα υλικά (θωράκιση, κρυστάτη κτλ). Το πρώτο πράγμα που παρατηρείται είναι πως δεν θα έπρεπε να εμφανίζονται γεγονότα σε ενέργειες μεγαλύτερες από την ενέργεια των προσπίπτοντων φωτονίων, πέρα φυσικά από κάποια γεγονότα που προέρχονται από το φυσικό υπόβαθρο (π.χ κοσμική ακτινοβολία). Στην πραγματικότητα όμως αν περισσότερες από μία ακτίνες-γ της πηγής αλληλεπιδράσουν με τον ανιχνευτή ταυτόχρονα, θα καταγραφούν και θα συνεισφέρουν στο συνεχές υπόστρωμα, ενδεχομένως στην περιοχή ενεργειών υψηλότερα από την φωτοκορυφή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **τυχαία σύμπτωση** (pile up/random summing). Ένα άλλο φαινόμενο που συνεισφέρει στα γεγονότα σε αυτή την περιοχή είναι αυτό της **πραγματικής σύμπτωσης – φαινόμενο αθροιστικών φωτοκορυφών** (true coincidence).

2.3.2.1 Οπισθοσκεδαζόμενες ακτίνες-γ

Συχνά τα φάσματα ακτίνων-γ δίνουν μια κορυφή στην περιοχή 0.2-0.25MeV, η οποία ονομάζεται κορυφή οπισθοσκέδασης. Η κορυφή προκαλείται από ακτίνες-γ της πηγής που έκαναν σκέδαση Compton σε κάποιο από τα υλικά που περιβάλλει τον ανιχνευτή και εν συνεχεία ανιχνεύθηκαν από αυτόν. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται η ενέργεια των σκεδαζόμενων ακτίνων-γ, συναρτήσει της γωνίας σκέδασης. Η ενέργεια των σκεδαζόμενων ακτίνων-γ δίνεται από τη σχέση:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu(1 - \cos\theta)/m_0c_0^2)}$$



Σχήμα 2.9: Ενέργεια των σκεδαζόμενων ακτίνων-γ συναρτήσει της γωνίας σκέδασης

Για κάθε γωνία σκέδασης μεγαλύτερη από 110-120° φωτόνια οπισθοσκέδασης παραπλήσιας ενέργειας. Συνεπώς αναμένεται να ανιχνεύονται πολλά φωτόνια με ενέργεια κοντά στην ελάχιστη τιμή, κάτι που οδηγεί στο σχηματισμό αιχμής περί την ενέργεια αυτή. Η ενέργεια στην οποία παρουσιάζεται η κορυφή είναι (για $\theta=\pi$):

$$hv' = \frac{hv}{1 + 2hv/m_0c^2}$$

Για υψηλής ενέργειας ακτίνες γ ($hv \gg m_0c^2$) η έκφραση γίνεται $hv' \approx m_0c^2/2$ (για $\theta=\pi$).

2.3.2.2 Ακτινοβολία εξαΰλωσης

Αν το ισότοπο που παράγει την γ-ακτινοβολία εκπέμπει και ποζιτρόνια θα πρέπει να περιμένουμε στο φάσμα και μια κορυφή στα 0.511 MeV λόγω των φωτονίων εξαΰλωσης που παράγονται όταν το ποζιτρόνιο χάσει την ενέργειά του. Οι περισσότερες πηγές γ-ακτινοβολίας είναι τοποθετημένες μέσα σε θήκη η οποία έχει αρκετό πάχος ώστε να σταματά τα ποζιτρόνια και έτσι αυτά εξαΰλωνονται σε μια περιοχή πολύ κοντά στην πηγή. Αυτή η περιοχή λειτουργεί σαν μια πηγή ακτινοβολίας φωτονίων ενέργειας 0.511 MeV που υπερτίθεται στο καθαρό φάσμα που αναμένεται από την πηγή. Σε σπάνιες περιπτώσεις, ανιχνευτές μπορεί να έχουν κατάλληλη γεωμετρία ώστε να ανιχνεύουν ταυτόχρονα και τα δύο φωτόνια εξαΰλωσης, οπότε μπορεί να ανιχνευτεί και μια κορυφή ενέργειας 1.022 MeV. Βέβαια η εκπομπή ποζιτρονίων από την πηγή δεν είναι ο μόνος λόγος για τον οποίο είναι δυνατή η ανίχνευση κορυφής στα 0.511 MeV. Αν η ενέργεια των ακτίνων-γ της πηγής

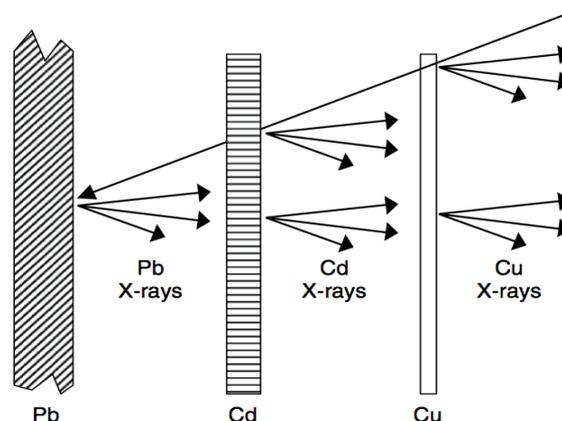
είναι ικανή να προκαλέσει δίδυμη γέννηση, αυτή μπορεί να συμβεί και στη θωράκιση. Έτσι, το ένα από τα δύο φωτόνια της εξαύλωσης του ποζιτρονίου μπορεί να ανιχνευτεί και να συνεισφέρει σ' αυτή την κορυφή. Ένας τρίτος παράγοντας που μπορεί να συνεισφέρει σε μια τέτοια κορυφή είναι η δίδυμη γένεση στη θωράκιση από κοσμική ακτινοβολία υψηλής ενέργειας.

2.3.2.3 Αιχμές διαφυγής ακτίνων-X

Όταν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα μέσα στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή, ακολουθεί εκπομπή μιας χαρακτηριστικής ακτίνας-X του υλικού. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η χαρακτηριστική ακτίνα-X απορροφάται κοντά στο σημείο που παρήχθη. Αν όμως η παραγωγή της χαρακτηριστικής γίνει κοντά στην επιφάνεια του ανιχνευτή, αυτή μπορεί να διαφύγει εκτός του ανιχνευτή. Σε αυτή την περίπτωση, η ενέργεια που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι μειωμένη κατά ένα ποσό ίσο με την ενέργεια της χαρακτηριστικής ακτίνας-X. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση αυτή δημιουργείται μια καινούρια φωτοκορυφής στην ενέργεια που αντιστοιχεί στην ενέργεια της φωτοκορυφής μειωμένη κατά την ενέργεια της χαρακτηριστικής. Αυτές οι φωτοκορυφές ονομάζονται «αιχμές διαφυγής ακτίνων-X». Το φαινόμενο είναι πιο έντονο για ακτινοβολία-γ χαμηλής ενέργειας και για ανιχνευτές που ο λόγος της επιφάνειάς τους προς τον συνολικό όγκο τους είναι μεγάλος.

2.3.2.4 Χαρακτηριστικές ακτίνες-X (θωράκισης)

Όταν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην θωράκιση ακολουθείται από την εκπομπή μιας χαρακτηριστικής ακτίνας-X του υλικού από το οποίο απορροφήθηκε το φωτόνιο. Υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα αυτή η ακτίνα-X να οδηγηθεί στον ανιχνευτή και να σχηματίσει μια κορυφή. Το αποτέλεσμα θα είναι να υπάρχουν στο φάσμα κορυφές από τις χαρακτηριστικές ακτίνες-X των υλικών της θωράκισης και ιδιαίτερα αυτών με υψηλό Ατομικό Αριθμό (Z), τα οποία



Σχήμα 2.10: Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την θωράκιση

εκπέμπουν και χαρακτηριστικές ακτίνες- X σε υψηλότερες ενέργειες (όπως ο μόλυβδος). Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι μια θωράκιση η οποία δεν θα αποτελείται από ένα υλικό αλλά από επάλληλες στρώσεις υλικών με μειούμενο Z πλησιέστερα στον ανιχνευτή. Συνήθως, το αρχικό στρώμα μόλυβδου καλύπτεται από κάδμιο για να απορροφήσει τις χαρακτηριστικές X του μόλυβδου. Στη συνέχεια τοποθετείται χαλκός ο οποίος μπορεί να ακολουθείται από συνθετικό υλικό για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν σε κάποιο βαθμό να επιτευχθούν με μία θωράκιση, τα τοιχώματα της οποίας θα απέχουν πολύ από τον ανιχνευτή και την πηγή, θα είναι δηλαδή όγκου. Έτσι μειώνεται τόσο η σκεδαζόμενη ακτινοβολία- γ που φτάνει στη θωράκιση αλλά και οι ακτίνες- X που φτάνουν στον ανιχνευτή. Μια τέτοια λύση όμως είναι πολύ ακριβότερη λόγω κατασκευής και δύσχρηστη λόγω μεγέθους και γι' αυτό δεν προτιμάται.

2.3.2.5 Διαφυγή ηλεκτρονίων

Αν το μέγεθος του ανιχνευτή δεν είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με την τυπική διαδρομή των δευτερογενών ηλεκτρονίων, τότε ένα ποσοστό αυτών μπορεί να διαφύγει από τον ανιχνευτή και άρα η ενέργεια τους να μην ανιχνευτεί. Ιδιαίτερα για ακτίνες- γ υψηλής ενέργειας το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο αφού κι οι ενέργειες των δευτερογενών ηλεκτρονίων λόγω σκέδασης Compton μπορεί να είναι επίσης υψηλές. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η καταγραφή λιγότερων γεγονότων στην αιχμή Compton, η οποία τότε μπορεί να παρουσιάζεται ελαφρώς παραμορφωμένη.

2.3.2.6 Ακτινοβολία πέδησης

Ένας μηχανισμός μέσω του οποίου τα δευτερογενή ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια είναι μέσω της εκπομπής φωτονίων πέδησης. Το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται με αυτό τον τρόπο αυξάνεται δραματικά με την αύξηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου και γίνεται κυρίαρχο φαινόμενο για ενέργειες μεγαλύτερες από μερικά MeV. Επίσης, το φαινόμενο εξαρτάται και από το ατομικό βάρος του υλικού του ανιχνευτή κατά ένα παράγοντα ανάλογο του Z^2 οπότε γίνεται εντονότερο για βαρύτερα στοιχεία. Παρόλο που το ηλεκτρόνιο μπορεί να επιβραδυνθεί και να απορροφηθεί / καταγραφεί πλήρως μέσα στον ανιχνευτή, μπορεί ένα κλάσμα της ενέργειάς του να διαφύγει με τη μορφή φωτονίου. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας είναι παρόμοια με αυτά του προηγούμενου μηχανισμού, δηλαδή υπάρχει παραμόρφωση του φάσματος, αλλά σε καμία περίπτωση δεν εισάγονται νέες φωτοκορυφές σε αυτό.

Παράλληλα, οι περισσότερες κοινά χρησιμοποιούμενες πηγές γ -ακτινοβολίας εκπέμπουν

και β-σωματίδια και συχνά είναι τοποθετημένες μέσα σε θήκες ικανού πάχους για να σταματά τα σωματίδια-β. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας απορροφητής ώστε να εμποδίζονται τα β-σωματίδια από το να φτάνουν στον ανιχνευτή και να παραμορφώνουν το φάσμα. Παρόλα αυτά κατά την διαδικασία της απορρόφησης παράγεται δευτερογενής ακτινοβολία πέδησης η οποία μπορεί να κάνει αισθητή την παρουσία της στο φάσμα. Τυπικά, το φάσμα αυτής της δευτερογενούς ακτινοβολίας εκτείνεται μέχρι το μέγιστο της ακτινοβολίας που έχουν τα β-σωματίδια όμως στην πράξη η επίδραση του είναι πολύ σημαντική μόνο για τις χαμηλές ενέργειες. Επειδή η ακτινοβολία πέδησης παίρνει συνεχείς τιμές δεν προσθέτει κάποια κορυφή στο φάσμα αλλά παραμορφώνει το συνεχές υπόστρωμα. Για να μειωθεί στο ελάχιστο η επίδραση αυτού του φαινομένου προτείνεται η θωράκιση της ακτινοβολίας-β με υλικά χαμηλού ατομικού αριθμού όπως για παράδειγμα το βηρύλλιο ή συνθετικά υλικά.

2.3.2.7 Περιβάλλοντα υλικά

Σε κάθε πρακτική εφαρμογή ένας ανιχνευτής που χρησιμοποιείται για φασματοσκοπία γ περιβάλλεται από πολλά υλικά τα οποία μπορεί να επιφέρουν μετρήσιμες αλλαγές στο τι καταγράφει ο ανιχνευτής. Συνήθως ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος μέσα σε κενό ή μπορεί να περιβάλλεται από μια θήκη για προστασία από την υγρασία και το φως. Για την μείωση του φυσικού υποβάθρου οι περισσότεροι ανιχνευτές περιβάλλονται και από θωράκιση. Επίσης η ίδια η πηγή της γ-ακτινοβολίας μπορεί να είναι τμήμα ενός μεγαλύτερου αντικειμένου ή να περιβάλλεται και η ίδια από κάποια θήκη. Όλα αυτά τα υλικά είναι πιθανές πηγές ακτινοβολίας που δευτερογενώς παράγονται από αλληλεπίδραση της γ-ακτινοβολίας με αυτά. Αν αυτή η δευτερογενής ακτινοβολία φτάσει στον ανιχνευτή μπορεί να παραμορφώσει το φάσμα που καταγράφεται και πολλές φορές μάλιστα σε σημαντικό βαθμό.

2.4 Η ακτινοβολία υποβάθρου και η ιδιαίτερη επίδραση της θωράκισης

Λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας που συνεχώς βομβαρδίζει την ατμόσφαιρα της γης αλλά και της παρουσίας φυσικής ραδιενέργειας στο περιβάλλον, όλοι οι ανιχνευτές ακτινοβολίας καταγράφουν κάποια ακτινοβολία υποβάθρου. Η φύση αυτής της ακτινοβολίας υποβάθρου διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση και εξαρτάται τόσο από το μέγεθος και το είδος του ανιχνευτή αλλά και από την θωράκιση που περιβάλλει κάθε φορά τον ανιχνευτή. Επειδή το “μέγεθος” της ακτινοβολίας υποβάθρου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ελάχιστο επίπεδο ανίχνευσης ακτινοβολίας, καταλαβαίνει κανείς πόσο σημαντική είναι η ελαχιστοποίηση αυτής της

παραμέτρου ειδικά για μετρήσεις χαμηλής ενεργότητας (activity). Όμως, και σε καθημερινή χρήση είναι αρκετά σημαντική η ύπαρξη χαμηλού επιπέδου ανίχνευσης και γι' αυτό το λόγο οι περισσότερες ανιχνευτικές διατάξεις είναι εξαρχής κατασκευασμένες με μια, έστω μικρή, θωράκιση. Ακόμα, η θωράκιση προστατεύει και από άλλες πηγές οι οποίες πιθανόν να υπάρχουν στους χώρους των εργαστηρίων και μπορεί να επηρεάσουν τη μέτρηση.

2.4.1 Πηγές ακτινοβολίας υποβάθρου

Οι πηγές ακτινοβολίας υποβάθρου μπορούν να χωρισθούν σε 4 γενικές κατηγορίες:

- Φυσική ραδιενέργεια που προέρχεται από υλικά του ίδιου του ανιχνευτή καθώς και από υλικά της θωράκισης και των περιφερειακών συστημάτων που είναι απαραίτητα για να λειτουργήσει.
- Ραδιενέργεια που προέρχεται από το έδαφος και από τα υλικά κατασκευής του εργαστηρίου.
- Ραδιενέργεια που υπάρχει στον αέρα γύρω από τον ανιχνευτή.
- Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα κοσμική ακτινοβολία.

2.4.1.1 Ραδιενέργεια που προέρχεται από συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά

Η ραδιενέργεια των κοινώς χρησιμοποιούμενων υλικών κατασκευής προέρχεται κυρίως από χαμηλή συγκέντρωση φυσικών ραδιενεργών στοιχείων όπως το κάλιο (^{40}K), το θόριο, το ουράνιο καθώς και στοιχεία της αλυσίδας του ουρανίου και του θορίου. Πιο συγκεκριμένα, το φυσικό κάλιο (K) περιέχει 0.012% ^{40}K το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 1.26×10^9 χρόνια. Εκπέμπει ένα σωματίδιο-β ενέργειας 1.314 MeV (89%) και σωματίδια-γ στα 1.46 MeV (11%) καθώς και χαρακτηριστική ακτίνα-X του ^{40}Ar , που ακολουθεί τη διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίου (EC). Το κάλιο συναντάται πολύ συχνά στα οικοδομικά υλικά όπως το τσιμέντο και για το λόγο αυτό συνήθως οι ακτίνες-γ που εκπέμπει ανιχνεύονται στα φάσματα υποστρώματος. Άλλα ισότοπα που ανιχνεύονται είναι τα ^{234}Th και ^{210}Pb θυγατρικά του ^{238}U , ίχνη του οποίου βρίσκονται στα υλικά της θωράκισης του ανιχνευτή καθώς και θυγατρικά της σειράς του ^{232}Th . Εκτός από τη ισότοπα φυσικής ραδιενέργειας μπορεί να ανιχνευτούν και κατάλοιπα πυρηνικών δοκιμών και ατυχημάτων (πχ Chernobyl) με συχνότερο το ^{137}Cs . Στον σχήμα 2.10 παρατίθενται ενδεικτικές τιμές ραδιενέργειας μερικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ανιχνευτικών συστημάτων.

Material	²³² Th(583 keV)	²³⁸ U	⁴⁰ K
Aluminum (6061 from Harshaw)	0.42	0.04	< 0.05
Aluminum (1100 from Harshaw)	0.24	< 0.017	< 0.06
Aluminum (1100 from ALCOA)	0.08	< 0.026	< 0.11
Aluminum (3003 from ALCOA)	0.10	< 0.026	0.56
Stainless steel (304)	< 0.006	< 0.007	< 0.06
Stainless steel (304-L)	< 0.005	< 0.005	< 0.02
Magnesium (rod)	0.06	< 0.04	0.1
Magnesium (ingot)	< 0.01	< 0.002	< 0.02
Magnesium (4 in. Ø × 4 in. from Dow)	< 0.005	< 0.002	< 0.02
Magnesium (from PGT)	< 0.05	< 0.03	< 0.05
Beryllium copper alloy	< 0.02	< 0.06	< 0.2
Copper (sheet)	< 0.05	< 0.06	< 0.2
Pyrex window	0.45	0.27	3.8
Quartz window	< 0.018	< 0.018	< 0.07
Molecular sieve	4.4	3.0	9.0
Neoprene	< 0.008	< 0.01	0.36
Rubber	0.12	1.0	2.0
Apiezon Q	4.5	4.5	2.7
Electrical tape—3M	< 0.04	< 0.06	< 0.1
Cement (Portland)	0.25	1.3	4.5
Epoxy	0.006	0.01	0.19
Lacquer	0.002	0.005	0.04

Source: Camp et al.³

Σχήμα 2.11: Ακτινοβολία υλικών που χρησιμοποιούνται σε θωρακίσεις

Μερικά υλικά όπως το pyrex γυαλί περιέχουν κάλιο, θόριο ή ακόμα και ουράνιο άρα συνεισφέρουν σημαντικά στην ακτινοβολία υποβάθρου. Στα περισσότερα από τα άλλα υλικά ο βαθμός συνεισφοράς τους εξαρτάται από το βαθμό καθαρότητάς τους. Ορισμένες φορές πρόβλημα μπορεί να αποτελέσει και το ενεργό υλικό που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση. Πιο ειδικά, για τους ανιχνευτές γερμανίου όμως, επειδή το γερμάνιο πρέπει για να λειτουργήσει σαν ενεργό υλικό να είναι πάρα πολύ υψηλής καθαρότητας, δεν αντιμετωπίζονται τέτοια προβλήματα.

Συχνά ο αέρας γύρω από τον ανιχνευτή μπορεί να συνεισφέρει στο υπόβαθρο. Για παράδειγμα τα αέρια ραδόνιο (²²²Rn) και το θορόνιο (²²⁰Rn) που προέρχονται τόσο από το έδαφος όσο κι από τα οικοδομικά υλικά παράγουν γ-ραδιενεργά θυγατρικά ισότοπα τα οποία μάλιστα με ευκολία εισέρχονται μέσα στη θωράκιση του ανιχνευτή. Μάλιστα το πρόβλημα αυτό γίνεται μεγαλύτερο καθώς η συγκέντρωσή των αερίων αυτών παρουσιάζει χρονική κύμανση. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα συχνά οι ανιχνευτές κλείνονται σε αεροστεγές περιβάλλον στο οποίο διοχετεύεται αέριο χωρίς ραδόνιο (π.χ η εξάτμιση του υγρού αζώτου του ανιχνευτή). Πάντως τα θυγατρικά του ραδονίου και θορονίου αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές υποστρώματος των ανιχνευτικών διατάξεων.

2.4.1.2 Κοσμική ακτινοβολία

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει στην ακτινοβολία υποβάθρου είναι η δευτερογενής ακτινοβολία που παράγεται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα. Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία που μπορεί να είναι είτε γαλαξιακής είτε ηλιακής προέλευσης, αποτελείται κυρίως από πρωτόνια καθώς και πυρήνες ηλίου και βαρέα ιόντα με ιδιαίτερα υψηλές ενέργειες. Κατά την αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα παράγεται ένα μεγάλο πλήθος από π και μ μεσόνια, ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια και φωτόνια με πολύ μεγάλο εύρος ενεργειών. Ορισμένα από αυτά τα σωματίδια φτάνουν στο επίπεδο της γης και μπορούν να ανιχνευτούν από τους ανιχνευτές.

Λόγω της πολύ υψηλής τους ενέργειας τα κοσμικά σωματίδια έχουν πολύ μικρή απώλεια ενέργειας, συγκρινόμενα με τα ταχέα ηλεκτρόνια. Για παράδειγμα, η απώλεια ενέργειας των μιονίων κυμαίνεται από 1.1 έως 1.8 MeV ανά g/cm^2 σε υλικά με υψηλό και χαμηλό ατομικό αριθμό αντίστοιχα. Έτσι, ενώ σε "λεπτούς" ανιχνευτές το σήμα που καταγράφεται δεν είναι πολύ σημαντικό δεν συμβαίνει το ίδιο και με ανιχνευτές, όπως για παράδειγμα οι ανιχνευτές γερμανίου, που το ενεργό υλικό έχει μεγάλο πάχος. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αποτιθέμενη ενέργεια μπορεί να είναι αρκετά MeV και οι καταγραφόμενοι παλμοί συγκρίσιμοι με τους συνήθως καταγραφόμενους.

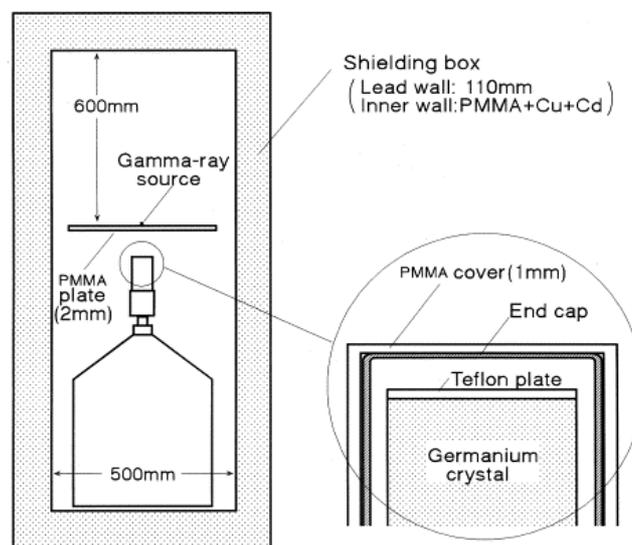
Τα διάφορα σωματίδια δευτερογενούς ακτινοβολίας έχουν -όπως είναι φυσικό- διαφορετική ικανότητα να διαπερνούν τις θωρακίσεις,

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος είναι τα δευτερογενή σωματίδια τα οποία προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις με τα υλικά της ίδιας της θωράκισης. Για παράδειγμα, πρωτόνια υψηλής ενέργειας μπορεί να παράγουν νετρόνια υψηλής ενέργειας, ειδικά κατά την αλληλεπίδρασή τους με υλικά υψηλού Z , όπως ο μόλυβδος, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κόρον στις θωρακίσεις ανιχνευτών γερμανίου. Τα πόνια και τα μόνια μπορούν να παράγουν υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια και ακτίνες- X εξαιτίας πέδησης. Η δημιουργία αυτών των δευτερογενών σωματιδίων μπορεί να αντισταθμίσει αρνητικά ορισμένα από τα οφέλη που οδηγούν στην επιλογή μεγαλύτερου πάχους θωράκισης για την μείωση της επίδρασης άλλων πηγών ακτινοβολίας υποβάθρου. Για παράδειγμα, εάν μια τυπική θωράκιση μολύβδου ξεπεράσει τα 10-15 cm πάχους δεν θα συνεισφέρει περισσότερο στην μείωση της ακτινοβολίας από άλλες πηγές, ενώ παράλληλα πιθανόν θα αυξήσει τη δευτερογενή κοσμική ακτινοβολία.

2.4.2 Η ακτινοβολία υποβάθρου στα φάσματα γ-ακτινοβολίας

2.4.2.1 Σχετική συνεισφορά

Η σχετική συνεισφορά των διάφορων πηγών ακτινοβολίας υποβάθρου στο φάσμα γ-ακτινοβολίας ποικίλει από περίπτωση σε περίπτωση. Σε έναν ανιχνευτή χωρίς θωράκιση, η συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας είναι η κυρίαρχη. Όμως, στις συνηθισμένες περιπτώσεις που χρησιμοποιείται θωράκιση, οι συνιστώσες της κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και της ακτινοβολίας από το περιβάλλον είναι μικρότερες, σε σχέση με την ακτινοβολία που οφείλεται στα υλικά του ανιχνευτή και της θωράκισης. Μια διάταξη θωράκισης για έναν ανιχνευτή γερμανίου φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.12: Θωράκιση ανιχνευτή γερμανίου¹

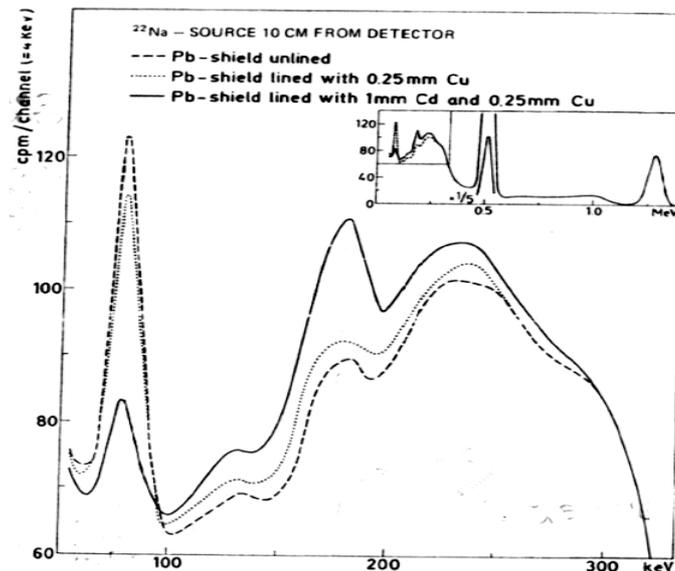
Στους ανιχνευτές γ-ακτινοβολίας ο όγκος του ανιχνευτή φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο. Γι' αυτό, σε περιπτώσεις που το χαμηλό υπόβαθρο είναι πάρα πολύ σημαντικό πρέπει να επιλέγεται το μικρότερο δυνατό μέγεθος ανιχνευτή. Γενικά, ένα συνηθισμένο κριτήριο είναι να επιλέγονται ανιχνευτές που μεγιστοποιούν το λόγο S^2/B όπου: S είναι το counting rate λόγω μόνο της πηγής που αναλύεται και B είναι το counting rate εξαιτίας του υποβάθρου.

2.4.2.2 Ακτινοβολία υποβάθρου που συνδέεται με την πηγή

Στην φασματοσκοπία-γ παρατηρείται μια επιπλέον πηγή ακτινοβολίας σαν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ακτίνων-γ της πηγής με τα υλικά της θωράκισης αλλά και του ίδιου του ανιχνευτή. Σημαντικοί μηχανισμοί είναι η οπισθοσκέδαση Compton, η δημιουργία χαρακτηριστικών ακτίνων

¹ (PMMA) Polymethyl-Methacrylate

κ.α. Αυτές οι ακτινοβολίες μπορούν να εξαφανισθούν εντελώς μόνο αν δεν υπάρχει καθόλου θωράκιση. Επειδή όμως αυτό δεν είναι δυνατόν, αυτό που στην πράξη γίνεται είναι η κατάλληλη σχεδίαση της θωράκισης ώστε να ελαχιστοποιούνται αυτά τα φαινόμενα. Στο σχήμα 2.12 φαίνεται το τμήμα χαμηλής ενέργειας του φάσματος γ-ακτινοβολίας πηγής ^{22}Na όπως καταγράφηκε από έναν ανιχνευτή NaI(Tl). Στο φάσμα φαίνεται η αιχμή οπισθοσκέδασης περί τα ~ 170 keV καθώς και μια κορυφή στα 77 keV που αντιστοιχεί σε ακτίνες X του μολύβδου που βρίσκεται στη θωράκιση. Για την ελαχιστοποίηση της τελευταίας στο εσωτερικό της θωράκισης από μολύβδο τοποθετείται επίστρωση από ένα υλικό χαμηλού Z, ώστε να απορροφά αυτές τις ακτίνες X. Το ίδιο το υλικό της επίστρωσης εκπέμπει ακτίνες X πολύ μικρότερης ενέργειας. Στο σχήμα φαίνεται επίσης τι αποτέλεσμα μπορεί να έχει μια επίστρωση από χαλκό ή κάδμιο. Ένα μικρό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αυξάνεται ελαφρά η πιθανότητα για σκέδαση Compton μέσα στο υλικό της επίστρωσης σε σχέση με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



Σχήμα 2.13: Φάσμα γ-ακτινοβολίας ^{22}Na όπως καταγράφεται σε ανιχνευτή NaI(Tl)

2.4.3 Υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή θωρακίσεων.

2.4.3.1 Συνηθισμένα υλικά για θωρακίσεις χαμηλού υποβάθρου.

A. Μόλυβδος

Λόγω της υψηλής του πυκνότητας και του μεγάλου του ατομικού βάρους, ο μολύβδος είναι ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή θωρακίσεων ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας. Η ενεργός διατομή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου κυριαρχεί για ενέργειες έως 0.5 MeV και για αυτό το λόγο ακόμα και φωτόνια σχετικά υψηλής ενέργειας “κόβονται” επαρκώς. Λόγω της υψηλής

του πυκνότητας, πάχος μερικών εκατοστών μπορεί να έχει σημαντικά αποτελέσματα στο μετρούμενο υπόβαθρο ενός ανιχνευτή. Ο μόλυβδος είναι πολύ αποτελεσματικός και για τη θωράκιση και σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας, παρόλο που για πάχη μεγαλύτερα από 10 cm είναι σημαντική και η συνιστώσα του συνεχούς υποστρώματος που δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με τον ίδιο τον μόλυβδο.

Ο μόλυβδος που συνήθως είναι διαθέσιμος στην αγορά έχει αυξημένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας λόγω προσμίξεων και έτσι προτιμάται μόλυβδος που έχει υποστεί ειδική επεξεργασία ή που προέρχεται από κάποια πολύ παλιά πηγή. Αμέσως μετά την επεξεργασία του ο μόλυβδος μπορεί να περιέχει σημαντική ποσότητα ^{210}Pb , ένα θυγατρικό του ^{226}Ra , το οποίο έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 22.4 χρόνια, είναι β-ραδιενεργό και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 46.5keV με χαμηλό ποσοστό εκπομπής (4%). Παρόλα αυτά υπάρχουν τρόποι ώστε και ο πρόσφατα επεξεργασμένος μόλυβδος να μην περιέχει σημαντική ποσότητα από ^{210}Pb . Ο συνήθως χρησιμοποιούμενος μόλυβδος μπορεί να περιέχει και ίχνη από ραδιενεργά ισότοπα τα οποία οφείλονται σε πυρηνικές δοκιμές ή πυρηνικά/ραδιολογικά ατυχήματα. Επίσης μπορεί να περιέχει ίχνη θυγατρικών του θορίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ορισμένα δείγματα μολύβδου έχουν ενεργότητες μέχρι και 1.5 Bq/g. Οι συνήθεις τιμές της ενεργότητας σε μόλυβδο υψηλής καθαρότητας είναι 1-2 τάξεις μεγέθους χαμηλότερες.

B. Ατσάλι

Το ατσάλι και το σίδηρο είναι επίσης δύο υλικά που χρησιμοποιούνται για θωρακίσεις ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας, ειδικά σε περιπτώσεις που η κατασκευή της θωράκισης μόνο από μόλυβδο είναι οικονομικά ασύμφορη. Η συνηθέστερη εναλλακτική λύση είναι μια θωράκιση από σίδηρο ή ατσάλι με επίστρωση από μόλυβδο. Στην περίπτωση αυτή έχει πολύ μεγάλη σημασία να προτιμώνται υλικά που είναι επεξεργασμένα πριν το 1950, καθώς τα νεότερα έχουν συχνά αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας. Επειδή τόσο η πυκνότητα αυτών των υλικών όσο και ο ατομικός τους αριθμός δεν είναι τόσο μεγάλος όσο του μολύβδου, πρέπει η θωράκιση να έχει πάχος αρκετές δεκάδες cm.

Γ. Βολφράμιο

Το βολφράμιο είναι ένα υλικό με ατομικό αριθμό 74 και πυκνότητα 19g/cm^3 . Με αυτά τα χαρακτηριστικά δεν μπορεί κανείς να το αγνοήσει, ειδικά στην περίπτωση μικρών θωρακίσεων. Το μέταλλο στην καθαρή του μορφή είναι δύσκολο να το επεξεργαστεί κανείς, είναι όμως δυνατό να χρησιμοποιηθεί υπό μορφή σκόνης. Η χρήση του βολφραμίου είναι μονόδρομος όταν απαιτείται η καλύτερη δυνατή θωράκιση, σε συνδυασμό με το ελάχιστο πάχος. Σε άλλες περιπτώσεις μπορούν

να χρησιμοποιηθούν κράματα βολφραμίου με νικέλιο και σίδηρο ή με νικέλιο και χαλκό που διατηρούν το 86% ή το 90% της πυκνότητας του καθαρού βολφραμίου αλλά εν γένει είναι απαιτητικά στην επεξεργασία.

Δ. Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα λόγω του πολύ χαμηλού κόστους χρησιμοποιείται σε θωρακίσεις μεγάλου μεγέθους. Η ενεργότητά του όμως είναι αυξημένη λόγω του ^{40}K , του ουρανίου και άλλων ιχνοστοιχείων που περιέχει. Έτσι, χρησιμοποιείται ως εξωτερικό στρώμα με εσωτερική επίστρωση από ατσάλι, μόλυβδο, ή κάποιο άλλο υλικό χαμηλότερης ραδιενέργειας. Το συνηθισμένο σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από νερό και ορισμένα υλικά χαμηλού Z. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και ειδικής σύστασης τσιμέντο, το οποίο περιέχει μεγάλο ποσοστό στοιχείων υψηλού Z, γεγονός που το κάνει πολύ καλύτερο στη θωράκιση γ-ακτινοβολίας (barytes concrete).

2.4.3.2 Θωράκιση νετρονίων

Η θωράκιση έναντι των νετρονίων δεν είναι κάτι που αφορά μόνο τις ανιχνευτικές διατάξεις νετρονίων. Ένας ανιχνευτής φωτονίων μπορεί να επηρεαστεί από ένα περιβάλλον στο οποίο υπάρχουν ταχέα νετρόνια. Αυτό έχει να κάνει κυρίως με τα φωτόνια που απελευθερώνονται κατά τη σύλληψη νετρονίων από τα υλικά κοντά ή μέσα στον ανιχνευτή. Προφανώς, σε περιβάλλοντα που υπάρχει έντονη παραγωγή νετρονίων, η ανάγκη για θωράκιση έναντι των νετρονίων είναι εντονότερη, παρόλα αυτά η θωράκιση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε περίπτωση.

Για την επιλογή των υλικών σε αυτή την περίπτωση τα κριτήρια είναι πολύ διαφορετικά. Είναι πολύ σημαντικό να επιβραδυνθούν γρήγορα τα νετρόνια σε χαμηλές ενέργειες έτσι ώστε να απορροφηθούν από υλικά με μεγάλη ενεργό διατομή απορρόφησης στα νετρόνια. Τα καταλληλότερα υλικά είναι εκείνα με χαμηλό ατομικό αριθμό άρα υλικά που περιέχουν υδρογόνο, όπως το νερό, το σκυρόδεμα και η παραφίνη. Όταν το νετρόνιο επιβραδυνθεί θα πρέπει να απορροφηθεί. Αυτό μπορεί να γίνει στο υλικό που χρησιμοποιείται και για την επιβράδυνση, παρόλο που η ενεργός διατομή για απορρόφηση είναι σχετικά μικρή. Επίσης η απορρόφηση στο υδρογόνο οδηγεί στην απελευθέρωση ενός φωτονίου στα 2.22 MeV που είναι ανεπιθύμητη. Έτσι, συνήθως προτιμάται η απορρόφηση να γίνεται σε διαφορετικό υλικό από την επιβράδυνση, το οποίο μπορεί να είναι αναμεμιγμένο με το υλικό της επιβράδυνσης ή μπορεί να αποτελεί ένα ξεχωριστό στρώμα στην εσωτερική πλευρά. Για αυτό το ρόλο επιλέγονται υλικά με μεγάλη ενεργό διατομή απορρόφησης, όπως το βόρον και το λίθιο. Η αντίδραση $\text{B}(n,\alpha)$ έχει υψηλή ενεργό διατομή απορρόφησης στις χαμηλές ενέργειες και επίσης το βόρον μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε άλλα

υλικά όπως το πολυαιθυλένιο. Τα βαρέα φορτισμένα σωματίδια που παράγονται από την αντίδραση απορροφούνται σε απόσταση μικρότερη από 0.1 mm και έτσι δεν συνεισφέρουν περαιτέρω στο υπόβαθρο. Όμως, η πλειοψηφία των αντιδράσεων απορρόφησης οδηγεί σε διεγερμένη κατάσταση του παράγωγου πυρήνα και σε εκπομπή φωτονίου στα 0.48 MeV. Για αυτό το λόγο σε ορισμένες εφαρμογές που μπορεί αυτό να αποτελεί πρόβλημα, προτιμάται το λίθιο καθώς η αντίδραση $\text{Li}(n,\alpha)$ δεν παράγει πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση, με εν συνεχεία εκπομπή φωτονίου.

Ένα ακόμα υλικό που χρησιμοποιείται για την απορρόφηση των νετρονίων είναι το κάδμιο, το οποίο έχει πολύ υψηλή ενεργό διατομή απορρόφησης. Με ένα πάχος της τάξης των 0.5 mm μπορεί κανείς να πετύχει πολύ καλά αποτελέσματα. Το μειονέκτημα είναι πως κατά τη διαδικασία της απορρόφησης εκπέμπεται φωτόνιο το οποίο συνεισφέρει και αυτό στην ακτινοβολία υποβάθρου.

2.4.4 Ενεργητικές μέθοδοι μείωσης της ακτινοβολίας υποβάθρου.

2.4.4.1 Anti-coincidence Shielding

Όπως έχουμε δει έως τώρα η συνιστώσα της ακτινοβολίας υποβάθρου που οφείλεται στην κοσμική ακτινοβολία μπορεί να εξαιρεθεί μόνο μέσα από πάρα πολύ μεγάλες σε μέγεθος αλλά και κόστος κατασκευές συμβατικής (παθητικής) θωράκισης. Όμως μια εναλλακτική μέθοδος είναι η λεγόμενη ενεργητική θωράκιση. Μια τέτοια μέθοδος είναι η anti-coincidence shielding. Σε αυτή τη μέθοδο ο κύριος ανιχνευτής περιβάλλεται από έναν ή περισσότερους δευτερεύοντες ανιχνευτές. Το σήμα εξόδου του κύριου ανιχνευτή γίνεται δεκτό μόνο αν δεν συνοδεύεται από ταυτόχρονο παλμό στους δευτερεύοντες ανιχνευτές. Η θωράκιση αυτού του τύπου μειώνει σε σημαντικό βαθμό το υπόστρωμα λόγω σκεδάσεων και οπισθοσκεδάσεων Compton.

2.4.4.2 Coincidence counting

Μια άλλη μέθοδος ενεργητικού περιορισμού του υποβάθρου είναι η coincidence counting. Όταν ένα ραδιοϊσότοπο εκπέμπει περισσότερα από ένα φωτόνια “ταυτόχρονα” (με βάση την χρονική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή) το υπόβαθρο μπορεί να μειωθεί κατά πολύ χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική. Για παράδειγμα, κατά την εκπομπή β-σωματιδίου που σχεδόν ταυτόχρονα οδηγεί στην εκπομπή γ-σωματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθούν δύο ανεξάρτητοι ανιχνευτές για τα β-σωματίδια και τα φωτόνια, με την πηγή κατάλληλα τοποθετημένη ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση σε κάθε ανιχνευτή. Απαιτώντας σύμπτωση στις εξόδους των δύο ανιχνευτών, πολλά γεγονότα υποβάθρου δεν θα καταγραφούν καθώς θα καταγραφούν σε έναν μόνο

από τους δύο ανιχνευτές. Τελικά, η μέθοδος οδηγεί στο να καταγράφονται 50-60% λιγότεροι παλμοί υποστρώματος, με ταυτόχρονη βελτίωση του κατώτερου επιπέδου ανίχνευσης κατά 1-2 τάξεις μεγέθους, σε σχέση με μια απλά θωρακισμένη διάταξη γ-ακτινοβολίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Ο κώδικας προσομοίωσης αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας & ύλης PENELOPE

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η λειτουργία των ανιχνευτών ακτινοβολιών στηρίζεται στην αλληλεπίδραση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με την ενεργό περιοχή του ανιχνευτή. Σε μια πειραματική διάταξη η λειτουργία αυτή αφήνεται στα χέρια της φύσης, αλλά όταν επιχειρείται η προσομοίωση ενός πειράματος ανίχνευσης ακτινοβολίας θα πρέπει να υπάρχει ένας αλγόριθμος ο οποίος να αναλαμβάνει το ρόλο της. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, αν η πηγή εκπέμψει ένα σωματίδιο και εκείνο αλληλεπιδράσει με στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή θα χάσει ένα μέρος της ενέργειας του ή ακόμα και το σύνολό της, με παράλληλη παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων. Αν δεν χάσει όλη την ενέργεια του θα συνεχίσει την πορεία του και θα αλληλεπιδράσει ξανά ή θα διαφύγει από τον ανιχνευτή. Αυτή η διαδικασία θα συνεχιστεί έως ότου το σωματίδιο να χάσει όλη την ενέργειά του, δηλαδή να αποδώσει όλη την ενέργεια του. Άρα όσο εξελίσσεται χρονικά το φαινόμενο διαπιστώνεται και μεγαλύτερη διασπορά της ενέργειας σε περισσότερα σωματίδια.

Λόγω της μεγάλης σημασίας της μετάδοσης ακτινοβολίας μέσα στην ύλη, σε πολλούς τομείς της φυσικής και της τεχνολογίας, ήδη από την αρχή του 20^{ου} αιώνα υπήρξαν προσπάθειες να μελετηθεί σε βάθος το φαινόμενο. Όμως, μόνο από τα μέσα του αιώνα και μετά με την ανάπτυξη και της επιστήμης των υπολογιστών υπήρξε πραγματικό άλμα σ' αυτή την κατεύθυνση με την ανάπτυξη των μεθόδων προσομοίωσης Monte Carlo.

3.1 Μέθοδος προσομοίωσης MONTE CARLO

Η πρώτη καταγεγραμμένη αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo ήταν αυτή των Hayward και Hubbell (1954) που δημιούργησε, κατέγραψε και ανέλυσε 67 ιστορίες φωτονίων. Το ότι η πρώτη μέθοδος κατέγραφε φωτόνια κι όχι π.χ. ηλεκτρόνια δεν είναι τυχαίο, μιας και τα φωτόνια μπορεί να απορροφηθούν αποτελεσματικά με μερικές σκεδάσεις Compton ή μια δίδυμη γέννηση. Αντίθετα, η προσομοίωση ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων είναι πολύ πιο δύσκολη καθώς η μέση απώλεια ενέργειας τους για μια αλληλεπίδραση είναι πολύ μικρότερη από εκείνη των φωτονίων. Κατά συνέπεια, για να υπάρχει απορρόφηση της ενέργειας ενός ηλεκτρονίου, πρέπει να γίνουν πολλές αλληλεπιδράσεις και να παραχθούν περισσότερα δευτερογενή σωματίδια και κατά συνέπεια πολλές ιστορίες που πρέπει να προσομοιωθούν.

Στην προσομοίωση Monte Carlo θεωρείται η ιστορία/τροχιά ενός σωματιδίου σαν μια τυχαία ακολουθία ελευθέρων διαδρομών μέσα στο υλικό, που τελειώνουν με μια αλληλεπίδραση. Ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μπορεί να υπάρχει αλλαγή κατεύθυνσης, απώλεια ενέργειας ή

δημιουργία δευτερογενών σωματιδίων. Η προσομοίωση Monte Carlo, για μια συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, συνίσταται στη δημιουργία τέτοιων τυχαίων ιστοριών. Για να προσομοιωθούν αυτές τις ιστορίες απαιτείται ένα «μοντέλο αλληλεπίδρασης» που θα βασίζεται στους φυσικούς νόμους που διέπουν μια αλληλεπίδραση. Για παράδειγμα, για κάθε πιθανή αλληλεπίδραση απαιτείται η διαφορική ενεργός διατομή της. Η διαφορική ενεργός διατομή (differential cross section – DCS) καθορίζει την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (probability distribution function – PDF) της κάθε τυχαίας μεταβλητής που παίρνει μέρος στην ιστορία. Το μήκος της ελευθέρως διαδρομής μεταξύ δύο διαδοχικών αλληλεπιδράσεων, το είδος της αλληλεπίδρασης, την απώλεια ενέργειας και την γωνιακή κατανομή των εκπεμπόμενων σωματιδίων κτλ. Με γνωστές αυτές τις κατανομές πιθανότητας δημιουργούνται οι ιστορίες. Η δημιουργία μιας ιστορίας βασίζεται στη διαδικασία της στατιστικής δειγματοληψίας. Για τη δημιουργία μιας ιστορίας, σε κάθε φάση της, επιλέγεται με τυχαίο τρόπο, μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, μια τιμή για κάθε ένα μέγεθος/χαρακτηριστικό του φωτονίου (π.χ. αρχική διεύθυνση, θέση που θα πραγματοποιήσει την πρώτη αλληλεπίδραση, είδος της αλληλεπίδρασης κλπ). Στη συνέχεια, μετά από μια σειρά υπολογισμών, προκύπτει το τελικό ζητούμενο μέγεθος, το οποίο και καταγράφεται. Με το πέρας της ιστορίας καταγράφονται τα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοσή του. Εάν ο αριθμός των ιστοριών είναι αρκετά μεγάλος, οι μέσες τιμές των φυσικών μεγεθών που καταγράφονται με την ολοκλήρωση κάθε ιστορίας προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια.

Σήμερα η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται ευρέως για τη λύση φυσικών και μαθηματικών προβλημάτων, ιδιαίτερα σε πεδία που εμπεριέχονται πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές (στατιστική φυσική, κβαντική θεωρία πολλών σωμάτων, ανάλυση ρίσκου σε οικονομικά μοντέλα κτλ). Το όνομα Monte Carlo δόθηκε στη μέθοδο από τον John Von Neumann που ήταν μέλος της ερευνητικής ομάδας στο επιστημονικό εργαστήριο του Los Alamos. Ο Von Neumann διάλεξε το όνομα του διάσημου καζίνο Monte Carlo στο Μονακό όπου ο θείος του στενού του συνεργάτη του Ulam Stanislaw ήταν τακτικός θαμώνας.

3.2 Ο κώδικας PENELOPE

Κατά καιρούς έχουν δημιουργηθεί μια σειρά από κώδικες Monte Carlo που έχουν ένα πολύ ευρύ πεδίο εφαρμογής. Μερικοί από αυτούς που χρησιμοποιούνται στους τομείς της πυρηνικής και σωματιδιακής φυσικής είναι:

- GEANT: χρησιμοποιείται από το CERN για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης σωματιδίων υψηλής ενέργειας με ανιχνευτές

- FLUKA - INF: χρησιμοποιείται από το CERN για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης / μεταφοράς σωματιδίων στην ύλη
- SRIM: κώδικας που υπολογίζει το βαθμό διείσδυσης και απόθεσης ενέργειας ιόντων στην ύλη
- CompHEP / PYTHIA: προσομοίωση Monte Carlo για συγκρούσεις μεταξύ σωματιδίων
- BEAMnrc: χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις LINAC (Linear Accelerator) για μοντελοποίηση πηγών ραδιοθεραπείας
- MCNP: χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης νετρονίων, ηλεκτρονίων, φωτονίων με την ύλη

Ένας τέτοιος κώδικας είναι και ο κώδικας PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ. Ο κώδικας αναπτύχθηκε από τους F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau, του Πανεπιστημίου της Βαρκελώνης, και η πρώτη έκδοση του κυκλοφόρησε το 1996. Η έκδοση του κώδικα PENELOPE, η οποία και χρησιμοποιείται στην ΜΕ, κυκλοφόρησε το 2005 (PENELOPE 2005) και περιείχε αρκετές τροποποιήσεις και βελτιώσεις σε σχέση με την αρχική έκδοση. Ο κώδικας PENELOPE προσομοιώνει την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-β και φωτονίων με διάφορα υλικά. Το όνομα προέρχεται από το ακρωνύμιο “**PE**Netration and **E**nergy **LO**ss of **P**ositrons and **E**lectrons in matter”. Ο αλγόριθμος αλληλεπίδρασης βασίζεται σε ένα μοντέλο που συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων και αναλυτικά μοντέλα ενεργών διαφορικών διατομών για αλληλεπιδράσεις διαφόρων τύπων μεταξύ σωματιδίων και ύλης. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί για ένα μεγάλο εύρος της κινητικής ενέργειας ηλεκτρονίων και φωτονίων που εκτείνεται από 50 eV έως 1GeV.

3.2.1 Δομή και χρήση του κώδικα PENELOPE

Το πρώτο βήμα για να μπορέσει ο χρήστης να χρησιμοποιήσει τον κώδικα είναι να καταστρώσει ένα πρόγραμμα που θα το ονομάζουμε **κυρίως πρόγραμμα (main program)**. Με το πρόγραμμα αυτό περιγράφει τα γενικά σταθερά στοιχεία του προς εξέταση προβλήματος, ελέγχει την εξέλιξη της «ιστορίας» του κάθε σωματιδίου κατά την προσομοίωση κτλ. Το κυρίως πρόγραμμα καλεί σε όποιο σημείο χρειάζεται υπορουτίνες από ένα πακέτο υπορουτινών (**subroutine packages**) που αποτελεί την καρδιά του κώδικα της PENELOPE. Λεπτομέρειες σχετικά με το πακέτο αυτό υπορουτινών θα παρατεθούν στη συνέχεια. Για να μπορεί όμως το κυρίως πρόγραμμα να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα σενάρια, απαιτούνται μία σειρά από

παραμέτρους, οι οποίες δεν εντάσσονται στον βασικό κορμό του κυρίως προγράμματος, αλλά παρέχονται από κατάλληλα αρχεία δεδομένων (αρχεία εισόδου) που πρέπει κάθε φορά να παρέχει ο χρήστης (αρχεία της μορφής *.in). Επίσης τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγει το κυρίως πρόγραμμα θα πρέπει να είναι διαθέσιμα στον χρήστη. Γι' αυτό τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία εξόδου σε πολλές διαφορετικές μορφές, ανάλογα με το είδος των αποτελεσμάτων.

3.2.2 Οι υπορουτίνες του κώδικα PENELOPE

Ο κώδικας αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτινών, οι οποίες αναλαμβάνουν να πραγματοποιήσουν την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ύλη. Οι βασικές υπορουτίνες είναι ομαδοποιημένες σε πακέτα. Κάθε πακέτο έχει ξεχωριστό ρόλο και όλα συντίθενται (compilation) κατάλληλα στο εκάστοτε κυρίως πρόγραμμα που απαιτεί η κάθε εφαρμογή.

- PENELOPE.F: Το βασικό πακέτο για την προσομοίωση των σωματιδίων (showers) μέσα σε κάποιο υλικό
- PENGEOM.F: Πακέτο που είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό και την κίνηση των σωματιδίων μέσα στην εκάστοτε γεωμετρία (υποστηρίζει έως 2500 επιφάνειες και 1250 σώματα)
- PENVARED.F: Πακέτο υπορουτινών υπεύθυνων για την μείωση της διασποράς (variance reduction) κατά την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo.
- TIMER.F: Πακέτο σχετικό με τις υπορουτίνες μέτρησης και συγχρονισμό
- MATERIAL.F: Το βασικό πακέτο για τη δημιουργία αρχείων υλικών (material data files)

3.2.3 Κυρίως πρόγραμμα

Ο χρήστης καλείται να γράψει το δικό του **κυρίως πρόγραμμα** (main program) με το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία του προς εξέταση προβλήματος, ελέγχει την εξέλιξη της ιστορίας του κάθε σωματιδίου κατά την προσομοίωση και καταχωρεί σε αρχεία τις ποσότητες που τον ενδιαφέρουν (π.χ. την ενέργεια κάθε φωτονίου που φτάνει σε μία περιοχή). Για διευκόλυνση του χρήστη, μαζί με τον κώδικα προσομοίωσης διατίθενται και μικρός αριθμός από κυρίως προγράμματα, κατάλληλα για την επίλυση προβλημάτων σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Πιο συγκεκριμένα, στην έκδοση του κώδικα PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ διατίθενται τα παρακάτω κυρίως προγράμματα:

1. PENSLAB: για την προσομοίωση της διάδοσης σωματιδίων β / φωτονίων τα οποία διέρχονται από επίπεδη πλάκα συγκεκριμένου υλικού,
2. PENCYL: για την προσομοίωση της διάδοσης σωματιδίων β / φωτονίων μέσα από σύνθετες κυλινδρικές επιφάνειες,
3. PENMAIN: για την προσομοίωση της διάδοσης σωματιδίων β / φωτονίων διερχομένων από σύνθετες κατασκευές. Αποτελεί τη γενικότερη περίπτωση κυρίως προγράμματος από αυτά που διατίθενται στο πακέτο του κώδικα PENELOPE και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Το πρόγραμμα PENMAIN χρησιμοποιήθηκε και ως βάση στην παρούσα ΜΕ. Βέβαια χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες μετατροπές οι οποίες θα παρουσιαστούν διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

3.2.4 Αρχεία εισόδου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πρότυπη δομή ενός αρχείου εισόδου του προγράμματος PENMAIN και αναλύονται οι παράμετροι που εμφανίζονται, δίνοντας έμφαση σε εκείνες που απασχόλησαν στα πλαίσια της παρούσας ΜΕ (για αναλυτικότερη παρουσίαση βλέπε ΔΕ Ν. Αθανασίου – 2006).

```

TITLE  penmain_cone_2

>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.46e6     [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0     [Coordinates of the source]
SDIREC  0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT  180      [Beam aperture, in deg]

>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT  10         [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 2 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 3 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 4 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 5 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 6 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 7 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 8 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 9 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAN 10 1.0e3 1.0e3 1.0e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
PFNAME volume_SiO2.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN xtra_volume_geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE  1e3 7.0e5 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 0e3 2.0e6 4096 [Energy window and number of channels]
EDBODY 15 [Active body; one line for each body]
EDBODY 14 [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 30 [Dumping period, in sec]

TIME  2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

```

Σχήμα 3.1: Τμήμα αρχείου εισόδου

Σε ένα αρχείο εισόδου δεν χρειάζεται να ορισθούν τιμές σε όλες τις παραμέτρους. Για τις παραμέτρους που δεν θα ορισθούν η παράμετρος λαμβάνει μια προεπιλεγμένη τιμή (default).

Επίσης, ορισμένες δευτερεύουσες παράμετροι είναι δυνατόν να μην οριστούν εξαρχής. Εάν δεν τοποθετηθούν καθόλου στο αρχείο θεωρείται πως δεν υπάρχουν. Ακολουθεί κατάλογος των παραμέτρων του αρχείου εισόδου.

TITLE: Το όνομα του αρχείου. Το μέγιστο μέγεθος είναι 120 χαρακτήρες (αλφαριθμητικοί).

Προεπιλογή: καμία

SKPAR: Το είδος της ακτινοβολίας της πηγής. (1=ηλεκτρόνια, 2=φωτόνια, 3=ποζιτρόνια).

Προεπιλογή: KPARP=1

SENERG: Η αρχική ενέργεια των εκπεμπόμενων σωματιδίων (για μονοενεργειακή πηγή).

Προεπιλογή: SE0=1.0E6

SPECTR: Για πηγή που εκπέμπει φάσμα ενεργειών ορίζεται η ενέργεια ανά ενεργειακή περιοχή.

Κάθε γραμμή SPECTR δίνει την ελάχιστη ενέργεια του καναλιού του φάσματος (E_i) καθώς και τη σχετική πιθανότητα (P_i). Το άνω όριο του φάσματος ορίζεται εισάγοντας μια γραμμή SPECTR που θα δίνει την ενέργεια (E_i) και θα θέτει τη σχετική πιθανότητα (P_i) σε αρνητική τιμή. Προεπιλογή: καμία

SPOSIT: Συντεταγμένες της (σημειακής) πηγής. Προεπιλογή: SX0=SY0=0, SZ0= -1.0E15

SDIREC: Πολική και αζιμουθιακή γωνία εκπομπής της πηγής (σε μοίρες). Προεπιλογή:

STHETA = 0.0, SPHI = 0.0

SAPERT: Γωνιακό εύρος εκπομπής της πηγής (σε μοίρες). Προεπιλογή: SALPHA = 0.0

Οι προηγούμενες παράμετροι που καθορίζουν τη δέσμη των εκπεμπόμενων σωματιδίων μπορεί να δοθούν εναλλακτικά με τη χρήση ενός αρχείου (phase-space file) της μορφής **.psf. Τότε οι προηγούμενες παράμετροι αγνοούνται.

IPSFN: Το όνομα του .psf αρχείου (20 χαρακτήρες). Μπορούν να οριστούν έως 100 αρχεία .psf τα οποία διαβάζονται διαδοχικά.

IPSPLI: Αριθμός διαχωρισμού. Κάθε σωματίδιο στο .psf αρχείο διαχωρίζεται σε NSPLIT ισοδύναμα σωματίδια με συντελεστή βαρύτητας ίσο με WGHT/NSPLIT. Προεπιλογή: NSPLIT=1 (χωρίς διαχωρισμό)

EPMAX: Μέγιστη ενέργεια των σωματιδίων που ορίζονται στο .psf αρχείο. Προεπιλογή: EPMAX=1.0E9

NMAT: Αριθμός διαφορετικών υλικών. Η υπορουτίνα PENELOPE.f επιτρέπει έως 10 υλικά. Περισσότερα μπορούν να ορισθούν με την αλλαγή της μεταβλητής MAXMAT του κυρίως προγράμματος. Η αρίθμησή τους θα πρέπει να συμφωνεί με εκείνη στο αρχείο υλικών. Προεπιλογή: NMAT=1

SIMPAR: Πακέτο παραμέτρων προσομοίωσης για κάθε ένα από τα υλικά του προβλήματος. Σε κάθε υλικό αντιστοιχεί μια γραμμή με τις παρακάτω παραμέτρους (όλες οι τιμές ενέργειας σε eV):

- ενέργεια απορρόφησης για κάθε είδος σωματιδίου, EABS(1:3,M),
- παράμετροι για ελαστική σκέδαση, C1(M) και C2(M),
- ενέργεια cutoff για ανελαστική σύγκρουση και ακτινοβολία πέδησης, WCC(M) και WCR(M).

Προεπιλογή: EABS(1,M) = EABS(3,M) = 0.01*EPMAX, EABS(2,M) = 0.001*EPMAX

C1(M) = C2(M) = 0.1, WCC = EABS(1,M), WCR = EABS(2,M) (προτεινόμενες τιμές στον κώδικα)

PFNAME: Το όνομα του αρχείου υλικών (έως 20 χαρακτήρες). Προεπιλογή: καμία

GEOMFN: Το όνομα του αρχείου γεωμετρίας PENGEOM – αρχείο της μορφής **.geo - (έως 20 χαρακτήρες). Προεπιλογή: καμία

DSMAX: Μέγιστο μήκος βήματος DSMAX (IB) σε cm, ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων στο σώμα IB. Προεπιλογή: DSMAX = 1.0E20

IMPDET : Ορίζει έναν ανιχνευτή αλληλεπίδρασης.

ENDDDET: Ορίζει έναν ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

RESUME: Το πρόγραμμα θα διαβάσει το αρχείο προσωρινής αποθήκευσης (dump file) που ονομάζεται "dumpfile_1.dat" και θα συνεχίσει την προσομοίωση από το συγκεκριμένο σημείο που είχε διακοπεί. Προεπιλογή: καμία.

DUMPTO: Δημιουργεί το αρχείο "dumpfile_2.ext" έτσι ώστε μετά το τέλος της προσομοίωσης να μπορεί ο χρήστης να την συνεχίσει για να πετύχει καλύτερη στατιστική. Προεπιλογή: καμία

DUMPP: Με την ενεργοποίηση αυτής της παραμέτρου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης γράφονται στα αρχεία εξόδου ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ίσα με την τιμή της παραμέτρου σε δευτερόλεπτα. Προεπιλογή: DUMPP = 1.0E15

NSIMSH: Ο αριθμός των ιστοριών που επιθυμούμε να προσομοιωθούν. Προεπιλογή: DSHN = 2.0E9

RSEED: Οι αρχικές τιμές της γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Προεπιλογή: ISEED1 = 12345; ISEED2 = 54321

TIME: Ο συνολικός χρόνος που θα διαρκέσει η προσομοίωση σε sec. Προεπιλογή: TIMEA = 100.0E0

Εάν διαπιστωθεί ότι κάποια από τις παραμέτρους περιέχει μη αποδεκτά δεδομένα, το πρόγραμμα σταματά και στην τελευταία γραμμή του αρχείου εξόδου "penmain.dat" καταγράφεται σε ποια γραμμή του αρχείου εισόδου βρίσκεται το λάθος.

3.2.4.1 Εικονικοί ανιχνευτές

Στην προηγούμενη ανάλυση του αρχείου εισόδου δεν έγινε αναφορά στις παραμέτρους που αφορούν τα τρία είδη ανιχνευτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον κώδικα, μιας και η σημαντικότητά τους επιβάλλει να παρουσιασθούν πιο αναλυτικά. Για την παρακολούθηση και την καταγραφή της υπό εξέταση ακτινοβολίας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τρία διαφορετικά είδη "εικονικών ανιχνευτών". Οι ανιχνευτές αλληλεπίδρασης (impact detectors), οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detectors) και οι ανιχνευτές δόσης (dose enclosure). Ένας ανιχνευτής αντιστοιχεί σε ένα σώμα το οποίο ορίζεται σε συγκεκριμένη θέση στο χώρο, με συγκεκριμένες διαστάσεις και αποτελούμενος από συγκεκριμένο υλικό. Ανάλογα με το είδος του κάθε ανιχνευτή καταγράφονται σε συγκεκριμένα αρχεία εξόδου πληροφορίες που ενδιαφέρουν, όπως η ενέργεια που αποτίθεται σε έναν ανιχνευτή κτλ. Η ενεργοποίηση ή όχι ενός ανιχνευτή γίνεται στο αρχείο εισόδου, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι ανιχνευτές, ανάλογα με τον τύπο τους, μπορεί να αποτελούν μέρος ή όχι της γεωμετρίας που κατασκευάζεται προκειμένου να προσομοιωθεί η πειραματική διαδικασία.

3.2.4.1.1 Ανιχνευτής αλληλεπίδρασης

Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης είναι ένας εικονικός ανιχνευτής που καταγράφει το πλήθος των σωματιδίων που εισέρχονται σ' αυτόν, τα οποία έχουν ενέργεια μέσα σε μία προκαθορισμένη ενεργειακή περιοχή. Πρέπει να αποτελεί μέρος της γεωμετρικής κατασκευής και συνεπώς πρέπει να είναι ορισμένος μέσα στο αρχείο γεωμετρίας (*.geo). Στο αρχείο αποτελεσμάτων του ανιχνευτή αυτού καταγράφεται η ενεργειακή κατανομή (φάσμα) των σωματιδίων που **εισήλθαν** στον ανιχνευτή. Για να οριστεί πλήρως ο ανιχνευτής πρέπει να προστεθούν στο αρχείο εισόδου δεδομένων οι κατάλληλες γραμμές, όπως φαίνονται στο πρότυπο αρχείο εισόδου στην παράγραφο "impact detectors". Μπορούμε να ορισθούν συγχρόνως έως 5 ανιχνευτές αλληλεπίδρασης.

Στην πρώτη γραμμή και μετά την εντολή **IMPDET** περιγράφεται το ενεργειακό φάσμα του ανιχνευτή. Για τον προσδιορισμό των ορίων του ενεργειακού φάσματος χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές **EDIL** και **EDIU** (κατώτερο και ανώτερο όριο του φάσματος) και η μεταβλητή **NCHI** που εκφράζει το πλήθος καναλιών του φάσματος εξόδου του ανιχνευτή. Η παράμετρος **IDPSF** δίνει το όνομα του αρχείου εξόδου (*.psf). Προεπιλογή: "rm_psf_impdet_#.dat". Η παράμετρος **IDSPC** δίνει το όνομα του αρχείου αποθήκευσης/εξόδου του ενεργειακού φάσματος. Προεπιλογή: "rm_spc_impdet_#.dat". Με την μεταβλητή **IDBODY** ορίζεται ο αύξων αριθμός του σώματος (body) που θα αποτελέσει τον ανιχνευτή, όπως αυτός ορίζεται στο αρχείο γεωμετρίας. Εξυπακούεται πως το σώμα αυτό θα πρέπει προηγουμένως να έχει οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας.

Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς ο αριθμός αυτός πρέπει να είναι ο ίδιος με τον αντίστοιχο αριθμό του σώματος στο αρχείο γεωμετρίας. Επίσης, το ίδιο σώμα δεν μπορεί να αποτελεί μέρος 2 ή περισσότερων ανιχνευτών αλληλεπίδρασης. Τέλος με την παράμετρο **IDKPAR** ορίζεται το είδος σωματιδίων που θα ανιχνεύονται. Αν δεν οριστεί τιμή θα ανιχνεύονται όλα τα σωματίδια.

3.2.4.1.2 Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας

Ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας είναι ένας ανιχνευτής που καταγράφει την ενέργεια που αποθέτουν τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν με αυτόν. Για να οριστεί χρειάζεται να θεωρηθεί ως τμήμα της κατασκευής και να περιγραφεί κατάλληλα στο αρχείο της γεωμετρίας. Στην συνέχεια πρέπει να οριστούν από το χρήστη τα σώματα (bodies) της κατασκευής, που θεωρούνται ως ενεργά, δηλαδή αποτελούν μέρος του ανιχνευτή. Ο χρήστης ορίζει το όνομα του αρχείου που δημιουργεί το πρόγραμμα για την αποθήκευση του φάσματος αποτιθέμενης ενέργειας, το ενεργειακό εύρος ανίχνευσης του ανιχνευτή καθώς και τα ενεργειακά κανάλια (energy bins) που θα χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί αυτό το φάσμα. Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει μέσα στον ανιχνευτή τότε καταγράφεται η ενέργεια η οποία αποτίθεται μέσα σε αυτόν, ενώ σε περίπτωση απλής διέλευσης από τον ανιχνευτή χωρίς απόθεση ενέργειας το σωματίδιο δεν καταγράφεται. Όπως και με την περίπτωση των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης και για τους ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας, δίδεται η δυνατότητα ορισμού έως πέντε ανιχνευτών. Στην πρώτη γραμμή και μετά την μεταβλητή **ENDDET** ορίζεται η ενεργειακή περιοχή (κάτω και άνω όριο) που θα ανιχνεύει ο ανιχνευτής και τα ενεργειακά κανάλια στα οποία αυτή θα χωρισθεί με τις παραμέτρους **EDEL**, **EDEU** και **NCHE** αντίστοιχα. Στην επόμενη γραμμή ορίζεται το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτεί το φάσμα του ανιχνευτή με την παράμετρο **EDSPC**. Το όνομα του αρχείου πρέπει να έχει τη μορφή `rm_src_enddet_#.dat`, όπου # ο αριθμός του ανιχνευτή (1-5), για να είναι δυνατή η απεικόνιση του περιεχομένου του με το πρόγραμμα `wgnuplot`. Τέλος, με την μεταβλητή **EDBODY** ορίζεται ο αριθμός του σώματος της κατασκευής που θα αποτελέσει τον ανιχνευτή. Το σώμα αυτό θα πρέπει να έχει προηγουμένως ορισθεί στο αρχείο γεωμετρίας τύπου `.geo`, ενώ ο αριθμός αυτός θα πρέπει να αντιστοιχεί στον αριθμό του σώματος στο αρχείο γεωμετρίας `.geo`. Ο ανιχνευτής αυτός είναι πολύ χρήσιμος για την καταγραφή του ενεργειακού φάσματος των σωματιδίων (ή φωτονίων) που αποτίθεται σε ένα σώμα (τον ανιχνευτή). Χρησιμοποιείται πολύ συχνά, όταν πχ το σώμα αυτό είναι ένας πραγματικός ανιχνευτής ακτινοβολίας, γι αυτό και στην παρούσα ΜΕ οι εικονικοί ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτού του είδους.

3.2.4.1.3 Ανιχνευτής δόσης

Ο ανιχνευτής δόσης (dose enclosure) είναι ένας ανιχνευτής ο οποίος καταγράφει την κατανομή της δόσης σε ένα τμήμα της κατασκευής μας. Ως ανιχνευτής θεωρείται ένα ορθογώνιο τρισδιάστατο πλέγμα, το οποίο καθορίζεται από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου τύπου .in. Σε αντίθεση με τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης και αποτιθέμενης ενέργειας, δεν αποτελεί ξεχωριστό τμήμα της κατασκευής και άρα δεν χρειάζεται να περιγράφεται ξεχωριστά στο αρχείο γεωμετρίας. Αυτού του τύπου οι εικονικοί ανιχνευτές βρίσκουν εφαρμογές σε προβλήματα δοσιμετρικών υπολογισμών. Για να οριστεί ο ανιχνευτής, ο χρήστης θα χρειαστεί να ορίσει τις επιφάνειες του ορθογωνίου που θα θεωρηθεί ως ανιχνευτής δόσης, καθώς και τις διαστάσεις του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό γίνεται μέσω του ορισμού των συντεταγμένων των κορυφών του.

Στην πρώτη γραμμή με την παράμετρο **GRIDX** δίνονται οι X συντεταγμένες των κορυφών. Στην δεύτερη και την τρίτη γραμμή με τις παραμέτρους **GRIDY** και **GRIDZ** δίνονται οι Y και Z συντεταγμένες αντίστοιχα. Οι διαστάσεις δίνονται σε cm. Τέλος, στην τελευταία γραμμή ορίζεται η πυκνότητα του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί με άλλα λόγια σε πόσα επίπεδα κατά X,Y και Z θα τεμαχισθεί ο ανιχνευτής με χρήση της παραμέτρου **GRIDBN**. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι $NX=1, NY=1, NZ=1$, δηλαδή ο ανιχνευτής είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο χωρίς διαμέριση.

3.2.4.2 Αρχείο γεωμετρίας

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στο αρχείο εισόδου με την παράμετρο GEOMFN ορίζεται το αρχείο από το οποίο αντλεί ο κώδικας τις πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Η κατασκευή σωστού αρχείου γεωμετρίας είναι ύψιστης σημασίας για την ορθότητα της προσομοίωσης, γι' αυτό και θα αναλυθεί διεξοδικά σε αυτή την παράγραφο. Το αρχείο γεωμετρίας είναι ένα αρχείο της μορφής *.geo γραμμένο σε ASCII μορφή. Η υπορουτίνα που είναι υπεύθυνη για την ανάγνωση αυτού του αρχείου και την μεταφορά της πληροφορίας στο κυρίως πρόγραμμα είναι η υπορουτίνα PENGEOM του κώδικα PENELOPE. Σε ένα αρχείο γεωμετρίας τα "δομικά στοιχεία" που διατίθενται για την κατασκευή μίας πραγματικής γεωμετρίας είναι τρία. Οι επιφάνειες (surfaces), τα σώματα (bodies) και οι ενότητες σωμάτων (modules).

3.2.4.2.1 Επιφάνειες (surfaces)

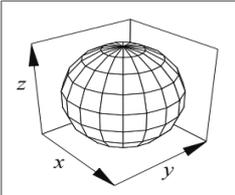
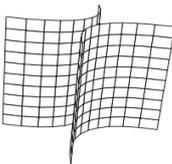
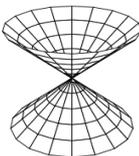
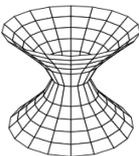
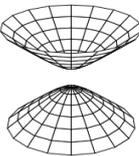
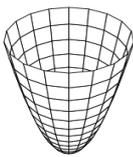
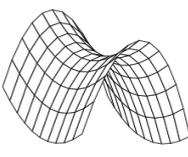
Όπως είναι γνωστό μια οποιαδήποτε επιφάνεια μπορεί να περιγραφεί από μια εξίσωση της μορφής:

$$F(x, y, z) = A_{xx}x^2 + A_{xy}xy + A_{xz}xz + A_{yy}y^2 + A_{yz}yz + A_{zz}z^2 + A_x x + A_y y + A_z z + A_0 = 0$$

με κατάλληλα επιλεγμένους συντελεστές (αναλυτική μορφή). Όμως, αν κανείς προσπαθήσει να περιγράψει μια επιφάνεια μέσω αυτής της εξίσωσης θα διαπιστώσει πως υπάρχει αρκετά μεγάλη δυσκολία, ειδικά στην περίπτωση σύνθετων επιφανειών χωρίς συμμετρία γύρω κάποιον άξονα καρτεσιανών συντεταγμένων, ή γύρω από την αρχή των αξόνων. Για την απλούστευση της περιγραφής, ο κώδικας PENELOPE παρέχει τη δυνατότητα περιγραφής "μοναδιαίων" επιφανειών με κεντρική συμμετρία γύρω από τον άξονα z χρησιμοποιώντας την παρακάτω συμπυγμένη έκφραση:

$$F_x(x, y, z) = I_1 x^2 + I_2 y^2 + I_3 z^2 + I_4 z + I_5 = 0$$

Με χρήση κατάλληλων εργαλείων μπορεί να γίνει μεγέθυνση ή/και να μετατόπιση της αρχικής επιφάνειας, έτσι ώστε να περιγραφεί οποιαδήποτε επιφάνεια. Στην συμπυγμένη μορφή εμφανίζονται μόνο πέντε συντελεστές, οι οποίοι αποκαλούνται **δείκτες (indices)**. Οι δείκτες παίρνουν μόνο τις τιμές -1, 0, 1 και οι επιφάνειες που περιγράφονται είναι "μοναδιαίες". Ανάλογα με την τιμή των δεικτών προκύπτουν οι επιφάνειες όπως φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 3.2.

		
1,1,1,0,-1	1,1,0,0,-1	1,-1,0,0,-1
		
1,1,-1,0,0	1,1,-1,0,-1	1,1,-1,0,1
		
1,1,0,-1,0	1,0,0,-1,0	1,-1,0,-1,0

Σχήμα 3.2: Δείκτες μοναδιαίων επιφανειών

Για να περιγραφεί τώρα μια πραγματική επιφάνεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω τρία εργαλεία μετασχηματισμού:

- **Επέκταση** (expansion) προς μία από τις καρτεσιανές συντεταγμένες. Η εξίσωση της επιφάνειας γίνεται:

3.2.4.3 Αρχείο υλικών

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.4, μέσα από το αρχείο εισόδου καλείται με την παράμετρο PFILENAME ένα αρχείο υλικών. Το αρχείο αυτό είναι της μορφής *.mat και περιέχει πληροφορίες που αφορούν τα υλικά που εμφανίζονται στο αρχείο γεωμετρίας (πυκνότητα, χημική σύσταση, κατά βάρος σύσταση κλπ). Το αρχείο δημιουργείται με τη βοήθεια της υπορουτίνας material.f που περιλαμβάνεται στο πακέτο PENELOPE. Αρχικά δημιουργείται ένα εκτελέσιμο αρχείο (material.exe) με την εντολή:

```
C:\penelope\charis-penelope\pendbase>g77 -O material.f -o material.exe
```

Το πρόγραμμα material.exe δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας αρχείου υλικών (*.mat). Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Αν το υλικό που χρησιμοποιείται περιλαμβάνεται στον κατάλογο με τα γνωστά υλικά που περιέχει ο κώδικας PENELOPE στη βάση δεδομένων της (pdcompos.p05) το υλικό επιλέγεται με βάση τον αριθμό που αντιστοιχεί στη λίστα υλικών που δίνεται στα συνοδευτικά κείμενα του κώδικα (manual.txt). Αν δεν υπάρχει, μπορεί να δημιουργηθεί δίνοντας στοιχεία για την χημική σύσταση κτλ. Εκτελώντας το material.exe εμφανίζεται η παρακάτω επιλογή:

```
C:\penelope\charis-penelope\pendbase>material.exe
Select one option (1 or 2):
1: Enter composition data from the keyboard
2: Read them from the file pdcompos.p05
```

Στη συνέχεια αφού έχει δημιουργηθεί από ένα αρχείο υλικού (*.mat) για κάθε υλικό που περιλαμβάνεται στην κατασκευή, ενοποιούνται όλα τα αρχεία σε ένα συγκεντρωτικό αρχείο υλικών που περιέχει στοιχεία για όλα τα υλικά. Αν π.χ. η κατασκευή περιέχει δύο υλικά, τα υλικά yliko_1.mat και yliko_2.mat, το τελικό αρχείο υλικών μπορεί π.χ. να ονομασθεί teliko.mat. Η ένωση αυτή γίνεται με την εντολή:

```
C:\penelope\charis-penelope\pendbase>copy yliko_1.mat+yliko_2.mat teliko.mat_
```

3.2.5 Αρχεία εξόδου

Με την ολοκλήρωση μιας προσομοίωσης δημιουργούνται τα αρχεία εξόδου (της μορφής *.dat και *.rep) τα οποία δίνουν πληροφορίες σχετικά με διάφορα μεγέθη της προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά καθορίζονται από το κυρίως πρόγραμμα της προσομοίωσης και ο κάθε χρήστης μπορεί

να τα τροποποιήσει για να καλύψει τις ανάγκες που παρουσιάζονται. Τα αρχεία διαβάζονται με οποιοδήποτε πρόγραμμα κειμενογράφου. Για την παρούσα ΜΕ δεν χρειάστηκε να γίνει επέμβαση στα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN. Έμφαση θα δοθεί στα δύο βασικότερα αρχεία εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια θα γίνει σύντομη αναφορά και στα υπόλοιπα. Αναλυτικότερη περιγραφή των αρχείων εξόδου και για άλλα κυρίως προγράμματα μπορεί να βρεθεί στην ΔΕ Ν. Αθανασίου (2006).

Το αρχείο αποτελεσμάτων pm_spc_enddet_nn.dat

Το αρχείο αυτό είναι εκείνο που καταγράφει τις πληροφορίες σχετικά με τον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που έχει χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση. Αν έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότεροι ανιχνευτές, οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε διαφορετικά αρχεία. Μπορεί να υπάρχουν μέχρι 5 διαφορετικά αρχεία, όσοι και οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (για nn από 1 έως 5). Ένα τμήμα ενός τέτοιου αρχείου φαίνεται στο σχήμα 3.7

```
# 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).

2.441406E+02  7.095324E-10  5.321492E-10
7.324219E+02  7.982240E-10  5.644295E-10
1.220703E+03  1.596448E-09  7.982236E-10
1.708985E+03  1.374719E-09  7.407202E-10
2.197266E+03  1.552102E-09  7.870591E-10
```

Σχήμα 3.7: Τμήμα αρχείου pm_spc_enddet_1.dat

Όπως φαίνεται το αρχείο περιλαμβάνει τρεις στήλες. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται το ενεργειακό κανάλι (bin) σε eV. Στη δεύτερη καταγράφεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (η πιθανότητα ένα αρχικό σωματίδιο να εναποθέσει την αντίστοιχη ενέργεια στον ανιχνευτή) σε μονάδες $1/(eV \cdot particle)$. Στην τρίτη στήλη καταγράφεται η αβεβαιότητα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (3σ). Επισημαίνεται ότι τόσο το εύρος όσο και ο καταμερισμός των ενεργειακών επιπέδων καθορίζονται από το χρήστη στο αρχείο δεδομένων τύπου .in.

Το αρχείο αποτελεσμάτων penmain.dat

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

αρχείο εισόδου τύπου *.in. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος αναφέρονται: η ημερομηνία και η ώρα της προσομοίωσης, ο τίτλος της διαδικασίας, η περιγραφή της πηγής, οι παράμετροι των υλικών της κατασκευής και η ονομασία του αρχείου που περιέχει τα χαρακτηριστικά των υλικών (τύπου **.mat). Ακόμα αναφέρονται η ονομασία του αρχείου που περιγράφει τη γεωμετρία της κατασκευής (τύπου *.geo), το μέγιστο μήκος του βήματος ενός σωματιδίου σε κάθε σώμα που περιγράφεται στη γεωμετρία, οι παράμετροι της εξαναγκασμένης αλληλεπίδρασης, οι διαστάσεις των ενεργειακών καναλιών (bins) που έχουν επιλεγεί από το χρήστη, τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης, τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας, τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών δόσης, οι ονομασίες των αρχείων dump στα οποία ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποτίθενται οι τρέχουσες αριθμητικές τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης, και η χρονική περίοδος της διαδικασίας dump, ο αριθμός των ιστοριών και η διάρκεια της προσομοίωσης.

Το δεύτερο τμήμα του αρχείου penmain.dat με τίτλο “PROGRAM- PENMAIN. Results” είναι εκείνο που επαναλαμβάνεται μέσα στο αρχείο penmain.dat και περιλαμβάνει τις τρέχουσες τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπως αυτές καταχωρούνται στο αρχείο dump. Με τη συμπλήρωση καθορισμένης από το χρήστη χρονικής περιόδου, τα αποτελέσματα καταγράφονται στο αρχείο dump και στο δεύτερο τμήμα του αρχείου penmain.dat. Όσο πιο συχνά επαναλαμβάνεται η διαδικασία dump, κάτι που – όπως αναφέρθηκε – επιλέγει ο χρήστης, τόσο περισσότερες είναι οι καταχωρήσεις τιμών στο αρχείο penmain.dat και συνεπώς τόσο μεγαλύτερο γίνεται το αρχείο αυτό. Στο δεύτερο μέρος του αρχείου περιέχονται: η διάρκεια και η ταχύτητα της προσομοίωσης, ο συνολικός αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που προσομοιώθηκαν, ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που εξήλθαν της κατασκευής, που οπισθοσκεδάστηκαν, που απορροφήθηκαν, οι ποσότητες fractional transmission, fractional backscattering και fractional absorption που εκφράζουν αντίστοιχα το κλάσμα των - πρωτογενών και δευτερογενών - σωματιδίων που εκπέμφθηκαν (transmission), οπισθοσκεδάστηκαν (backscattering) ή απορροφήθηκαν (absorption) δια του συνολικού αριθμού ιστοριών της προσομοίωσης, οι πιθανότητες εκπομπής, οπισθοσκέδασης και απορρόφησης των δευτερογενών σωματιδίων που προέκυψαν στη διαδικασία της προσομοίωσης, η μέση τιμή της εναποτιθέμενης ενέργειας (σε eV) στο κάθε σώμα (body) της κατασκευής, η μέση τιμή της ενέργειας (σε eV) που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, η μέση τιμή της αποτιθέμενης ενέργειας (σε eV) που καταγράφηκε από τον κάθε ανιχνευτή εναποτιθέμενης ενέργειας και οι τιμές των τυχαίων αριθμών όπως προέκυψαν από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Τμήμα του αρχείου penmain.dat φαίνεται στο σχήμα 3.8

```

*****
** Program PENMAIN. Results. **
*****

Simulation time ..... 2.502280E+05 sec
Simulation speed ..... 1.845618E+02 showers/sec

Simulated primary showers ..... 4.618252E+07

Transmitted primary particles ..... 0.000000E+00
Backscattered primary particles ..... 0.000000E+00
Absorbed primary particles ..... 4.618252E+07

Fractional transmission ..... 0.000000E+00 +- 0.0E+00
Fractional backscattering ..... 0.000000E+00 +- 0.0E+00
Fractional absorption ..... 1.000000E+00 +- 2.0E-12

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 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| | +- 0.0E+00 | +- 0.0E+00 | +- 0.0E+00 |
-----
| absorbed | 7.165811E+00 | 6.257832E-01 | 0.000000E+00 |
| | +- 2.1E-03 | +- 4.0E-04 | +- 0.0E+00 |
-----

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 1.989551E+00 +- 2.2E-01 eV (effic. = 2.91E-03)
Body 2 ..... 2.971175E+00 +- 2.4E-01 eV (effic. = 5.51E-03)
Body 3 ..... 1.329659E+02 +- 3.0E+00 eV (effic. = 7.13E-02)
Body 4 ..... 4.004269E+00 +- 3.0E-01 eV (effic. = 6.57E-03)
Body 5 ..... 4.734423E+00 +- 3.7E-01 eV (effic. = 5.96E-03)
Body 6 ..... 1.277497E+00 +- 1.9E-01 eV (effic. = 1.56E-03)

```

Σχήμα 3.8: Τμήμα αρχείου penmain.dat

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_material.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_geometry.rep:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pengeom_tree.rep:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων psource.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm energy el trans.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm energy el back.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm energy ph trans.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm energy ph back.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm energy po trans.dat:

Στο αρχείο αυτό καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων από την κατασκευή ποζιτρονίων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια (σε eV), η δεύτερη στην πιθανότητα

ύπαρξης εκπεμπόμενου ποζιτρονίου με αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας.

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_energy_po_back.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_angle_el.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_angle_ph.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_angle_po.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_spc_impdet_nn.dat:

Στο αρχείο αυτό καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των σωματιδίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης στον οποίο αναφέρεται το αρχείο. Μπορούν να υπάρχουν έως 5 τέτοια αρχεία που αντιστοιχούν σε 5 διαφορετικούς ανιχνευτές αλληλεπίδρασης. Ο αύξων αριθμός του

αντίστοιχου ανιχνευτή υποδεικνύεται μέσα σε αγκύλες στον τίτλο του κάθε αρχείου. Στο αρχείο αυτό περιγράφεται η κατανομή της ενέργειας (σε eV). Η πρώτη στήλη αναφέρεται στην ενέργεια, η δεύτερη στην πιθανότητα ύπαρξης σωματιδίου με την αντίστοιχη ενέργεια εξόδου (σε $1/(eV \cdot particle)$) ενώ στην τρίτη στήλη καταγράφεται το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας (σε 3σ).

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_depth_dose.dat:

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

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_psf_impdet_nn.dat:

Το αρχείο αυτό περιέχει τις τιμές των διαφόρων μεταβλητών των σωματιδίων όπως αυτές καταγράφηκαν τη στιγμή που τα σωματίδια εισέρχονταν στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης στον οποίο αναφέρεται το αρχείο. Το συγκεκριμένο αρχείο δημιουργείται μόνο όταν η μεταβλητή IPSF (στο αρχείο εισόδου) πάρει/έχει τις τιμές 1 ή -1. Μπορούν να υπάρχουν έως 5 τέτοια αρχεία που αντιστοιχούν σε 5 διαφορετικούς ανιχνευτές αλληλεπίδρασης. Ο αύξων αριθμός του αντίστοιχου ανιχνευτή υποδεικνύεται μέσα σε αγκύλες στον τίτλο του κάθε αρχείου. Οι μεταβλητές που περιέχονται είναι: Το είδος των σωματιδίων (KPAR), η ενέργεια (E), οι συντεταγμένες της θέσης (X, Y, Z), τα συνημίτονα κατεύθυνσης (U, V, W), ο παράγοντας βαρύτητας (WGHT), το διάλυσμα ILB και ο αριθμός προσαύξησης της ιστορίας (NSHI).

To αρχείο αποτελεσμάτων pm_3d_dose.dat:

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

Το αρχείο αποτελεσμάτων pm 2d dose [αριθμός καναλιού].dat:

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

Το αρχείο αποτελεσμάτων dump1.dat:

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

3.3 Τα βοηθητικά προγράμματα gview και wgnuplot

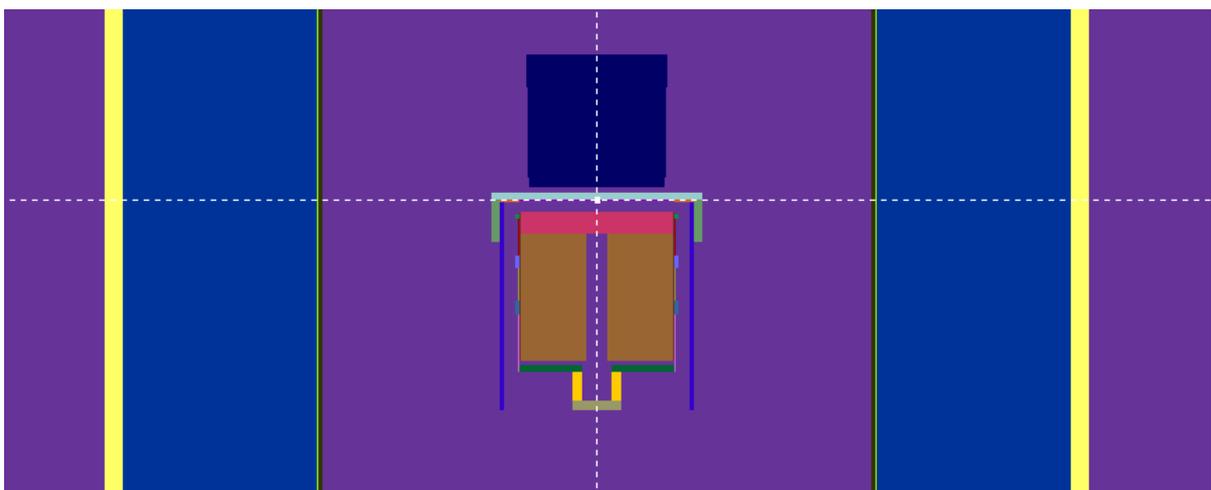
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθούν δύο προγράμματα τα οποία είναι εξαιρετικά χρήσιμα, καθώς επιτρέπουν τη γραφική παρουσίαση της γεωμετρίας η οποία ορίζεται μέσω του αρχείου .geo καθώς και τη χάραξη γραφημάτων των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Πρόκειται για τα προγράμματα gview και wgnuplot. Η συνοπτική παρουσίασή τους κρίθηκε σκόπιμη, καθώς τα προγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν συχνά στα πλαίσια της ΜΕ για τον έλεγχο της γεωμετρίας της προσομοίωσης και την κατασκευή γραφημάτων αποτελεσμάτων.

3.3.1 Το πρόγραμμα gview

Το λογισμικό gview χρησιμεύει για την απεικόνιση της γεωμετρίας που κατασκευάζεται στο αρχείο γεωμετρίας τύπου *.geo. Αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο καθώς όπως έχει προαναφερθεί, η κατασκευή σωστής γεωμετρίας είναι υψίστης σημασίας για την επιτυχία της προσομοίωσης. Το λογισμικό gview παρέχεται σε δύο εκδόσεις, το gview2d και το gview3d για τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση αντίστοιχα. και οι δύο εκδόσεις είναι εξίσου χρήσιμες για την σωστή απεικόνιση της γεωμετρίας και αλληλοσυμπληρώνονται καθώς η έκδοση 2D είναι πιο γρήγορη και προσφέρει άμεση εποπτεία της γεωμετρίας ενώ η 3D είναι πιο αργή, και προφανώς πιο αναλυτική. Με το πακέτο διανομής του κώδικα PENELOPE διατίθενται και εκτελέσιμα αρχεία των παραπάνω προγραμμάτων για περιβάλλον Windows.

3.3.1.1 Το πρόγραμμα gview2d

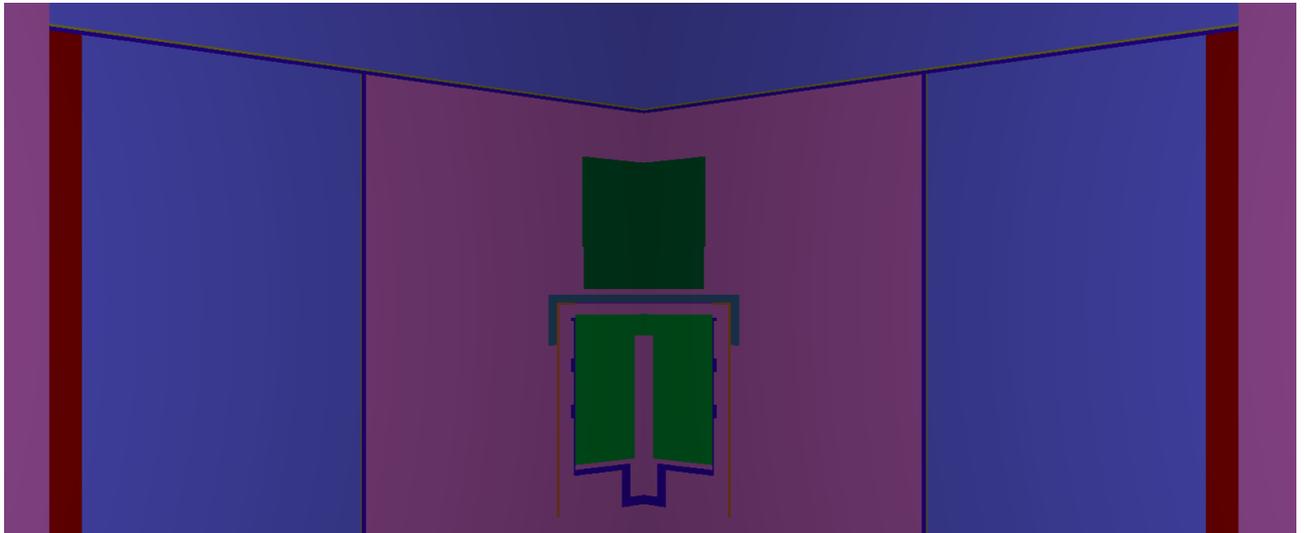
Το πρόγραμμα gview2d χρησιμοποιείται για δισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας που έχει κατασκευασθεί. Το πρόγραμμα καταρχήν ζητάει το όνομα του αρχείου γεωμετρίας και τον κατάλογο στο οποίο βρίσκεται. Στη συνέχεια ζητείται ο καθορισμός του κέντρου των αξόνων στην εικόνα. Ο χρήστης πληκτρολογεί 3 ψηφία χωρισμένα μεταξύ τους με κόμμα (συντεταγμένες του κέντρου των αξόνων). Στη συνέχεια δίδεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει την προβολή της επιλεγμένης γεωμετρίας είτε κατά υλικό (επιλογή 1) είτε κατά σώμα (επιλογή 2). Τέλος, παρουσιάζεται η γεωμετρία στην οθόνη. Με τα πλήκτρα +,- μπορεί ο χρήστης να εστιάσει ή να απομακρυνθεί από την εικόνα αντίστοιχα (zoom-in, zoom-out) ενώ με τα πλήκτρα της κατεύθυνσης μπορεί να μετακινεί την εικόνα.



Σχήμα 3.9: Δείγμα απεικόνισης gview2d

3.3.1.2 Το πρόγραμμα gview3d

Το πρόγραμμα gview3d χρησιμοποιείται για τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας. Το πρόγραμμα καταρχήν ζητάει το όνομα του αρχείου γεωμετρίας και το directory στο οποίο βρίσκεται. Στη συνέχεια υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της απόστασης από την οποία θα γίνει η αρχική απεικόνιση, η οποία όμως στη συνέχεια μπορεί να αλλάξει. Η σημαντική διαφορά του gview3d από το gview2d είναι η δυνατότητα να εμφανισθεί η γεωμετρία σε τομή. Για το λόγο αυτό ζητείται από το χρήστη να επιλέξει τη γωνία τομής (πχ 90°). Αφού γίνουν οι παραπάνω επιλογές εμφανίζεται μία εικόνα σχετικά χαμηλής ευκρίνειας, όπου ο χρήστης μπορεί να εστιάσει ή να απομακρυνθεί με τα πλήκτρα +,- αντίστοιχα, ή να μετακινηθεί με τα πλήκτρα κατευθύνσεως. Στη συνέχεια ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, να αλλάξει την ευκρίνεια της εικόνας που παρουσιάζεται εκείνη τη στιγμή στην οθόνη από το αριθμητικό πληκτρολόγιο (η τιμή 1 αντιστοιχεί στη μέγιστη ευκρίνεια).

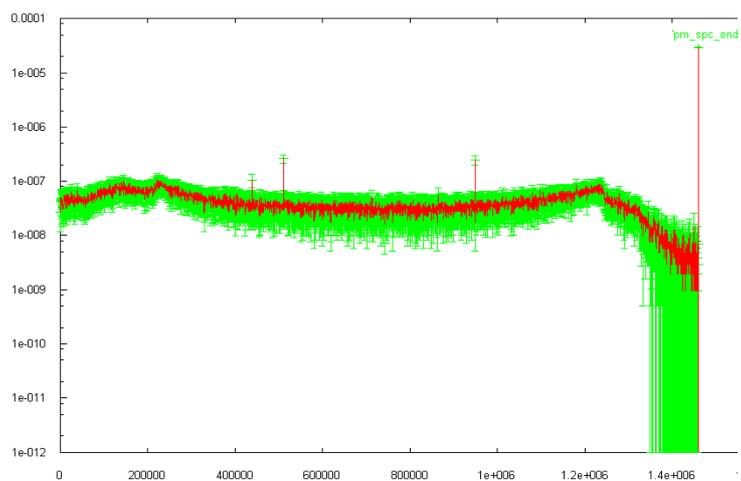


Σχήμα 3.10: Δείγμα απεικόνισης gview3d

3.3.2 Το πρόγραμμα wgnuplot

Το πρόγραμμα wgnuplot είναι ένα πρόγραμμα το οποίο μπορεί να χαράξει με μεγάλη ευκολία πλήθος απεικονίσεων, διαβάζοντας τα σχετικά δεδομένα από αντίστοιχα αρχεία σε ASCII μορφή. Το πρόγραμμα τρέχει με την εντολή wgnuplot *.gnu και διαβάζει όλα τα απαραίτητα δεδομένα από αρχείο δεδομένων *.gnu το οποίο πρέπει να έχει προηγουμένως συντάξει ο χρήστης σε μορφή ASCII. Το αρχείο *.gnu, περιέχει τα ονόματα των αρχείων τα οποία περιέχουν τα δεδομένα που πρόκειται να απεικονισθούν και όλες τις πληροφορίες σχετικά με την απεικόνιση (τίτλους, υποδιαιρέσεις, κλίμακες, χρώματα κλπ). Το πακέτο που συνοδεύει τον κώδικα

PENELOPE περιέχει μια σειρά από αρχεία *.gnu για τη χάραξη όλων των αρχείων αποτελεσμάτων που δημιουργούνται κατά την εκτέλεση του προγράμματος PENMAIN.



Σχήμα 3.11: Παράδειγμα απεικόνισης με το πρόγραμμα wgnuplot

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί και εισαγωγικά, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιασθεί ο κύριος όγκος της παραμετρικής μελέτης μίας γ-φασματοσκοπικής διάταξης που έγινε στα πλαίσια της ΜΕ, με χρήση τεχνικών Monte Carlo. Η μελέτη εστιάζεται στην ποιοτική καταγραφή του τρόπου με τον οποίο παράμετροι όπως: τα χαρακτηριστικά της πηγής (π.χ. γεωμετρία, σύσταση), η απόσταση πηγής-ανιχνευτή, τα χαρακτηριστικά της θωράκισης, τα υλικά που παρεμβάλλονται μεταξύ πηγής και ανιχνευτή επιδρούν στο συλλεγόμενο γ-φάσμα. Για την πραγματοποίηση της μελέτης, προσομοιώνονται και συγκρίνονται φάσματα σημειακών πηγών και πηγών όγκου, με χρήση του κώδικα PENELOPE. Σε κάθε περίπτωση εξετάζεται πηγή ^{40}K . Σε ό,τι αφορά στον ανιχνευτή, προσομοιώνεται το ανιχνευτικό σύστημα του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή XtRa (eXtended Range Germanium detector).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, αρχικά περιγράφονται οι κύριες συνιστώσες της μελέτης που πραγματοποιήθηκε (ανιχνευτής, θωράκιση, πηγή) και ο τρόπος διαμόρφωσης των αρχείων εισόδου της προσομοίωσης που αφορά σε αυτά και δίνονται στοιχεία για τη διαμόρφωση όλων των αρχείων εισόδου. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και την καταγραφή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτές.

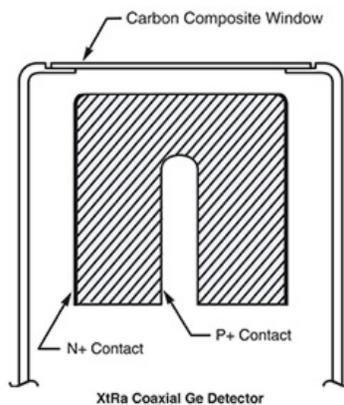
4.2 Περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών της μελέτης

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι κύριες συνιστώσες της μελέτης που πραγματοποιήθηκε. Αναφορά γίνεται (α) στον ανιχνευτή, (β) στη θωράκιση και (γ) στην πηγή ^{40}K η οποία προσομοιώθηκε. Εκτός από τα πραγματικά/φυσικά χαρακτηριστικά τους, περιγράφεται και ο τρόπος εισαγωγής τους στα αρχεία εισόδου των προσομοιώσεων.

4.2.1 Ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ και η ανάπτυξη του σχετικού μοντέλου

Ο ανιχνευτής XtRa Ge (eXtended Range germanium detector) του ΕΠΤ - ΕΜΠ ανήκει στην κατηγορία ανιχνευτών ημιαγωγών υλικών και πρόκειται για ομοαξονικό ανιχνευτή γερμανίου. Το

ακριβές μοντέλο που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι το GX10021 της εταιρίας Canberra Industries, Inc [Παράρτημα Α – σχήματα Α.1 & Α.2]. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει σχετική απόδοση 104.5%. Οι διαστάσεις του κρυστάλλου του ανιχνευτή είναι: διάμετρος 80mm, ύψος 78mm. Παρουσιάζει πολύ υψηλή διακριτική ικανότητα, της τάξεως του 1.03 keV για φωτόνια ενέργειας 122.06 keV και 2.04 keV για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV, ενώ ο λόγος peak-to-Compton για φωτόνια ενέργειας 1332.50 keV είναι 82.2 προς 1. Ο ανιχνευτής διαθέτει παράθυρο κρυστάτη από ανθρακονήματα (carbon fibers) πάχους 0.5 mm, γεγονός το οποίο τον καθιστά κατάλληλο για την ανίχνευση φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών ($E < 100$ keV). Στο σχήμα 4.1 φαίνεται απλοποιημένη η διάταξη του ανιχνευτή.

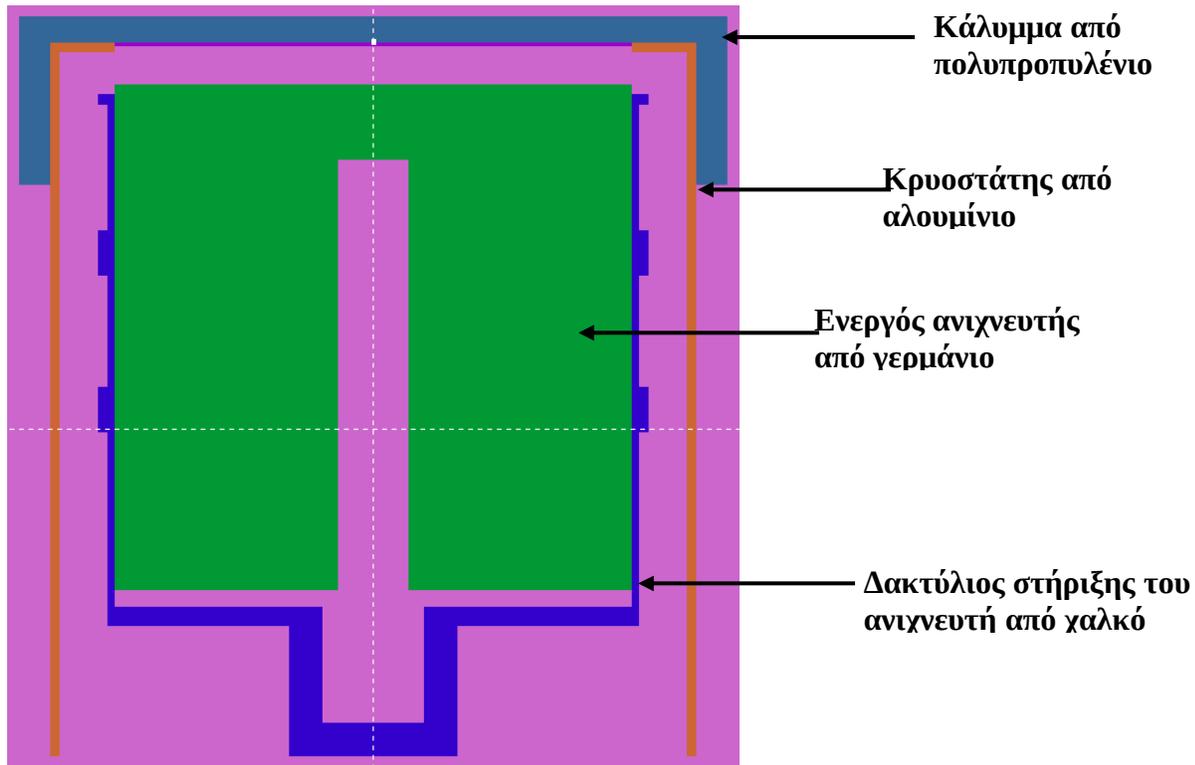


Σχήμα 4.1: Σχηματική διάταξη του ανιχνευτή XtRa

Προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση προσομοιώσεων για το συγκεκριμένο ανιχνευτή, θα πρέπει να εισαχθεί στον κώδικα PENELOPE η γεωμετρία του. Ο ανιχνευτής εισάγεται στην προσομοίωση ως τμήμα του συνολικού αρχείου γεωμετρίας, μαζί με την πηγή και τη θωράκιση. Η διακρίβωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενη ΜΕ [ΜΕ Θ. Βασιλοπούλου - 2008] τα στοιχεία της οποίας αξιοποιήθηκαν και στην παρούσα ΜΕ. Σημειώνεται ωστόσο ότι, καθώς τα αναμενόμενα συμπεράσματα της μελέτης είναι ποιοτικά, δεν ήταν αναγκαία η γνώση των ακριβών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή.

Το τμήμα του αρχείου γεωμετρίας που αναφέρεται στον ανιχνευτή θα μείνει σχεδόν αναλλοίωτο στις περισσότερες προσομοιώσεις. Το αναλυτικό αρχείο γεωμετρίας παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Στο σχήμα 4.2 που παρατίθεται στη συνέχεια, φαίνεται ο ανιχνευτής XtRa, όπως εμφανίζεται μέσω του προγράμματος «gview2d» σε μεγέθυνση. Στο σχήμα διακρίνεται το ενεργό

υλικό (Ge), ο κρυστάτης από Al, το παράθυρο από ανθρακονήματα, το κάλυμμα του ανιχνευτή από πολυπροπυλένιο καθώς και ο χάλκινος δακτύλιος στήριξης του ανιχνευτή μέσα στον κρυστάτη.



Σχήμα 4.2: Ο ανιχνευτής XtRa όπως απεικονίζεται από το πρόγραμμα “gview2d”

4.2.2 Η θωράκιση του ανιχνευτή XtRa και η ανάπτυξη του μοντέλου της

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικών μοντέλων των ανιχνευτών συμπεριλαμβάνει και μια διάταξη θωράκισης, έτσι ώστε να απομονώνει τον ανιχνευτή από την επίδραση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ θωρακίζεται από τη θωράκιση μοντέλο 767 της εταιρείας Canberra Industries, Inc. [Παράρτημα Α – σχήματα Α.3 & Α.4] η οποία παρουσιάζεται σε πλήρη ανάπτυξη στο σχήμα 4.3.α. Το συγκεκριμένο μοντέλο θωράκισης είναι κατακόρυφου προσανατολισμού, διαθέτει μια πληθώρα χαρακτηριστικών και είναι σχεδιασμένο για χρήση με ανιχνευτές γερμανίου. Το κύριο υλικό της θωράκισης είναι μόλυβδος, αλλά το μοντέλο αυτό υιοθετεί την τεχνοτροπία της σταδιακής θωράκισης με επάλληλα φύλλα από διαφορετικά υλικά.

Τα υλικά από το εξωτερικό προς το εσωτερικό είναι:

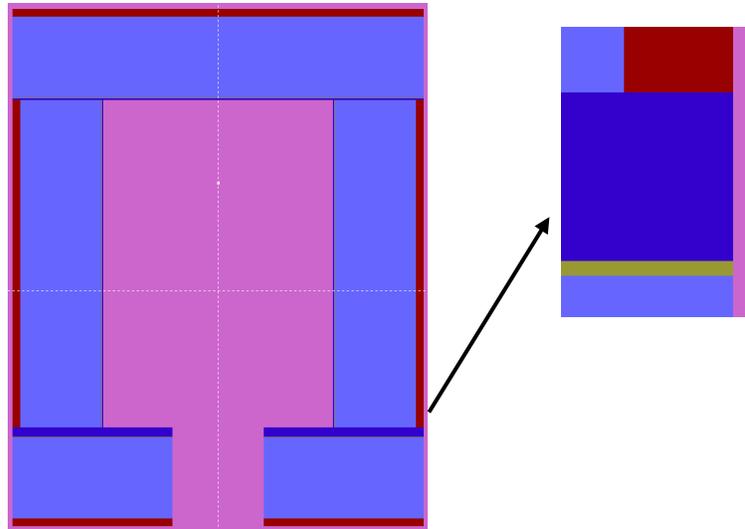
- 1 ατσάλι πάχους 9.5 mm
- 2 μόλυβδος πάχους 100 mm
- 3 κασσίτερος πάχους 1 mm
- 4 χαλκός πάχους 1.5 m

Η θωράκιση είναι προσεκτικά σχεδιασμένη έτσι ώστε να μην υπάρχει πουθενά εκτεθειμένος μόλυβδος. Οι δύο «πόρτες» που βρίσκονται στην πάνω πλευρά είναι συνδεδεμένες έτσι ώστε να ανοίγουν και οι δύο μαζί, ενώ η πόρτα στο πρόσθιο μέρος της θωράκισης, ανοίγοντας δίνει πλήρη πρόσβαση στο εσωτερικό της. Όλη η διάταξη της θωράκισης στηρίζεται πάνω σε τραπέζι που διαθέτει πόδια με ρύθμιση καθ' ύψος. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις ακριβείς διαστάσεις και το σχεδιασμό της θωράκισης μπορεί κανείς να ανατρέξει στο παράρτημα Α.



Σχήμα 4.3.α: Η θωράκιση του ανιχνευτή XtRa

Όπως και στην περίπτωση του ανιχνευτή, η θωράκιση εισάγεται στην προσομοίωση μέσω του αρχείου γεωμετρίας. Η προσομοίωση της θωράκισης έχει γίνει λεπτομερώς και στην εικόνα που παρουσιάζεται στη συνέχεια φαίνονται όλα τα επάλληλα στρώματα που καλύπτουν το εσωτερικό της θωράκισης [ΜΕ Θ. Βασιλοπούλου – 2008].



Σχήμα 4.3.β: Δισδιάστατη απεικόνιση της θωράκισης

4.2.3 Η χρησιμοποιούμενη πηγή ^{40}K και η ανάπτυξη του μοντέλου της

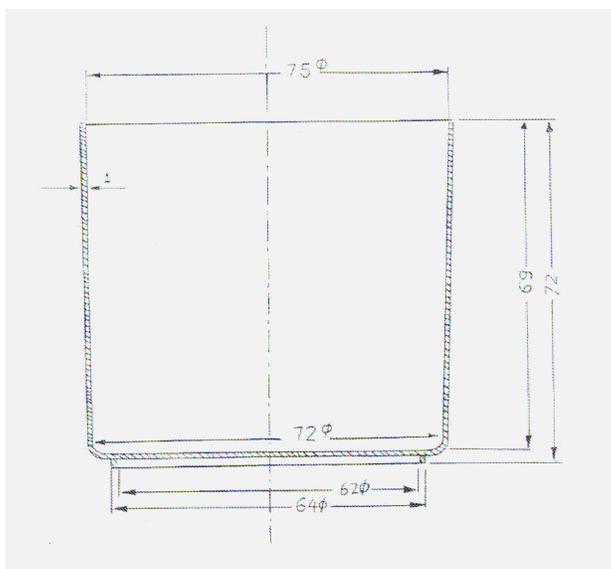
Για τις προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της ΜΕ χρησιμοποιήθηκε μονοενεργειακή πηγή ^{40}K .

Για την εισαγωγή της πηγής ^{40}K στις προσομοιώσεις απαιτείται:

- η εισαγωγή της γεωμετρίας στο αρχείο εισόδου γεωμετρίας (αρχείο τύπου .geo) και στο κυρίως πρόγραμμα, και
- η εισαγωγή του σχήματος διάσπασής της στο αρχείο εισόδου, αρχείο *.in.

4.2.3.1 Γεωμετρία της πηγής ^{40}K

Για τη πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν πηγές όγκου (κυλινδρικές και σφαιρικές) καθώς και σημειακές πηγές. Με την τελευταία κατηγορία πραγματοποιήθηκε η πλειοψηφία των προσομοιώσεων. Σε ό,τι αφορά στις πηγές όγκου, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες. Και οι δύο αφορούν στην τοποθέτηση του ραδιενεργού παρασκευάσματος (^{40}K) στο δοχείο του σχήματος 4.4. Πρόκειται για το τυποποιημένο δοχείο συσκευασίας πηγών όγκου που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Το δοχείο είναι ελαφρώς κωνικό και ο συνολικός του όγκος είναι 282cm^3 . Η κωνικότητα του δοχείου περιγράφεται από τη συνάρτηση $R(h) = 0.029h + 3.54$ όπου h : το ύψος του δοχείου και R : η ακτίνα του. [Αναγνωστάκης Μ. - 1998]. Το δοχείο είναι κατασκευασμένο από πλαστικό υλικό (PVC) πάχους $\sim 1\text{mm}$ που παρουσιάζει χαμηλή εξασθένιση για φωτόνια χαμηλών ενεργειών ($E < 100\text{ keV}$).



Σχήμα 4.4: Το κωνικό δοχείο που χρησιμοποιήθηκε για τις κυλινδρικές γεωμετρίες

Οι δύο γεωμετρίες που προηγούμενα αναφέρθηκαν αφορούν στη διαφορετική πλήρωση του δοχείου. Η πρώτη αφορά στην πλήρωση του δοχείου μέχρι ύψους 2.2 cm (όγκος 97.2 cm³) και στο εξής θα φέρει την ονομασία «γεωμετρία 5», ενώ η δεύτερη αφορά στην πλήρη πλήρωση του δοχείου (όγκος 282 cm³) και στο εξής θα αναφέρεται ως «γεωμετρία 2». Ως - εικονικά - υλικά πλήρωσης των δοχείων χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα: H₂O, SiO₂ και KCl με μοριακές πυκνότητες 3.34*10²², 2.32*10²² και 1.6*10²² (mole/cm³) αντίστοιχα. Για την πληρότητα της παραμετρικής μελέτης κατά τη διενέργεια των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές αποστάσεις πηγής ανιχνευτή: σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή, σε απόσταση από τον ανιχνευτή και κοντά στη θωράκιση του ανιχνευτή. Τα αρχεία εισόδου γεωμετρίας .geo, μέσω των οποίων εισάγονται οι διαφορετικές γεωμετρίες της πηγής στις προσομοιώσεις, μπορούν να αναζητηθούν στο Παράρτημα Β της ΜΕ.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης απαιτήθηκε τροποποίηση στο κυρίως πρόγραμμα, (user code) δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε το κυρίως πρόγραμμα renmain.f, το οποίο είναι κατασκευασμένο για την προσομοίωση σημειακών πηγών. Για τις δύο περιπτώσεις πηγών όγκου δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικές εκδοχές του κυρίως προγράμματος renmain. Οι σχετικές τροποποιήσεις προστέθηκαν στον κώδικα στη θέση ορισμού του σημείου έναρξης της ιστορίας ενός φωτονίου. Με βάση τις τροποποιήσεις το σημείο έναρξης δεν είναι πλέον σταθερό (περίπτωση σημειακής πηγής) αλλά κάθε φορά λαμβάνεται με τυχαίο τρόπο εντός των ορίων της πηγής. Στα σχήματα (4.5.α) και (4.5.β) παρατίθενται τα τμήματα του κώδικα που τροποποιήθηκαν για τη γεωμετρία «5» και «2», αντίστοιχα.

Αντίστοιχες τροποποιήσεις πραγματοποιήθηκαν και για την περίπτωση της σφαιρική πηγής. Σαν υλικό της πηγής επιλέχτηκε το KCl, ενώ θεωρήθηκε ότι η πηγή είναι πολύ μικρών διαστάσεων, ακτίνας 1 mm. Επιπλέον θεωρήθηκε ότι η πηγή βρίσκεται εντός θήκης από προπυλένιο. Στο σχήμα 4.6 απεικονίζεται η γεωμετρία σφαιρικής πηγής μικρών διαστάσεων [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.1] μέσω του προγράμματος gview2d. Η εισαγωγή της σφαιρικής πηγής απαιτεί επίσης και αλλαγή στο αρχείο renmain κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτό των πηγών όγκου. Το τμήμα του κυρίως προγράμματος renmain.f που τροποποιήθηκε φαίνεται στη συνέχεια στο σχήμα 4.7.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι σε ό,τι αφορά στις σημειακές πηγές δε χρειάστηκε η τροποποίηση του προγράμματος renmain.f και του αρχείου γεωμετρίας, δεδομένου ότι το πρόγραμμα είναι σχεδιασμένο για τη μελέτη σημειακών πηγών.

```

C ***** set the initial state
C of the primary particle.
C
C     IF(ISORP.EQ.0) THEN
C ***** Point source.
C         SHN=SHN+1.0D0
C         N=N+1
C         IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
C         KPAR=KPARP
C         WGHT=WGHT0
C ----- Initial position ...
C ***** Modification of random sampling
C in a geometry 2 volume source with
C ***** varying radius{3.54-3.74cm}
C 2.2cm height, positioned 0.3cm over the
C ***** detector window
4444 ZZ=Rand(1.0D0)
      ZH=ZZ*2.2D0
      Z=ZH+0.7D0
      R=ZH*0.029D0+3.54D0
      X=Rand(2.0D0)*R
      Y=Rand(3.0D0)*R
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RR2=R*R
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      BX=Rand(4.0D0)
      BY=Rand(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y

```

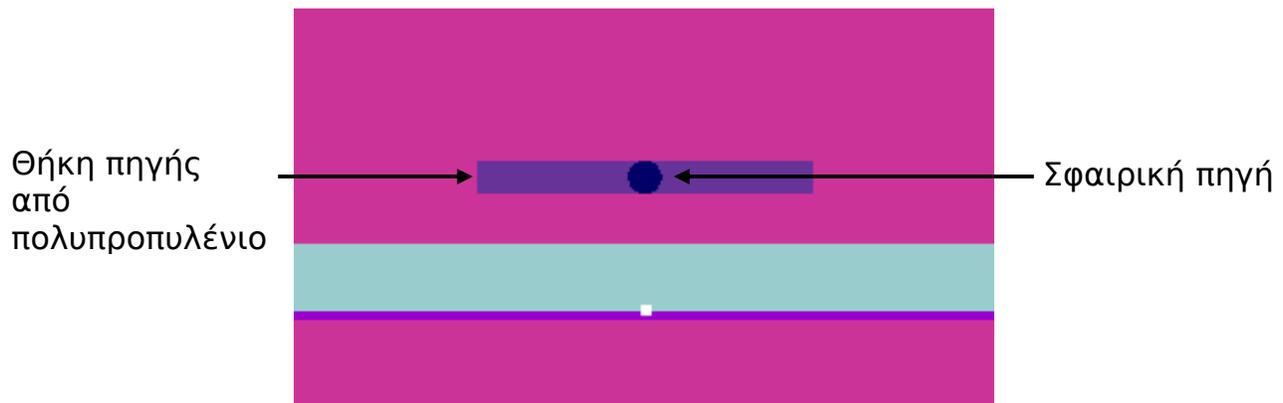
Σχήμα 4.5.α: Τροποποίηση του κυρίως προγράμματος renmain.f για την περίπτωση της πηγής «γεωμετρίας 5». Οι τονισμένες γραμμές, αφορούν στην προσθήκη που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα.

```

C ***** Set the initial state
C of the primary particle.
C
C   IF(ISORP.EQ.0) THEN
C ***** Point source.
C   SHN=SHN+1.0D0
C   N=N+1
C   IF(N.GT.2000000000) N=N-2000000000
C   KPAR=KPARP
C   WGHT=WGHT0
C ---- Initial position ...
C ***** Modification of random sampling
C in a geometry 2 volume source with
C ***** varying radius{3.54-3.74cm}
C 6.9cm height,positioned 0.3cm over the
C ***** detector window
4444 ZZ=RAND(1.0D0)
      ZH=ZZ*6.9D0
      Z=ZH+0.7D0
      R=ZH*0.029D0+3.54D0
      X=RAND(2.0D0)*R
      Y=RAND(3.0D0)*R
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RR2=R*R
      IF(RRT.GT.RR2)GOTO 4444
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y

```

Σχήμα 4.5.β: Τροποποίηση του κυρίως προγράμματος *penmain.f* για την περίπτωση της πηγής «γεωμετρίας 2». Οι τονισμένες γραμμές, αφορούν στην προσθήκη που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα.



Σχήμα 4.6: Η γεωμετρία της σφαιρικής πηγής

```

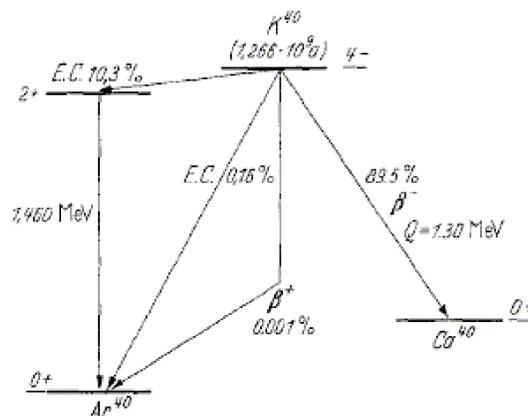
C ---- Initial position ...
C **** Modification of random sampling in a geometry 2 spherical source with
C **** radius{1mm}, positioned 0.3cm over the
C **** detector window
4444 ZZ=RAND(1.D0)
      ZH=ZZ*0.2D0
      Z=ZH+0.7D0
      KH=Z-0.8D0
      R=SQRT(1D0-KH*KH)
      X=RAND(2.0D0)*R
      Y=RAND(3.0D0)*R
      RRT=X**2.0D0+Y**2.0D0
      RRZ=R*R
      IF(RRT.GT.RRZ)GOTO 4444
      BX=RAND(4.0D0)
      BY=RAND(5.0D0)
      IF(BX.GT.0.5D0)X=-X
      IF(BY.GT.0.5D0)Y=-Y

```

Σχήμα 4.7: Τροποποίηση του προγράμματος *renmain.f* για την περίπτωση σφαιρικής πηγής.

4.2.3.2 Εισαγωγή της ραδιενεργού πηγής στον κώδικα προσομοίωσης

Για τις ανάγκες της Μ.Ε μελετήθηκε το ραδιενεργό κάλιο (^{40}K), που το απαντάται ευρέως σε μετρήσεις φυσικής ραδιενέργειας, με χρόνο ημιζωής 1.248×10^9 χρόνια. Η φυσική ισοτοπική του αναλογία είναι 0.0117%. Το διάγραμμα διάσπασης του ^{40}K φαίνεται στο σχήμα 4.8. Από το διάγραμμα διάσπασης προκύπτει ότι το ^{40}K διασπάται κυρίως σε ^{40}Ca με πιθανότητα 89.5% εκπέμποντας σωματίδια β^- και σε ^{40}Ar μέσω Electron Capture (EC) με την εκπομπή φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV. Η δεύτερη διαδικασία έχει πιθανότητα 10.46%. Το φάσμα εκπομπή σωματιδίων- β παρατίθεται στον πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα διάσπασης του ^{40}K [The Decay of Potassium-40 - Leutz, Schultz, Wenninger - 1965]

Energy (keV)	Final spectrum <i>N</i> (<i>W</i>)
100	635
150	704
200	771
250	836
300	888
350	932
400	962
450	984
500	995
550	1000
600	996
650	984
700	962
750	936
800	900
850	855
900	796
950	728
1000	642
1050	549
1100	449

Πίνακας 4.1: Ενεργειακό φάσμα σωματιδίων β^- του ^{40}K [Leutz et al, 1965]

Η χρήση του συγκεκριμένου ισότοπου επελέγη, δεδομένου ότι επιτρέπει την ταυτόχρονη μελέτη της επίδρασης δύο διαφορετικών τύπων ακτινοβολίας στη γ -φασματοσκοπική ανάλυσή του. Κατά την προσομοίωση, θα πρέπει επομένως να ληφθούν υπόψη, τόσο τα φωτόνια ενέργειας 1.46 MeV, όσο και το συνεχές ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων β^- που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση του ισότοπου.

Ο ορισμός της ακτινοβολίας που προσομοιώνεται γίνεται μέσω του αρχείου εισόδου, τύπου *.in. Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένο το κυρίως πρόγραμμα renmain.f επιτρέπει την προσομοίωση ενός είδους ακτινοβολίας κάθε φορά. Για την παράκαμψη του συγκεκριμένου προβλήματος κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα. Στο πρώτο προσομοιώθηκε η πρωτογενής φωτονιακή ακτινοβολία και λήφθηκε το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα στον ανιχνευτή. Στο δεύτερο βήμα, προσομοιώθηκε το συνεχές φάσμα ηλεκτρονίων και λήφθηκε το ενεργειακό φάσμα της δευτερογενούς φωτονιακής ακτινοβολίας που προέρχονται από την αλληλεπίδραση της σωματιδιακής ακτινοβολίας με τα υλικά του ανιχνευτή, της θωράκισης κλπ. Τα ληφθέντα φάσματα τελικά υπερτέθηκαν και με τον τρόπο αυτό λήφθηκε ένα συνολικό ενεργειακό φάσμα, το οποίο αντιπροσωπεύει τη συνολική απόκριση του ανιχνευτή στην παρουσία πηγής που περιέχει ^{40}K .

Η εισαγωγή των φωτονίων 1.46 MeV γίνεται με εισαγωγή της ενέργειάς τους στην αντίστοιχη θέση του αρχείου εισόδου .in, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9.

```

TITLE volume_water_1

>>>>>> source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.46e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

```

Σχήμα 4.9: Τμήμα του αρχείου εισόδου για την εκπομπή της ακτινοβολίας-γ

Αντίστοιχα, το αρχείο εισόδου για την περίπτωση της εκπομπής σωματιδίων β^- απεικονίζεται στο σχήμα 4.10.

```

TITLE water_volume_1

>>>>>> source definition.
SKPAR 1 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SPECTR 25e3 0.03153
SPECTR 50e3 0.03394
SPECTR 75e3 0.03628
SPECTR 100e3 0.03842
SPECTR 125e3 0.04022
SPECTR 150e3 0.04244
SPECTR 175e3 0.04405
SPECTR 200e3 0.04600
SPECTR 225e3 0.04776
SPECTR 250e3 0.04909
SPECTR 275e3 0.05073
SPECTR 300e3 0.05170
SPECTR 325e3 0.05324
SPECTR 350e3 0.05383
SPECTR 375e3 0.05496
SPECTR 400e3 0.05546
SPECTR 425e3 0.05622
SPECTR 450e3 0.05660
SPECTR 475e3 0.05684
SPECTR 500e3 0.05723
SPECTR 525e3 0.05713
SPECTR 550e3 0.05734
SPECTR 575e3 0.05690
SPECTR 600e3 0.05694
SPECTR 625e3 0.05622
SPECTR 650e3 0.05601
SPECTR 675e3 0.05496
SPECTR 700e3 0.05455
SPECTR 725e3 0.05347
SPECTR 750e3 0.05254
SPECTR 775e3 0.05142
SPECTR 800e3 0.04999
SPECTR 825e3 0.04885
SPECTR 850e3 0.04689
SPECTR 875e3 0.04548
SPECTR 900e3 0.04323
SPECTR 925e3 0.04159
SPECTR 950e3 0.03899
SPECTR 975e3 0.03668
SPECTR 1000e3 0.03419
SPECTR 1025e3 0.03136
SPECTR 1050e3 -0.0
SPOSIT 0 0 0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180 [Beam aperture, in deg]

```

Σχήμα 4.10: Τμήμα του αρχείου εισόδου για την εκπομπή της ακτινοβολίας β^- .

Στο αρχείο αυτό, η ενεργειακή περιοχή του β^- φάσματος έχει διαιρεθεί σε υποπεριοχές εύρους 25 keV, ενώ για κάθε περιοχή έχει οριστεί η πιθανότητα εκπομπής σωματιδίου εντός των ορίων της [ME Θ. Βασιλοπούλου - 2008]. Τα πρωταρχικά στοιχεία για το φάσμα προέκυψαν από τη δημοσίευση [Leutz et al, 1965].

4.3 Η μεθοδολογία της παραμετρικής μελέτης

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στις προσομοιώσεις που περιγράφονται στη συνέχεια, έχει ως σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης που έχουν διάφοροι παράμετροι, όπως τα υλικά της ανιχνευτικής διάταξης και της θωράκισης, η γεωμετρία της διάταξης κλπ, στη μορφή του γ-φάσματος που καταγράφει ο ανιχνευτής XtRa. Στη συνέχεια αναλύεται λίγο περισσότερο η πορεία σκέψης που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της ΜΕ.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, κατά τη διεξαγωγή ενός πειράματος όπου καταγράφεται το γ-φάσμα μίας πηγής, πέρα από την ακτινοβολία της πηγής, καταγράφεται και ακτινοβολία, που η προέλευσή της μπορεί να είναι η κοσμική ακτινοβολία, η ακτινοβολία του περιβάλλοντος χώρου κτλ. Στην συγκεκριμένη ΜΕ θεωρήθηκε ότι η ακτινοβολία που καταγράφεται προέρχεται μόνο από την πηγή ακτινοβολίας.

Ήδη στην παράγραφο 4.2.3.2 αναφέρθηκε ότι η πηγή αυτή (^{40}K) εκτός των φωτονίων εκπέμπει και σωματίδια β^- υπό τη μορφή συνεχούς φάσματος. Ένας ανιχνευτής γ-ακτινοβολίας ανιχνεύει φωτόνια που εισέρχονται στο εσωτερικό του (αλληλεπιδρούν με το ενεργό υλικό του) ανεξάρτητα από την προέλευσή τους. Όμως τα σωματίδια β^- που εκπέμπει μία πηγή (όπως το ^{40}K) αλληλεπιδρώντας με τα υλικά της θωράκισης ή και του ίδιου του ανιχνευτή μπορούν για παράδειγμα να υποστούν πέδηση και να εκπέμψουν φωτόνια τα οποία ενδεχομένως καταγράφονται από τον ανιχνευτή. Όπως παρουσιάστηκε και εισαγωγικά, η συνιστώσα αυτή μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαίνεται ασήμαντη, στην πραγματικότητα όμως έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην διαμόρφωση του συνεχούς φάσματος και κατά συνέπεια στην ανίχνευση φωτονίων, ιδιαίτερα στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών. Μάλιστα, έχει ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση του ^{40}K , το οποίο εκπέμπει σωματίδια-β αρκετά υψηλής ενέργειας και επιπλέον η αναλογία εκπομπής φωτονίων προς σωματίδια-β $\sim 1:10$.

Για τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τα φάσματα του ανιχνευτή XtRa, αρχικά αποφασίζεται ποιο σενάριο θα προσομοιωθεί (πηγή, γεωμετρία κτλ). Στη συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα στον κώδικα μέσω των κατάλληλων αρχείων εισόδου. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 για τη διενέργεια της κάθε προσομοίωσης, προετοιμάζονται τα ακόλουθα αρχεία:

- Το κυρίως πρόγραμμα `renmain.f`, το οποίο τροποποιείται με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.1.4.1 ανάλογα με τη γεωμετρία της πηγής.
- Το αρχείο εισόδου τύπου `*.in`, το οποίο τροποποιείται ανάλογα με την προσομοίωση ως προς τις ακόλουθες παραμέτρους:
 - Το είδος της ακτινοβολίας (φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας, συνεχές φάσμα σωματιδίων β^-), με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.1.4.1.

- Το χρησιμοποιούμενο εικονικό ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής που αρχικά χρησιμοποιήθηκε ήταν ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, σταθερού ενεργειακού εύρους (2 MeV) και σταθερού πλήθους ενεργειακών διαμερίσεων / καναλιών - energy bins (4096). Οι επιλογές αυτές έγιναν, προκειμένου η προσομοίωση να πλησιάζει όσο γίνεται τις πραγματικές συνθήκες υπό τις οποίες γίνονται οι μετρήσεις στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ειδικά για τον ορισμό του πλήθους των διαμερίσεων (4096) πρέπει να αναφερθεί ότι χρειάστηκε τροποποιηθεί το αντίστοιχο τμήμα του κώδικα `renmain.f`, καθώς ο κώδικας `renmain.f` – εκ κατασκευής – δέχεται ανιχνευτές με μέγιστο πλήθος 1000 κανάλια. Συγκεκριμένα η μεταβλητή που τροποποιήθηκε ήταν η “NEDCM”, η νέα τιμή της οποίας ορίστηκε στα 10000 κανάλια, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.12.

```

----- Energy-deposition detectors (up to NEDM different detectors).
PARAMETER (NEDM=5, NEDCM=10000, NEDCMT=2*NEDM*NEDCM)
DIMENSION SPCDEO(NEDM)
DIMENSION DET(NEDM, NEDCM), DET2(NEDM, NEDCM), TDED(NEDM),
1 TDED2(NEDM), DEDE(NEDM)
DATA DET, DET2/NEDCMT*0.000/
DIMENSION EDEL(NEDM), EDEU(NEDM), BDEE(NEDM), NDECH(NEDM)
DIMENSION KBDE(NB)

```

Σχήμα 4.12: Η αλλαγή στην τιμή της μεταβλητής NEDCM

- Το αρχείο γεωμετρίας *.geo, το οποίο τροποποιείται σε περιπτώσεις αλλαγής της γεωμετρίας της πηγής (πλήρωση δοχείου όγκου, υλικό πλήρωσης) ή/και αλλαγών στη θωράκιση του ανιχνευτικού συστήματος που επιβάλλει η παραμετρική μελέτη.
- Το αρχείο υλικών *.mat, το οποίο τροποποιείται προκειμένου να καλύψει τις αλλαγές του αρχείου γεωμετρίας *.geo.

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, σε κάθε περίπτωση κατασκευάζεται το σχετικό γράφημα-φάσμα της αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιασθούν οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ομαδοποιημένες με βάση το είδος της πηγής. Αρχικά παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που έγιναν για τις πηγές όγκου και εν συνεχεία αυτές που έγιναν για σημειακές πηγές. Σε κάθε προσομοίωση παράγεται το «καθαρό» φάσμα γ-ακτινοβολίας, το φάσμα πέδησης λόγω της ακτινοβολίας-β και η σύνθεσή τους, δηλαδή το «πραγματικό» φάσμα που ανιχνεύεται. Επισημαίνεται ότι τα αναλυτικά αρχεία όλων των αποτελεσμάτων κάθε προσομοίωσης θα παρουσιαστούν μόνο για τις εισαγωγικές περιπτώσεις για την κατανόηση της διαδικασίας παραγωγής τους, ενώ το σύνολο των αρχείων αποτελεσμάτων βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα Γ. Στη

συνέχεια θα παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, με βάση το κριτήριο σύγκρισης που έχει κάθε φορά τεθεί.

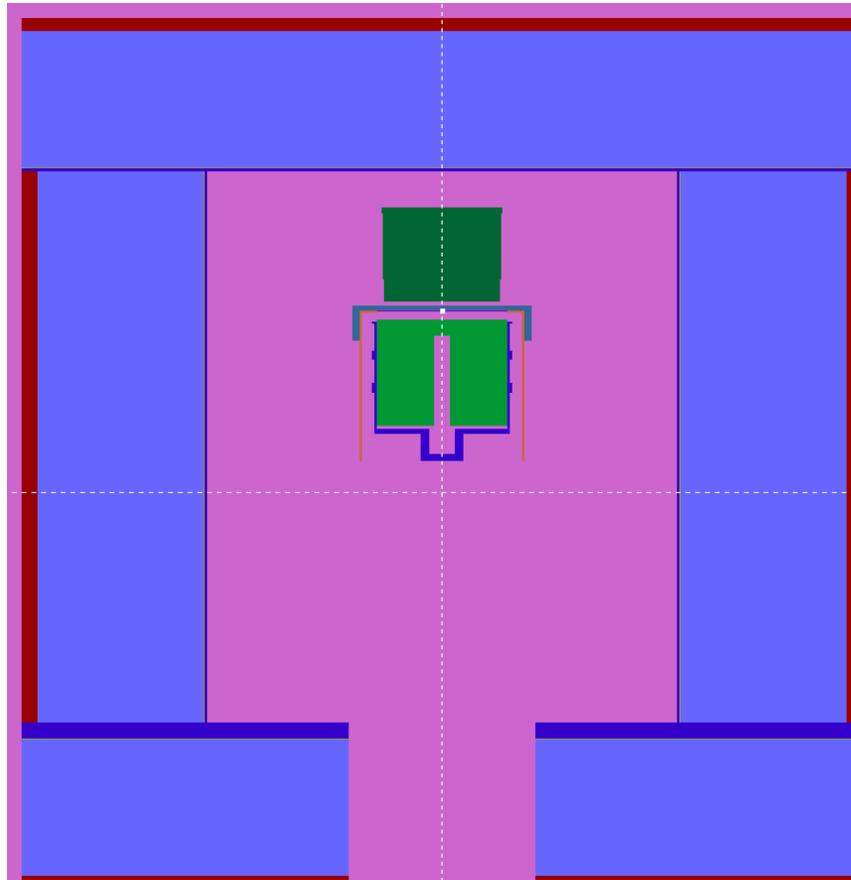
4.4 Προσομοίωση γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης κυλινδρικών πηγών όγκου

Στα πρώτα σενάρια που προσομοιώθηκαν επιλέχθηκε η χρήση πηγών όγκου. Σε αυτή την περίπτωση ενδιέφερε η **μελέτη της επίδρασης του μεγέθους και του υλικού της πηγής στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φάσματος του ανιχνευτή**. Στις προσομοιώσεις με πηγές όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι 2 γεωμετρίες που βασίζονται στο δοχείο που περιγράφονται στην παράγραφο 4.2.3.1. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την πλήρωση των πηγών ήταν H_2O , KCl και SiO_2 (παράγραφος 4.2.3.1). Σε κάθε περίπτωση η απόσταση του δοχείου από το κάλυμμα του ανιχνευτή ήταν 0.3 cm, όπως θα αναφέρεται και στη συνέχεια. Η επιλογή αυτή έγινε, προκειμένου να είναι δυνατή η μελλοντική προσθήκη υλικού μεταξύ του ανιχνευτή και της πηγής (π.χ. φίλτρο).

4.4.1 Υλικό πηγής H_2O - γεωμετρία 2

Αρχικά και με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προετοιμάζονται τα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης. Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η συνολική γεωμετρία (ανιχνευτής, πηγή, θωράκιση) για την εξεταζόμενη περίπτωση, όπως προκύπτει από τη χρήση του προγράμματος gview.

Τα αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια, προκύπτουν από το αρχείο «`rm_src_enddet_1.dat`», το οποίο παράγεται κάθε φορά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και το οποίο περιέχει τα αποτελέσματα που κατέγραψε ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.5. Στο σχήμα 4.14α απεικονίζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν κατά την προσομοίωση, τόσο των φωτονίων, όσο και των σωματιδίων-β που εκπέμπονται από την πηγή ^{40}K (πρόκειται για δύο ενεργειακά φάσματα). Στον άξονα των τετμημένων (άξονας x) εμφανίζονται τα ενεργειακά κανάλια, που ουσιαστικά αντιστοιχούν στην ενέργεια των φωτονίων, ενώ στον άξονα των τεταγμένων (άξονας y) παρουσιάζεται η πιθανότητα καταγραφής φωτονίου σε συγκεκριμένο ενεργειακό κανάλι, δηλαδή η πιθανότητα απόθεσης συγκεκριμένου ποσού ενέργειας στον ανιχνευτή, ανηγμένη στο εύρος του καναλιού. Πρόκειται στην πραγματικότητα για ένα μέγεθος ανάλογο του πλήθους των φωτονίων που συγκεκριμένης ενέργειας που ανιχνεύονται. Αντίστοιχα, στο σχήμα 4.14.β γίνεται η υπέρθεση των δύο φασμάτων. Για την υπέρθεση των φασμάτων, εφαρμόζεται η διαδικασία που παρουσιάζεται ακολούθως.



Σχήμα 4.13: Αναπαράσταση της πλήρους γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης από το πρόγραμμα *gview2d*.

Όπως προαναφέρθηκε, η εκπομπή των σωματιδίων-β και των φωτονίων από την πηγή ^{40}K δεν γίνεται με αναλογία 1:1. Με βάση τη βιβλιογραφία, η ακριβής αναλογία είναι 0.1066:0.8933. Με βάση αυτή την αναλογία θα πρέπει να γίνει και η υπέρθεση των φασμάτων, προκειμένου το συνολικό φάσμα που θα προκύψει να αντιστοιχεί στο πραγματικό φάσμα που συλλέγεται από τον ανιχνευτή. Η μαθηματική σχέση που αποτυπώνει αυτή την αναλογία είναι η:

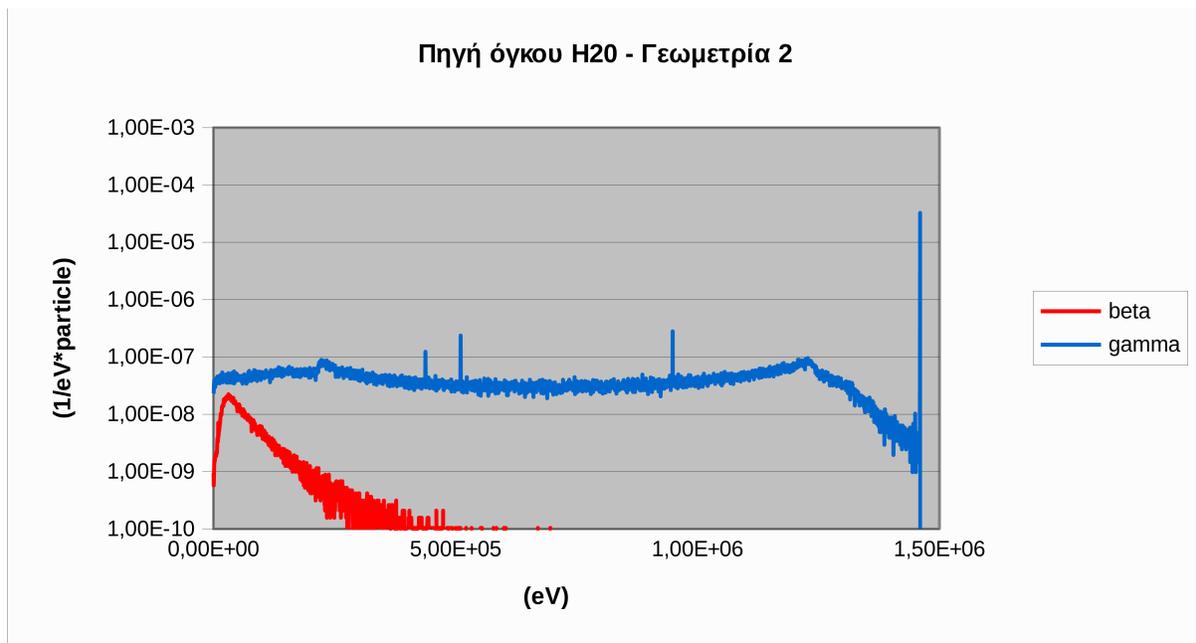
$$pdf = [(0.1066 * ph) + (0.8933 * el)] \quad (4.1)$$

όπου

ph: η πιθανότητα να αποθέσει συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή, φωτόνιο της πηγής

el: η πιθανότητα να αποθέσει συγκεκριμένη ενέργεια στον ανιχνευτή, φωτόνιο το οποίο παράγεται από την αλληλεπίδραση – πιθανότητα πέδηση – των σωματιδίων-β με την ανιχνευτική διάταξη

pdf: η συνολική πιθανότητα να αποτεθεί συγκεκριμένο ποσό ενέργειας στον ανιχνευτή ανά διάσπαση πυρήνα ^{40}K



Σχήμα 4.14.α: Φάσματα αποτιθέμενης ενέργειας φωτονίων και σωματιδίων β - για πηγή ^{40}K «γεωμετρίας 2» και για υλικό πηγής H_2O

Στο συνολικό φάσμα (σχήμα 4.14.β) το οποίο προκύπτει από την επαλληλία των δύο φασμάτων, αναγνωρίζονται όλα τα χαρακτηριστικά του φάσματος που αναλύθηκε στην παράγραφο 2.3.2.

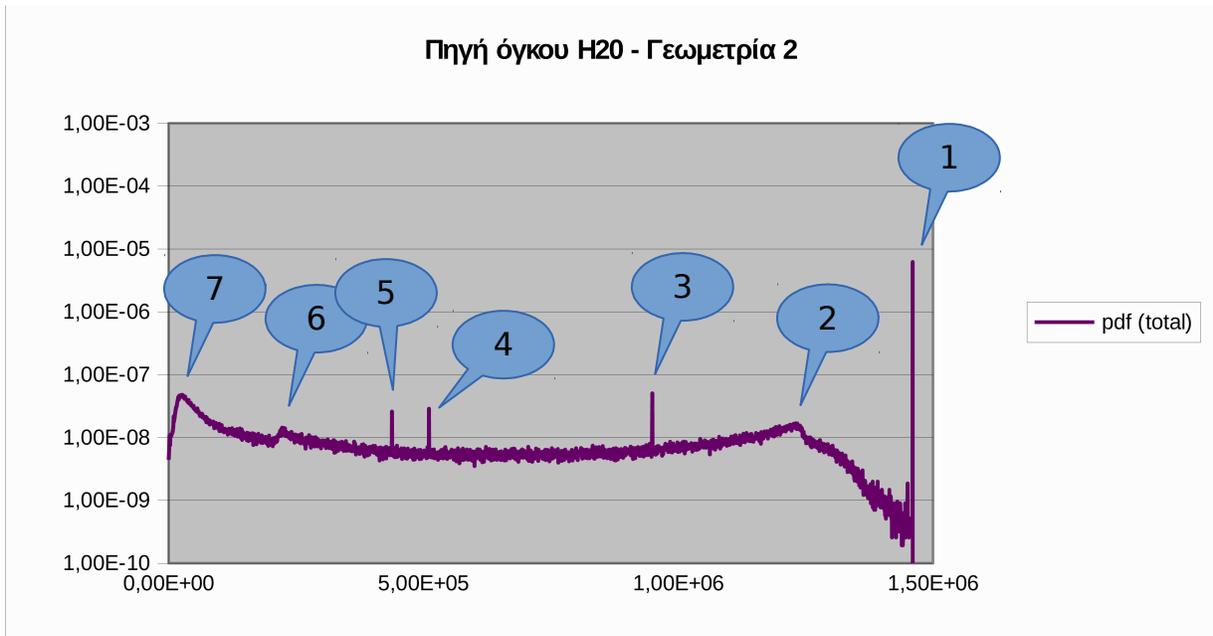
Πιο συγκεκριμένα αναγνωρίζονται:

1. Αιχμή πλήρους απόθεσης ενέργειας (φωτοκορυφή) στην ενέργεια 1460keV
2. Αιχμή Compton στην ενέργεια περί τα 1200keV
3. Αιχμή απλής διαφυγής στην ενέργεια $1460-511= 949\text{keV}$
4. Αιχμή διπλής διαφυγής στην ενέργεια $1460-2\times 511= 438\text{keV}$
5. Αιχμή δίδυμης γένεσης στην ενέργεια 511keV
6. Αιχμή απισθοσκέδασης στην ενέργεια $\sim 200\text{keV}$
7. Συνεχές φάσμα, λόγω σκεδάσεων και πέδησης

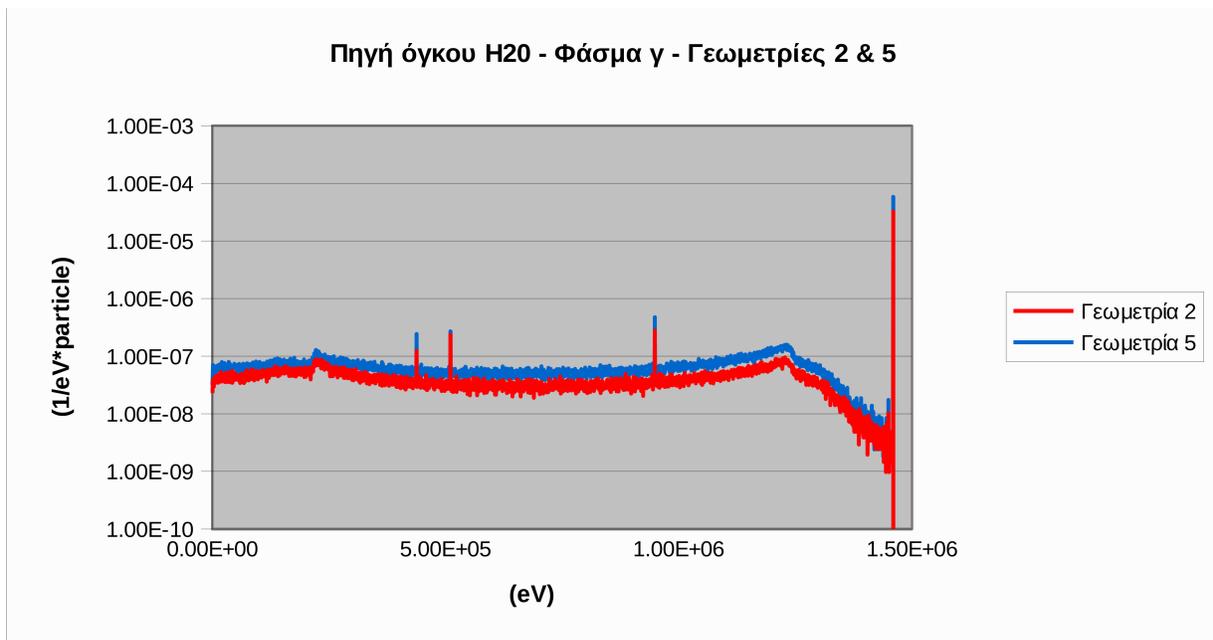
4.4.2 Υλικό πηγής H_2O - γεωμετρία 5

Ακολουθως, και προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση του όγκου της πηγής στο γ -φάσμα που προκύπτει από την προσομοίωση της πηγής ^{40}K , συγκριτικά με την πηγή H_2O «γεωμετρίας 2»

εξετάζεται η αντίστοιχη πηγή με υλικό H₂O «γεωμετρίας 5». Τα συγκριτικά φάσματα των δύο περιπτώσεων, τα οποία οφείλονται στην εκπομπή φωτονίων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.15α.



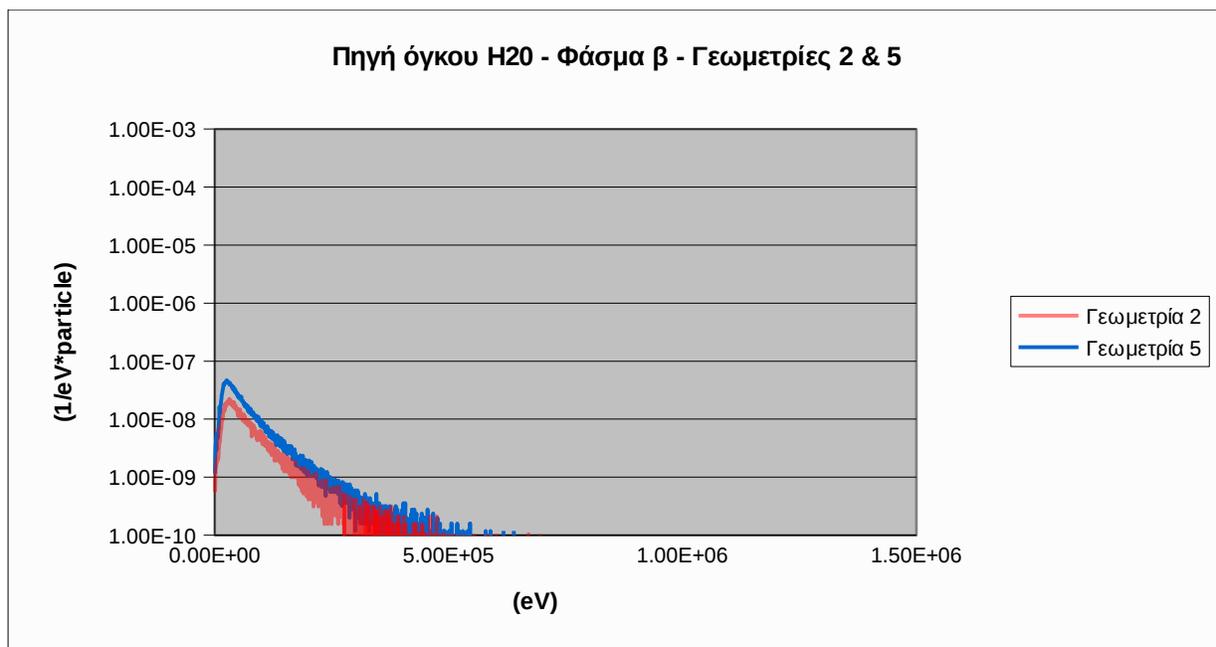
Σχήμα 4.14.β: Το συνολικό φάσμα για την περίπτωση της πηγής ⁴⁰K γεωμετρίας 2 σε H₂O.



Σχήμα 4.15.α: Συγκριτικά γ-φάσματα για την περίπτωση της πηγής ⁴⁰K γεωμετρίας «2» και «5» σε H₂O

Με βάση το συγκριτικό διάγραμμα παρατηρείται πως, ενώ ποιοτικά τα δύο φάσματα είναι ίδια (ίδιες κορυφές / ευρήματα – ίδιες περιοχές συνεχούς φάσματος), ποσοτικά παρατηρείται πως στην

«γεωμετρία» του πλήρους δοχείου, η πιθανότητα καταγραφής σωματιδίων είναι ελαφρώς χαμηλότερη για όλο το εύρος ενεργειών. Αυτό θα πρέπει να αποδίδεται στη μειωμένη απόδοση ανίχνευσης φωτονίων που παρουσιάζει η «γεωμετρία 2» καθώς ένα μεγάλο ποσοστό της πηγής βρίσκεται τοποθετημένο μακριά από την πηγή, λόγω του μεγαλύτερου ύψους της πηγής. Στο σχήμα 4.15β για τις δύο γεωμετρίες γίνεται σύγκριση των γ -φασμάτων αποτιθέμενης ενέργειας που οφείλονται στην εκπομπή σωματιδίων β^- από την πηγή. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η πιθανότητα να ανιχνευθεί ακτινοβολία πέδησης είναι μειωμένη για την περίπτωση που το δοχείο της πηγής είναι πλήρως γεμάτο (γεωμετρία 2) σε σχέση με την περίπτωση της «γεωμετρίας 5». Το αποτέλεσμα οφείλεται στους τους ίδιους λόγους που οφείλεται και το αντίστοιχο για τα φωτόνια της πηγής, αλλά επιπλέον και στο γεγονός ότι τα φωτόνια πέδησης τα οποία έχουν σχετικά χαμηλή ενέργεια εξασθενούν εντονότερα μέσα στην μεγάλη πηγή.



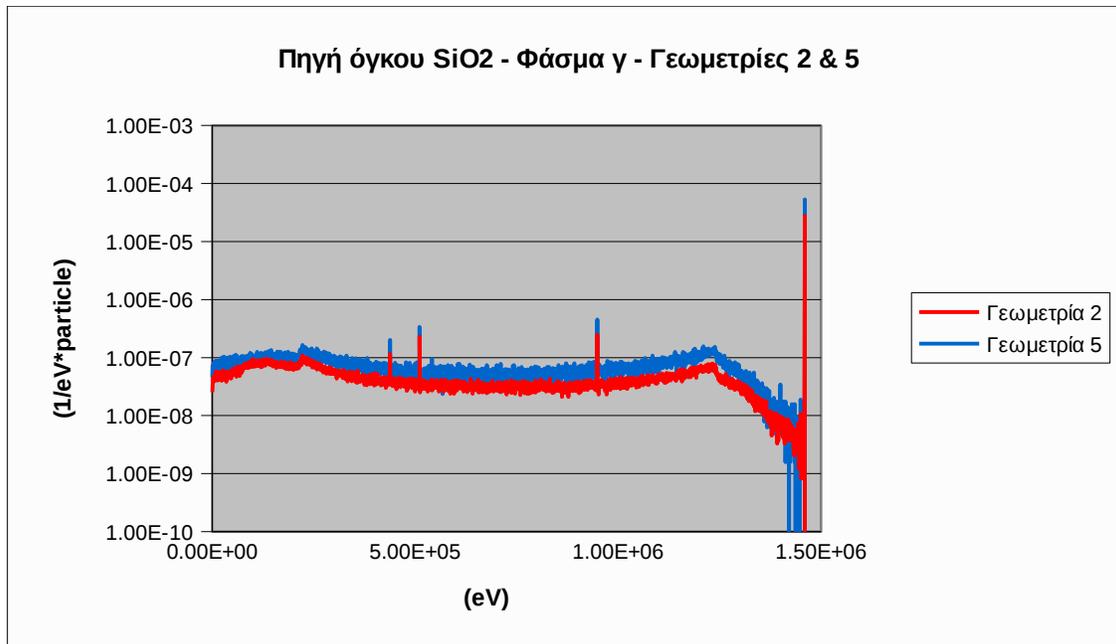
Σχήμα 4.15.β: Συγκριτικά γ -φάσματα λόγω της εκπομπής σωματιδίων β^- για την περίπτωση της πηγής ^{40}K γεωμετρίας «2» και «5» σε H_2O .

Η υπέρθεση των δύο φασμάτων γ και β ακτινοβολίας, η οποία αντιστοιχεί και στο πραγματικό φάσμα που συλλέγεται από τον ανιχνευτή δεν παρουσιάζεται στο σημείο αυτό, καθώς θεωρήθηκε ότι δεν προσφέρει κάτι περισσότερο στην εξαγωγή συμπερασμάτων, αλλά παρουσιάζεται στο Παράρτημα Δ.

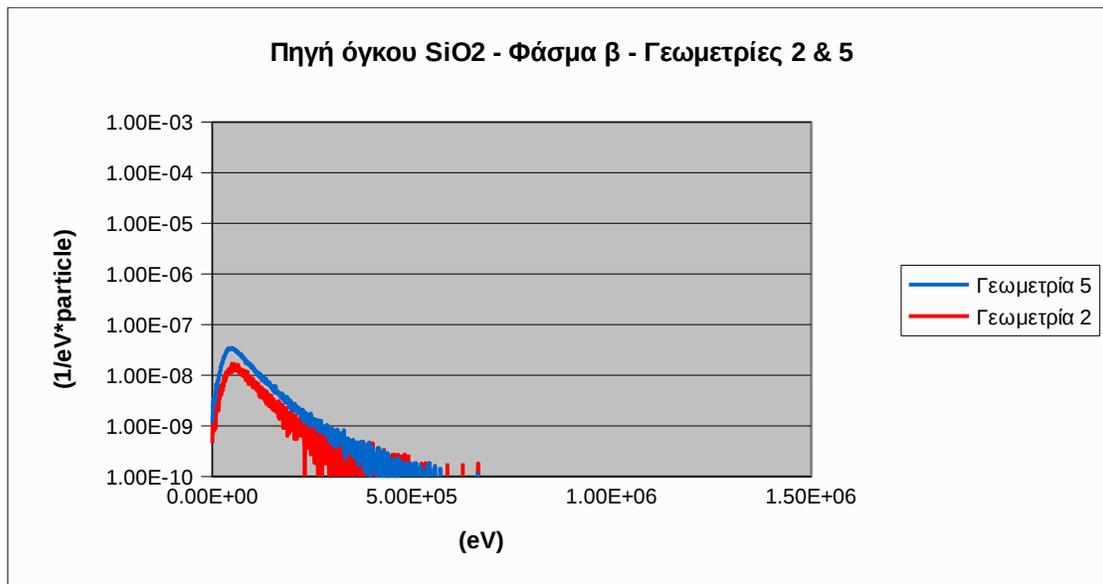
4.4.3 Υλικό πηγής SiO_2 – γεωμετρίες «2» & «5»

Σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγούν και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο γεωμετρίες όγκου «2» & «5» και για υλικό πηγής SiO_2 . Το υλικό αυτό ως απορροφητής προσομοιάζει

περισσότερο από το νερό σε υλικά περιβαλλοντικής σημασίας, όπως η άμμος και το χώμα. Στο σχήμα 4.16α παρατίθεται το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας-γ, ενώ στο σχήμα 4.16β το αντίστοιχο φάσμα ακτινοβολίας-γ που οφείλεται στην εκπομπή σωματιδίων β⁻ από την πηγή.



Σχήμα 4.16.α: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ της πηγής ^{40}K για γεωμετρίας «2» και «5» σε SiO_2



Σχήμα 4.16.β: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ λόγω της εκπομπής σωματιδίων β⁻ για την πηγή ^{40}K , γεωμετρίας «2» και «5» σε SiO_2

Προκειμένου να γίνει μία ποσοτική σύγκριση των φασμάτων εξαιτίας της γ-ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή ^{40}K , υπολογίσθηκε για κάθε ένα από τα φάσματα αυτά ο λόγος της πιθανότητας καταγραφής ενέργειας στην αιχμή (φωτοκορυφή) προς την αντίστοιχη πιθανότητα καταγραφής ενέργειας στην αιχμή Compton του φάσματος ($\sim 1200\text{keV}$).

Υλικό Πηγής	Γεωμετρία	Λόγος πιθανότητας αιχμής/Compton
H_2O	5	434
H_2O	2	416
SiO_2	5	425
SiO_2	2	379

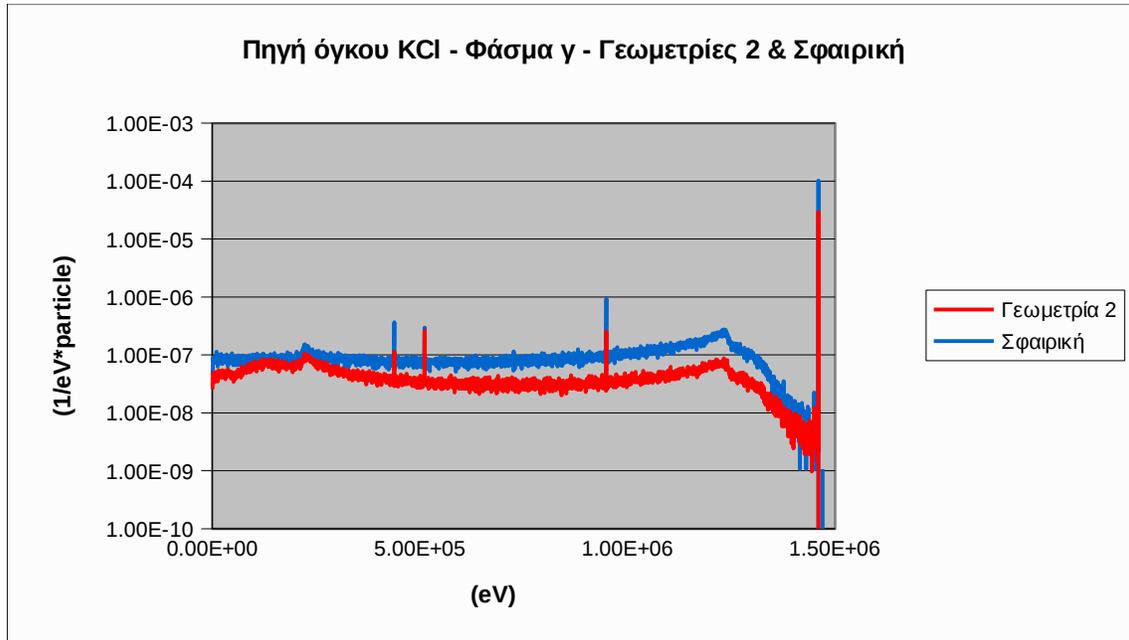
Πίνακας 4.2: Λόγος πιθανότητας ανίχνευσης στην αιχμή (φωτοκορυφή) προς την πιθανότητα ανίχνευσης στην αιχμή Compton για τα φωτόνια ενέργειας 1460keV του ^{40}K

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.2, και για τα δύο υλικά, η πιθανότητα σκέδασης είναι υψηλότερη (χαμηλότερη τιμή του λόγου) για τη γεωμετρία «2» που έχει μεγαλύτερο όγκο. Επίσης προκύπτει ότι και για τις δύο γεωμετρίες, η πιθανότητα σκέδασης είναι υψηλότερη για το υλικό SiO_2 το οποίο έχει υψηλότερη πυκνότητα και εντονότερη εξασθένηση των φωτονίων.

4.5 Προσομοίωση γ-φάσματος σφαιρικής πηγής

Στις προηγούμενες παραγράφους διαπιστώθηκε ότι ο όγκος (και το ύψος) μίας κυλινδρικής πηγής παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των φασμάτων, τόσο των σωματιδίων-β όσο και των φωτονίων, λόγω της απόστασης της πηγής από τον ανιχνευτή, αλλά και λόγω της αυτοαπορρόφησης μέσα στην πηγή. Προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση της παραμέτρου της αυτοαπορρόφησης, αποφασίσθηκε να γίνει μία σειρά από προσομοιώσεις με πηγές πολύ μικρότερου όγκου και σφαιρικής γεωμετρίας. Ως υλικό της πηγής επιλέχθηκε το KCl , ενώ η ακτίνα της σφαιρικής πηγής επιλέχθηκε να είναι 1mm , όσο περίπου είναι και οι διαστάσεις τυπικών σημειακών πηγών που χρησιμοποιούνται κατά τις βαθμονομήσεις. Για μία πηγή τέτοιων διαστάσεων και για την ενέργεια των φωτονίων 1460keV είναι εύλογο να θεωρηθεί ότι η αυτοαπορρόφηση μέσα στην πηγή μπορεί με ασφάλεια να θεωρηθεί αμελητέα.

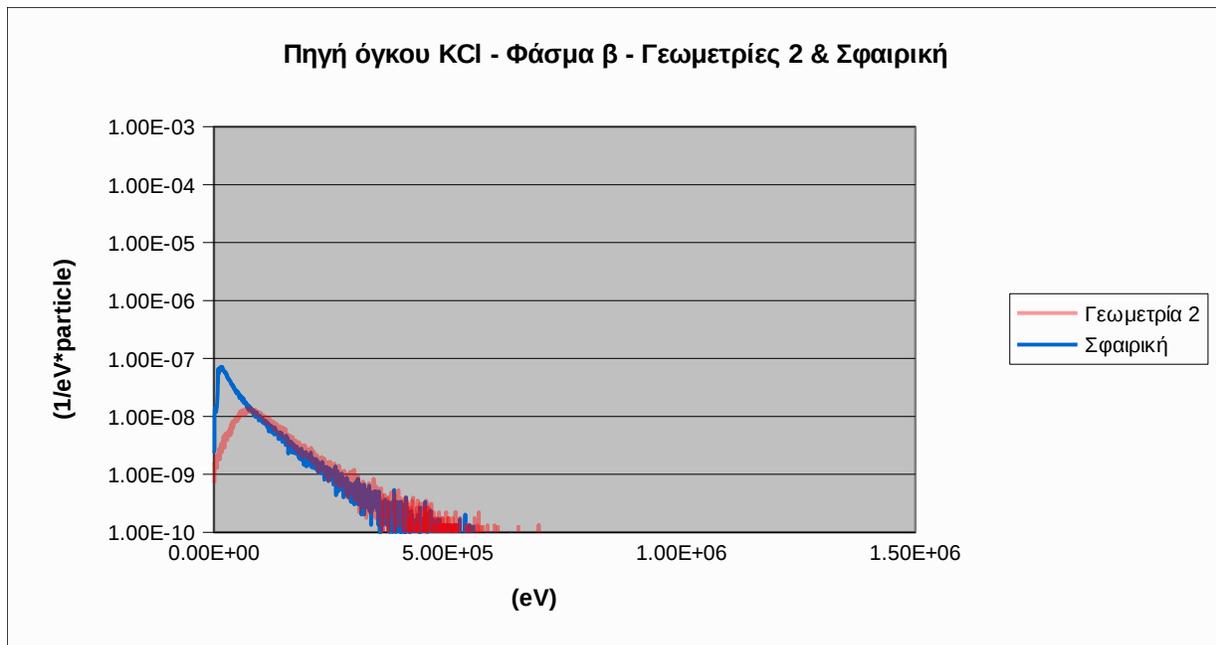
Η μέθοδος με την οποία εισάγεται η σφαιρική πηγή στον κώδικα χρήστη έχει περιγραφεί στις παραγράφους 4.2.3.1 και 4.2.3.2. Στο σχήμα 4.17α παρατίθεται το ενεργειακό φάσμα της αποτιθέμενης στον ανιχνευτή ενέργειας, λόγω των εκπεμπόμενων φωτονίων, και συγκρίνεται με το αντίστοιχο φάσμα της πηγής «γεωμετρίας 2».



Σχήμα 4.17α: Συγκριτικά φάσματα γ-ακτινοβολίας για την περίπτωση της πηγής ^{40}K σφαιρικής γεωμετρίας και γεωμετρίας «2» και υλικό KCL.

Από το διάγραμμα του σχήματος 4.17α προκύπτει ότι η απόκλιση ανάμεσα στις δύο πηγές είναι εντονότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόκλιση των σχημάτων 4.15α και 4.16α, στα οποία συγκρίνεται η «γεωμετρία 2» με τη «γεωμετρία 5» κάτι που επιβεβαιώνει τη σημαντική επίδραση της αυτοαπορρόφησης μέσα στην πηγή, η οποία εξαρτάται από το υλικό της πηγής και φυσικά τη γεωμετρία. Μάλιστα η τιμή του λόγου πιθανότητας ανίχνευσης στην αιχμή (φωτοκορυφή) προς την πιθανότητα ανίχνευσης στην αιχμή Compton για τα φωτόνια ενέργειας 1460keV του ^{40}K για τη σφαιρική πηγή μικρών διαστάσεων εκτιμήθηκε σε 442 – υψηλότερη όλων των τιμών του πίνακα 4.2 – κάτι που επιβεβαιώνει ότι για την περίπτωση αυτής της πηγής η αυτοαπορρόφηση έχει την ελάχιστη τιμή, κάτι που άλλωστε αναμένεται. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη σύγκριση των δύο φασμάτων στην ενεργειακή περιοχή 150-200keV όπου καταγράφονται στον ανιχνευτή η αιχμή οπισθοσκέδασης. Όπως φαίνεται η αιχμή οπισθοσκέδασης στη σφαιρική πηγή μικρών διαστάσεων είναι σημαντικά χαμηλότερη έναντι αυτής που παρουσιάζεται για την περίπτωση της «γεωμετρίας 2».

Αντίστοιχη σύγκριση πραγματοποιείται και μέσω του σχήματος 4.17.β για το φάσμα αποτιθέμενης ενέργειας που οφείλεται στην εκπομπή σωματιδίων β⁻. Το φάσμα πέδησης, όπως παρατηρείται είναι αυξημένο στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.



Σχήμα 4.17β: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ λόγω της εκπομπής σωματιδίων β⁻ για την περίπτωση της πηγής ⁴⁰K σφαιρικής γεωμετρίας και γεωμετρίας 2 σε KCl.

Αυτό συμβαίνει διότι i) τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από την πηγή και είναι υποψήφια για να συνεισφέρουν στην ακτινοβολία πέδησης αλληλεπιδρώντας σε υλικά κοντά στον ανιχνευτή είναι πολύ περισσότερα (μειωμένη αυτοαπορρόφηση σωματιδίων-β – ιδιαίτερα αυτών με χαμηλότερη ενέργεια και ii) η ακτινοβολία πέδησης που παράγεται από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων-β μέσα στην πηγή υφίσταται μικρότερη αυτοαπορρόφηση στην πηγή και κατά συνέπεια είναι ευκολότερο να φτάσει στον ανιχνευτή. Εν γένει, η μορφή του φάσματος πέδησης στην σφαιρική πηγή μικρών διαστάσεων, όπως θα φανεί και αναλυτικά στη συνέχεια προσιδιάζει περισσότερο στην καμπύλη πέδησης που προκύπτει από σημειακή πηγή και λιγότερο από πηγή όγκου, πράγμα το οποίο το αναμένεται με βάση τη γεωμετρία και το μέγεθος της συγκεκριμένης πηγής.

4.6 Προσομοίωση γ-φάσματος σημειακής πηγής

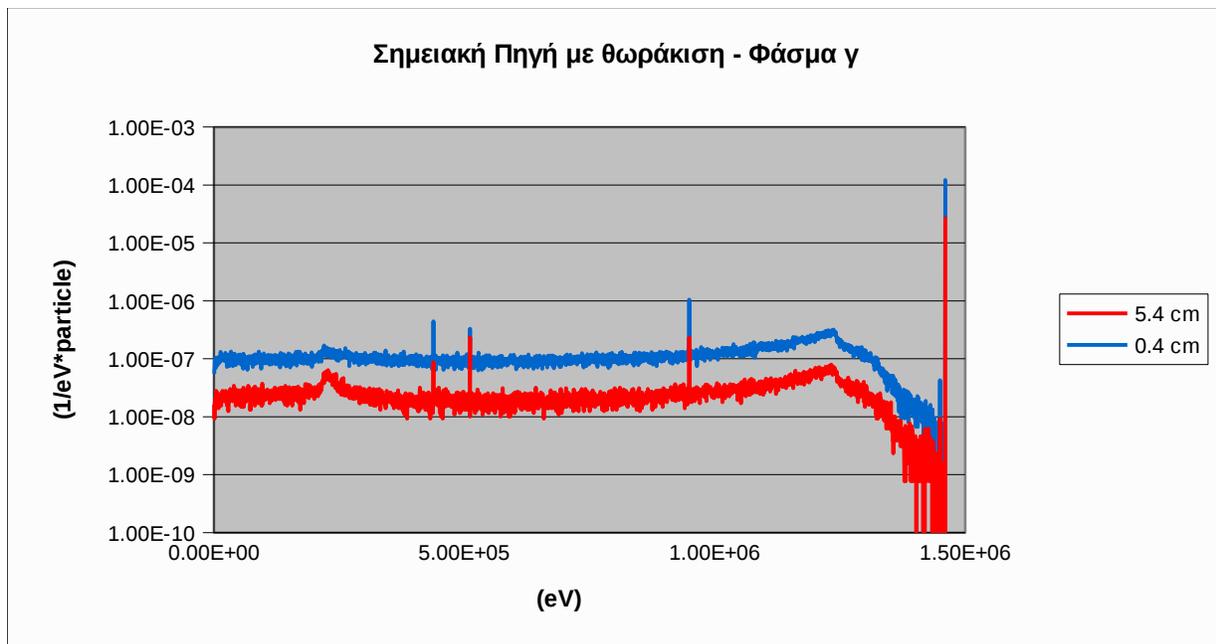
Αφού ολοκληρώθηκαν οι προσομοιώσεις για τις πηγές όγκου και τις σφαιρικές πηγές ακολούθησε ο κύριος όγκος των προσομοιώσεων, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε σημειακή πηγή. Η

χρήση των σημειακών πηγών στόχο έχει τη μελέτη της εξάρτησης των ενεργειακών φασμάτων αποτιθέμενης ενέργειας από τις παραμέτρους της ανιχνευτικής διάταξης χωρίς να επηρεάζεται από τις παραμέτρους της πηγής (π.χ. αυτοαπορρόφηση κτλ). Με αυτές τις παραμέτρους να έχουν εξετασθεί στις προσομοιώσεις με πηγές όγκου και με σφαιρικές πηγές, η ΜΕ επικεντρώθηκε στη μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας (απόσταση πηγής - ανιχνευτή και πηγής - θωράκισης) καθώς και στην επίδραση των διαφόρων συνιστωσών της ανιχνευτικής διάταξης – κυρίως της θωράκισης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε μία σειρά σεναρίων με χρήση φίλτρων και επιπλέον επιστρώσεων στη θωράκιση.

4.6.1 Μελέτη της επίδρασης της απόστασης πηγής-ανιχνευτή

Το πρώτο πράγμα που διερευνήθηκε ήταν η επίδραση της απόστασης της σημειακής πηγής από τον ανιχνευτή στο φάσμα της γ-ακτινοβολίας. Τα δύο σενάρια που συγκρίνονται αφορούν αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή 5.4 cm και 0.4 cm.

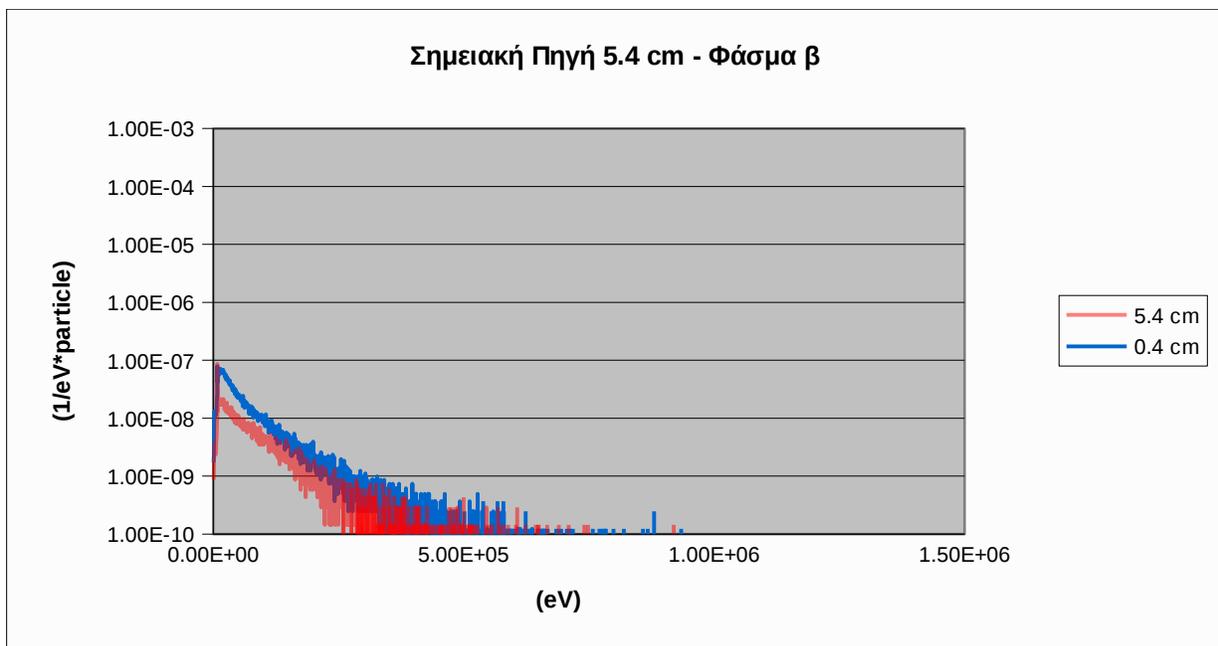
Τα ενεργειακά φάσματα αποτιθέμενης ενέργειας από τις προσομοιώσεις των φωτονίων ενέργειας 1460keV των δυο περιπτώσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.18.α.



Σχήμα 4.18α: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ για την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4 και 0.4 cm από τον ανιχνευτή

Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι η πιθανότητα καταγραφής φωτονίων σε όλο το εύρος των ενεργειών αυξάνει καθώς η πηγή προσεγγίζει τον ανιχνευτή. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από τη σύγκριση των ολικών αποδόσεων των δύο γεωμετριών οι οποίες προκύπτουν 0.219 και 0.0493 για απόσταση πηγής-ανιχνευτή 0.4 cm και 5.4 cm αντίστοιχα. Από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει επίσης ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης περί τα $\sim 200\text{keV}$ είναι εντονότερη στην περίπτωση των 5.4 cm, γεγονός το οποίο θα πρέπει να αποδοθεί στο ότι η πηγή βρίσκεται πιο κοντά στο πάνω τμήμα της θωράκισης και επομένως η πιθανότητα οπισθοσκέδασης είναι εντονότερη. Άλλη μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η πιθανότητα ανίχνευσης φωτονίου ενέργειας 511keV στην περίπτωση της πηγής σε απόσταση 5.4cm είναι αυξημένη. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η πηγή βρίσκεται πλησιέστερα στη θωράκιση και συνεπώς η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί αλληλεπίδραση δίδυμης γένεσης στη θωράκιση, με συνέπεια την εκπομπή φωτονίου ενέργειας 511keV, είναι υψηλότερη.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τη σύγκριση των ενεργειακών φασμάτων αποτιθέμενης ενέργειας που οφείλονται στην εκπομπή σωματιδίων β^- για τις δύο αποστάσεις. Η σύγκριση πραγματοποιείται στο σχήμα 4.18.β. Είναι ξεκάθαρο πως η μορφή των φασμάτων είναι ίδια αλλά η πιθανότητα καταγραφής ακτινοβολίας στην περίπτωση αυτή είναι υψηλότερη καθώς η πηγή είναι πιο κοντά στον ανιχνευτή.

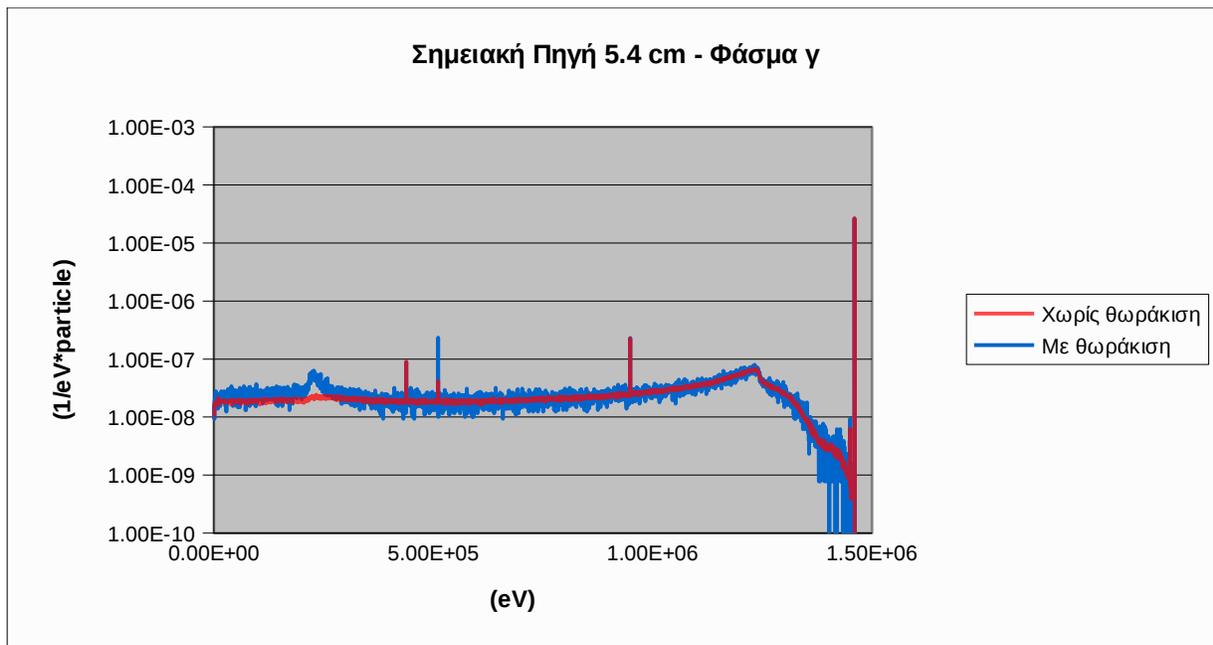


Σχήμα 4.18β: Συγκριτικά φάσματα που οφείλονται στην εκπομπή σωματιδίων β^- για την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4 και 0.4 cm από τον ανιχνευτή

4.6.2 Μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών της θωράκισης

Μετά τη διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης στα συλλεγόμενα φάσματα γ-ακτινοβολίας, το επόμενο βήμα ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της θωράκισης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις. Στην πρώτη προσομοιώθηκε η σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή με τη θωράκιση, ενώ στη δεύτερη προσομοιώθηκε η ίδια γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή αλλά χωρίς τη θωράκιση.

Στο σχήμα 4.19.α συγκρίνονται τα φάσματα που προκύπτουν από τις δύο προσομοιώσεις και οφείλονται στην εκπεμπόμενη φωτονιακή ακτινοβολία.



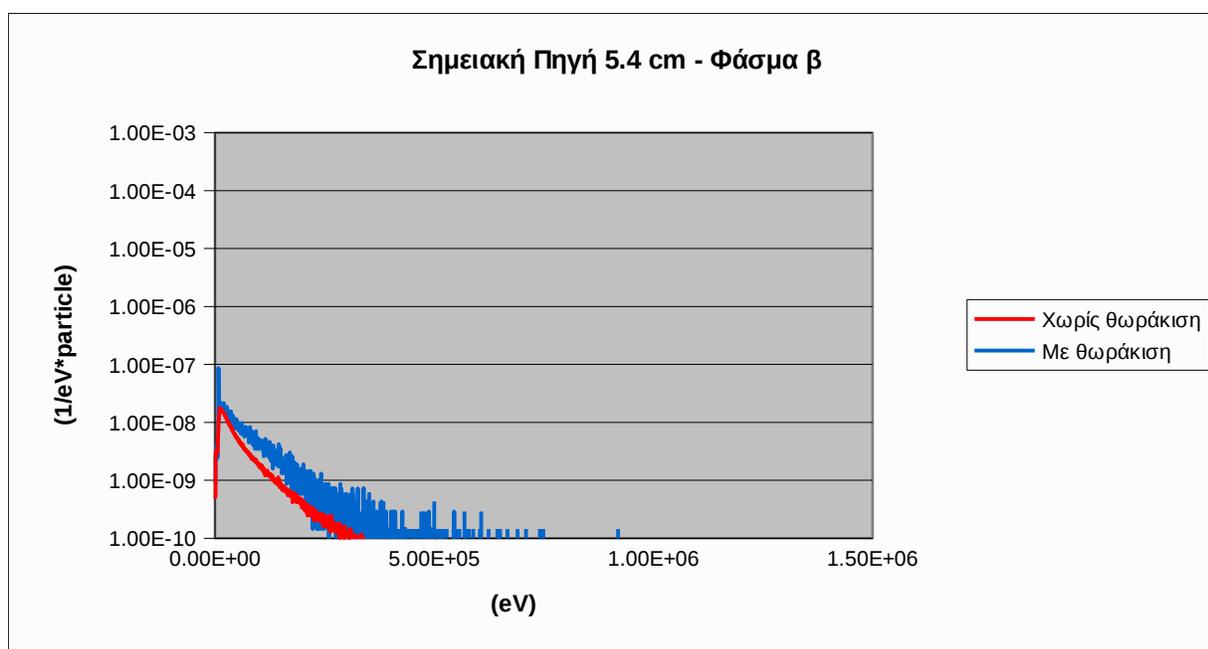
Σχήμα 4.19α: Συγκριτικά φάσματα φωτονιακής ακτινοβολίας για την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με ύπαρξη και χωρίς την ύπαρξη θωράκισης

Όπως προκύπτει από το σχήμα, η αφαίρεση της θωράκισης έχει ως συνέπεια τις παρακάτω διαφορές στο συλλεγόμενο γ-φάσμα:

- Η αιχμή οπισθοσκέδασης (~200keV) στην περίπτωση που δεν υπάρχει θωράκιση σχεδόν εξαφανίζεται. Αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς η οπισθοσκέδαση γίνεται κυρίως στη θωράκιση. Υπενθυμίζεται ότι η αιχμή οπισθοσκέδασης οφείλεται στην ανίχνευση φωτονίων τα οποία εκπέμπονται από την πηγή, αλληλεπιδρούν με το πάνω μέρος της θωράκισης (αντιδιαμετρικά του ανιχνευτή) πραγματοποιώντας σκέδαση Compton με γωνία σκέδασης 180°.

- Η αιχμή εξαύλωσης (δίδυμης γέννησης) στα 0.511 MeV στην περίπτωση που δεν υπάρχει θωράκιση μειώνεται δραματικά. Και αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς τα φωτόνια εξαύλωσης παράγονται κατά κύριο λόγο στο υψηλού Z υλικό της θωρακίσης. Αφαίρεση της θωράκισης, αφαιρεί και την αντίστοιχη συνιστώσα από την αιχμή των 0.511 MeV. Ωστόσο, η αιχμή δεν απαλείφεται πλήρως δεδομένου ότι δίδυμη γέννηση μπορεί να πραγματοποιηθεί και στα υπόλοιπα υλικά, όπως ο κρουστάτης του ανιχνευτή.

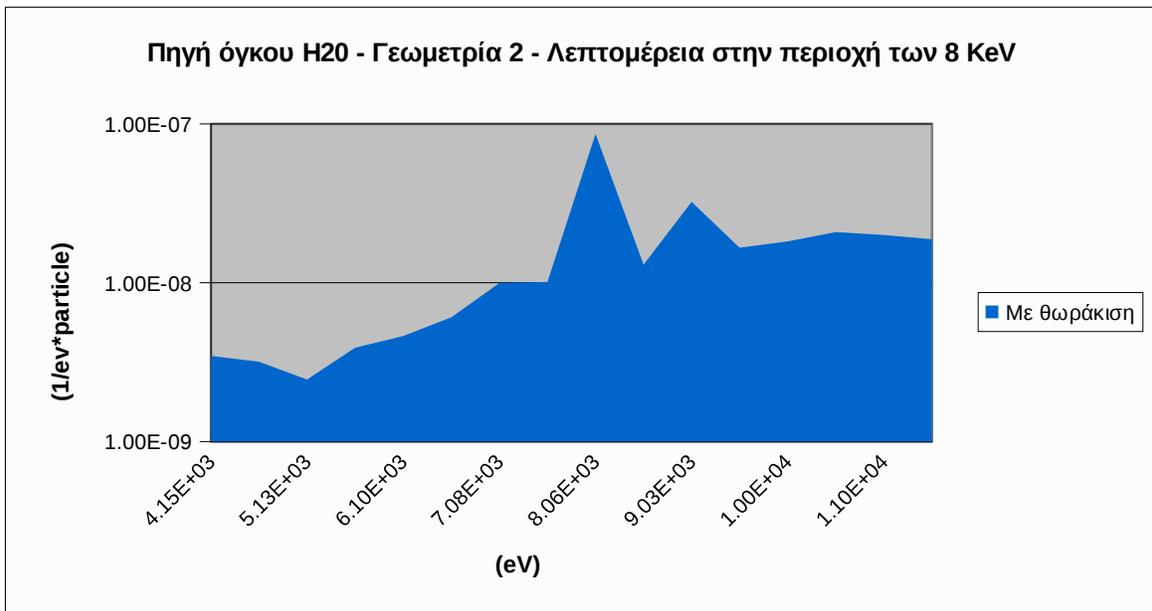
Η ύπαρξη της θωράκισης δεν επιδρά μόνο στο φάσμα που οφείλεται στην εκπεμπόμενη φωτονιακή ακτινοβολία αλλά και στο αντίστοιχο φάσμα που οφείλεται στα εκπεμπόμενα σωματίδια β⁻. Τα φάσματα αυτά, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.19.β.



Σχήμα 4.19β: Συγκριτικά φάσματα που οφείλονται στα εκπεμπόμενα σωματίδια β⁻ για σημειακή πηγή τοποθετημένης σε 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με και χωρίς τη θωράκιση

Όπως παρατηρείται στην περίπτωση όπου υπάρχει η θωράκιση, το συνεχές φάσμα της πέδησης των σωματιδίων β⁻ είναι υψηλότερο. Το γεγονός θα πρέπει να αποδοθεί στην αυξημένη πιθανότητα εκπομπής ακτινοβολίας πέδησης κατά την αλληλεπίδραση των σωματιδίων β⁻ με τα υλικά της θωράκισης. Στο ίδιο φάσμα εμφανίζονται και δύο φωτοκορυφές περί τα 8 και 9 keV, οι οποίες δεν εμφανίζονται στο φάσμα όταν δεν υπάρχει θωράκιση, όπως φαίνεται και στο γράφημα του σχήματος 4.19 γ. Οι δύο αυτές φωτοκορυφές θα πρέπει να αποδοθούν στις χαρακτηριστικές ακτίνες του χαλκού

στις ενέργειες των 8 keV (K_{α} , μέση τιμή των χαρακτηριστικών $K_{\alpha 1}$ και $K_{\alpha 2}$) και 8.9 keV (K_{β}). Υπενθυμίζεται ότι ο χαλκός είναι το τελευταίο στρώμα εξωτερικά της θωράκισης και αυτό που κυρίως εκτίθεται στην γ -ακτινοβολία της πηγής που φτάνει στη θωράκιση. Η αλληλεπίδραση μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου της ακτινοβολίας αυτής με τον χαλκό, έχει ως συνέπεια τελικά την εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X, οι οποίες είναι δυνατόν να ανιχνευθούν από τον ανιχνευτή. Γίνεται εμφανές ότι στην περίπτωση που η ανίχνευση των ακτίνων-X αυτών αποτελεί πρόβλημα, θα πρέπει να αναζητηθεί λύση, με χρήση ενδεχομένως επίστρωσης της θωράκισης με κατάλληλο υλικό.



Σχήμα 4.19 γ: Λεπτομέρεια στην περιοχή χαμηλών του φάσματος ακτινοβολίας-γ που ανιχνεύεται για σημειακή πηγή τοποθετημένη σε 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με θωράκιση

4.6.3 Επίδραση της παρουσίας φίλτρων μεταξύ πηγής και ανιχνευτή και της επένδυσης της θωράκισης στο συνεχές φάσμα πέδησης

Το συνεχές τμήμα του φάσματος, σε μεγάλο βαθμό, οφείλεται στην πέδηση¹ των εκπεμπόμενων από την πηγή σωματιδίων β⁻ με τα υλικά της θωράκισης ή και τα υλικά που περιβάλλουν τον ανιχνευτή (κρυστάτης, dead layer, κλπ). Προκειμένου να περιορισθεί η ακτινοβολία πέδησης προτείνονται οι παρακάτω λύσεις:

- Απορρόφηση των σωματιδίων-β πριν φθάσουν στον ανιχνευτή και τα περιβάλλοντα υλικά. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η χρήση φίλτρων μεταξύ πηγής και ανιχνευτή. Η λύση αυτή δεν επηρεάζει

¹ Το κατά πόσον το συνεχές τμήμα του φάσματος οφείλεται αποκλειστικά στην πέδηση που υφίστανται τα σωματίδια-β της πηγής στις συνιστώσες της διάταξης, είναι ένα θέμα που θα μελετηθεί με λεπτομέρεια στο 5^ο κεφάλαιο.

όμως τη ακτινοβολία πέδησης που εκπέμπεται λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων-β με τη θωράκιση.

- Απορρόφηση των σωματιδίων β⁻ της πηγής πριν αλληλεπιδράσουν με το υλικό της θωράκισης και παραχθεί ακτινοβολία πέδησης. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η χρήση επένδυσης της θωράκισης από κατάλληλο υλικό.
- Ταυτόχρονη χρήση φίλτρων και επένδυσης της θωράκισης.

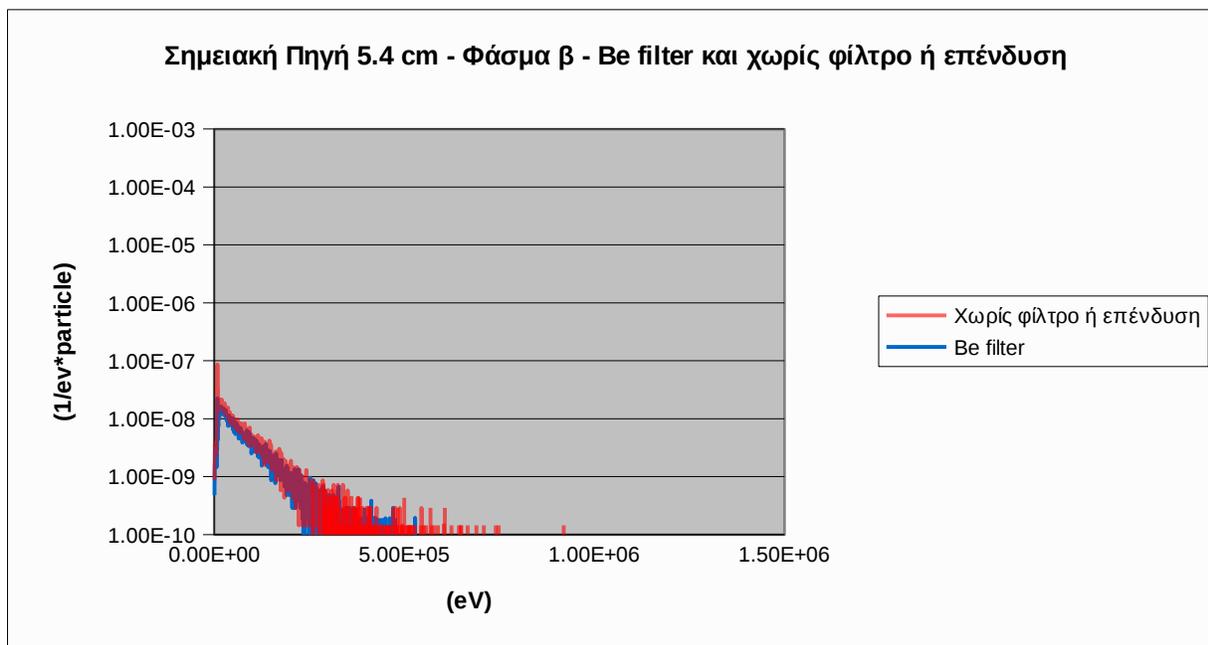
Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η διαδικασία διερεύνησης της επίδρασης των προηγούμενων μεθόδων στο συνεχές φάσμα πέδησης των σωματιδίων β⁻ που εκπέμπονται από την πηγή.

4.6.3.1 Χρήση φίλτρου από Be (Βηρύλλιο) πάχους 0.4 cm

Στη συγκεκριμένη παράγραφο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μελέτη της επίδρασης που έχει η προσθήκη φίλτρου από βηρύλλιο πάνω από το παράθυρο του ανιχνευτή. Το φίλτρο που ελέγχθηκε έχει πάχος 0.4 cm, ενώ η απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή είναι 5.4 cm. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε παρουσία της θωράκισης. Στο σχήμα 4.20 παρατίθενται τα ενεργειακά φάσματα που συλλέγεται από τον ανιχνευτή εξαιτίας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας-β για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ή όχι το φίλτρο. Όπως φαίνεται, τα δύο φάσματα είναι πρακτικά ίδια. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι πως στην περίπτωση που υπάρχει το φίλτρο Be οι χαρακτηριστικές ακτίνες-X του χαλκού δεν εμφανίζονται στο φάσμα. Το αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς οι χαμηλής ενέργειας χαρακτηριστικές του χαλκού (8-9keV) δεν είναι ικανές να διαπεράσουν το επιπλέον υλικό που προστέθηκε μεταξύ πηγής και ανιχνευτή. Το ίδιο αποτέλεσμα επιβεβαιώνεται και στην περίπτωση προσομοίωσης χωρίς θωράκιση. Εξυπακούεται ότι στην περίπτωση αυτή δεν ανιχνεύονται οι ακτίνες-X του χαλκού. Υπενθυμίζεται ότι όλα τα αναλυτικά διαγράμματα των προσομοιώσεων μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Γ.

4.6.3.2 Χρήση φίλτρου από πολυπροπυλένιο πάχους 0.4 cm

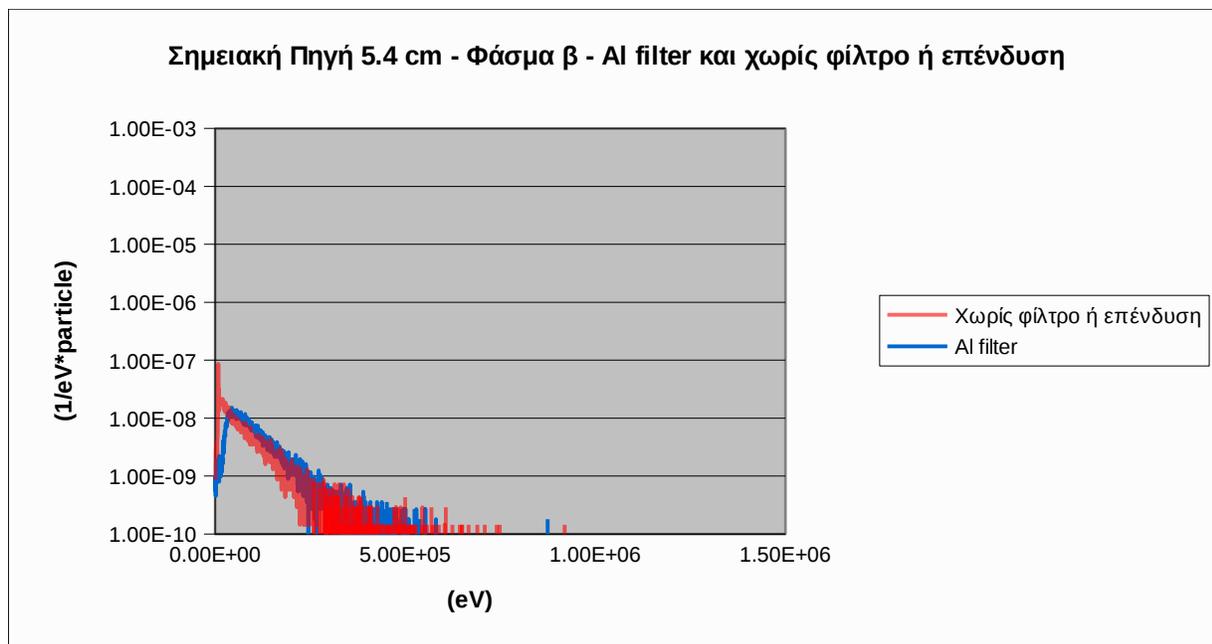
Το επόμενο φίλτρο που εξετάστηκε ήταν φίλτρο από πολυπροπυλένιο πάχους 0.4cm. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν διαφέρουν ποιοτικά από τα αντίστοιχα για το φίλτρο βηρυλλίου.



Σχήμα 4.20: Συγκριτικό φάσμα ακτινοβολίας-γ που ανιχνεύεται, το οποίο οφείλεται στα εκπεμπόμενα σωματίδια β- για την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με και χωρίς τη χρήση φίλτρου βηρυλλίου

4.6.3.3 Χρήση φίλτρου από Al (Αλουμίνιο) πάχους 0.4cm

Καθώς, τόσο το βηρύλλιο όσο και το πολυπροπυλένιο είναι δύο ελαφρά υλικά, στο επόμενο βήμα της διερεύνησης αποφασίσθηκε η χρήση φίλτρου υψηλότερου Z και συγκεκριμένα φίλτρου αλουμινίου. Η επίδραση που θα μπορούσε να έχει ένα φίλτρο υψηλότερου Z είναι διπλή. Αφενός αναμένεται να έχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην αποκοπή φωτονίων πέδησης που προέρχονται είτε από την πηγή, είτε από τη θωράκιση, αφετέρου θα μπορούσε να συνεισφέρει το ίδιο στην εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης, από τα σωματίδια-β τα οποία εκπέμπονται από την πηγή. Στο σχήμα 4.21 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με και χωρίς το φίλτρο αλουμινίου.



Σχήμα 4.21: Συγκριτικό φάσμα ακτινοβολίας-γ που οφείλεται στα εκπεμπόμενα σωματίδια β- για την περίπτωση σημειακής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με και χωρίς τη χρήση φίλτρου Al

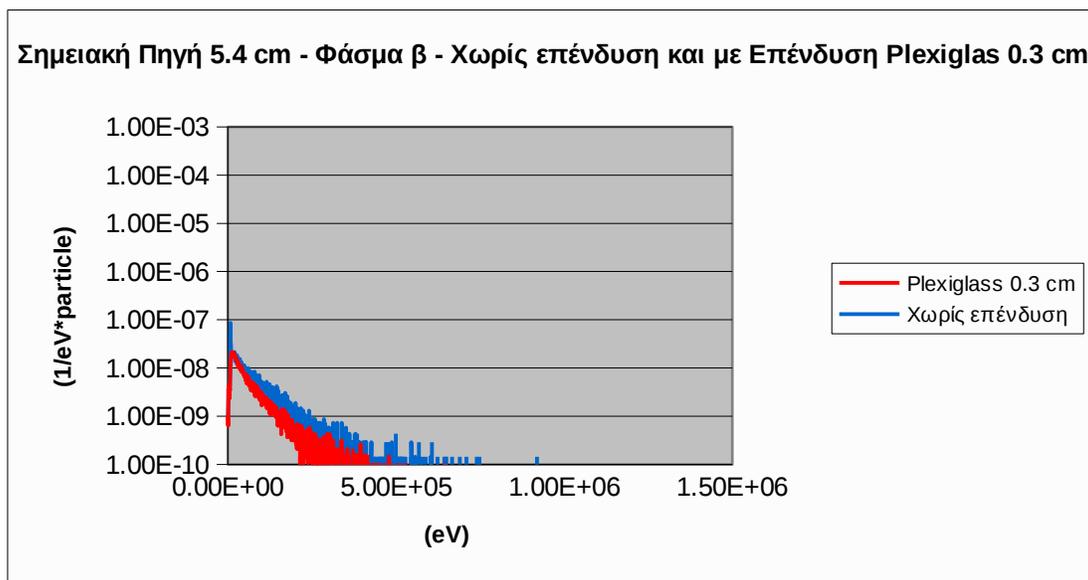
Όπως είναι εμφανές η εισαγωγή του φίλτρου αλουμινίου έχει διπλό αποτέλεσμα – όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Το πρώτο που παρατηρείται είναι πως το κομμάτι των πολύ χαμηλών ενεργειών μειώνεται πάρα πολύ. Αυτό είναι λογικό καθώς το αλουμίνιο κόβει τα χαμηλής ενέργειας φωτόνια που έχουν δημιουργηθεί και οδεύουν προς τον ανιχνευτή, μεταξύ αυτών και τις ακτίνες-X του χαλκού. Το δεύτερο αποτέλεσμα, είναι μια πολύ μικρή αύξηση του συνεχούς φάσματος στις υψηλότερες ενέργειες, πιθανότατα λόγω πέδησης των σωματιδίων-β που εκπέμπει η πηγή στο φίλτρο αλουμινίου.

4.6.3.4 Χρήση επένδυσης της θωράκισης από Plexiglas πάχους 0.3 cm

Όπως διαπιστώθηκε από τη μελέτη της επίδρασης των φίλτρων στο φάσμα της γ-ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή, ένα τμήμα του συνεχούς φάσματος ακτινοβολίας το οποίο οφείλεται στην εκπομπή της ακτινοβολίας-β της πηγής παράγεται στη θωράκιση της ανιχνευτικής διάταξης. Αυτό είναι πολύ καθαρό στην περίπτωση του φίλτρου αλουμινίου, το οποίο επιλεκτικά φιλτράρει τα τμήμα χαμηλής ενέργειας του συνεχούς φάσματος. Προκειμένου να διερευνηθεί το κατά πόσον είναι δυνατόν να μειωθεί το συνεχές φάσμα που παράγεται στη θωράκιση, μελετήθηκε η

επένδυση εσωτερικά της θωράκισης από φύλλο Plexiglas πάχους 0.3 cm ως τελευταίο υλικό των επάλληλων στρώσεων της θωράκισης, μετά από το χαλκό.

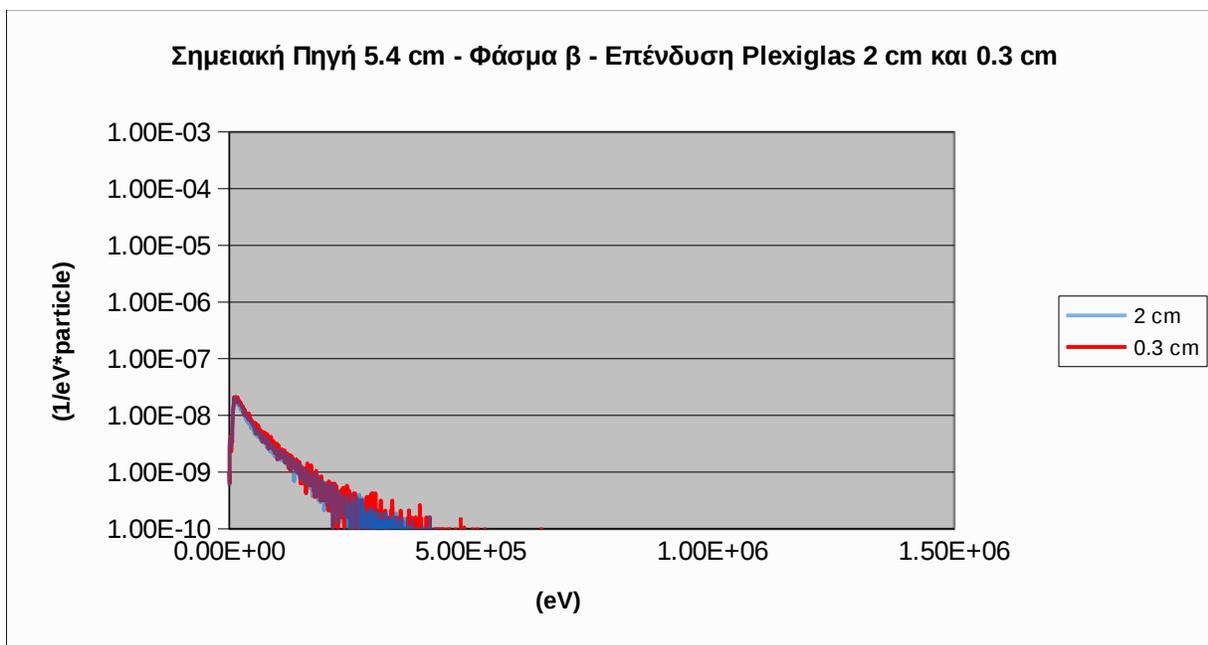
Στο σχήμα 4.22 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της ακτινοβολίας-γ λόγω πέδησης, όπως προκύπτει από την προσομοίωση με και χωρίς τη χρήση επένδυσης από Plexiglas στη θωράκιση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22, είναι εμφανής η επίδραση της επένδυσης συνολικά στο φάσμα.



Σχήμα 4.22: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ που οφείλονται στα εκπεμπόμενα σωματίδια β- για την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με και χωρίς επένδυση της θωράκισης από Plexiglas πάχους 0.3 cm

Καθώς το plexiglas είναι ένα υλικό χαμηλού Z, ένα μέρος από τα σωματίδια-β της πηγής, πριν φτάσουν στο στρώμα χαλκού, αλληλεπιδρούν με το plexiglas, κυρίως με διεγέρσεις και ιονισμούς και πολύ λιγότερο με ακτινοβολία πέδησης. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι οι χαρακτηριστικές ακτίνες-X των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το plexiglas (κυρίως άνθρακας και υδρογόνο) οι οποίες είναι εξαιρετικά χαμηλής ενέργειας και δεν φτάνουν στον ανιχνευτή.

Εύλογο, ερώτημα που τίθεται από την παραπάνω διαπίστωση είναι το κατά πόσον είναι επαρκής η επένδυση από στρώμα plexiglas πάχους 0.3cm. Ως επόμενο βήμα της μελέτης ακολούθησε προσομοίωση με στρώμα πάχους 2 cm. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής εμφανίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.23. Από το διάγραμμα προκύπτει πολύ ασθενής – σχεδόν ανύπαρκτος – περαιτέρω περιορισμός του συνεχούς φάσματος πέδησης.



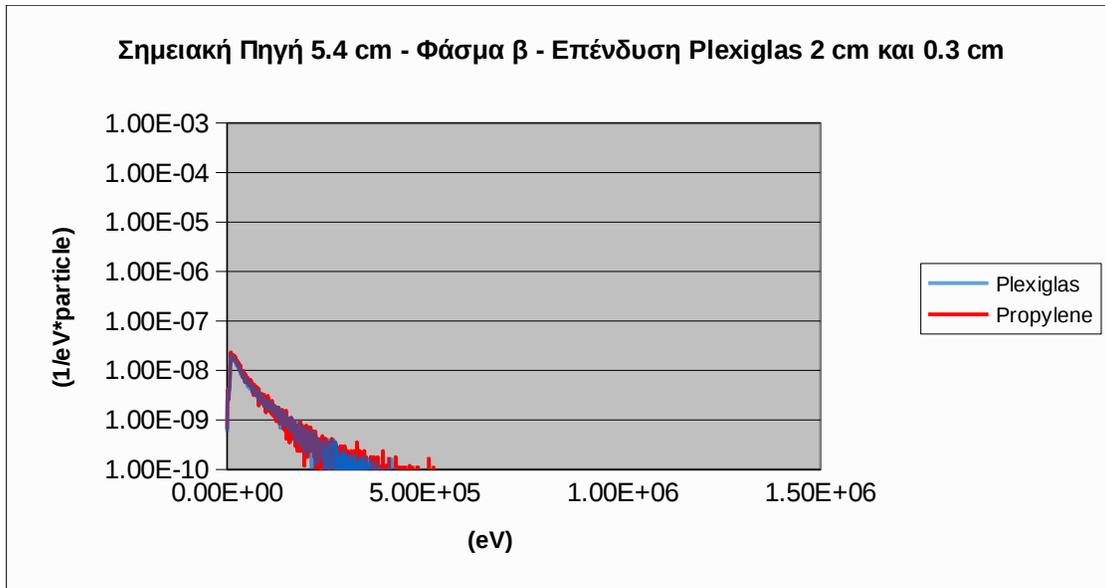
Σχήμα 4.23: Συγκριτικά φάσματα γ-ακτινοβολίας που οφείλονται στα εκπεμπόμενα σωματίδια β- για την περίπτωση σημειακής πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με τη χρήση επένδυσης της θωράκισης από Plexiglas πάχους 2 cm και 0.3 cm

4.6.3.5 Χρήση επένδυσης από πολυπροπυλένιο πάχους 2 cm στη θωράκιση

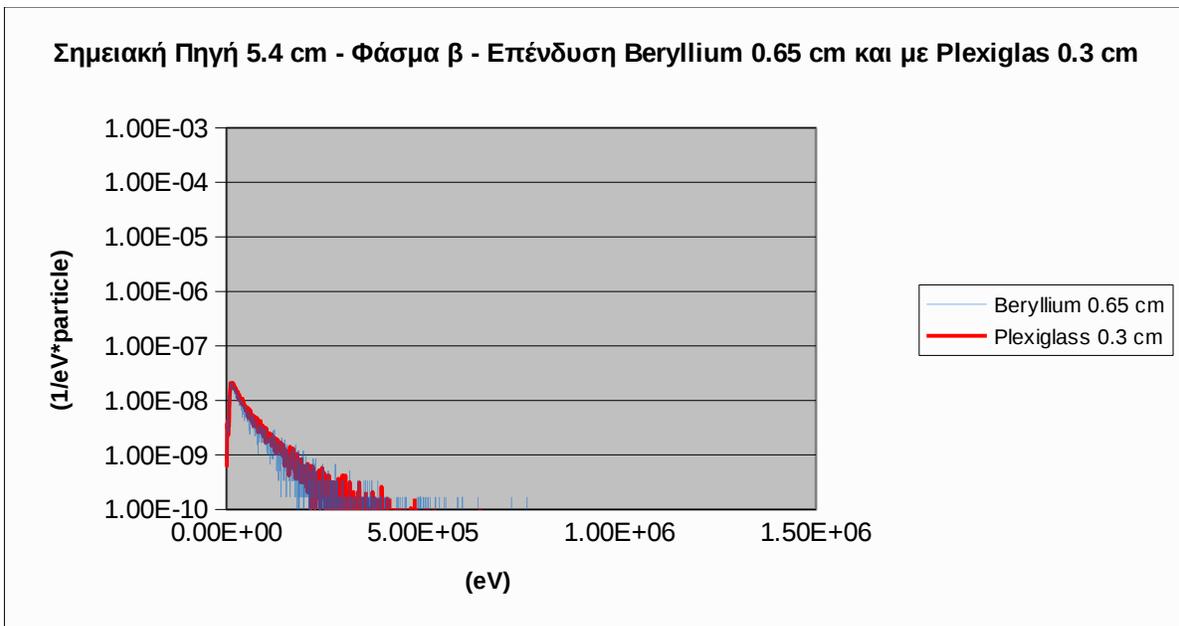
Καθώς το plexiglas αποδείχθηκε υλικό κατάλληλο για επένδυση της θωράκισης με στόχο τον μερικό περιορισμό του φάσματος συνεχούς ακτινοβολίας, κατ' ανάλογο τρόπο δοκιμάστηκε και το υλικό πολυπροπυλένιο πάχους 2 cm. Στο σχήμα 4.24 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής, από όπου διαπιστώνεται ότι η επίδραση που έχει το υλικό αυτό δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτή του Plexiglas.

4.6.3.6 Χρήση επένδυσης από Be (Βηρύλλιο) πάχους 0.65 cm

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως υλικό επένδυσης Βηρύλλιο πάχους 0.65 cm. Τα αποτελέσματα (σχήμα 4.25) δεν φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά από την περίπτωση επένδυσης με Plexiglas.



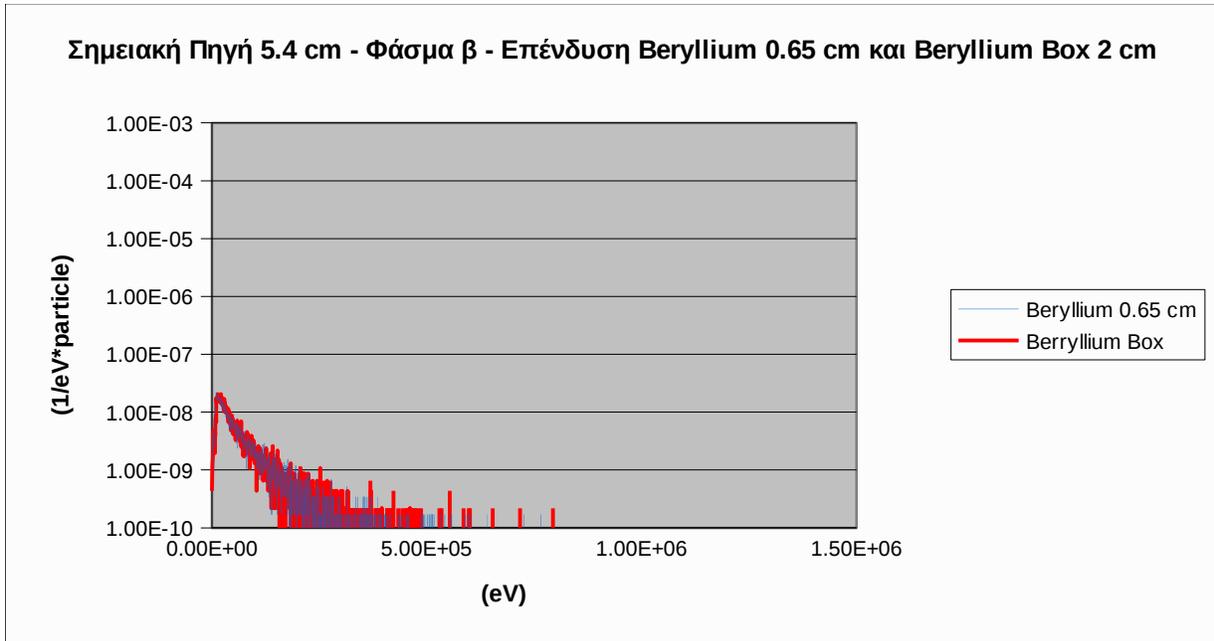
Σχήμα 4.24: Φάσματα ακτινοβολίας-γ εξαιτίας των σωματιδίων β- για την περίπτωση σημειακής πηγής σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με επένδυσης της θωράκισης Plexiglas και Polypropylene



Σχήμα 4.25: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ εξαιτίας των σωματιδίων β- για σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με επένδυσης θωράκισης Beryllium 0.65 cm και Plexiglass 0.3 cm

4.6.3.7 Τοποθέτηση της πηγής σε περίβλημα από Be (Βηρύλλιο) πάχους 0.5 cm

Καθώς η προσθήκη επένδυσης στην θωράκιση του ανιχνευτή δεν είναι κάτι που θα μπορούσε να υλοποιηθεί εύκολα αποφασίσθηκε η δοκιμή ενός εναλλακτικού σεναρίου. Συγκεκριμένα να δοκιμασθεί η αποτελεσματικότητα χρήσης ενός περιβλήματος της πηγής ακτινοβολίας κατασκευασμένο από Be πάχους 0.5 cm. Τα αποτελέσματα της εναλλακτικής αυτής λύσης δεν αναμένεται να είναι διαφορετικά από την λύση της επένδυσης της θωράκισης, κάτι που επιβεβαιώνεται από το σχήμα 4.26.

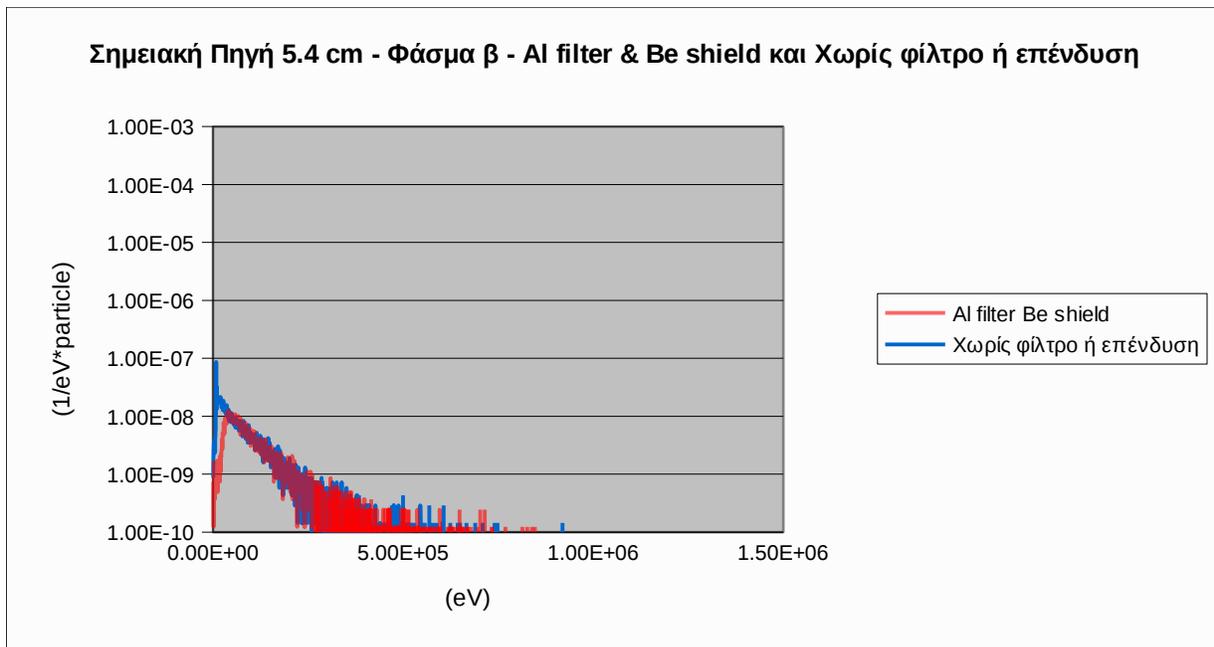


Σχήμα 4.26: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ εξαιτίας των σωματιδίων-β⁻ για σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με επένδυση θωράκισης από Be 0.65 cm και με περίβλημα Be πάχους 2 cm.

4.6.3.8 Συνδυασμένη χρήση φίλτρου Al και επένδυσης από Be

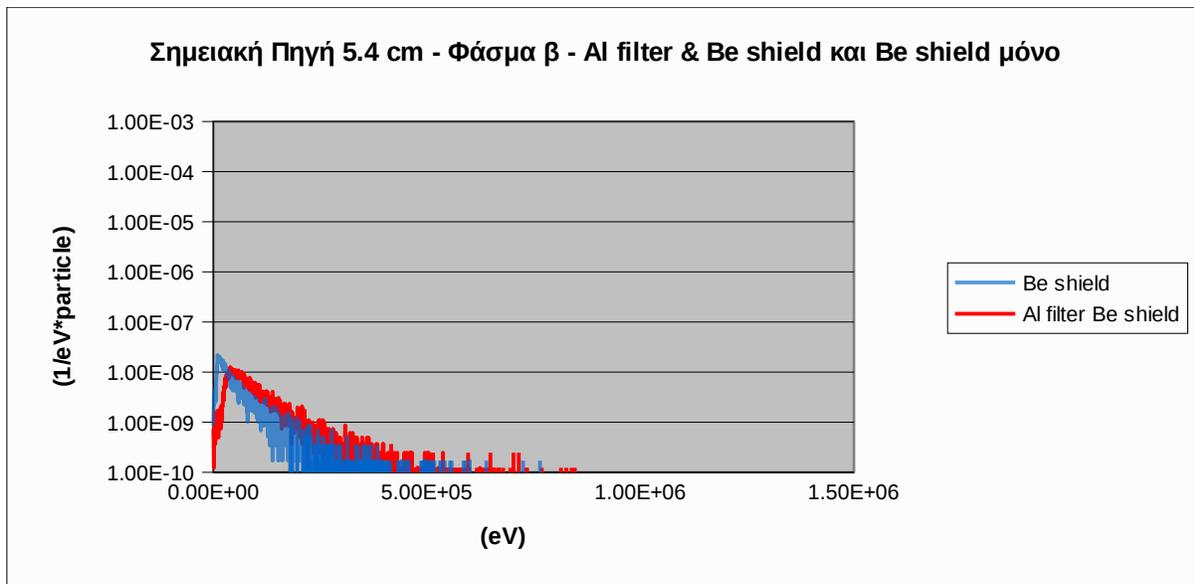
Από τις περιπτώσεις που αναπτύχθηκαν προηγούμενα, διαπιστώθηκε ότι τη σημαντικότερη επίδραση στο συνεχές φάσμα πέδησης είχαν το φίλτρο Al και η χρήση επένδυσης στη θωράκιση, με το Βηρύλλιο να αποτελεί (με μικρή διαφορά) καλύτερη επιλογή. Λογικά προκύπτει η ανάγκη μελέτης του συνδυασμού των δύο παραμέτρων προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη που προκύπτουν, ως προς τη μείωση του φάσματος της πέδησης. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή και χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Al πάχους 0.4 cm και η επένδυση Be στη θωράκιση πάχους 0.65 cm.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στο σχήμα 4.27. Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων παρατίθενται επιπλέον και γραφήματα με τα συγκριτικά αποτελέσματα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Από το πρώτο διάγραμμα (σχήμα 4.27) φαίνεται ότι, όπως και στην περίπτωση του φίλτρου Al υπάρχει μεγάλη μείωση του συνεχούς φάσματος πέδησης στις πολύ χαμηλές ενέργειες με το φάσμα στις υψηλότερες ενέργειες να μην παρουσιάζει διαφορά.

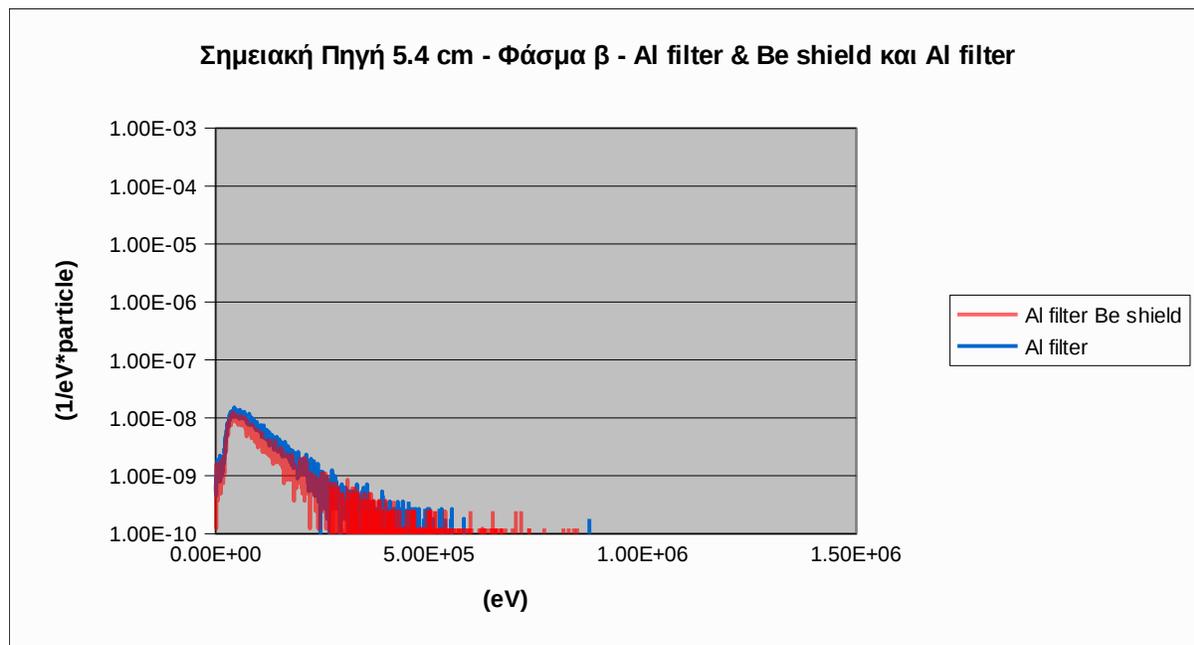


Σχήμα 4.27: Συγκριτικά φάσματα ακτινοβολίας-γ εξαιτίας των σωματιδίων β- για σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, με χρήση (α) επένδυσης από Be 0.65 cm στη θωράκιση και φίλτρου Al 0.4 cm και (β) χωρίς φίλτρο ή επένδυση

Από το δεύτερο διάγραμμα (Σχήμα 4.28) διαπιστώνεται ότι, σε σχέση με την περίπτωση που υπάρχει μόνο επένδυση της θωράκισης με, Be υπάρχει μείωση στις χαμηλές ενέργειες αλλά αύξηση στη συνέχεια. Από το τρίτο διάγραμμα (Σχήμα 4.29) παρατηρείται ότι σε σχέση με την περίπτωση που υπάρχει μόνο το φίλτρο Al, η επένδυση από Be καταφέρνει να μειώσει το συνεχές φάσμα πέδησης στις μέσες και υψηλές ενέργειες. Τελικά, από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι, η συνδυασμένη χρήση φίλτρου Al και επένδυσης Be εξαλείφει τη μικρή αύξηση στο συνεχές φάσμα πέδησης που παρατηρείται από το φίλτρο Al στις μέσες και υψηλές ενέργειες.



Σχήμα 4.28: Συγκριτικά φάσματα που ακτινοβολίας-γ εξαιτίας των σωματιδίων β- για σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, (α) με χρήση επένδυσης από Be 0.65 cm στη θωράκιση και φίλτρου Al 0.4 cm και (β) μόνο με χρήση επένδυσης Be 0.65 cm



Σχήμα 4.29: Συγκριτικά φάσματα που ακτινοβολίας-γ εξαιτίας των σωματιδίων β- για σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή, (α) με χρήση επένδυσης Be 0.65 cm στη θωράκιση και φίλτρου Al 0.4 cm και (β) με χρήση φίλτρου Al 0.4 cm

4.7 Συμπεράσματα

Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο, μέσω σειράς προσομοιώσεων, μπορεί να προκύψει μια σειρά συμπερασμάτων, σχετικά με την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο φάσμα ακτινοβολίας- γ που συλλέγεται από τον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ κατά την ανάλυση πηγής που περιέχει ^{40}K . Σημειώνεται ότι η ακτινοβολία- γ που ανιχνεύεται, οφείλεται αφενός στα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή ^{40}K , αφετέρου στη φωτονιακή ακτινοβολία η οποία παράγεται από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων- β που εκπέμπει η πηγή με τις διάφορες συνιστώσες της ανιχνευτικής διάταξης.

Εξετάζοντας αρχικά γεωμετρίες πηγής που έχουν όγκο, και συγκεκριμένα κυλινδρικές γεωμετρίες της ίδιας διατομής αλλά διαφορετικού ύψους, διαπιστώθηκε η επίδραση που έχει στο φάσμα, τόσο η γεωμετρία της πηγής (ύψος), όσο και το υλικό της. Συγκεκριμένα:

- Στην πηγή μεγαλύτερου ύψους, η πιθανότητα καταγραφής φωτονίων στο φάσμα είναι χαμηλότερη από ότι στην πηγή μικρότερου ύψους. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα φωτόνια που εκπέμπονται από το τμήμα της πηγής που είναι μακριά από τον ανιχνευτή παρουσιάζουν μικρότερη πιθανότητα ανίχνευσης.
- Στην πηγή μεγαλύτερου ύψους παρουσιάζεται μειωμένη και η ακτινοβολία λόγω της πέδησης των σωματιδίων- β . Αυτό θα πρέπει να αποδίδεται στο γεγονός ότι, στην πηγή μεγαλύτερου ύψους είναι μικρότερη η πιθανότητα να διαφύγει ένα σωματίδιο- β , το οποίο εν συνεχεία θα υποστεί πέδηση στη θωράκιση ή άλλη συνιστώσα του ανιχνευτή. Επιπλέον, η ίδια η πηγή όγκου, ενδεχομένως λειτουργεί ως θωράκιση της ακτινοβολίας πέδησης που παράγεται στη θωράκιση της διάταξης και κατευθύνεται προς τον ανιχνευτή.
- Όσο το μέγεθος της πηγής “μικραίνει” (και όσο αυξάνει η μοριακή πυκνότητα του υλικού της πηγής όγκου) τόσο το συνεχές φάσμα ακτινοβολίας- γ εξαιτίας της πέδησης των σωματιδίων β έχει παραπλήσια μορφή με το αντίστοιχο φάσμα σημειακών πηγών σωματιδίων- β .

Αφού μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας της πηγής, πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων για γεωμετρία σημειακής πηγής, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης. Από τις προσομοιώσεις αυτές διαπιστώθηκε:

- Όσο η πηγή προσεγγίζει τον ανιχνευτή αυξάνει η πιθανότητα καταγραφής φωτονίων σε όλα τα ενεργειακά εύρος του φάσματος.

- Όσο η πηγή απομακρύνεται από τον ανιχνευτή και κατά συνέπεια προσεγγίζει τη θωράκιση γίνεται εντονότερη η παρουσία της αιχμής οπισθοσκέδασης.
- Αφαίρεση της θωράκισης οδηγεί σε εξαφάνιση της αιχμής οπισθοσκέδασης και σε μεγάλη μείωση της αιχμής εξαύλωσης στα 0.511 MeV του φάσματος γ-ακτινοβολίας. Παρόλαυτά φαίνεται ότι φωτόνια εξαύλωσης παράγονται και κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τις συνιστώσες του ανιχνευτή, κυρίως τον κρυστάτη.
- Υπό την παρουσία της θωράκισης η πέδηση είναι σαφώς εντονότερη. Πράγματι, η ακτινοβολία πέδησης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό, αλλά όχι αποκλειστικά, στην πέδηση των σωματιδίων-β στη θωράκιση.

Στην τελική φάση της διερεύνησης δοκιμάστηκαν διάφορα φίλτρα και επενδύσεις της θωράκισης με στόχο τη μείωση του συνεχούς φάσματος πέδησης, με τα εξής συμπεράσματα:

- Τα φίλτρα που τοποθετούνται πριν από το κάλυμμα πολυπροπυλενίου του ανιχνευτή δεν φάνηκε να προκαλούν σημαντική διαφορά στο φάσμα της πέδησης. Το τι σημαίνει αυτό το γεγονός δεν είναι μονοσήμαντο. Ενδεχομένως σημαίνει πως η πέδηση γίνεται σε κάποιο υλικό που βρίσκεται «μετά» τα φίλτρα αλλά μπορεί και να σημαίνει πως τα σωματίδια-β που κινούνται προς τον ανιχνευτή «κόβονται» ούτως ή άλλως από κάποιο άλλο σώμα.
- Η αντικατάσταση των πλαστικών φίλτρων από φύλλο αλουμινίου είχε μικρό αποτέλεσμα πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα πως έστω ένα μικρό μέρος της πέδησης γίνεται πριν το φίλτρο.
- Η προσθήκη επιπλέον επένδυσης στη θωράκιση δείχνει να έχει κάποιο αποτέλεσμα πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα πως ένα τμήμα της πέδησης πρέπει να λαμβάνει χώρα στη θωράκιση.

Τελικά, αυτό που μπορεί να λεχθεί όσον αφορά το συνεχές φάσμα γ-ακτινοβολίας που παράγεται εξαιτίας της εκπομπής των σωματιδίων-β της πηγής– το οποίο στα προηγούμενα συχνά χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολία πέδησης – είναι ότι δεν κατέστη δυνατόν να διαπιστωθεί με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού ο ακριβής μηχανισμός παραγωγής της. Συγκεκριμένα, δεν διαπιστώθηκε αν το συνεχές φάσμα είναι αποκλειστικά πρωτογενές φάσμα πέδησης, ή αν πρόκειται και για ακτινοβολία-γ που έχει μεν προέλθει από ακτινοβολία πέδησης, αλλά έχει φτάσει στον ανιχνευτή μετά από προηγούμενη σκέδαση σε κάποια συνιστώσα της διάταξης. Στόχος του επόμενου κεφαλαίου είναι να διαπιστωθεί η ακριβής φύση

του συνεχούς αυτού φάσματος ακτινοβολίας- γ , καθώς και οι συνιστώσες της διάταξης στις οποίες αυτή παράγεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ «ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΠΕΔΗΣΗΣ»

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η συνεισφορά του συνεχούς φάσματος πέδησης στο συνολικό φάσμα γ-ακτινοβολίας που συλλέγεται σε έναν ανιχνευτή Ge είναι αρκετά σημαντική, ιδιαίτερα στην περιοχή χαμηλών ενεργειών. Η σχετική επίδραση του συνεχούς φάσματος αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ενέργεια των σωματιδίων-β που εκπέμπει η πηγή και γίνεται ιδιαίτερος σημαντική για ενέργειες μεγαλύτερες από 1MeV. Παρ όλη τη σαφή αναφορά που έχει γίνει έως τώρα σε «φάσμα πέδησης», στα πλαίσια της Μ.Ε. αναπτύχθηκε προβληματισμός για το κατά πόσον το συνεχές φάσμα το οποίο καταγράφεται στον ανιχνευτή Ge εξαιτίας των εκπεμπόμενων από την πηγή σωματιδίων-β είναι πράγματι φάσμα πέδησης, δηλαδή οφείλεται στην καταγραφή των ακτίνων-Χ που εκπέμπονται από την πέδηση των σωματιδίων-β της πηγής στο περιβάλλον της ανιχνευτής διάταξης. Όπως είναι γνωστό, ένας ανιχνευτής δεν μπορεί να ξεχωρίσει το είδος των σωματιδίων των οποίων την ενέργεια καταγράφει. Έτσι, τα σωματίδια-β που εκπέμπονται από την πηγή, θα μπορούσαν – υπό ορισμένες προϋποθέσεις – να ανιχνεύονται άμεσα από τον ανιχνευτή. Επισημαίνεται ότι έχει σημασία να είναι γνωστή η φύση της ακτινοβολίας που παράγει στον ανιχνευτή το συνεχές φάσμα που ως τώρα έχει χαρακτηριστεί ως «φάσμα πέδησης», καθώς, αυτό ενδεχομένως θα επιτρέψει τη λήψη μέτρων για τη μείωση του. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε έως τώρα, δηλαδή προσομοίωση των σωματιδίων-β της πηγής και χρήση ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας στην θέση του πραγματικού ανιχνευτή Ge, δεν δίνει την πληροφορία του είδους των σωματιδίων τα οποία φτάνουν στον ανιχνευτή και αποδίδουν την ενέργειά τους σε αυτόν, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Εδώ όμως η προσομοίωση επιβεβαιώνει την μεγάλη της χρησιμότητα. Με την χρήση του κατάλληλου εργαλείου μπορεί να αποκαλυφθεί ποιο είναι το σωματίδιο που κάθε φορά καταγράφει ο ανιχνευτής. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (Energy Deposition Detector - ENDDDET) από ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (Impact Detector - IMPDET).

5.2 Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (Impact Detector)

Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης (Impact Detector - IMPDET), όπως έχει προαναφερθεί, καταγράφει την ενεργειακή κατανομή των σωματιδίων που εισέρχονται στο εσωτερικό του.

Τονίζεται ότι δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει αλληλεπίδραση του σωματιδίου με το ενεργό υλικό του ανιχνευτή, αλλά απλά και μόνο διέλευση από αυτόν. Σε αντίθεση με τον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας εδώ ένα σωματίδιο δεν είναι δυνατό να διέλθει από τον ανιχνευτή και να μην καταγραφεί.

Η επιλογή του σωματιδίου που καταγράφεται γίνεται στο αρχείο εισόδου *.in, μέσω της παραμέτρου IDKPAR. Από τη στιγμή που το σωματίδιο θα καταγραφεί ο ανιχνευτής, μέσω της παραμέτρου IPSF, προσφέρει δύο επιλογές. Για $IPSF = 1$ το σωματίδιο συνεχίζει κανονικά την πορεία του ενώ για $IPSF = -1$ η προσομοίωση του σωματιδίου σταματάει μόλις καταγραφεί.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε $IPSF = -1$ για επίσπευση της διαδικασίας προσομοίωσης, καθώς το μόνο που ενδιέφερε ήταν το κατά πόσον εισέρχονται στον ανιχνευτή σωματίδια-β (ή ηλεκτρόνια, λόγω κάποιας αλληλεπίδρασης των φωτονίων εκτός του ανιχνευτή). Με βάση, τόσο αυτή την επιλογή όσο και τη γενικότερη διαφορά στη λειτουργία των δύο ανιχνευτών, αναμένεται να προκύψουν μόνο ποιοτικά αποτελέσματα και προφανώς το φάσμα που θα συλλέγεται δεν θα πρέπει να συγκρίνεται με το φάσμα του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

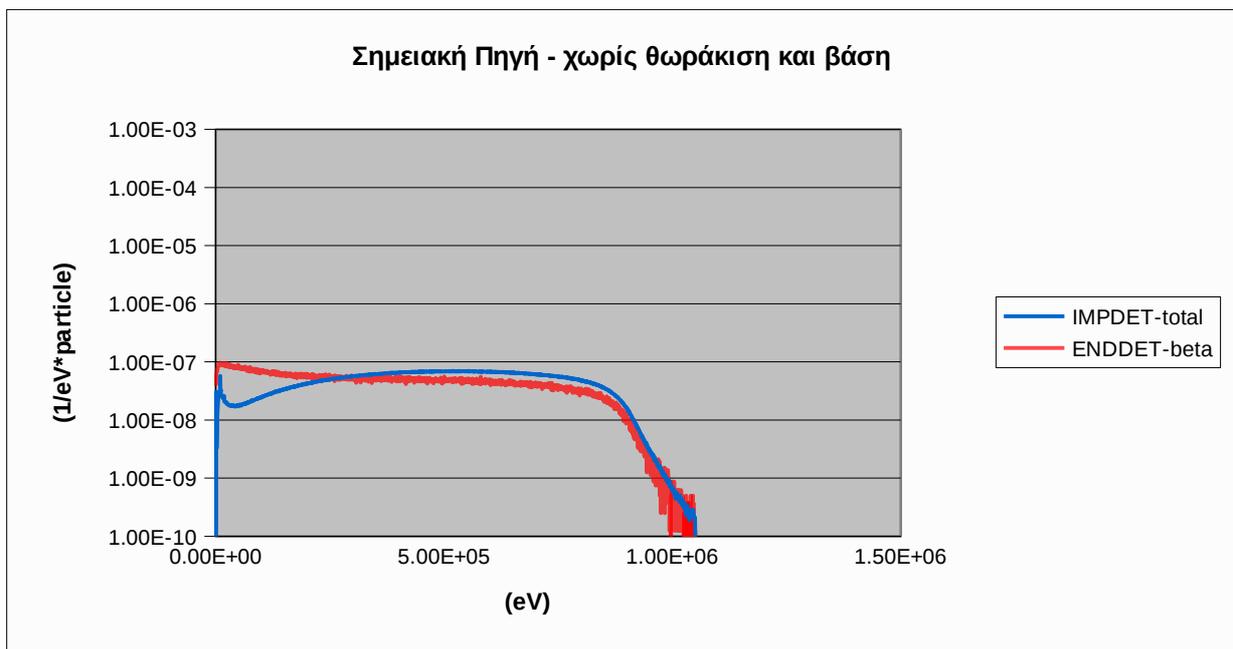
Ο στόχος της διερεύνησης αυτής ήταν, όχι απλά να διαπιστωθεί το κατά πόσον το συνεχές φάσμα που οφείλεται στα σωματίδια-β είναι πράγματι «φάσμα πέδησης», αλλά και να διαπιστωθεί ποια τμήματα της ανιχνευτικής διάταξης είναι εκείνα που συνεισφέρουν περισσότερο στην καταγραφόμενη ακτινοβολία πέδησης.

5.3 Μελέτη του φάσματος πέδησης

5.3.1 Προκαταρκτικές προσομοιώσεις

Σε πρώτη φάση έπρεπε να ελεγχθεί το κατά πόσον η καταγραφή τόσο των σωματιδίων-β όσο και των φωτονίων πέδησης ήταν πραγματικά εφικτή και γινόταν με ικανοποιητικό τρόπο και καλή στατιστική. Αρχικά αποφασίσθηκε να γίνει η σύγκριση των φασμάτων που λαμβάνονται από έναν ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (ENDDET) και έναν ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (IMPDET), οι οποίοι γεωμετρικά ταυτίζονται με τον πραγματικό ανιχνευτή, στην περίπτωση που η πρωτογενής ακτινοβολία είναι το συνεχές φάσμα της ακτινοβολίας-β που εκπέμπεται από το ^{40}K . Το φάσμα του IMPDET προκύπτει από την επαλληλία των επί μέρους φασμάτων για τα σωματίδια-β και τα φωτόνια που εισέρχονται στον ανιχνευτή. Στις προκαταρκτικές αυτές προσομοιώσεις επιλέχθηκε να αφαιρεθεί, τόσο η θωράκιση της διάταξης, όσο και το προστατευτικό κάλυμμα του ανιχνευτή, πάχους 4mm από πολυστυρένιο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα υλικά τα οποία μπορούν να προσθέσουν δευτερογενή ακτινοβολία, ή να μειώσουν την πρωτογενή. Τα φάσματα των δύο ανιχνευτών παρατίθενται στο σχήμα 5.1. Όπως παρατηρείται, τα δύο φάσματα είναι παρόμοια, με

μέγιστα περί τα 1MeV, όσο είναι και το μέγιστο του φάσματος της ακτινοβολίας-β του ^{40}K . Πρέπει επιπλέον να παρατηρηθεί ότι το φάσμα των φωτονίων που καταγράφονται από τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης υπερτερεί ελαφρώς του φάσματος του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, για τις σχετικά υψηλές ενέργειες. Αυτό είναι φυσικό, καθώς ορισμένα σωματίδια ή φωτόνια τα οποία εισέρχονται στον ανιχνευτή είναι δυνατόν να μην αφήνουν όλη την ενέργειά τους σε αυτόν. Αντίστοιχα, το φάσμα του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας υπερτερεί αισθητά στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, κάτι που θα πρέπει να αποδίδεται στον ίδιο λόγο, καθώς σωματίδια ή φωτόνια υψηλής ενέργειας που αποδίδουν στον ανιχνευτή ένα μόνο ποσοστό της ενέργειάς τους, καταγράφονται στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.

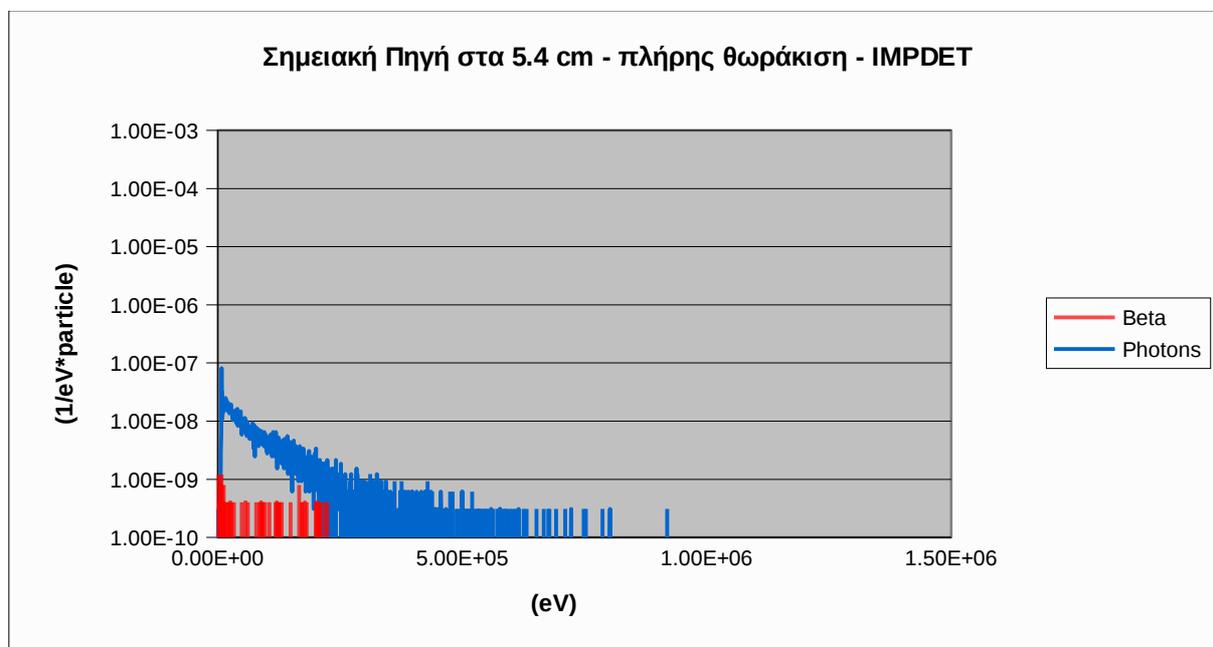


Σχήμα 5.1: Συγκριτικό διάγραμμα φασμάτων που συλλέγονται με τους ανιχνευτές ENDDDET και IMPDET για πρωτογενή ακτινοβολία-β από σημειακή πηγή, χωρίς τη θωράκιση και το κάλυμμα από πολυστυρένιο

5.3.2 Προσομοίωση της ολοκληρωμένης γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης

Προκειμένου να διαπιστωθεί ποιες από τις συνιστώσες της ανιχνευτικής διάταξης συνεισφέρουν στην ακτινοβολία της πέδησης που ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή, έγινε βήμα προς βήμα προσέγγιση, όπου αφαιρούνταν κατά την προσομοίωση διαδοχικά διάφορες συνιστώσες της ανιχνευτικής διάταξης, με εξαίρεση φυσικά τον ίδιο τον ανιχνευτή. Σε κάθε περίπτωση κατά την προσομοίωση χρησιμοποιείται ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης για την καταγραφή των σωματιδίων-β και των φωτονίων (ακτίνων-X λόγω πέδησης) που εισέρχονται στον ανιχνευτή. Στη σειρά αυτή

προσομοιώσεων, αρχικά προσομοιώθηκε η πλήρης διάταξη, που είχε προσομοιωθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η σημειακή πηγή σε απόσταση 5.4 cm από το κάλυμμα πολυστυρενίου και η θωράκιση όπως και όλα τα στοιχεία της ανιχνευτικής διάταξης είναι στη θέση τους. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων τα φωτόνια αποτελούν το σύνολο του φάσματος. Τα ηλεκτρόνια είναι πρακτικά μηδενικά.



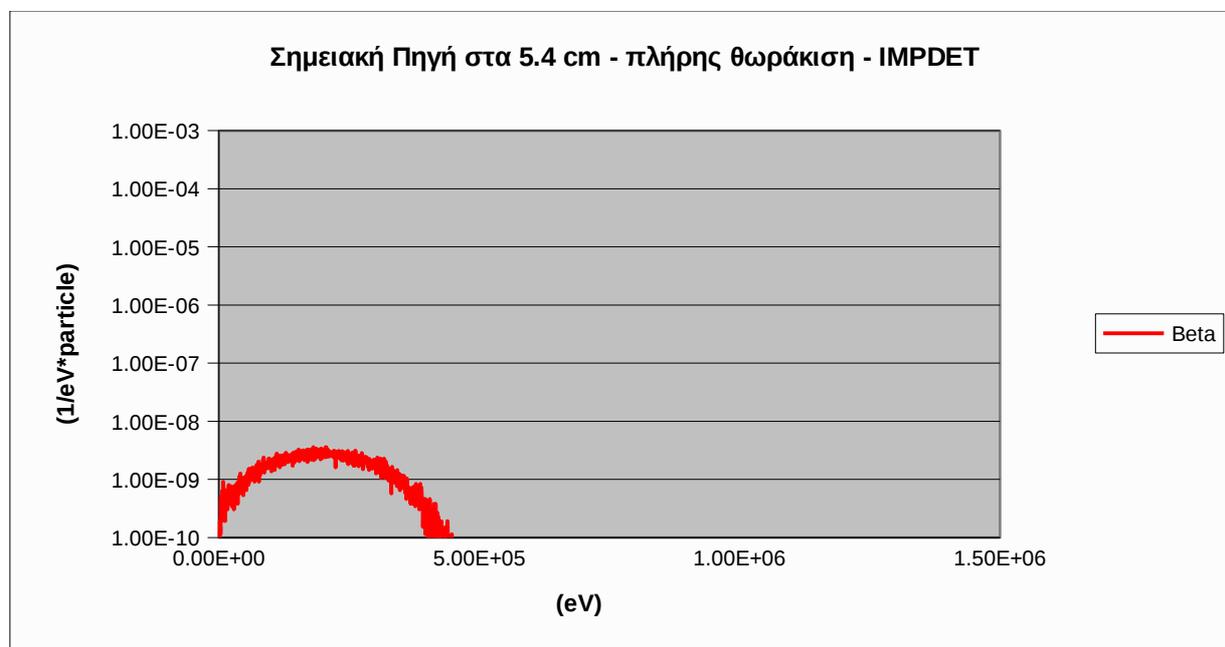
Σχήμα 5.2: Φάσμα IMPDET για σημειακή πηγή στα 5.4 cm με θωράκιση για σωματίδια β και γ

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, δίνεται άμεσα η απάντηση ότι τουλάχιστον για την περίπτωση της ολοκληρωμένης γεωμετρίας, το συνεχές φάσμα το οποίο καταγράφεται στον ανιχνευτή και το οποίο οφείλεται στην ακτινοβολία-β είναι πράγματι φάσμα φωτονίων, δηλαδή πρόκειται πράγματι για το φάσμα λόγω ακτινοβολίας πέδησης. Αναφορικά με τη μέγιστη ενέργεια, διαπιστώνεται ότι αυτή είναι πολύ χαμηλότερη (~400keV) από τη μέγιστη ενέργεια των σωματιδίων του φάσματος. Αυτό δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη, καθώς, η μέγιστη ενέργεια πέδησης αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια που χάνει ένα σωματίδιο-β το οποίο αλληλεπιδρά, και μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική ενέργεια του σωματιδίου.

5.3.3 Διερεύνηση του βαθμού συμμετοχής των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης στη δημιουργία της ακτινοβολίας πέδησης

Από τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου προκύπτει ότι στην περίπτωση της ολοκληρωμένης διάταξης, στον ανιχνευτή δεν φτάνουν παρά απειροελάχιστα σωματίδια-β. Ένα ερώτημα που θα πρέπει να απαντηθεί είναι ποια είναι η συνιστώσα της διάταξης στην οποία γίνεται

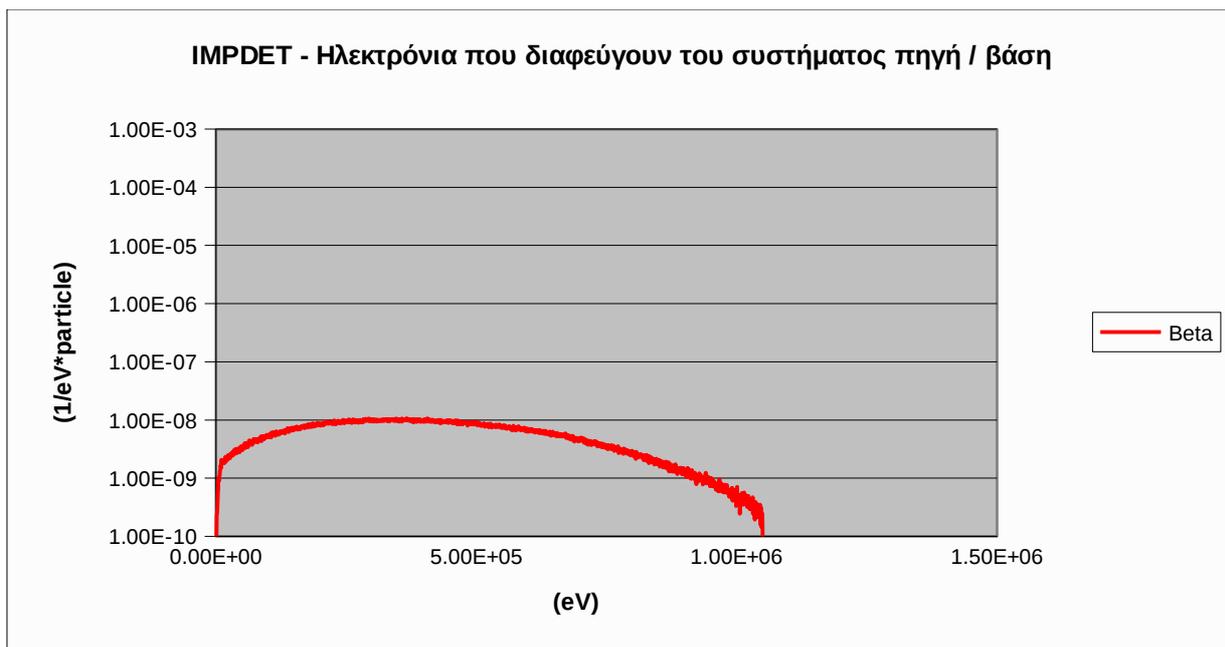
κυρίως η πέδηση των σωματιδίων-β. Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι η προηγούμενη προσομοίωση δεν έδωσε παρά τα σωματίδια-β εκείνα που εισέρχονται στο ενεργό υλικό του ανιχνευτή, τα οποία όμως δεν ταυτίζονται απαραίτητα με τα διαθέσιμα προς πέδηση σωματίδια-β. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν να εξέρχονται από το κάλυμμα του ανιχνευτή σωματίδια-β, τα οποία όμως δεν καταφέρνουν να φτάσουν στον ανιχνευτή και αλληλεπιδρούν έξω από αυτόν με παραγωγή ακτινοβολία πέδησης. Συνεπώς, ήταν σκόπιμο στο σημείο αυτό να διαπιστωθεί κατά πόσον υπάρχουν σωματίδια-β τα οποία διέρχονται από το κάλυμμα του πολυστυρενίου. Για αυτό το σκοπό επιλέχθηκε να γίνει χρήση ενός ανιχνευτή αλληλεπίδρασης, ακριβώς κάτω από το κάλυμμα πολυστυρενίου. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής φαίνεται στο σχήμα 5.3 στη συνέχεια.



Σχήμα 5.3: Φάσμα σωματιδίων-β τα οποία διέρχονται από το κάλυμμα πολυστυρενίου του ανιχνευτή στην περίπτωση της ολοκληρωμένης ανιχνευτικής διάταξης

Όπως προκύπτει από το παραπάνω γράφημα, υπάρχουν σε πραγματικές συνθήκες σωματίδια-β τα οποία διέρχονται από το κάλυμμα πολυστυρενίου με κατεύθυνση τον ανιχνευτή. Προφανώς, όπως προκύπτει και από το σχήμα 5.1, τα σωματίδια-β αυτά είναι και λιγότερα και με χαμηλότερη ενέργεια από αυτά τα οποία φτάνουν στον ανιχνευτή χωρίς το κάλυμμα. Εξυπακούεται ότι στην περίπτωση που η πηγή εκπέμπει σωματίδια-β υψηλότερης ενέργειας, θα είναι και περισσότερα αυτά τα οποία θα διέλθουν από το κάλυμμα του ανιχνευτή.

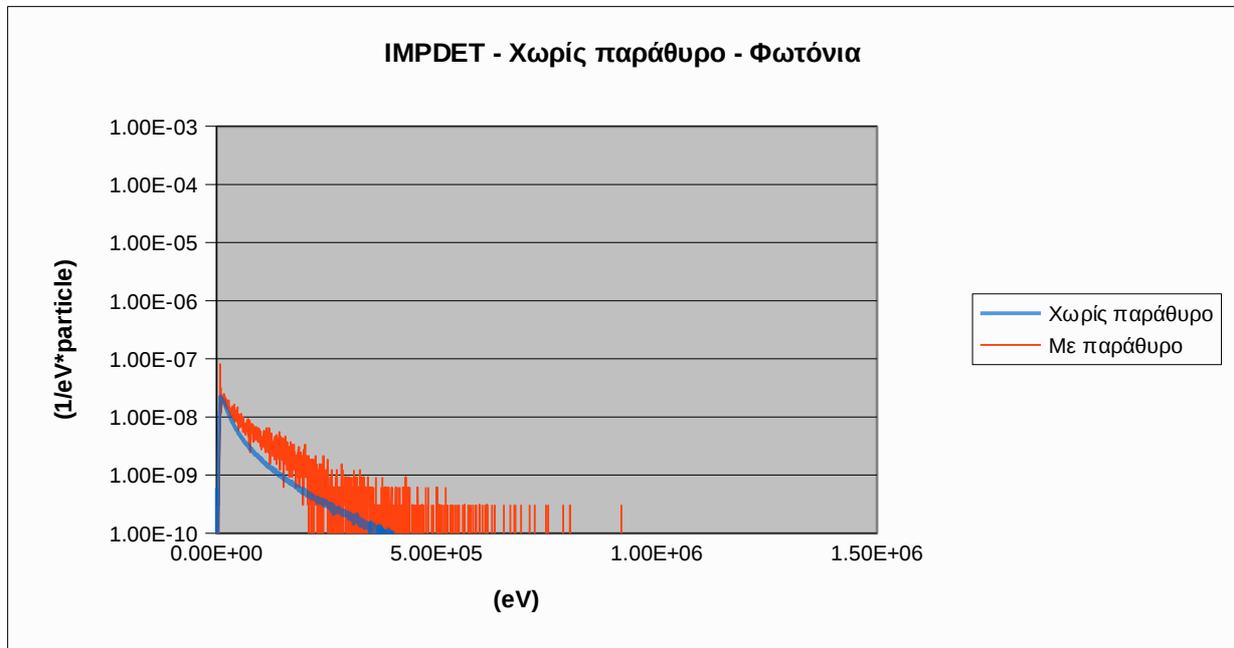
Ένα άλλο ερώτημα που φυσιολογικά προκύπτει και πρέπει να απαντηθεί είναι το εξής: σε πραγματικές πειραματικές συνθήκες, η πηγή συχνά είναι τοποθετημένη πάνω σε βάση από πλαστικό υλικό (συνήθως Plexiglas). Ποια είναι η επίδραση αυτής της βάσης στο πλήθος των σωματιδίων-β που φτάνουν στον ανιχνευτή; Ένα πρώτο συμπέρασμα μπορεί να προκύψει από το διάγραμμα του σχήματος 5.4, στο οποίο παρουσιάζονται τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την πηγή όγκου όταν είναι τοποθετημένη πάνω στην βάση της (πριν αλληλεπιδράσουν με το πολυστυρένιο).



Σχήμα 5.4: Σωματίδια-β τα οποία ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης IMPDET κάτω από την πλαστική βάση στήριξης πηγής όγκου

Με διαθέσιμο το φάσμα των σωματιδίων-β τα οποία εξέρχονται από τη βάση μίας πηγής όγκου, θα μπορούσε, για λόγους επιτάχυνσης της διερεύνησης της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων, να χρησιμοποιηθεί αυτό το φάσμα ως είσοδος στο αρχείο δεδομένων σε κάθε μελλοντική προσομοίωση, έτσι ώστε να μην επαναλαμβάνεται κάθε φορά η προσομοίωση της παραγωγής και αλληλεπίδρασης των σωματιδίων-β μέσα στην πηγή. Αυτό θα είχε ως συνέπεια μεγάλη οικονομία στη διάρκεια της προσομοίωσης. Όμως η διαδικασία επεξεργασίας και εισαγωγής αυτού του φάσματος ως είσοδος στο αρχείο δεδομένων αποδείχτηκε δύσκολη και χρονοβόρα για το επίπεδο της ΜΕ Έτσι επιλέχθηκε να γίνει ολοκληρωμένη προσομοίωση μόνο για ένα περιορισμένο πλήθος σεναρίων. Αρχικά έγινε προσομοίωση για την ολοκληρωμένη διάταξη, με εξαίρεση το παράθυρο από ανθρακονήματα. Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 5.5, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται

το παράθυρο από ανθρακονήματα ανιχνεύεται μεγαλύτερο πλήθος φωτονίων στον ανιχνευτή, κάτι που αποδεικνύει ότι ένα ποσοστό των σωματιδίων-β της πηγής αλληλεπιδρά με το παράθυρο από ανθρακονήματα, παράγοντας ακτινοβολία πέδησης που ανιχνεύεται στον ανιχνευτή. Πράγματι λοιπόν, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας πέδησης παράγεται στο παράθυρο από ανθρακονήματα.

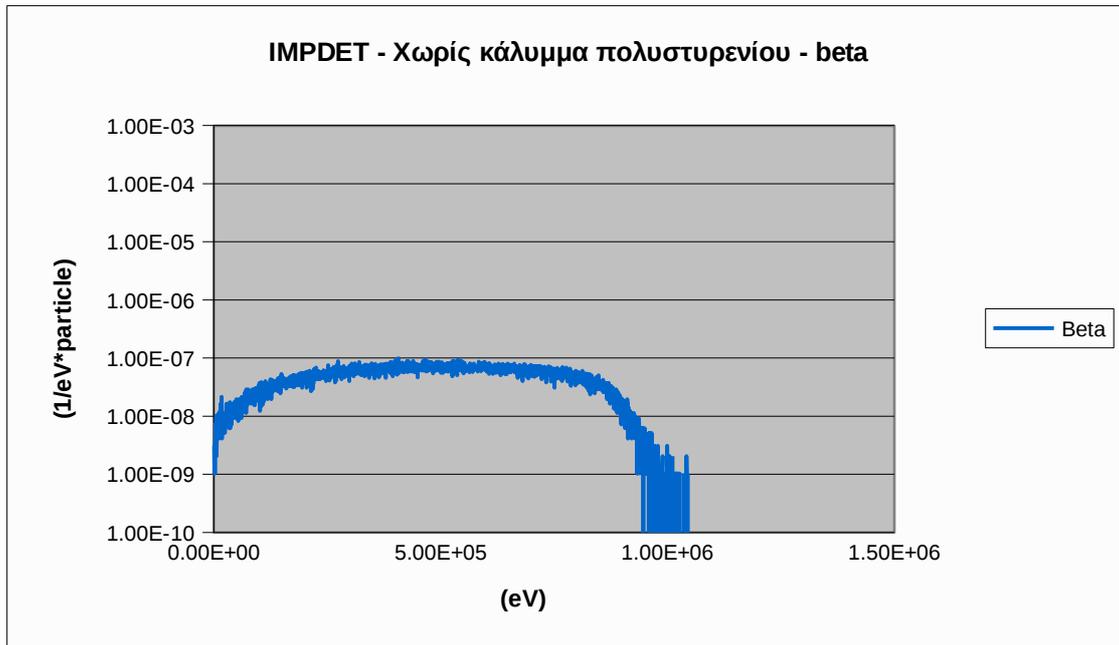


Σχήμα 5.5: Φάσμα πέδησης που ανιχνεύεται με ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (IMPDET) στον ανιχνευτή XtRa, με και χωρίς το παράθυρο από ανθρακονήματα

5.3.4 Φάσμα σωματιδίων-β χωρίς το κάλυμμα από πολυστυρένιο

Καθώς η διαδικασία της προσομοίωσης της ολοκληρωμένης διάταξης αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρονοβόρα, με τη διάρκεια μίας προσομοίωσης να φτάνει τις αρκετές ημέρες, ακολουθήθηκε ένας άλλος δρόμος προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία της διερεύνησης. Συγκεκριμένα, αποφασίστηκε η αφαίρεση του καλύμματος από πολυστυρένιο σε όλες τις επόμενες προσομοιώσεις, καθώς – όπως αποδείχθηκε σε προηγούμενη παράγραφο – το κάλυμμα αυτό σταματάει πολύ μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων-β της πηγής. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι, πέραν του μεγαλύτερου πλήθους των σωματιδίων-β τα οποία φτάνουν τώρα στον ανιχνευτή, και η ενεργειακή κατανομή τους δεν είναι η ίδια, με τη μέγιστη ενέργεια του φάσματος να είναι υψηλότερη. Παρόλα αυτά, επειδή σε αυτή τη φάση ενδιαφέρει η ποιοτική διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων των υπολοίπων συνιστωσών της διάταξης, κρίθηκε ότι η διαφορά στο ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων-β που φτάνουν στον ανιχνευτή δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλης σημασίας.

Στο σχήμα 5.6 διακρίνεται το φάσμα των σωματιδίων-β τα οποία κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή, μετά την αφαίρεση του καλύμματος από πολυστυρένιο.

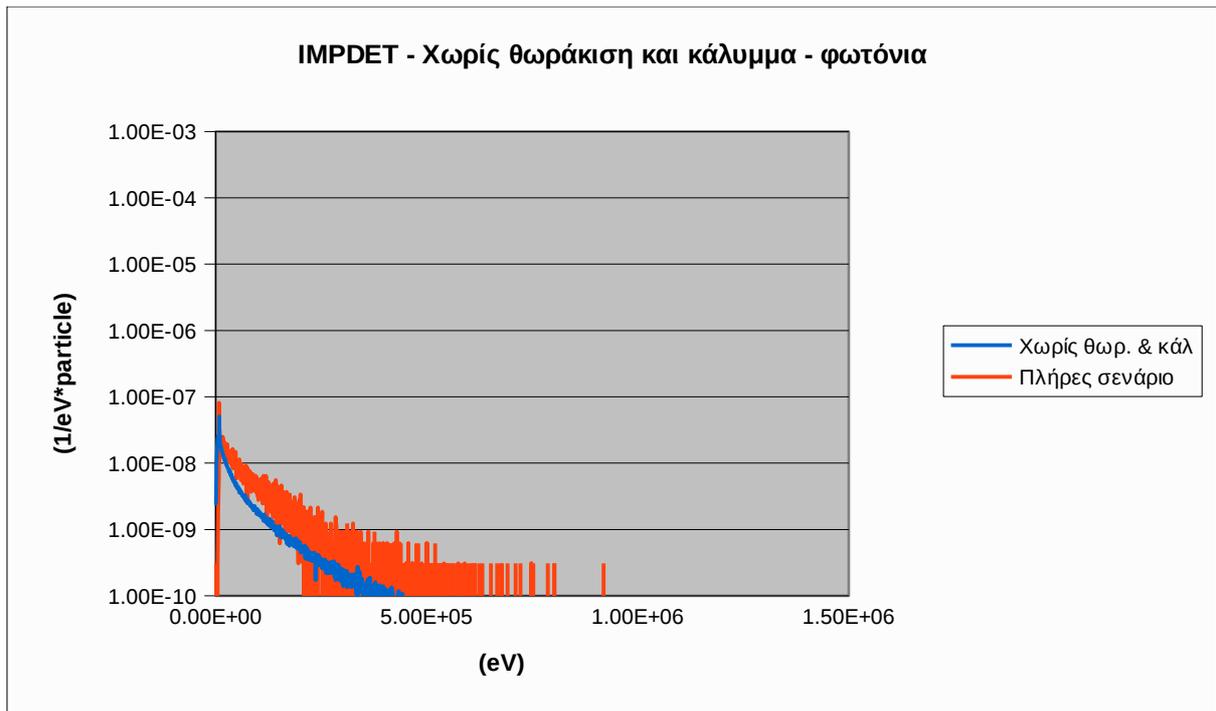


Σχήμα 5.6: Φάσμα σωματιδίων-β που κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή (ανιχνεύονται με IMPDET) όταν στη διάταξη δεν υπάρχει κάλυμμα πολυστυρενίου

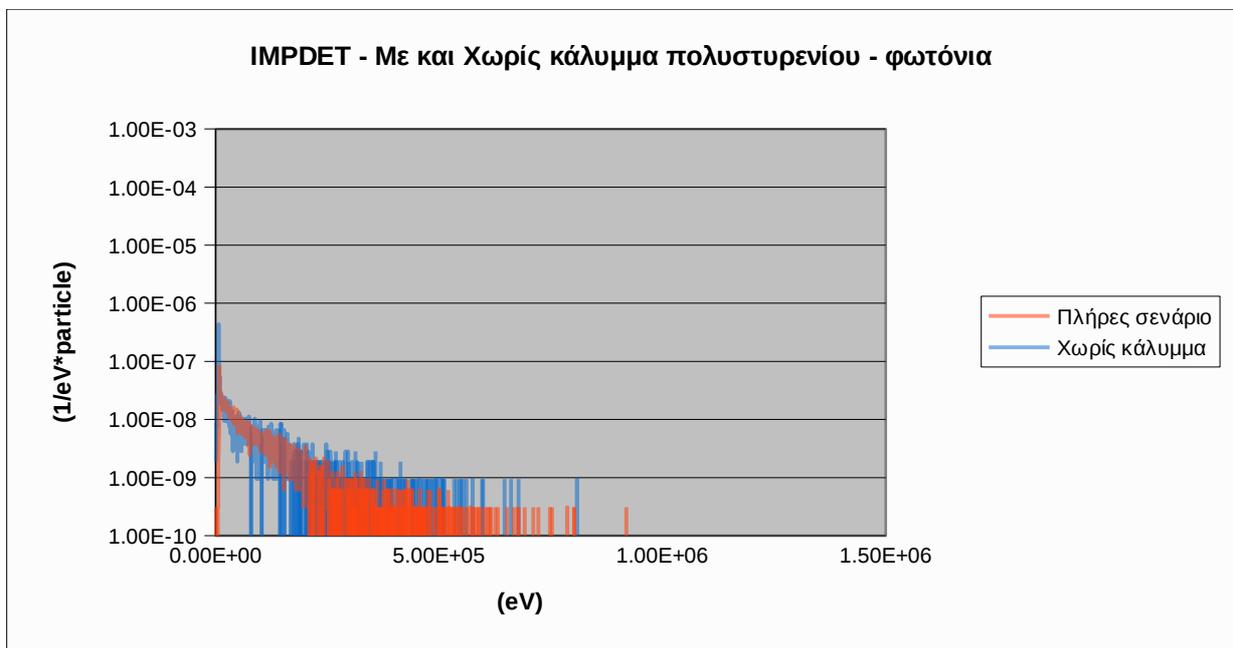
Όπως φαίνεται το κάλυμμα από πολυστυρένιο είναι το σώμα που εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να εισέλθουν στον ανιχνευτή και να ανιχνευτούν ως τέτοια. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7, η χρήση ή όχι του καλύμματος από πολυστυρένιο δεν έχει ουσιαστική επίδραση στο φάσμα των φωτονίων πέδησης που φτάνουν στον ανιχνευτή, συνεπώς, το κάλυμμα πολυστυρενίου δεν συνεισφέρει στην πέδηση (όπως είναι φυσικό πρόκειται για ένα υλικό πολύ χαμηλού Z).

5.3.5 Φάσμα σωματιδίων-β χωρίς θωράκιση και κάλυμμα από πολυστυρένιο

Το επόμενο βήμα, μετά την αφαίρεση του καλύμματος πολυστυρενίου είναι η μελέτη της επίδρασης της θωράκισης. Αυτό γίνεται με αφαίρεση της θωράκισης από τη γεωμετρία της διάταξης. Η θωράκιση, καθώς αποτελείται από υλικά υψηλού Z, αναμένεται να έχει σημαντική συνεισφορά στη δημιουργία του συνεχούς υποστρώματος λόγω πέδησης. Αυτό επιβεβαιώνεται από το σχήμα 5.8. Πράγματι, αποδεικνύεται η συνεισφορά της θωράκισης, αλλά επίσης αποδεικνύεται ότι αυτή δεν είναι η μοναδική, και ενδεχομένως – ανάλογα με τη γεωμετρία – δεν είναι και η πλέον σημαντική.



Σχήμα 5.7: IMPDET - Χωρίς θωράκιση και βάση και σύγκριση με πλήρες σενάριο - φωτόνια

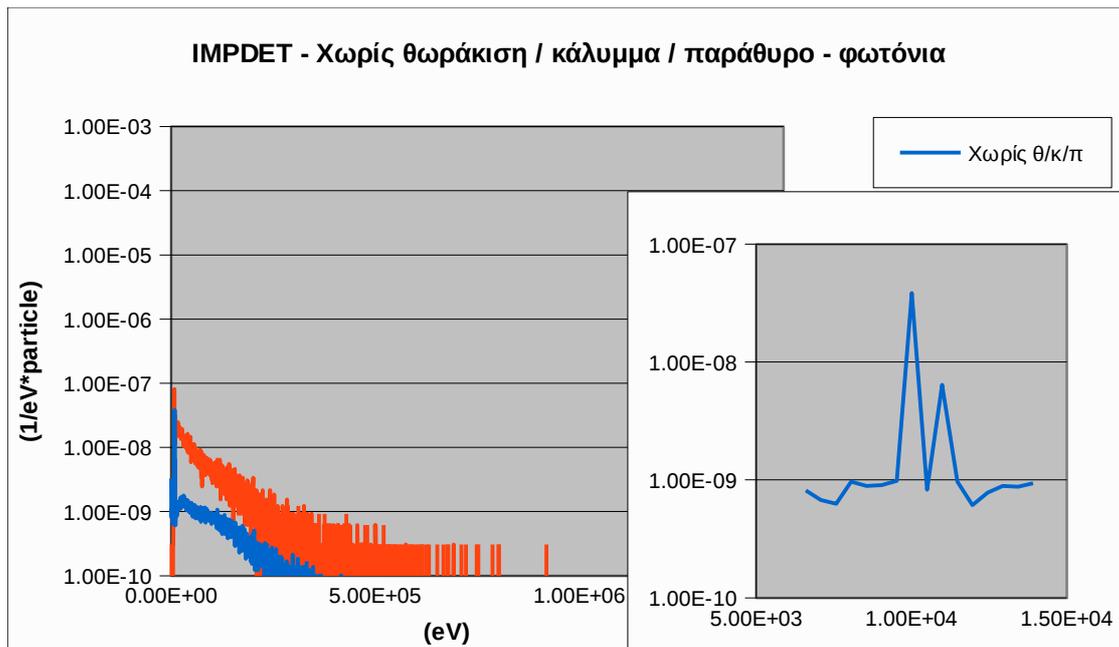


Σχήμα 5.8: IMPDET - Χωρίς θωράκιση και βάση και σύγκριση με πλήρες σενάριο - φωτόνια

5.3.6 Φάσμα σωματιδίων-β χωρίς κάλυμμα, θωράκιση και παράθυρο ανθρακονημάτων

Στο επόμενο βήμα της διερεύνησης, ακολουθεί προσομοίωση κατά την οποία έχει αφαιρεθεί και το παράθυρο από ανθρακονήματα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στο σχήμα

5.9 και είναι πολύ εντυπωσιακά. Όπως προκύπτει, ένα μεγάλο μέρος της πέδησης λαμβάνει χώρα στο παράθυρο από ανθρακονήματα. Το αποτέλεσμα δεν ήταν αναμενόμενο καθώς το πάχος του παραθύρου είναι μόνο 0.05cm! Σε λεπτομέρεια του φάσματος, παρατηρούνται δύο φωτοκορυφές στις ενέργειες ~ 10 keV και ~ 11 keV. Πρόκειται για τις χαρακτηριστικές ακτίνες-X του γερμανίου (K_{α} @ 9.9 keV και K_{β} @ 11.1 keV). Οι ακτίνες-X αυτές παράγονται στην ανενεργό περιοχή του ανιχνευτή (dead layer) που βρίσκεται αμέσως κάτω από το παράθυρο από ανθρακονήματα.

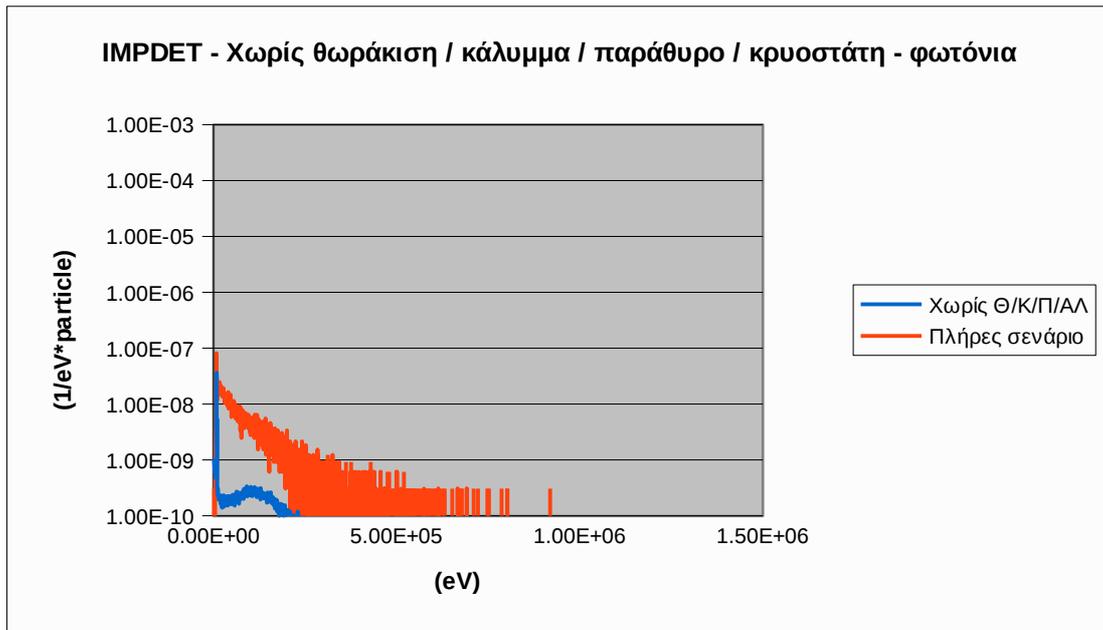


Σχήμα 5.9: Φάσμα φωτονίων που ανιχνεύονται στην περίπτωση της διάταξης χωρίς θωράκιση, κάλυμμα και παράθυρο από ανθρακονήματα και σύγκριση με πλήρες σενάριο (στη λεπτομέρεια οι χαρακτηριστικές του γερμανίου)

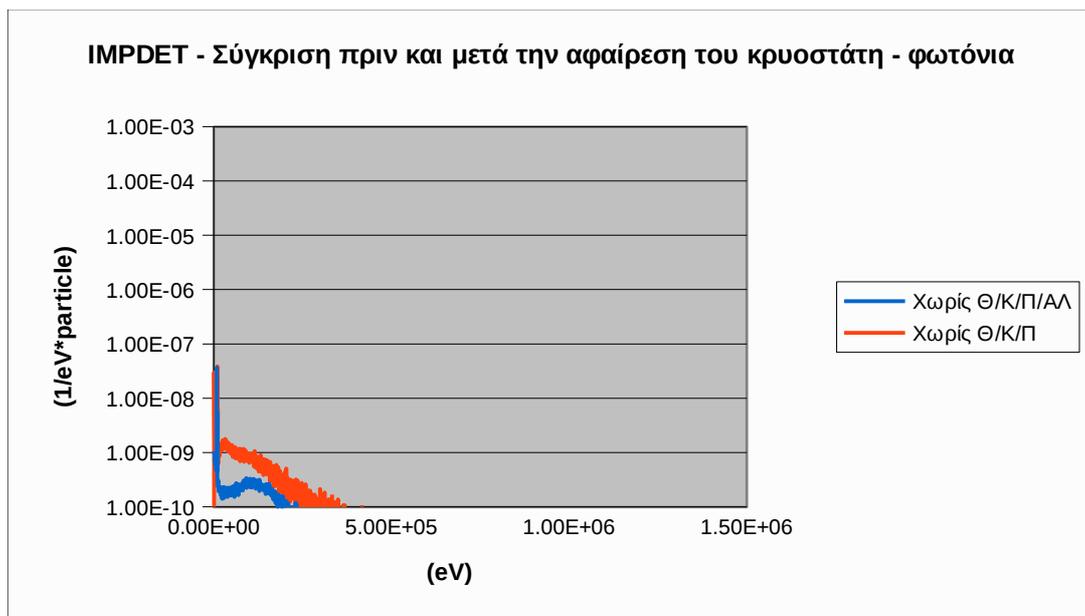
5.3.7 Φάσμα χωρίς κάλυμμα πολυστυρενίου, θωράκιση, παράθυρο και κρουστάτη αλουμινίου

Μία από τις σημαντικότερες συνιστώσες της διάταξης είναι ο κρουστάτης από Al ο οποίος περιβάλλει τον ανιχνευτή. Προφανώς σε πραγματικές συνθήκες δεν είναι δυνατό να αφαιρεθεί. Παρόλα αυτά, η επίδρασή του μπορεί να μελετηθεί μέσω της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται από στα διαγράμματα των σχημάτων 5.10 και 5.11, ο κρουστάτης αποτελεί μία σημαντική, ίσως τη σημαντικότερη συνιστώσα για τη δημιουργία του συνεχούς φάσματος πέδησης. Αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς πρόκειται για μεταλλική κατασκευή πάνω στην οποία υπάρχει αξιόλογη πιθανότητα πέδησης των σωματιδίων-β και η οποία βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να εκτίθεται στα σωματίδια-β της πηγής. Πρέπει πάντως στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι ο κρουστάτης,

μπορεί να συνεισφέρει και με άλλο τρόπο στην αύξηση του συνεχούς υποστρώματος. Καθώς περιβάλλει τον ανιχνευτή σχεδόν εξ ολοκλήρου, είναι δυνατόν, φωτόνια τα οποία διαφεύγουν από τον ανιχνευτή – μη εξαιρουμένων των φωτονίων πέδησης – να σκεδάζονται στον κρουστάτη και να ανιχνεύονται τελικά από αυτόν. Αυτό σημαίνει ότι τελικά το συνεχές φάσμα φωτονίων που καταγράφεται στα σχήματα 5.10 & 5.11, αλλά και σε προηγούμενα αντίστοιχα φάσματα, να οφείλεται σε πρωτογενώς παραχθείσα ακτινοβολία λόγω πέδησης, αλλά και ακτινοβολία πέδησης, μετά από σκέδαση σε περιβάλλοντα υλικά, κυρίως τον κρουστάτη.



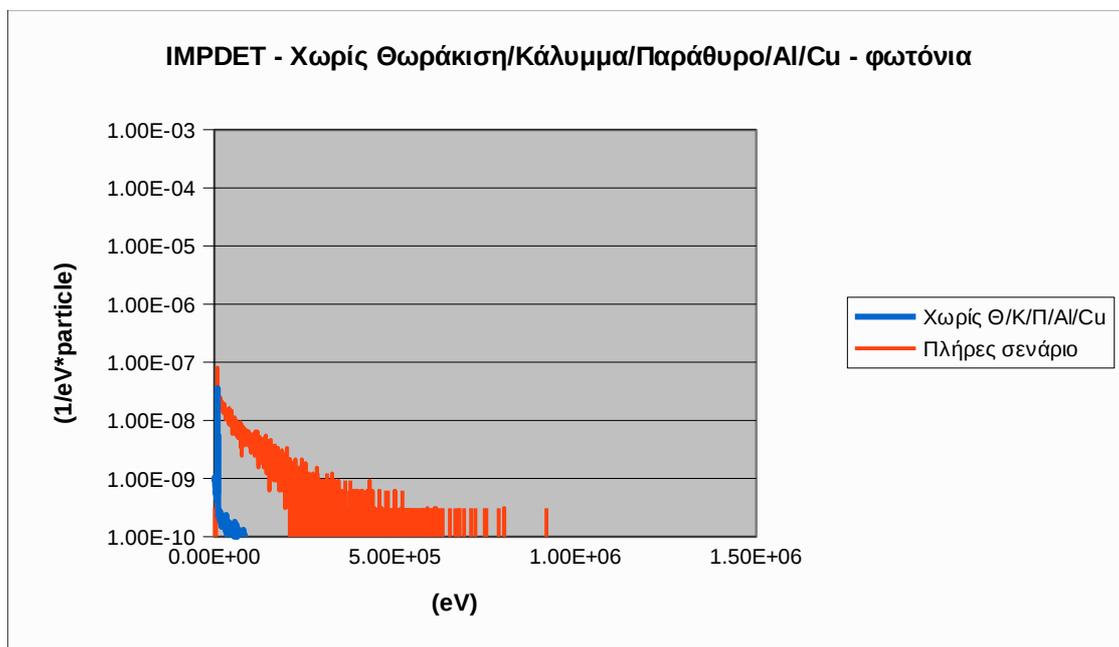
Σχήμα 5.10: Φάσμα φωτονίων που φτάνουν στον ανιχνευτή χωρίς θωράκιση, κάλυμμα κρουστάτη, παράθυρο από ανθρακονήματα και σύγκριση με την ολοκληρωμένη διάταξη



Σχήμα 5.11: Επίδραση του κρουστάτη στο φάσμα φωτονίων που φτάνει στον ανιχνευτή

5.3.8 Φάσμα χωρίς κάλυμμα πολυστυρενίου, θωράκιση. παράθυρο από ανθρακονήματα, κρουστάτη αλουμινίου και δακτύλιο στήριξης χαλκού

Το τελευταίο υλικό το οποίο θα ελεγχθεί είναι ο δακτύλιος στήριξης από χαλκό που περιβάλλει τον ανιχνευτή και τον συγκρατεί σταθερά σε κατακόρυφη θέση. Λόγω της θέσης του δακτυλίου αυτού είναι αρκετά δύσκολο να εκτεθεί άμεσα σε σωματίδια-β της πηγής, αν και όχι αδύνατο. Στο σχήμα 5.12 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπου έχει αφαιρεθεί και ο δακτύλιος στήριξης χαλκού. Συγκρίνοντας το γράφημα αυτό με το γράφημα του σχήματος 5.10 διαπιστώνεται πράγματι ότι υπάρχει επίδραση και του δακτυλίου χαλκού. Καθώς το συνεχές υπόστρωμα μειώνεται ακόμα περισσότερο με την αφαίρεση του. Πάντως, στο σημείο αυτό θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ο προβληματισμός που έλαβε χώρα στην προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, αφού ο δακτύλιος από χαλκό σε ελάχιστο βαθμό εκτίθεται στα σωματίδια-β, αλλά παρόλα αυτά διαπιστώνεται η επίδρασή του στο συνεχές υπόστρωμα, είναι εύλογο να υποθέσει κανείς ότι η συνεισφορά του έγκειται στη σκέδαση φωτονιακής ακτινοβολίας η οποία θα διέφευγε από τον ανιχνευτή και η οποία λόγω της σκέδασης τελικά ανιχνεύεται από αυτόν οδηγώντας σε αύξηση του συνεχούς υποστρώματος.



Σχήμα 5.12: Φάσμα φωτονίων που φτάνουν στον ανιχνευτή χωρίς θωράκιση, κάλυμμα, κρουστάτη, παράθυρο από ανθρακονήματα και δακτύλιο χαλκού σε σύγκριση με την ολοκληρωμένη διάταξη

Όπως προκύπτει από το σχήμα 5.12, το συνεχές φάσμα έχει σχεδόν εξαφανισθεί μετά την αφαίρεση όλων των συνιστωσών της διάταξης. Το ελάχιστο τμήμα του συνεχούς φάσματος, το οποίο

παραμένει, οφείλεται στο ανενεργό τμήμα του ανιχνευτή (dead layer) πάχους μερικών μm και εξαφανίζεται όταν αφαιρεθεί και το στρώμα αυτό.

5.4 Συμπεράσματα

Όπως έχει γίνει φανερό από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του κεφαλαίου αυτού, οι συνιστώσες που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη διαμόρφωση του συνεχούς φάσματος είναι το παράθυρο από ανθρακονήματα του ανιχνευτή, ο κρυστάτης από Al και ο χάλκινος δακτύλιος στήριξης του ανιχνευτή μέσα στον κρυστάτη. Πρόκειται για συνιστώσες της διάταξης οι οποίες δεν είναι δυνατόν να τροποποιηθούν από το χρήστη του ανιχνευτή. Αυτό που έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθεί είναι ότι οι συνιστώσες αυτές – κυρίως ο κρυστάτης και ο δακτύλιος στήριξης – συνεισφέρουν όχι μόνον λόγω της παραγωγής της ακτινοβολίας πέδησης, αλλά και λόγω της σκέδασης της ακτινοβολίας πέδησης, η οποία διαφεύγει του ανιχνευτή. Ο δεύτερος αυτός μηχανισμός φαίνεται να είναι και ο κυρίαρχος στην περίπτωση του δακτυλίου από χαλκό. Εύλογα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ίδιο θα συμβαίνει για οποιαδήποτε φωτονιακή ακτινοβολία φτάνει στον ανιχνευτή και όχι μόνο για την ακτινοβολία πέδησης. Όσον αφορά στο κάλυμμα του ανιχνευτή από πολυστυρένιο, φαίνεται ότι, ενώ μειώνει δραστικά το πλήθος των σωματιδίων- β που κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή, τελικά δεν φαίνεται να συνεισφέρει σημαντικά στη δημιουργία συνεχούς φάσματος πέδησης. Συνεπώς, προτείνεται ανεπιφύλακτα η συνεχής χρήση του, με εξαίρεση την περίπτωση που ενδιαφέρει η ανίχνευση φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση του καλύμματος στην εξασθένηση των φωτονίων και φυσικά να σταθμισθεί σε σχέση με την φυσική προστασία που παρέχει στον ανιχνευτή.

Όσον αφορά άλλες πηγές συνεχούς υποστρώματος, δεν θα πρέπει να παραβλέπεται η συνεισφορά της θωράκισης της διάταξης, η οποία άλλωστε είναι και η μοναδική συνιστώσα στην οποία θα μπορούσε να επιδράσει ο χρήστης, ενδεχομένως με αλλαγή της σχεδίασης ή χρήση άλλων υλικών ή και στρωμάτων υλικών, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη φίλτρων μεταξύ πηγής και ανιχνευτή.

Αυτό πάντως που αβίαστα προκύπτει ως συμπέρασμα, είναι ότι η προσομοίωση μπορεί να είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων μίας πολύπλοκης διάταξης, όπως είναι μία ανιχνευτική διάταξη γερμανίου και της επανασχεδίασης / βελτιστοποίησης της διάταξης ή συνιστωσών αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιασθούν συνοπτικά τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια και θα γίνουν ορισμένες προτάσεις για την επέκταση της εργασίας αυτής.

6.1 Συμπεράσματα

Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, μέσω σειράς προσομοιώσεων, στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας ΜΕ μπορεί να προκύψει μια σειρά συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο φάσμα ακτινοβολίας-γ που συλλέγεται από τον ανιχνευτή XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ, κατά την ανάλυση πηγής που περιέχει ^{40}K . Με τις πρώτες προσομοιώσεις, εξετάστηκαν πηγές όγκου και πιο συγκεκριμένα, κυλινδρικές πηγές διαφορετικού ύψους αλλά της ίδιας διατομής. Με αυτόν τον τρόπο διαπιστώθηκε η επίδραση που έχει στο φάσμα τόσο η γεωμετρία της πηγής, και πιο συγκεκριμένα το ύψος, όσο και το υλικό της.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής συνοψίζονται στα εξής:

- Η πιθανότητα καταγραφής φωτονίων στο φάσμα, η οποία συνδέεται άμεσα με την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης για την υπόψη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή, αυξάνεται όσο μειώνεται το ύψος της πηγής για σταθερή διατομή. Αυτό προκύπτει διότι τα φωτόνια που εκπέμπονται από το τμήμα της πηγής που είναι πιο μακριά από τον ανιχνευτή παρουσιάζουν μικρότερη πιθανότητα ανίχνευσης.
- Στην πηγή μικρότερου ύψους παρουσιάζεται αυξημένη και η ακτινοβολία λόγω πέδησης των σωματιδίων-β. Αυτό παρατηρείται διότι στην πηγή μικρότερου ύψους είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να διαφύγει ένα σωματίδιο-β, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να υποστεί πέδηση στη θωράκιση ή σε κάποια άλλη συνιστώσα της ανιχνευτικής διάταξης. Επιπλέον, επειδή η ίδια η πηγή όγκου μπορεί να λειτουργεί ως θωράκιση της ακτινοβολίας πέδησης που παράγεται στη θωράκιση της διάταξης και κατευθύνεται προς τον ανιχνευτή, η ακτινοβολία λόγω πέδησης των σωματιδίων-β παρουσιάζεται πιο έντονη στην περίπτωση της πηγής μικρότερου ύψους. Μάλιστα, όσο μικρότερη είναι σε όγκο η πηγή, τόσο το συνεχές φάσμα ακτινοβολίας, λόγω της πέδησης των σωματιδίων-β, τείνει στη μορφή του αντίστοιχου φάσματος σημειακής πηγής.

Αφού μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας της πηγής, πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων για γεωμετρία σημειακής πηγής, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης. Από τις προσομοιώσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι:

- Η πιθανότητα καταγραφής φωτονίων σε όλο το ενεργειακό εύρος του φάσματος αυξάνει όσο η πηγή προσεγγίζει τον ανιχνευτή, κάτι που ήταν φυσικά αναμενόμενο.
- Η παρουσία της αιχμής οπισθοσκέδασης των φωτονίων γίνεται εντονότερη όσο η πηγή απομακρύνεται από τον ανιχνευτή (και κατά συνέπεια πλησιάζει στη θωράκιση).
- Η αφαίρεση της θωράκισης οδηγεί τόσο σε εξαφάνιση της αιχμής οπισθοσκέδασης όσο και σε μεγάλη μείωση της αιχμής εξαύλωσης στα 0.511 MeV του φάσματος ακτινοβολίας-γ. Η αιχμή εξαύλωσης δεν εξαφανίζεται εντελώς, καθώς φωτόνια εξαύλωσης παράγονται και κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-γ με τις συνιστώσες του ανιχνευτή, κυρίως με τον κρυστάτη.
- Η ακτινοβολία λόγω της πέδησης σωματιδίων-β της πηγής είναι σαφώς εντονότερη υπό την παρουσία της θωράκισης, αλλά δεν οφείλεται αποκλειστικά σε αυτή.

Η διερεύνηση συνεχίστηκε με την προσθήκη φίλτρων πριν από το κάλυμμα πολυστυρενίου του ανιχνευτή και επενδύσεις στη θωράκιση με στόχο τη μείωση του συνεχούς φάσματος πέδησης, με τα εξής συμπεράσματα:

- Η χρήση πλαστικών φίλτρων και φίλτρων από φύλλο αλουμινίου έδειξε ότι ένα μικρό ποσοστό της πέδησης γίνεται πριν το φίλτρο.
- Η προσθήκη επιπλέον στρωμάτων για την εσωτερική επένδυση της θωράκισης δείχνει να έχει κάποιο αποτέλεσμα, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα πως ένα τμήμα της πέδησης πρέπει να λαμβάνει χώρα στη θωράκιση.
- Τα φίλτρα που τοποθετούνται πριν από το κάλυμμα του ανιχνευτή δεν φάνηκε να προκαλούν σημαντική διαφορά στο φάσμα της πέδησης. Αυτό βέβαια μπορεί να σημαίνει πως η πέδηση γίνεται σε κάποιο υλικό που βρίσκεται «μετά» τα φίλτρα αλλά μπορεί και να σημαίνει πως τα ίδια τα σωματίδια-β που κινούνται προς τον ανιχνευτή «φιλτράρονται» από κάποιο άλλο σώμα.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν με την χρήση του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (IMPDET), προέκυψε πως οι συνιστώσες που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη διαμόρφωση του συνεχούς φάσματος είναι το παράθυρο από ανθρακονήματα του ανιχνευτή, ο κρυστάτης από Al και ο χάλκινος δακτύλιος στήριξης του ανιχνευτή μέσα στον κρυστάτη. Σημειώνεται εδώ πως αυτές οι

συνιστώσες της διάταξης δεν μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη του ανιχνευτή. Αυτό που έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθεί είναι ότι οι συνιστώσες αυτές – κυρίως ο κρουστάτης και ο δακτύλιος στήριξης – συνεισφέρουν όχι μόνο λόγω της παραγωγής της ακτινοβολίας πέδησης, αλλά και λόγω της σκέδασης της ακτινοβολίας πέδησης, η οποία διαφεύγει του ανιχνευτή. Ο δεύτερος αυτός μηχανισμός (η σκέδαση της ακτινοβολίας πέδησης) φαίνεται να είναι και ο κυρίαρχος στην περίπτωση του δακτυλίου από χαλκό, ο οποίος λόγω γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή δεν είναι δυνατόν να προσβάλλεται άμεσα από τα σωματίδια-β της πηγής. Εύλογα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ίδιο θα συμβαίνει για οποιαδήποτε φωτονιακή ακτινοβολία φτάνει στον ανιχνευτή και όχι μόνο για την ακτινοβολία πέδησης. Όσον αφορά στο κάλυμμα του ανιχνευτή από πολυστυρένιο, φαίνεται ότι, ενώ μειώνει δραστικά το πλήθος των σωματιδίων-β που κατευθύνονται προς τον ανιχνευτή, τελικά δεν φαίνεται να συνεισφέρει σημαντικά στη δημιουργία συνεχούς φάσματος πέδησης. Συνεπώς, προτείνεται ανεπιφύλακτα η συνεχής χρήση του, με εξαίρεση την περίπτωση που ενδιαφέρει η ανίχνευση φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών, οπότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική λύση. Όσον αφορά άλλες πηγές συνεχούς υποστρώματος, δεν θα πρέπει να παραβλέπεται η συνεισφορά της θωράκισης της διάταξης, η οποία άλλωστε είναι και η μοναδική συνιστώσα στην οποία θα μπορούσε να επιδράσει ο χρήστης, ενδεχομένως με αλλαγή της σχεδίασης ή χρήση άλλων υλικών ή και στρωμάτων υλικών, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη φίλτρων μεταξύ πηγής και ανιχνευτή. Αυτό πάντως που αβίαστα προκύπτει ως συμπέρασμα, είναι ότι η προσομοίωση μπορεί να είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων μίας πολύπλοκης διάταξης, όπως είναι μία ανιχνευτική διάταξη γερμανίου και της επανασχεδίασης ή βελτιστοποίησης της διάταξης ή συνιστωσών αυτής.

6.2 Προτάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της παραμετρικής μελέτης και την διερεύνηση του φαινομένου της πέδησης.

Αρχικά, όσο αφορά την παραμετρική μελέτη των φασμάτων β και γ, η φυσική συνέχεια αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας θα περιελάμβανε τον έλεγχο των φασμάτων με περισσότερα φίλτρα αλλά και επενδύσεις της θωράκισης από άλλα υλικά και άλλες διαστάσεις με στόχο το μεγαλύτερο περιορισμό του συνεχούς φάσματος πέδησης και μάλιστα για πηγές που εκπέμπουν σωματίδια-β υψηλότερης ενέργειας. Θα είχε ενδιαφέρον να γίνει η διερεύνηση αυτή και με πηγές όγκου διαφορετικής γεωμετρίας.

Όσον αφορά στον καλύτερο (ποσοτικό και ποιοτικό) προσδιορισμό των συνιστωσών της διάταξης που συνεισφέρουν στο φαινόμενο της πέδησης θα μπορούσε:

- Να αντικατασταθεί το φάσμα εκπομπής της πηγής με το φάσμα των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από τη βάση πολυπροπυλενίου για πιο ακριβή αποτελέσματα.
- Να ελεγχθεί αν ένα παράθυρο ανιχνευτή από άλλο υλικό (π.χ. Be ή Mylar) μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά στην ανίχνευση του συνεχούς φάσματος.
- Στην περίπτωση που ενδιαφέρει η ανίχνευση φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών, όπως διαπιστώθηκε, η επίδραση του καλύμματος του ανιχνευτή είναι βαρύνουσας σημασίας. Θα μπορούσε λοιπόν να μελετηθεί η επίδραση του καλύμματος στην εξασθένηση των φωτονίων και η επίδραση αυτή να σταθμισθεί σε σχέση με την φυσική προστασία που παρέχει στον ανιχνευτή σε αυτή την περίπτωση.
- Για να διαπιστωθεί με βεβαιότητα κατά πόσον το συνεχές φάσμα είναι αποκλειστικά πρωτογενές φάσμα πέδησης, ή αν πρόκειται και για ακτινοβολία-γ που έχει μεν προέλθει από ακτινοβολία πέδησης, άλλα έχει φτάσει στον ανιχνευτή μετά από προηγούμενη σκέδαση σε κάποια συνιστώσα της διάταξης, είναι δυνατό να ακολουθηθεί μια διαδικασία προσομοίωσης κατά την οποία θα χρησιμοποιηθούν ανιχνευτές αλληλεπίδρασης και όχι αποτιθέμενης ενέργειας, που θα είναι τοποθετημένοι σε διάφορες θέσεις στην ανιχνευτική διάταξη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Χαρακτηριστικά των στοιχείων της διάταξης



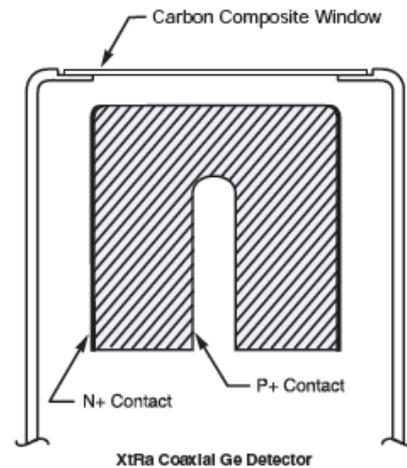
Features

- Spectroscopy from 3 keV to >10 MeV
- Wide range of efficiencies
- High resolution – good peak shape
- Excellent timing resolution
- High energy rate capability
- Diode FET protection
- Warm-up/HV shutdown
- High rate indicator

Extended Range Coaxial Ge Detectors (XtRa)

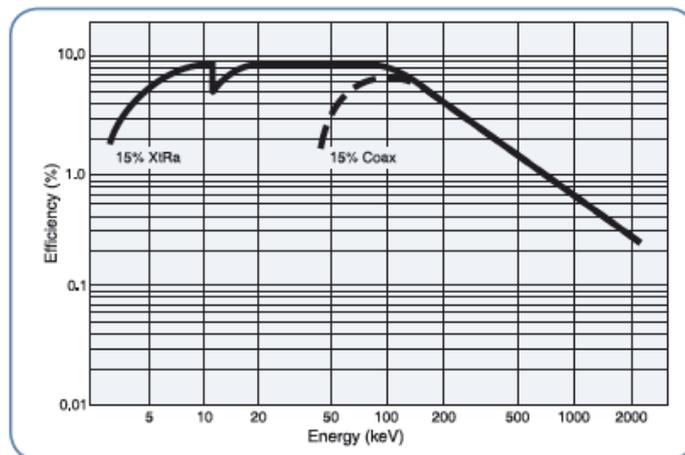
Description

The CANBERRA XtRa is a coaxial germanium detector having a unique thin-window contact on the front surface which extends the useful energy range down to 3 keV. Conventional coaxial detectors have a lithium-diffused contact typically between 0.5 and 1.5 mm thick. This dead layer stops most photons below 40 keV or so rendering the detector virtually worthless at low energies. The XtRa detector, with its exclusive thin entrance window and with a Carbon Composite cryostat window, offers



all the advantages of conventional standard coaxial detectors such as high efficiency, good resolution, and moderate cost along with the energy response of the more expensive Reverse Electrode Ge (REGe) detector.

The response curves (below) illustrate the efficiency of the XtRa detector compared to a conventional Ge detector. The effective window thickness can be determined experimentally by comparing the intensities of the 22 keV and 88 keV peaks from ^{109}Cd . With the standard 0.6 mm Carbon Composite window, the XtRa detector is guaranteed to give a 22 to 88 keV intensity ratio of greater than 20:1. Beryllium and aluminum windows are also available.



Typical Efficiency curves comparing XtRa with Be window and Coax Detectors with detector-source spacing of 2.5 cm

Phone contact information

Benelux/Denmark (32) 2 481 85 30 • Canada 905-660-5373 • Central Europe +43 (0)2230 37000 • France (33) 1 39 48 52 00 • Germany (49) 6 142 73620
Japan 81-3-5635-5402 • Russia (7-495) 429-6677 • Sweden +46 18 14 83 00 • United Kingdom (44) 1235 838333 • United States (1) 203-238-2351

For other international representative offices, visit our web site: www.canberra.com or contact the CANBERRA U.S.A. office.

C37440 4/10 Printed in U.S.A.

Σχήμα Α.1: Χαρακτηριστικά του ανιχνευτή XtRa της εταιρείας Canberra του ΕΙΤΤ-ΕΜΠ

Extended Range Coaxial Ge Detectors (XtRa)

XtRa GERMANIUM DETECTOR General Specifications and Information

Standard configuration includes:

- Vertical Slimline dipstick cryostat with Carbon Composite window and 30 liter Dewar.
- Model 2002C preamplifier with 3 meter bias, high voltage inhibit, signal and power cables.

Specify cryostat option from options price list.

Resolutions at 22 keV and 88 keV are *typical values*, not specification limits.

The XtRa detector is guaranteed to give a 22 to 88 keV intensity ratio of greater than 20:1.

Model Number	Relative Efficiency (%) ≥	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV)			Peak to Compton Ratio (P/C)	Endcap diameter mm (in.)
		At 22 keV energy	At 88 keV energy	At 1.3 MeV energy		
GX1018	10	0.7	0.8	1.8	40:1	76 (3.0)
GX1020	10	0.8	0.9	2.0	36:1	76 (3.0)
GX1518	15	0.7	0.8	1.8	46:1	76 (3.0)
GX1520	15	0.8	0.9	2.0	42:1	76 (3.0)
GX2018	20	0.7	0.8	1.8	50:1	76 (3.0)
GX2020	20	0.9	0.9	2.0	46:1	76 (3.0)
GX2518	25	0.7	0.8	1.8	54:1	76 (3.0)
GX2520	25	0.9	0.9	2.0	50:1	76 (3.0)
GX3018	30	0.7	0.8	1.8	58:1	76 (3.0)
GX3020	30	0.9	1.0	2.0	54:1	76 (3.0)
GX3518	35	0.8	0.9	1.8	60:1	76 (3.0)
GX3520	35	0.9	1.0	2.0	54:1	76 (3.0)
GX4018	40	0.8	0.9	1.8	62:1	76 (3.0)*
GX4020	40	1.0	1.1	2.0	56:1	76 (3.0)*
GX4518	45	0.9	1.0	1.8	63:1	83 (3.25)
GX4520	45	1.0	1.1	2.0	58:1	83 (3.25)
GX5019	50	0.9	1.0	1.9	64:1	83 (3.25)*
GX5021	50	1.1	1.2	2.1	58:1	83 (3.25)*
GX5519	55	1.0	1.1	1.9	64:1	89 (3.5)
GX5521	55	1.1	1.2	2.1	60:1	89 (3.5)
GX6020	60	1.0	1.1	2.0	66:1	89 (3.5)
GX6022	60	1.1	1.2	2.2	60:1	89 (3.5)
GX6520	65	1.0	1.1	2.0	68:1	89 (3.5)
GX6522	65	1.1	1.2	2.2	62:1	89 (3.5)
GX7020	70	1.0	1.1	2.0	70:1	89 (3.5)*
GX7022	70	1.1	1.2	2.2	64:1	89 (3.5)*
GX8021	80	1.0	1.1	2.1	72:1	95 (3.75)
GX8023	80	1.1	1.2	2.3	66:1	95 (3.75)
GX9021	90	1.2	1.3	2.1	78:1	95 (3.75)
GX9023	90	1.3	1.4	2.3	70:1	95 (3.75)
GX10021	100	1.2	1.3	2.1	78:1	95 (3.75)*
GX10023	100	1.3	1.4	2.3	70:1	95 (3.75)*

For availability of detectors above 100% relative efficiency consult factory.

Model Number	Relative Efficiency (%) ≥	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV)			Peak to Compton Ratio (P/C)	Endcap diameter mm (in.)
		At 22 keV energy	At 88 keV energy	At 1.3 MeV energy		
GX11021	110	1.2	1.3	2.1	78:1	102 (4.0)
GX11023	110	1.3	1.4	2.3	70:1	102 (4.0)
GX12021	120	1.2	1.3	2.1	78:1	102 (4.0)
GX12023	120	1.3	1.5	2.3	70:1	102 (4.0)

*Note: Due to variations in crystal size endcap diameter may be larger. For guaranteed endcap diameter or custom specifications and hardware customization consult factory.

Above specifications are in accordance with IEEE Std 325-1996. Resolution performance is tested with Lynx[®] digital MCA. For resolution performance guarantee using other CANBERRA digital MCAs consult factory.



Lynx is a registered trademark of Canberra Industries, Inc.

© 2010 Canberra Industries, Inc. All rights reserved.

Σχήμα Α.2: Χαρακτηριστικά του ανιχνευτή XtRa της εταιρείας Canberra του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Features

- Four inch low background lead
- Graded tin and copper liner
- Fully clad – no exposed lead
- Full area front door
- Synchronized split top door
- Lockable door latch
- Textured epoxy finish

Model 767 Front Opening Split-Top Shield

Description

The 767 is a full-size and full-featured lead shield for use with germanium detectors having a vertical orientation. It has several unique design features and is built with a great deal of attention to fit and finish. The 767 features 10 cm (4 in.) lead thickness and is jacketed by a 9.5 mm (3/8 in.) steel outer housing. The graded liner consists of a tin layer of 1 mm (0.040 in.) thickness and a copper layer of 1.5 mm (0.062 in.) thickness. There is no exposed lead in the 767 with or without the doors closed. The inside dimensions are 28 cm (11 in.) diameter by 40.6 cm (16 in.) high.

The top doors of the 767 are linked so they open and close together regardless of which is actuated. The front door opens to the right on precision adjustable hinges and provides full shield access.

A novel latch secures both the front and top doors and provides a means to lock the shield with a user-supplied padlock.

The shield table is equipped with leveling legs and with braces which allow the assembled shield to be moved with a simple pallet truck.

The 767 is finished outside with an attractive textured light gray epoxy paint. The copper interior has a brush grain finish with a clear polyurethane coating to retard tarnishing.

Specifications

MATERIALS

- OUTER JACKET – 9.5 mm (3/8 in.) thick low carbon steel.
- BULK SHIELD – 10 cm (4 in.) thick low background lead.
- GRADED LINING – 1 mm (0.040 in.) tin and 1.6 mm (0.062 in.) copper.

WEIGHT

- 1088 kg (2400 lb); 1134 kg (2500 lb) shipping weight.

FINISH

- CANBERRA light grey textured epoxy.



Phone contact information

Benelux/Denmark (32) 2 481 85 30 • Canada 905-660-5373 • Central Europe +43 (0)2290 37000 • France (33) 1 39 48 52 00 • Germany (49) 6142 73820
Japan 81-3-3500-5808 • Russia (7-495) 429-6577 • Sweden +46 18 14 83 00 • United Kingdom (44) 1235 838333 • United States (1) 203-238-2351

For other international representative offices, visit our web site: www.canberra.com or contact the CANBERRA U.S.A. office.

M3016 10/08 Printed in U.S.A.

Σχήμα Α.3: Χαρακτηριστικά της θωράκισης – μοντέλο 767 της εταιρείας Canberra

Model 767 Front Opening Split-Top Shield



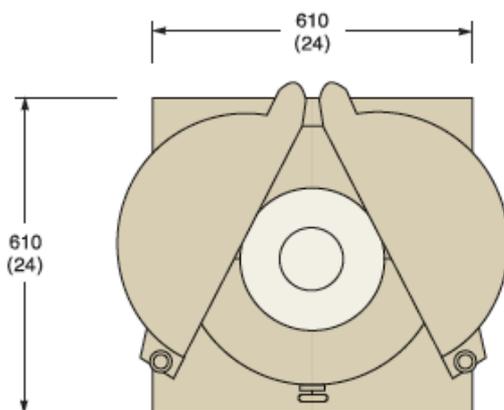
Top doors are linked – so they open and close together



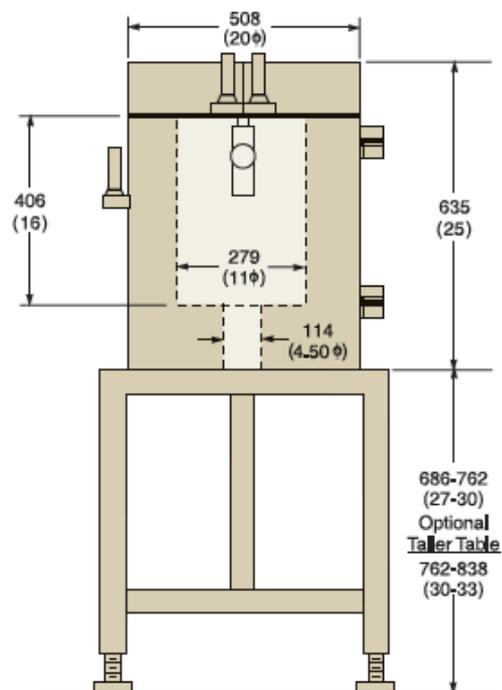
Front door provides full-area access

OPTIONS

- Model CFE-4 clamp-on cold finger extension.
- Model PHW Special Preamp Hardware (7500 only).
- Model 7415 Detector Lift (for use with MAC's and Cryoelectric II).
- Model 767-1 Annular Plug (7500 only).
- Model 767-2 Annular Plug (7500SL only).
- Model 767-3 Split Annular Plug (7500SL-RDC only).
- Model 767-5 Taller Table (7500SL-RDC only).



Top View
Dimensions in mm (inches)

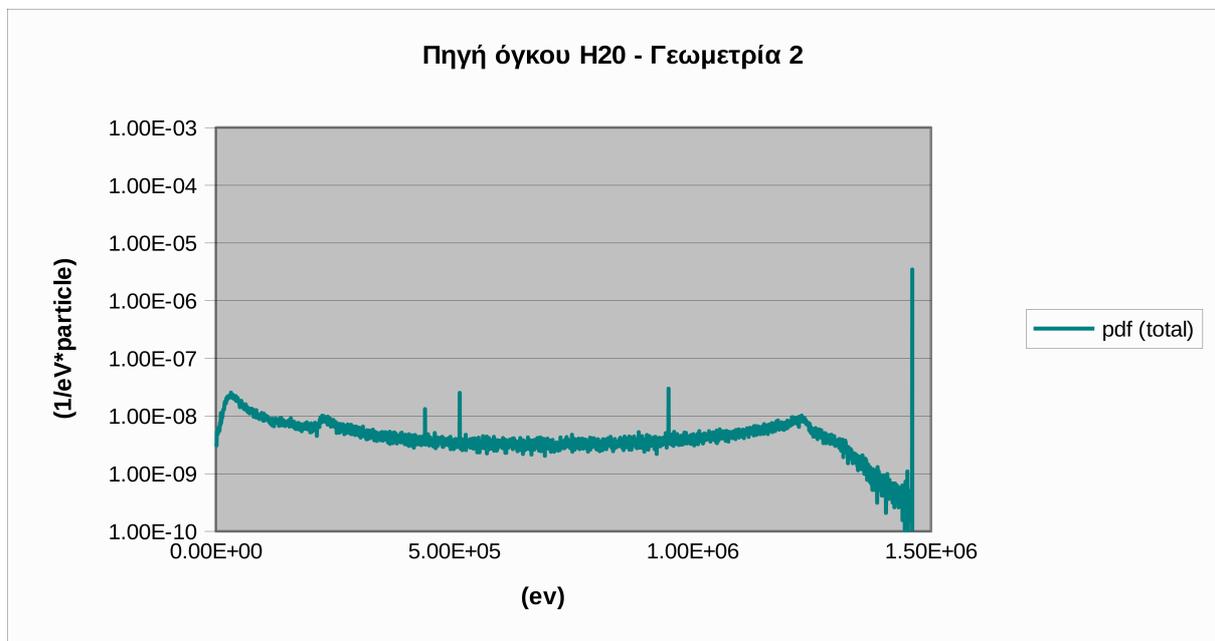
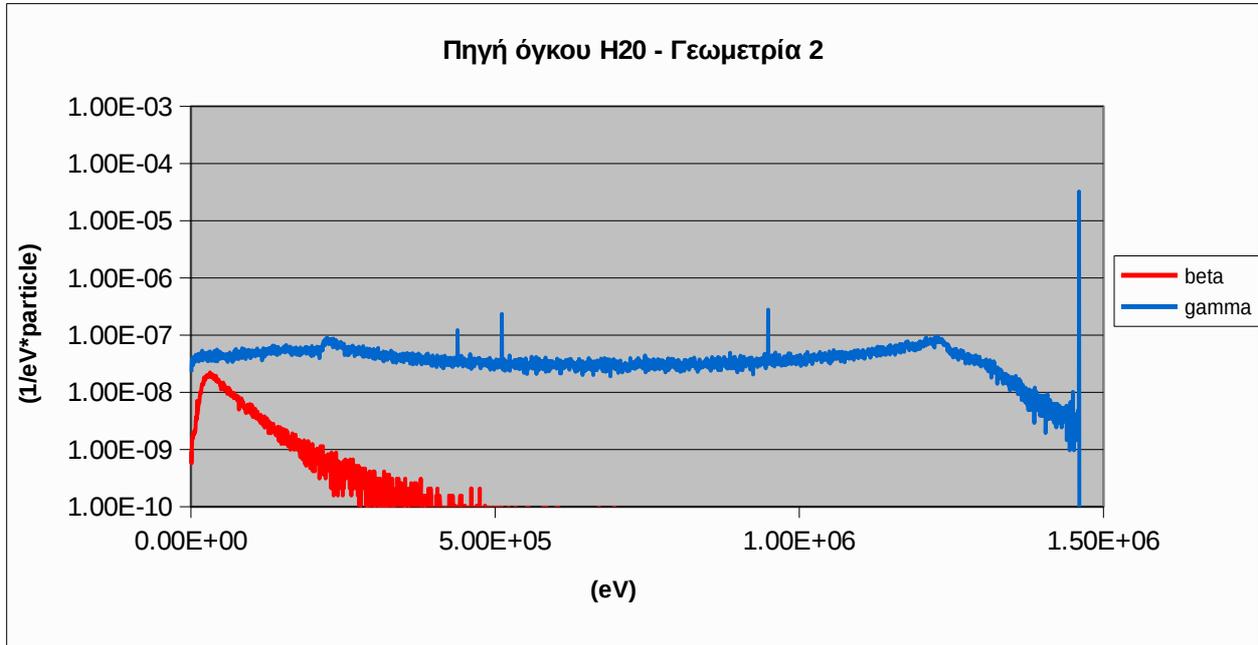


Front view
Dimensions in mm (inches)

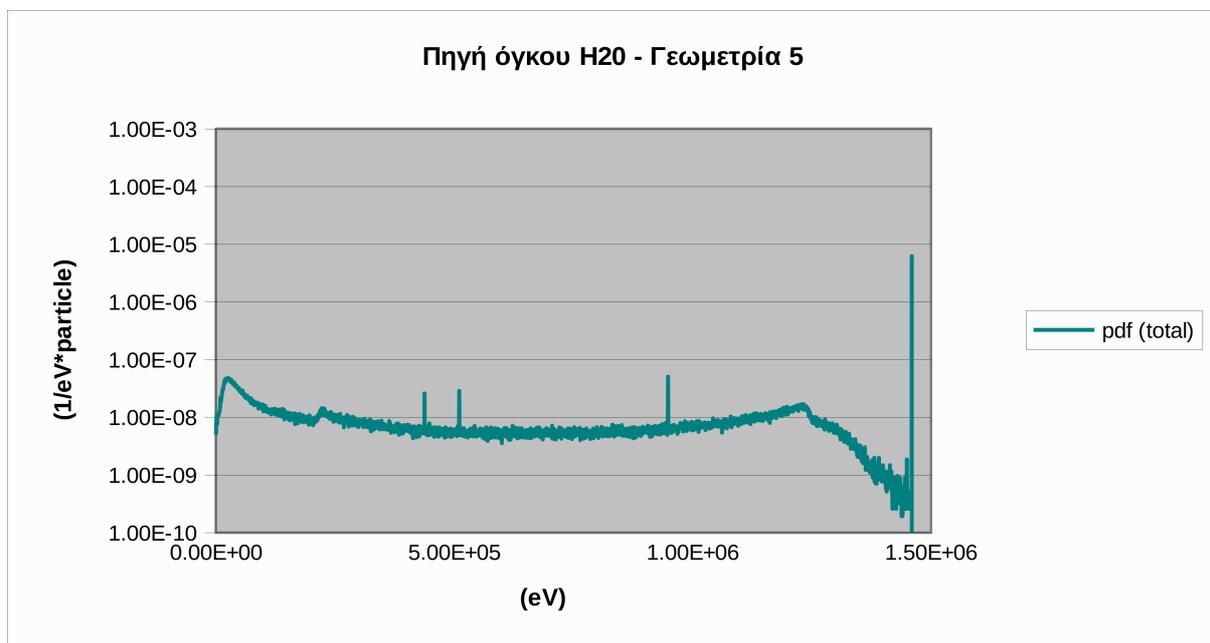
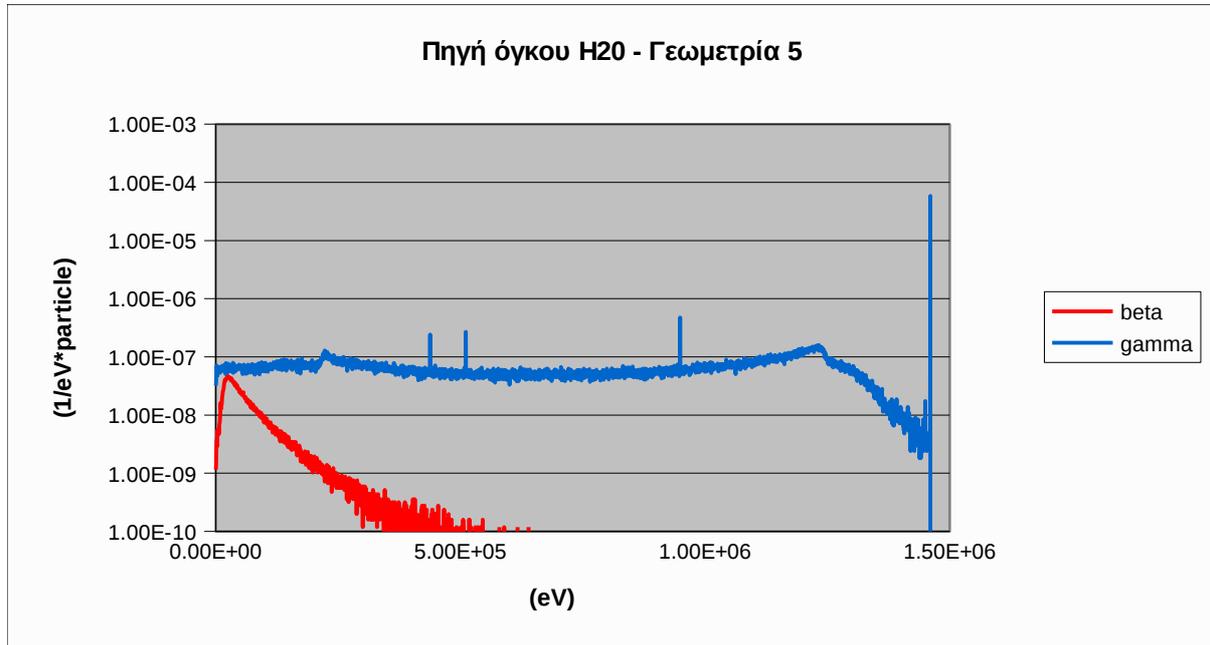
Σχήμα Α.4: Χαρακτηριστικά της θωράκισης – μοντέλο 767 της εταιρείας Canberra (συνέχεια)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Αναλυτικά Διαγράμματα γ-ακτινοβολίας (ENDDET)

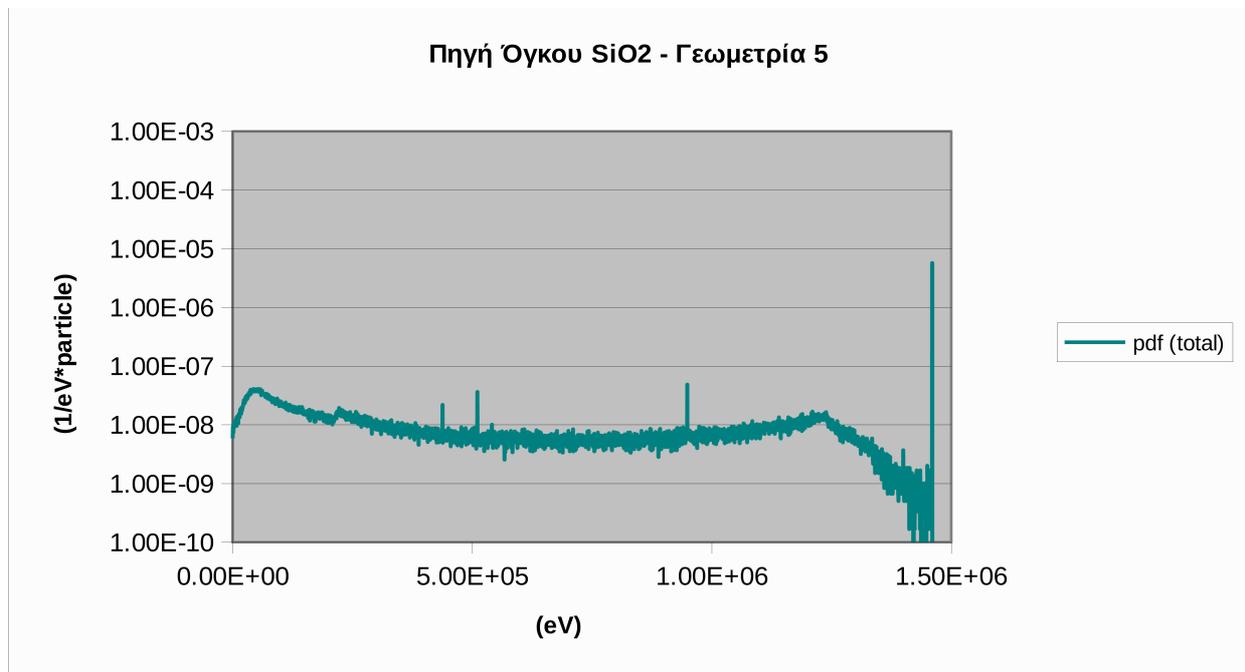
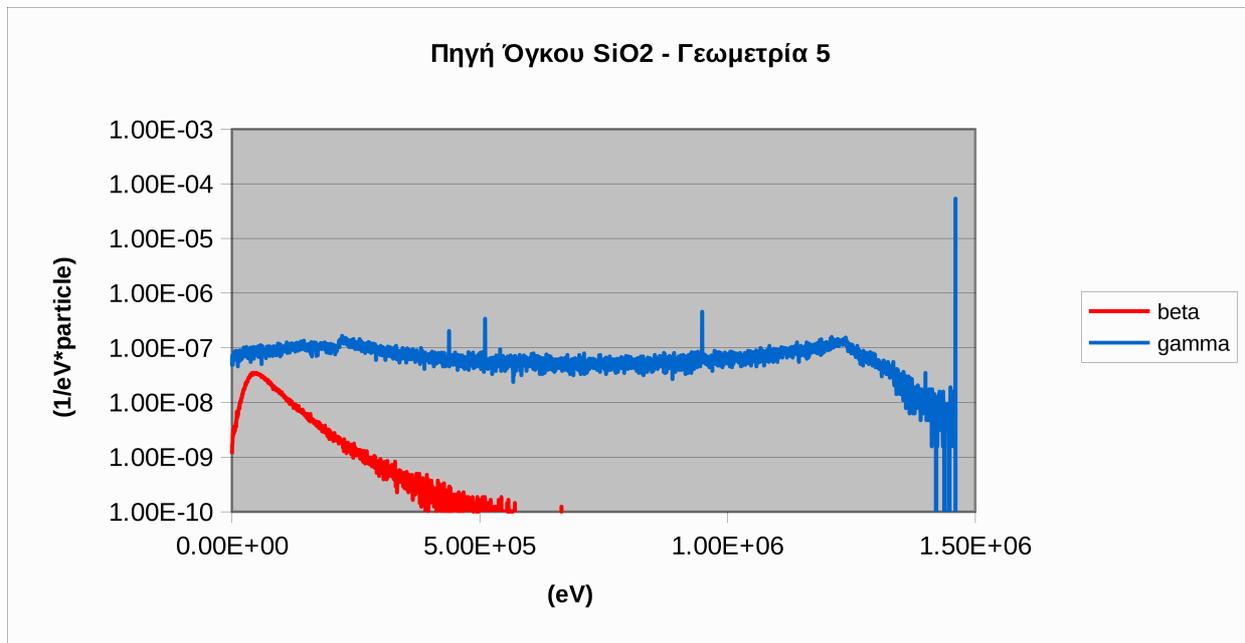
(4.4.1) Πηγή H₂O - Γεωμετρία 2



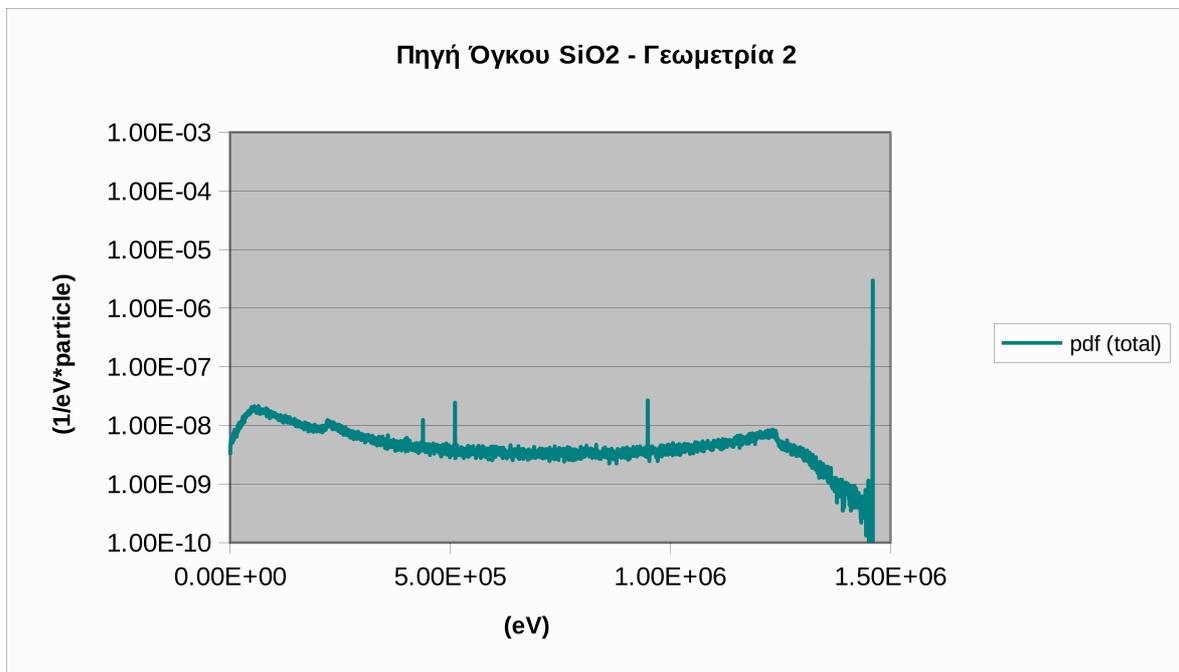
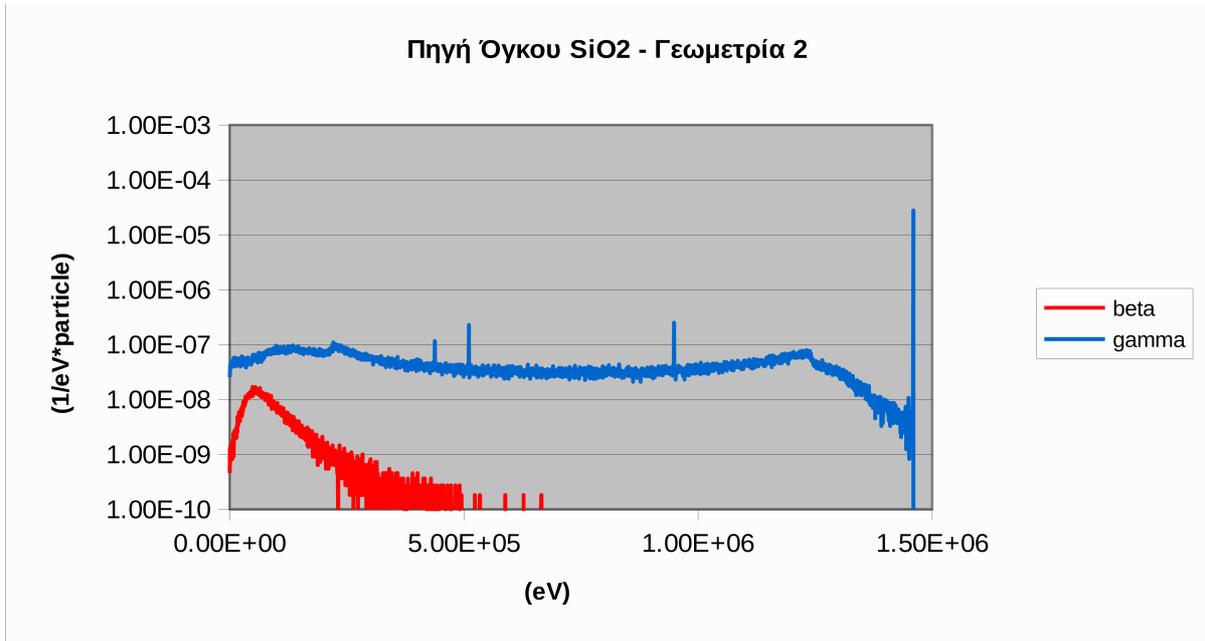
(4.4.2) Πηγή H₂O - Γεωμετρία 5



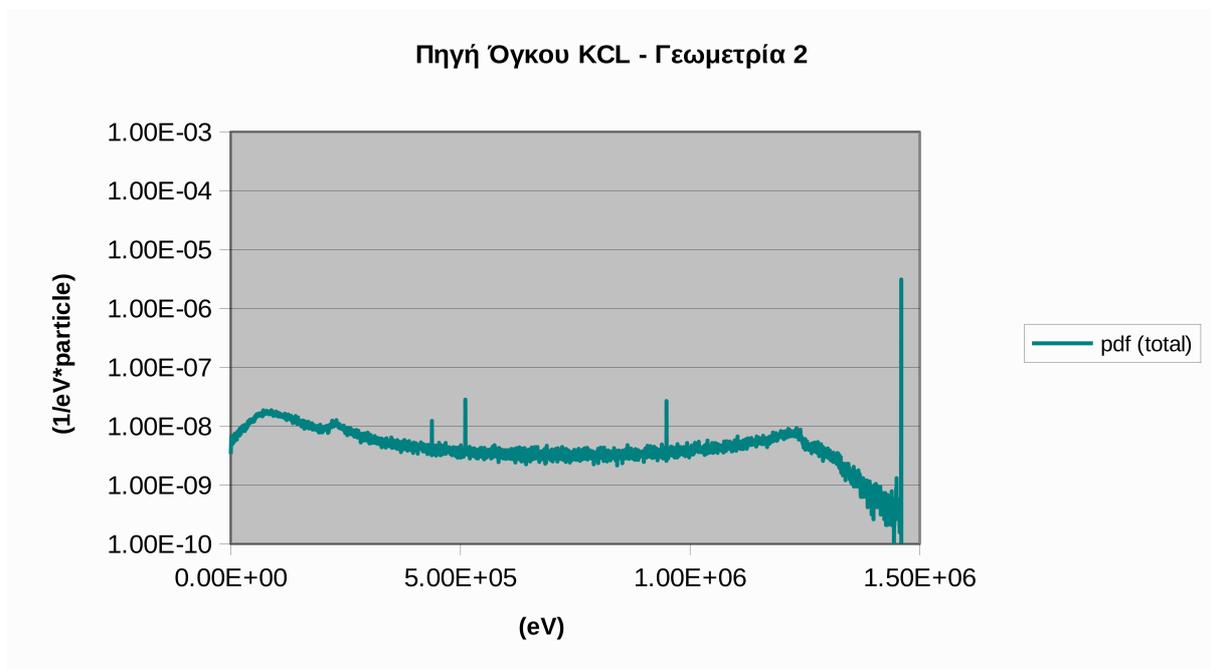
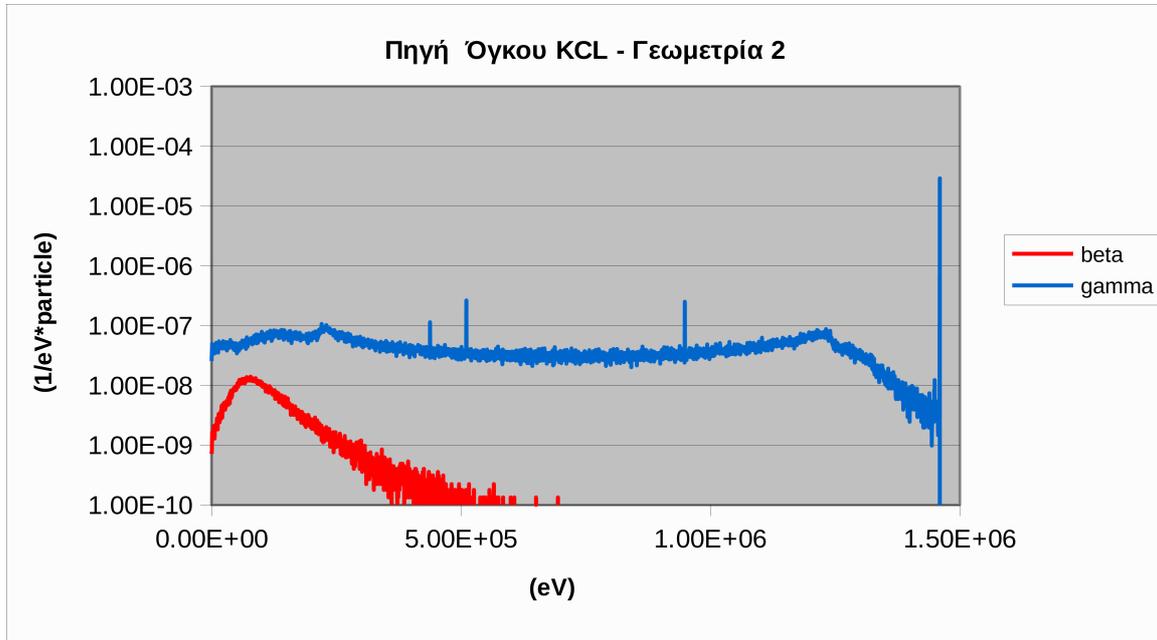
(4.4.3) Πηγή SiO₂ - Γεωμετρία 5



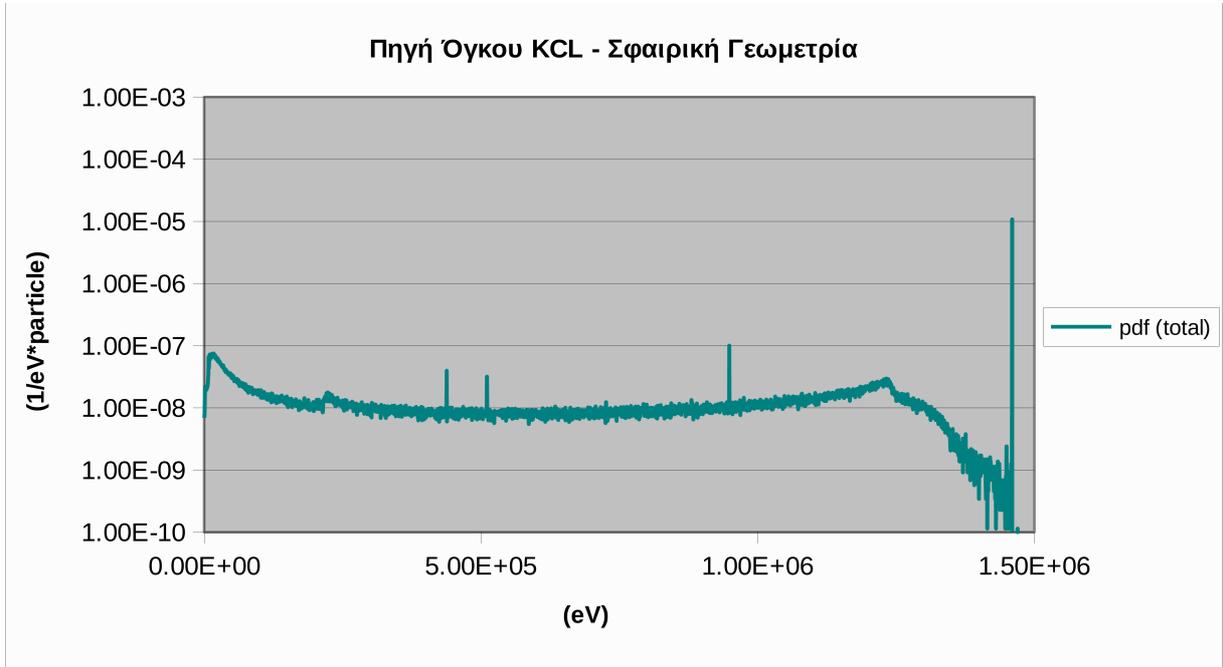
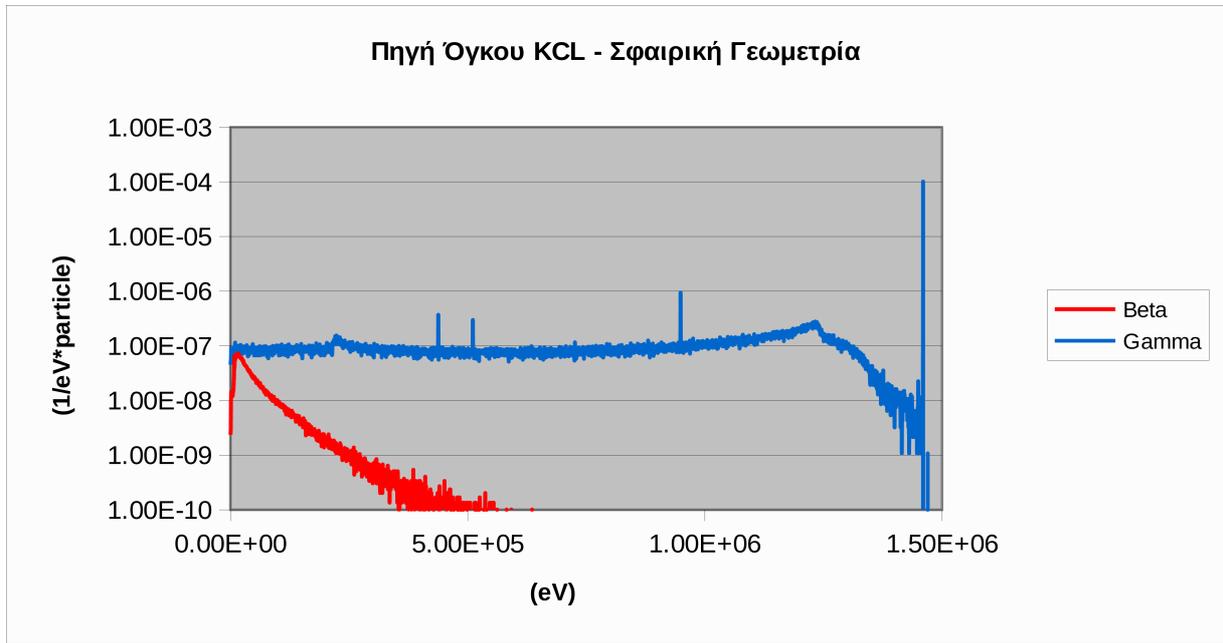
(4.4.3) Πηγή SiO₂ - Γεωμετρία 2



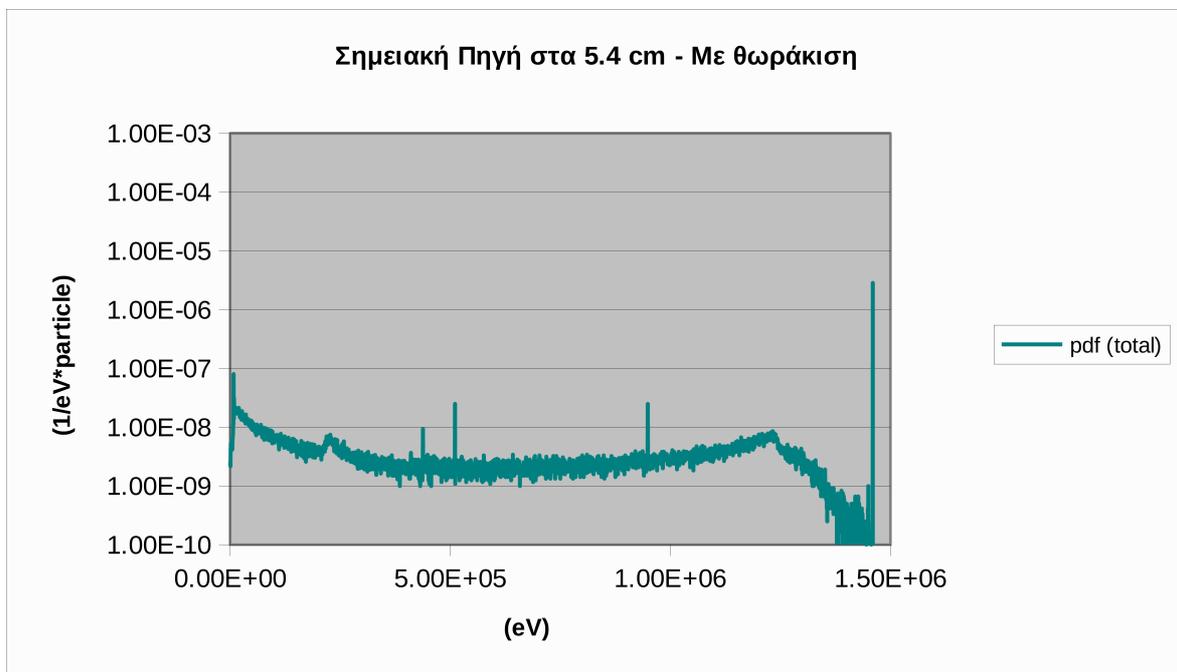
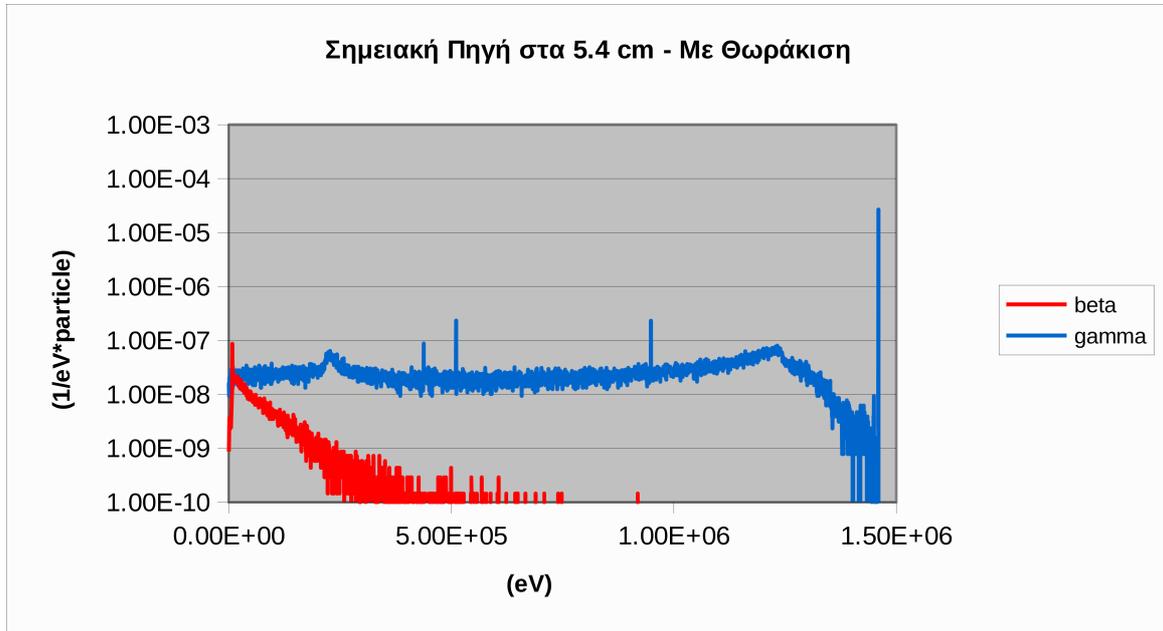
(4.5) Πηγή KCl - Γεωμετρία 2



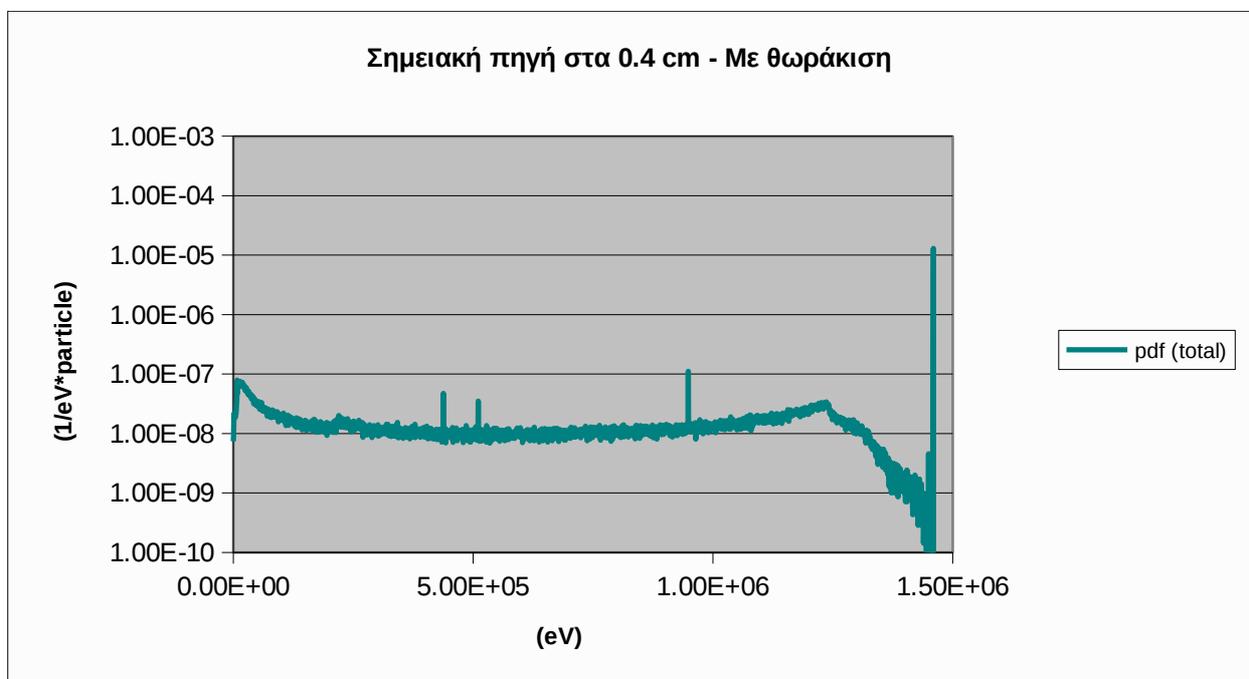
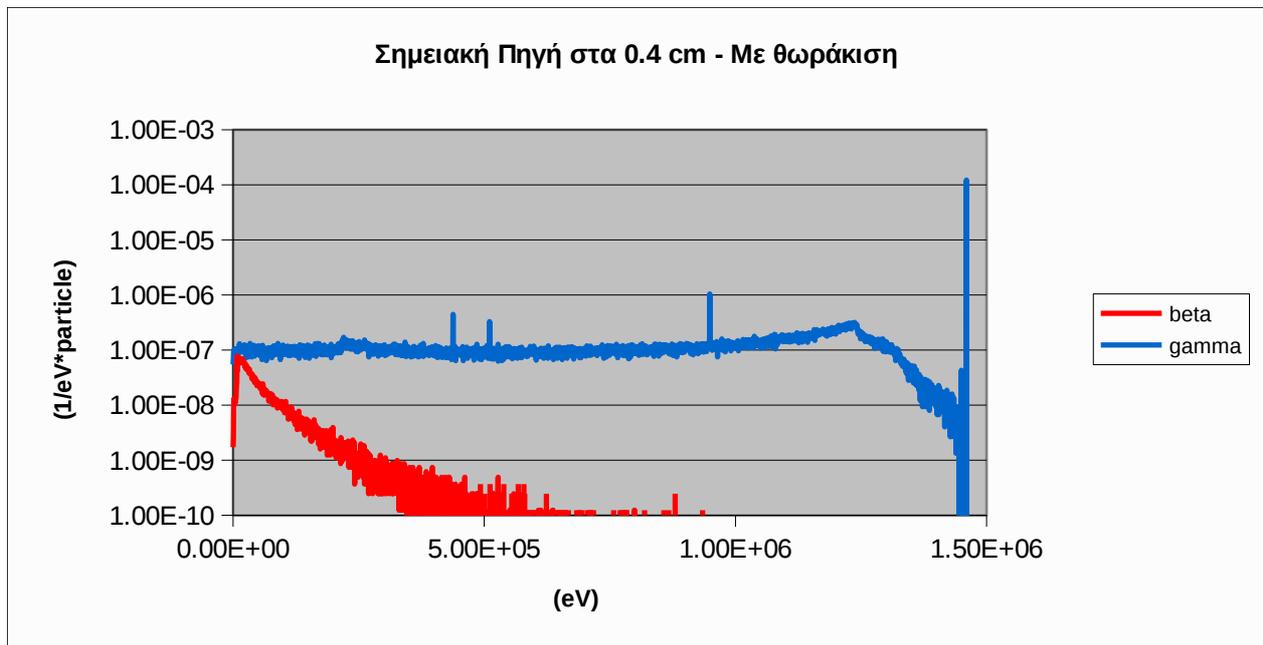
(4.5) Πηγή KCl - Σφαιρική Γεωμετρία



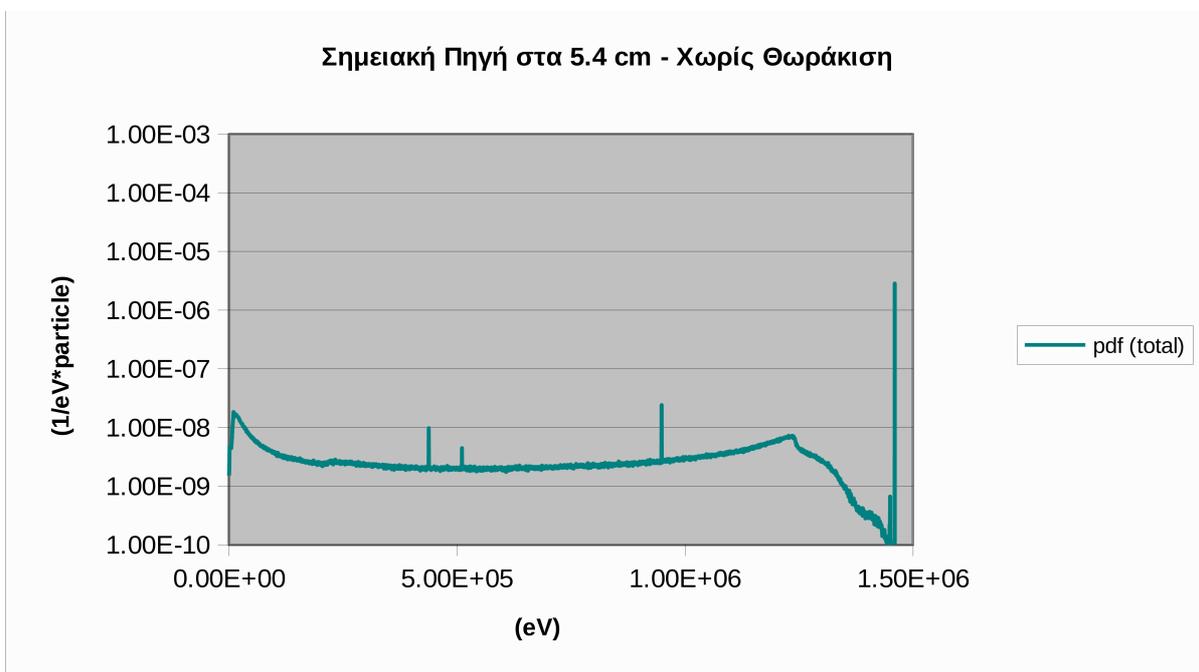
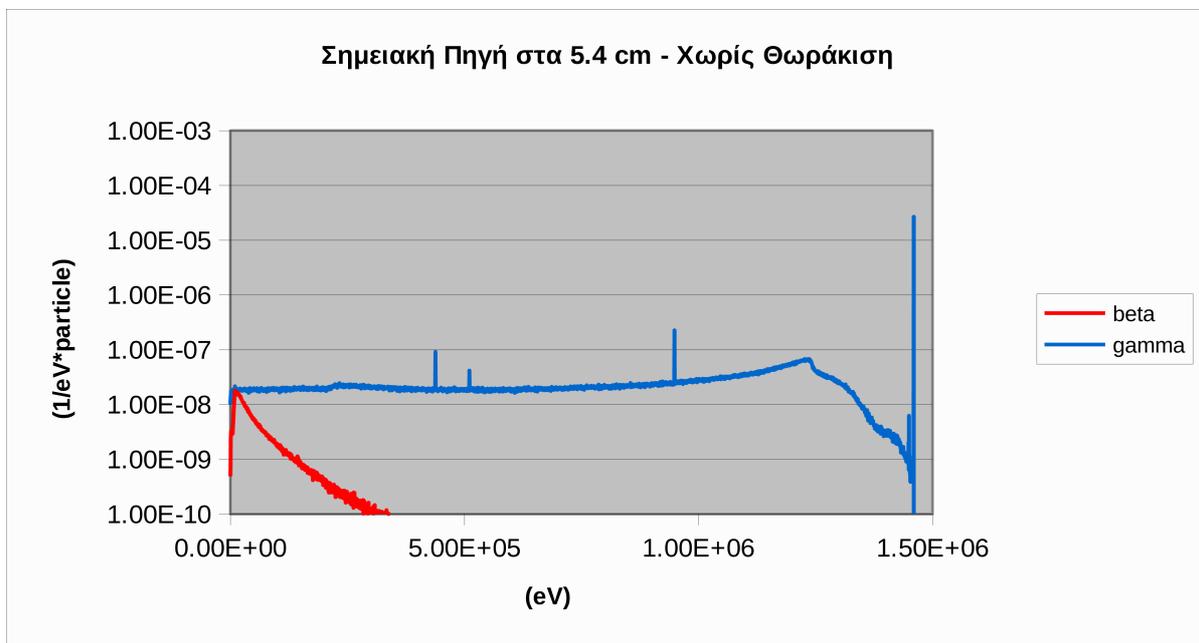
(4.6.1) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση



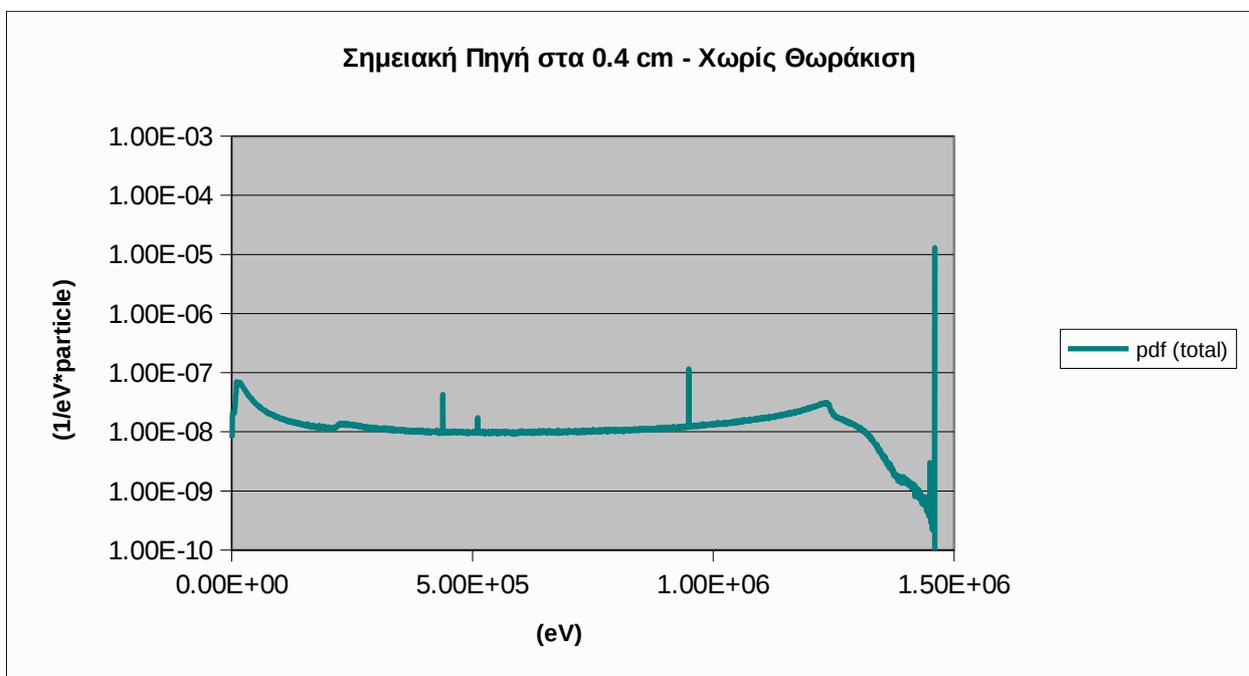
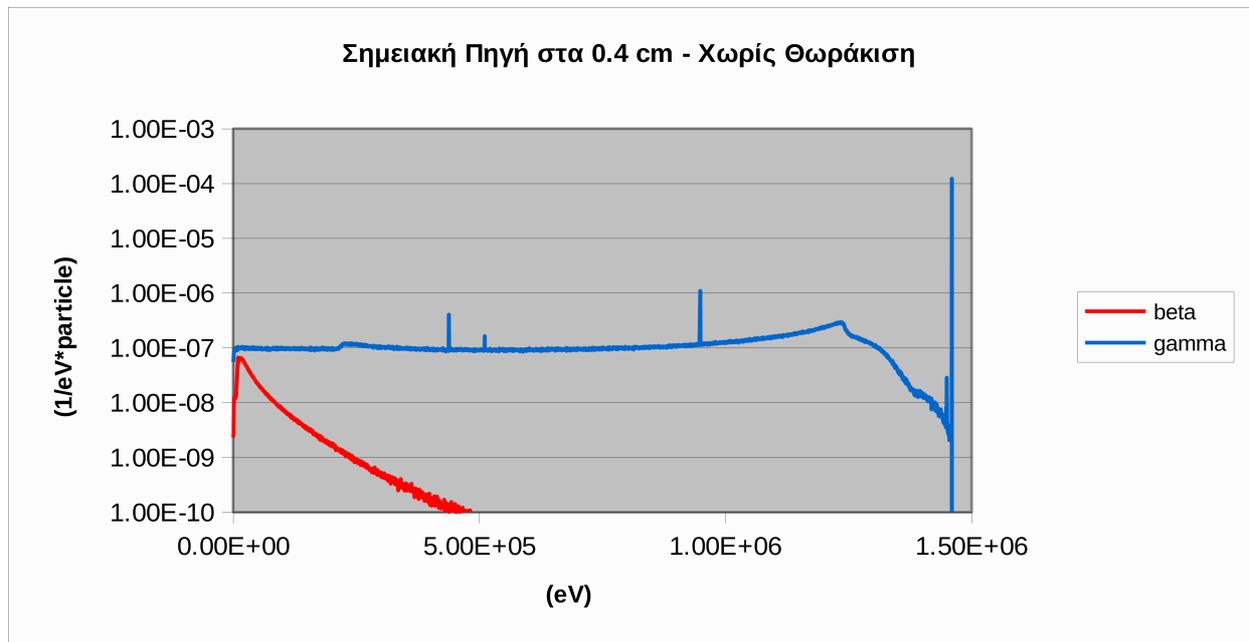
(4.6.1) Απόσταση 0.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση



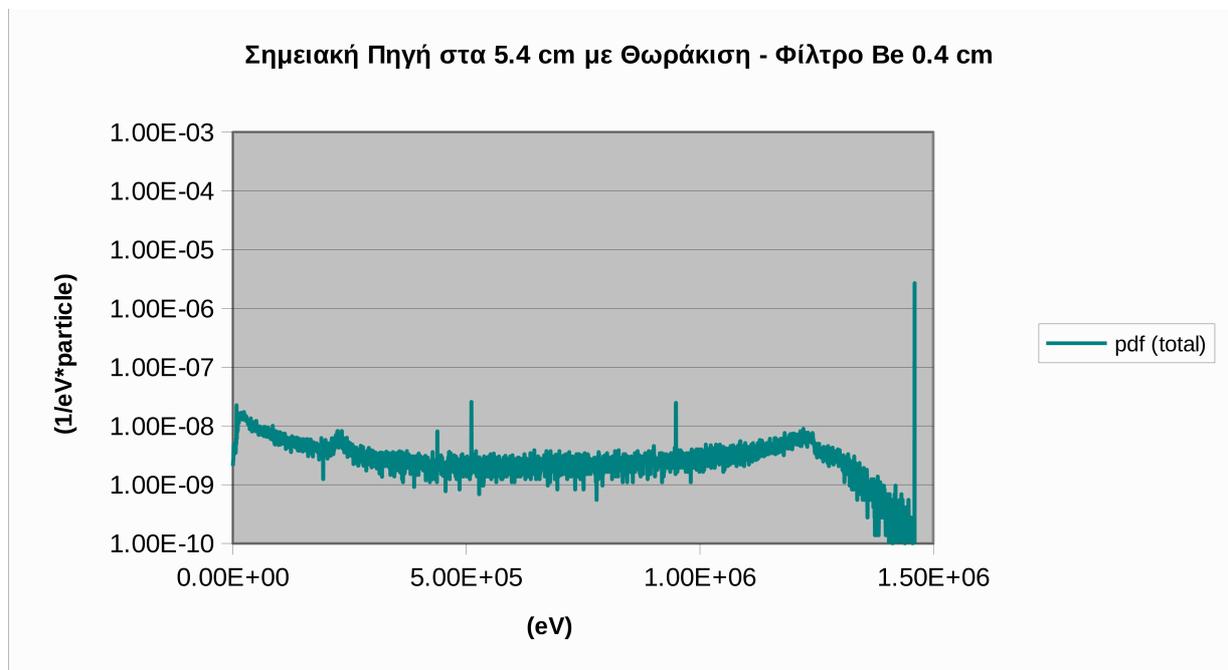
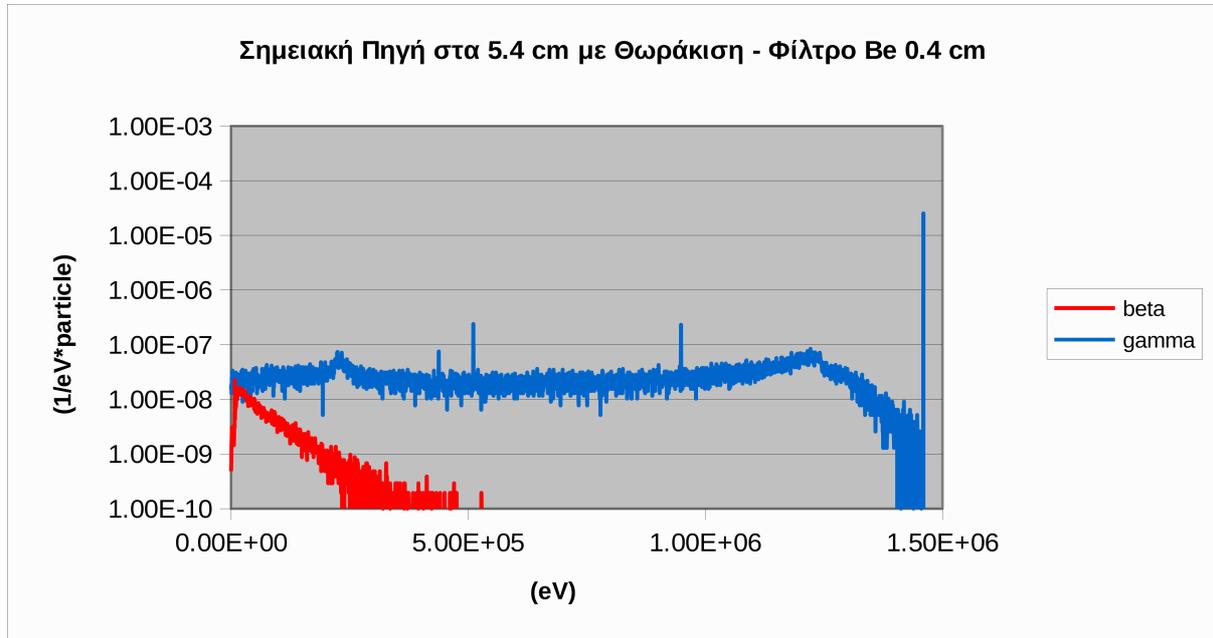
(4.6.2) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή χωρίς θωράκιση



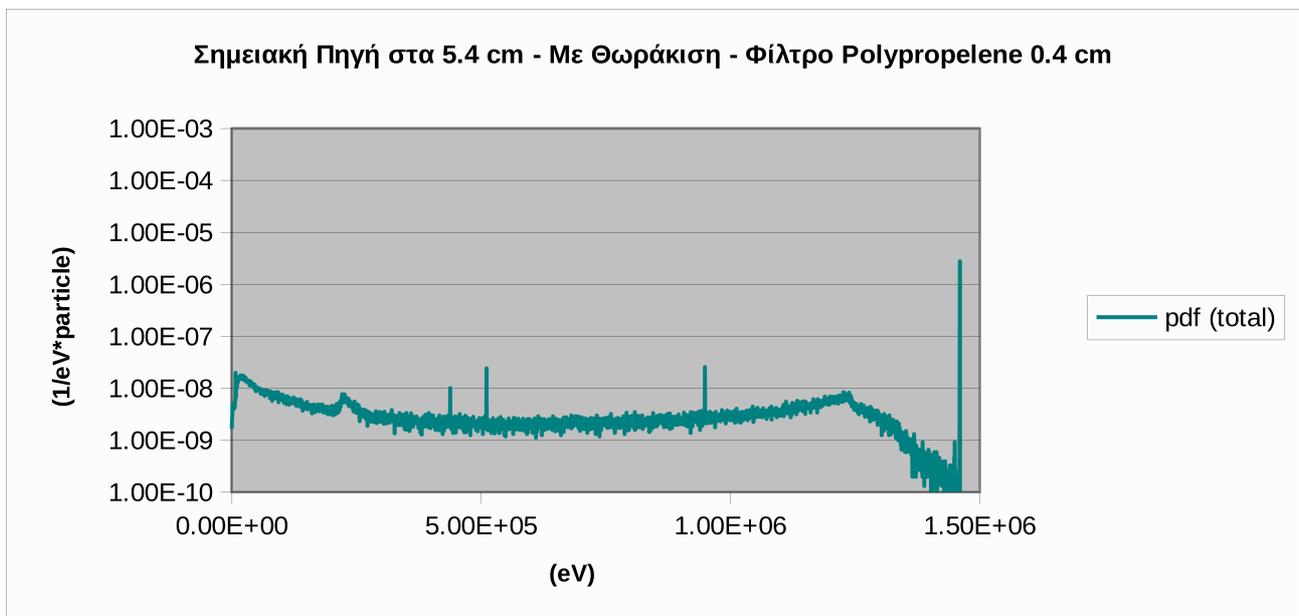
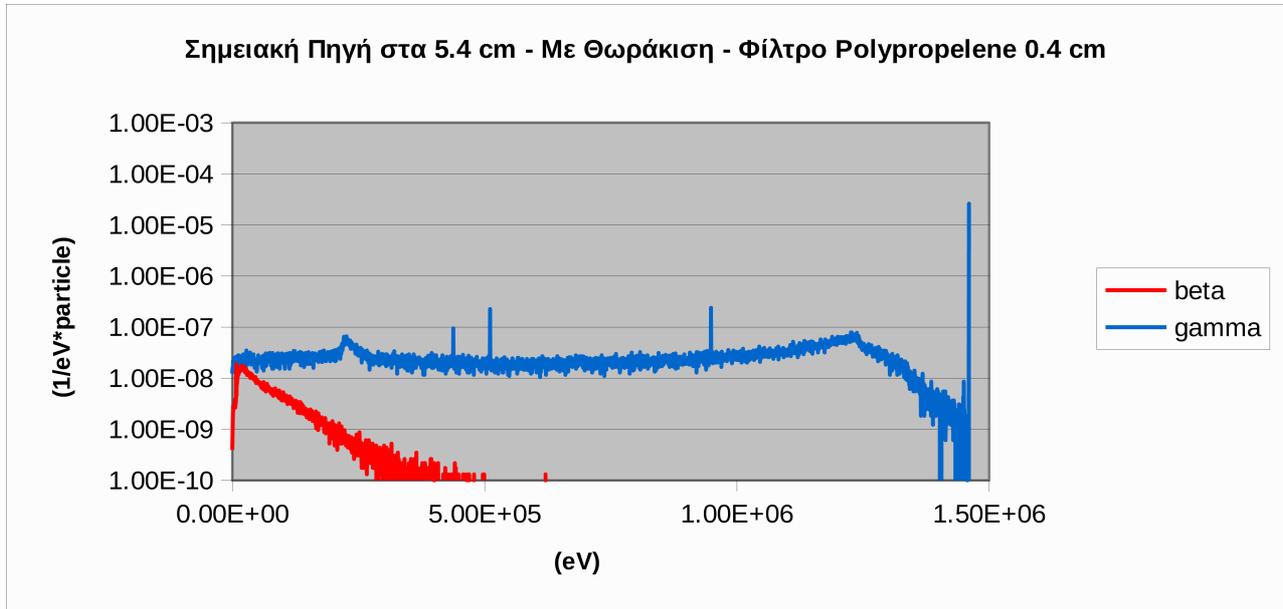
4.6.2 Απόσταση 0.4cm από τον ανιχνευτή χωρίς θωράκιση



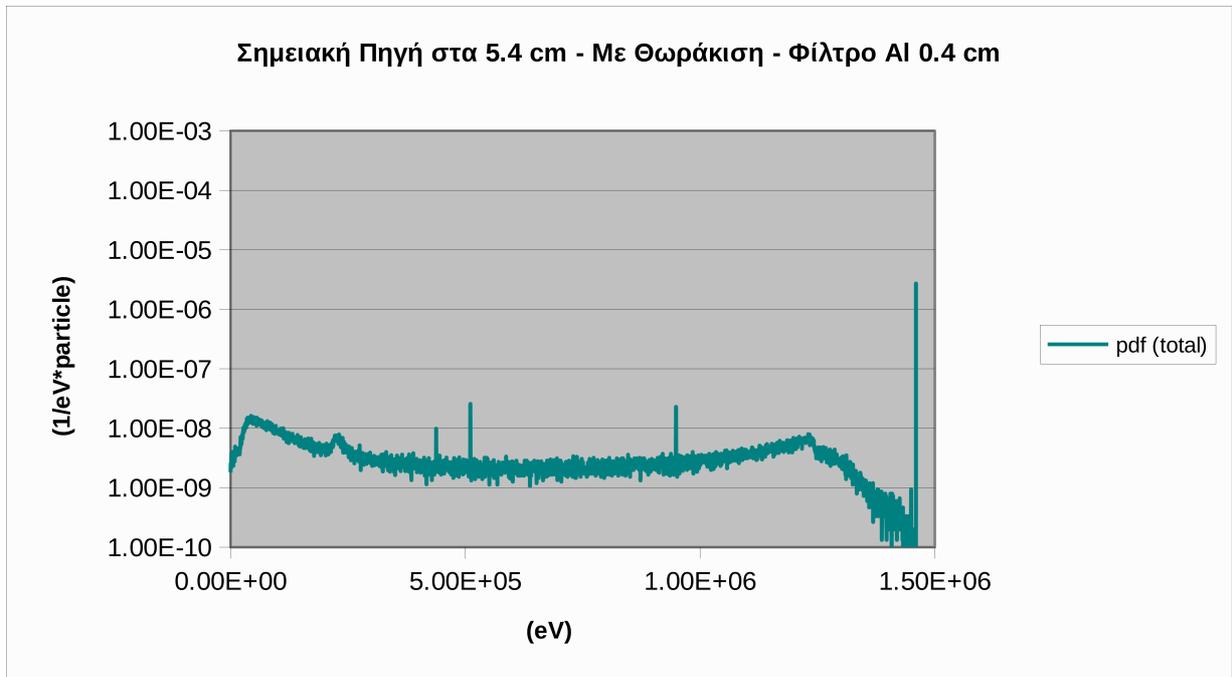
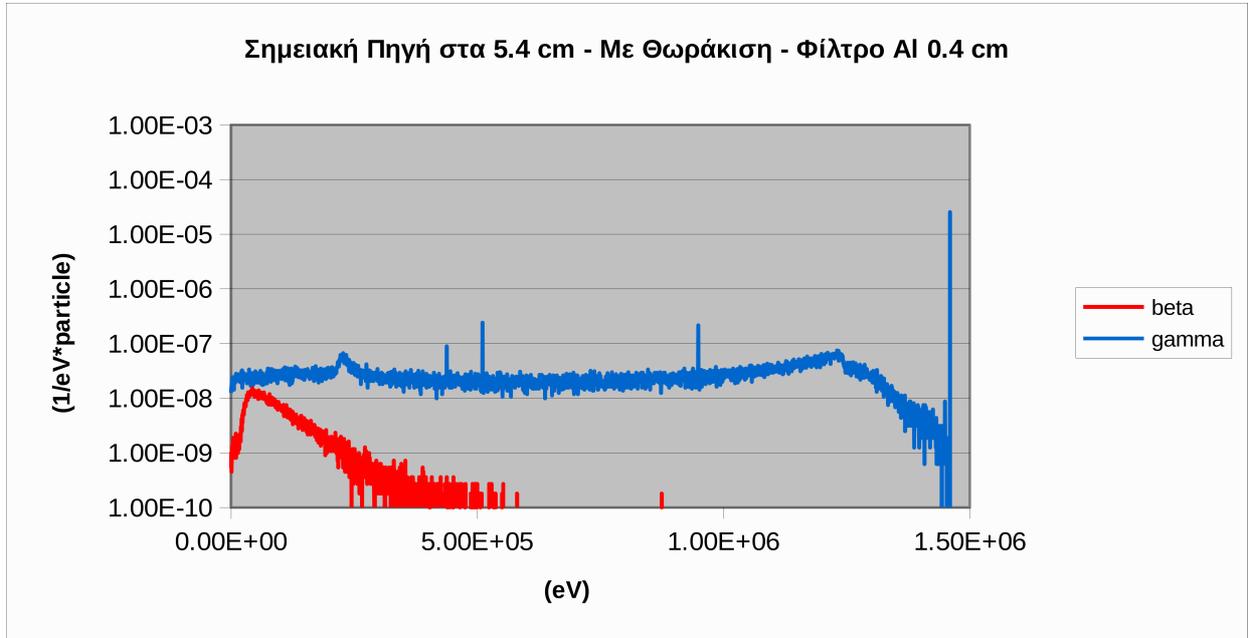
(4.6.3.1) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και φίλτρο 0.4cm από Be



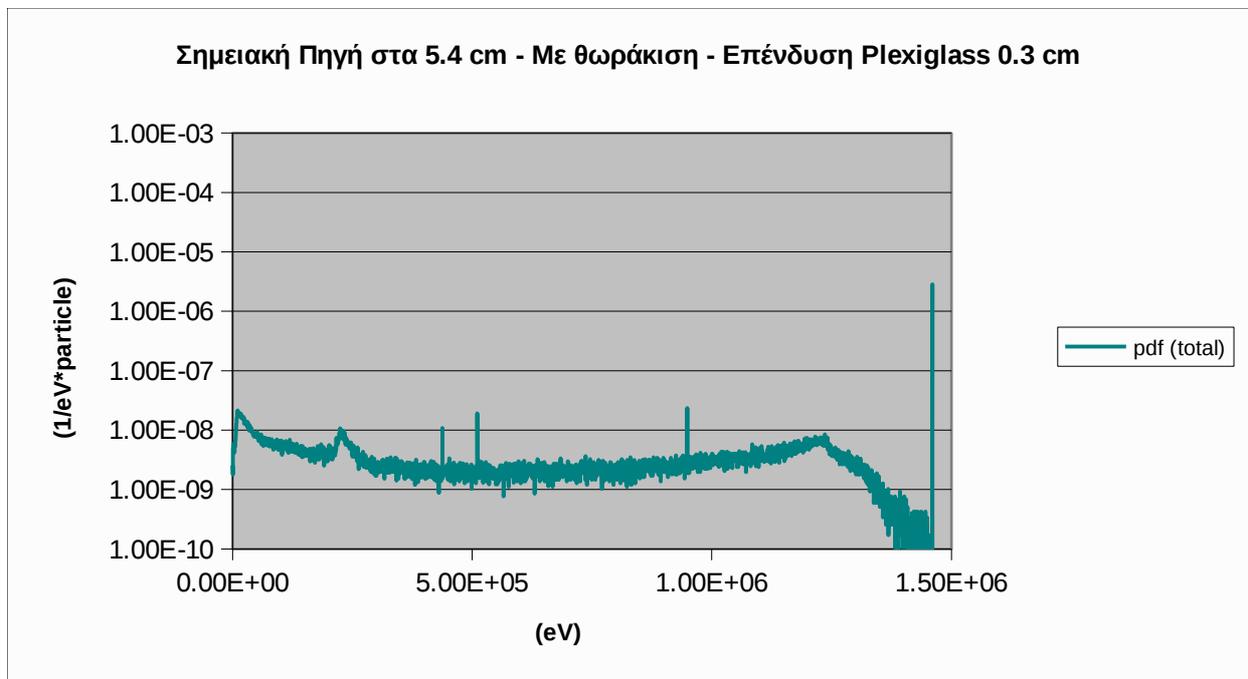
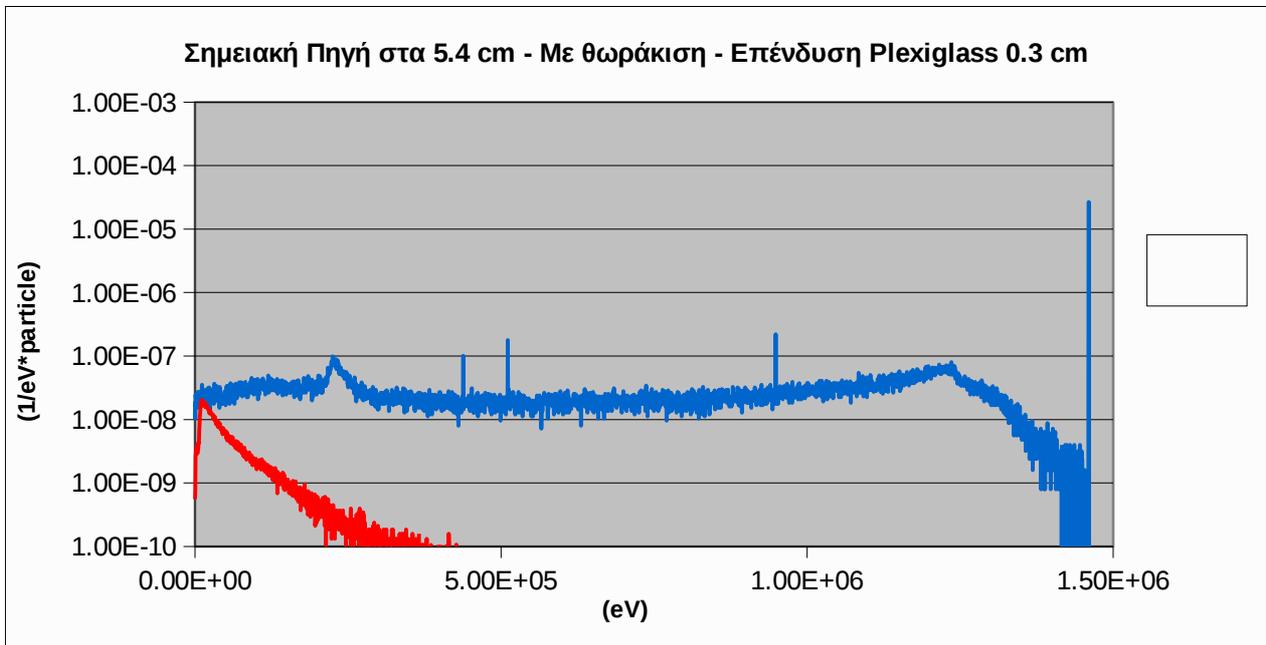
(4.6.3.2) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και φίλτρο 0.4cm από Polypropelene



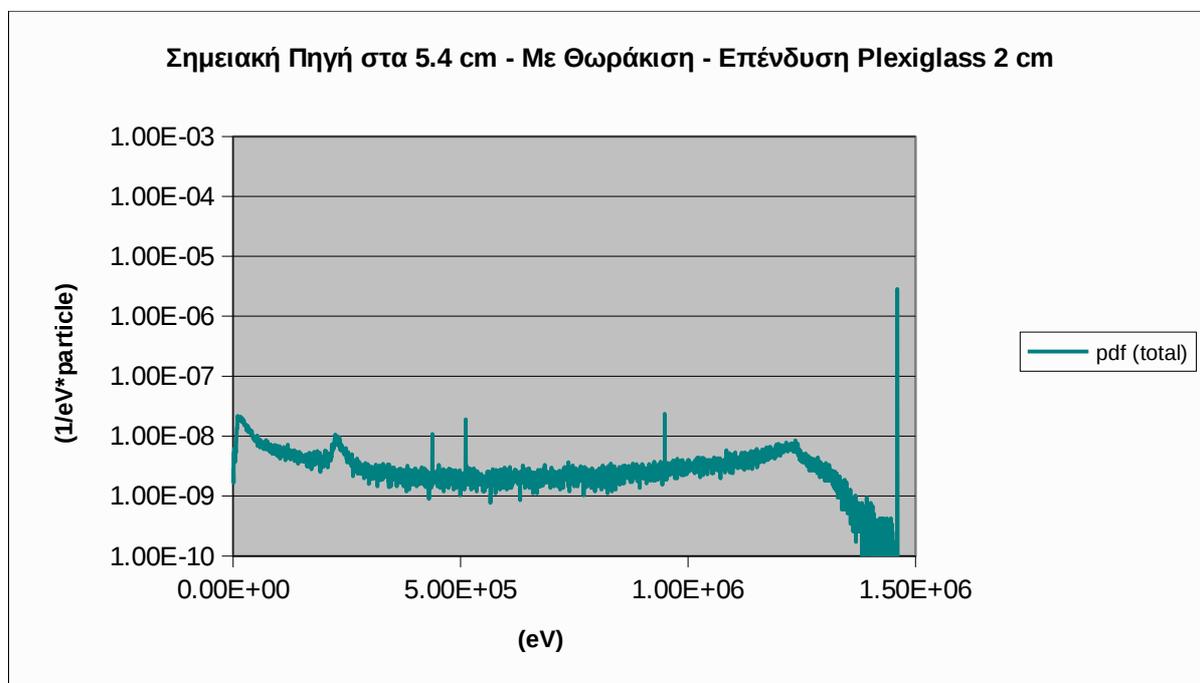
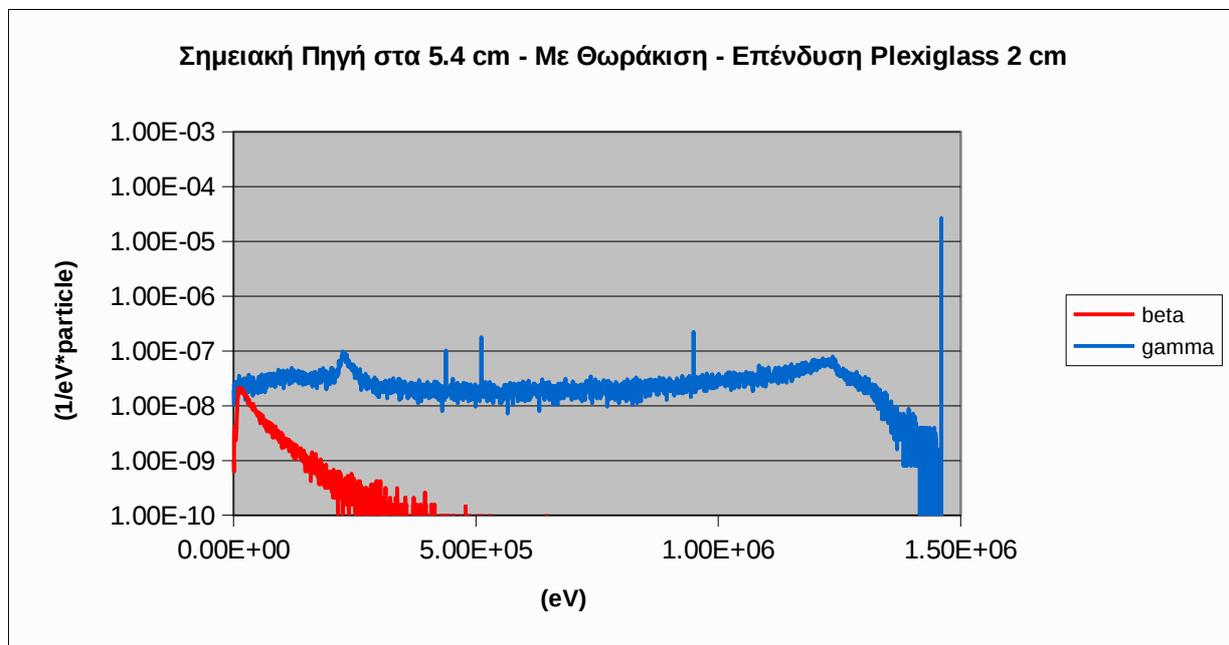
(4.6.3.3) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και φίλτρο 0.4cm από Aluminium



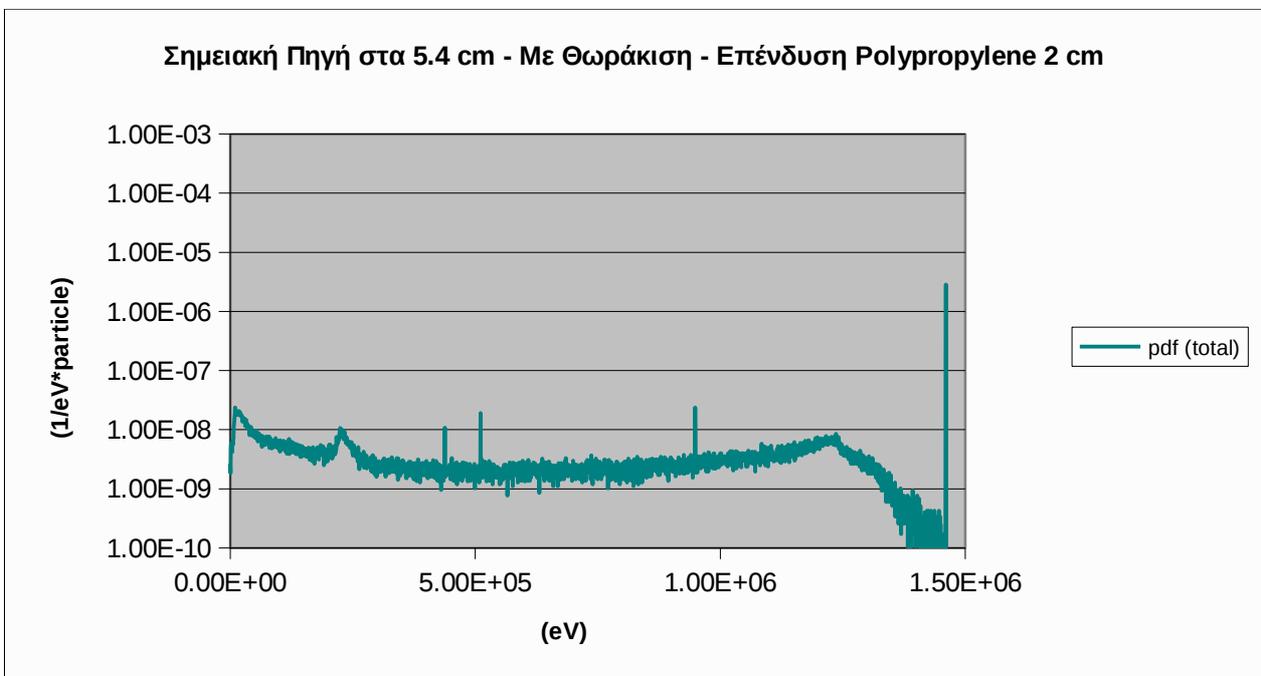
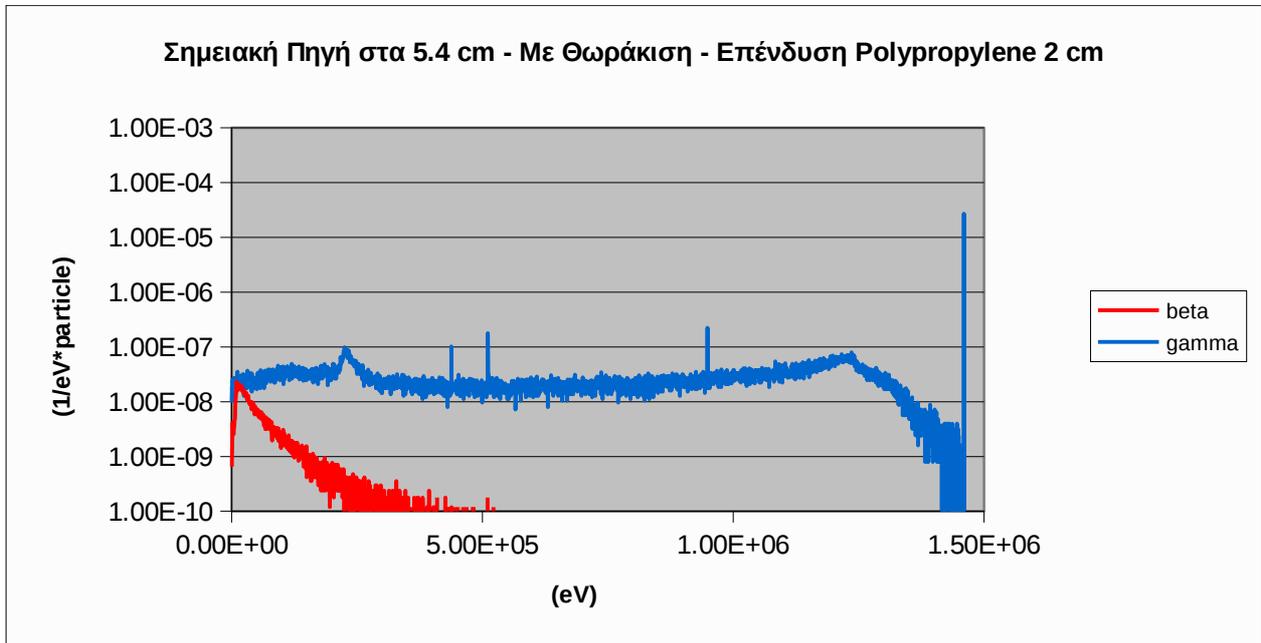
(4.6.3.4) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και επένδυση 0.3cm plexiglass



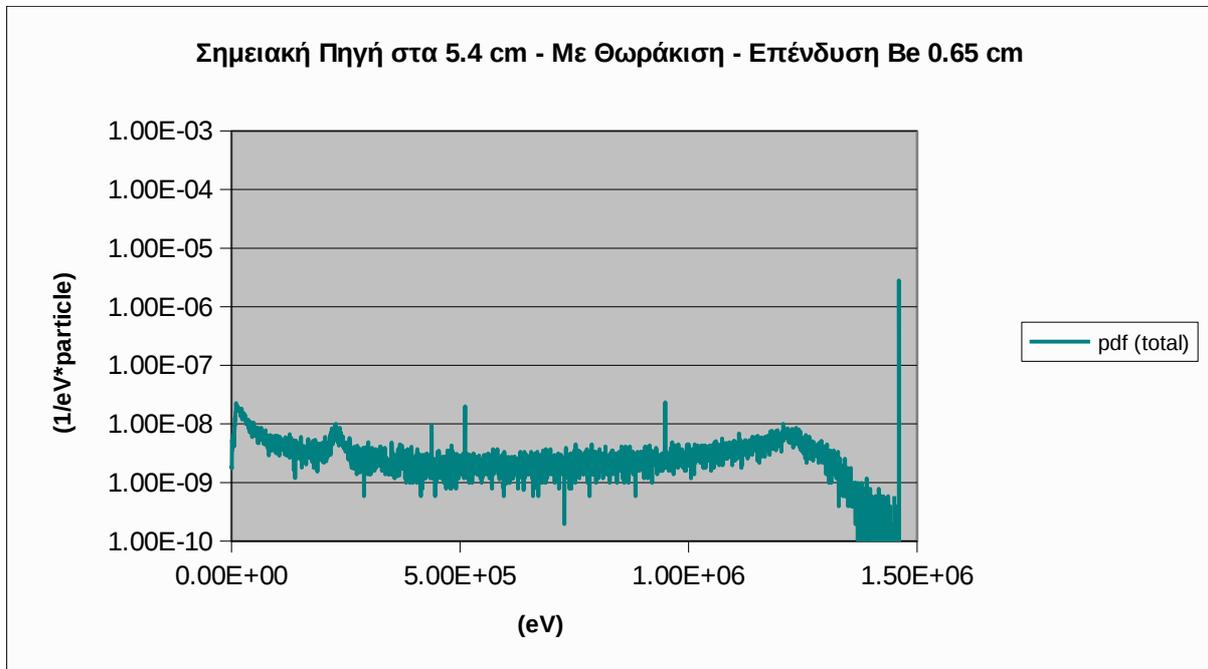
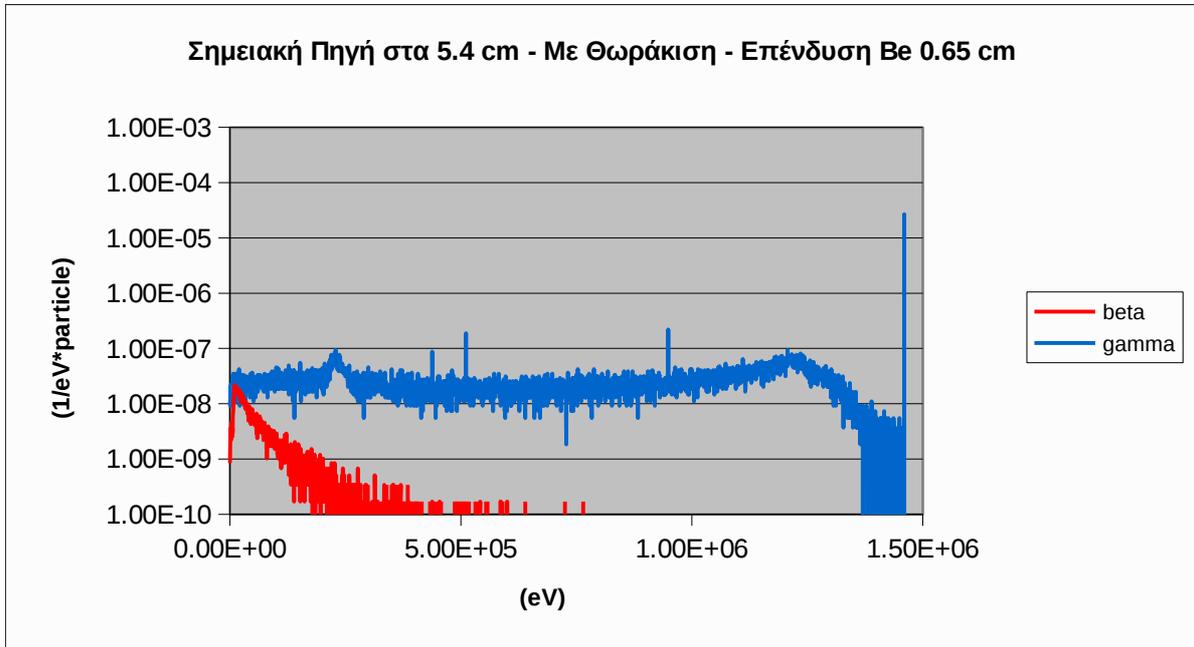
(4.6.3.4) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και επένδυση 2cm plexiglass



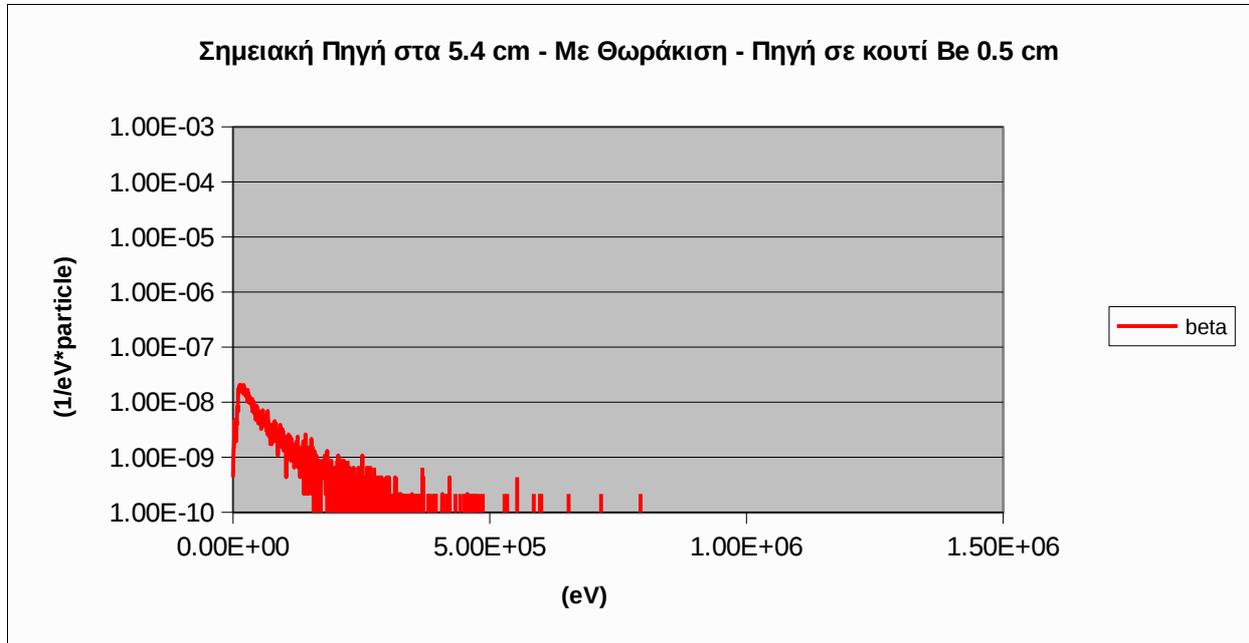
(4.6.3.5) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και επένδυση 2cm polypropylene



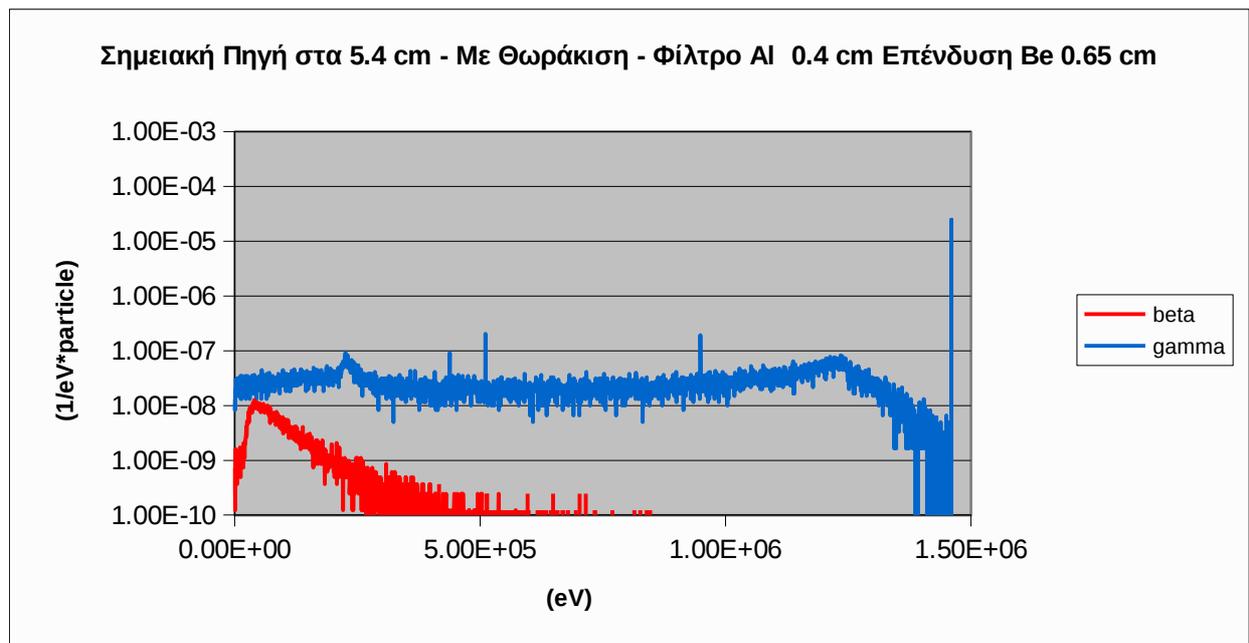
(4.6.3.6) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και επένδυση 0.65cm beryllium

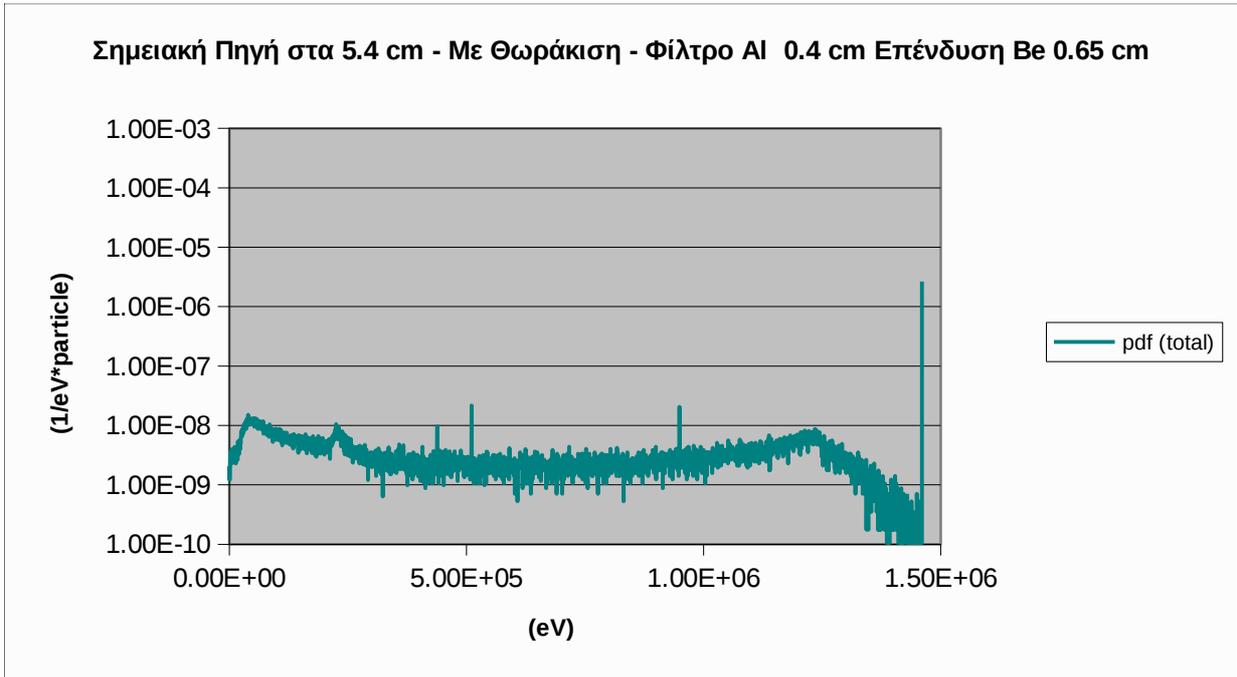


(4.6.3.7) Απόσταση 5.4cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση και πηγή σε κουτί Be πάχους 0.5cm

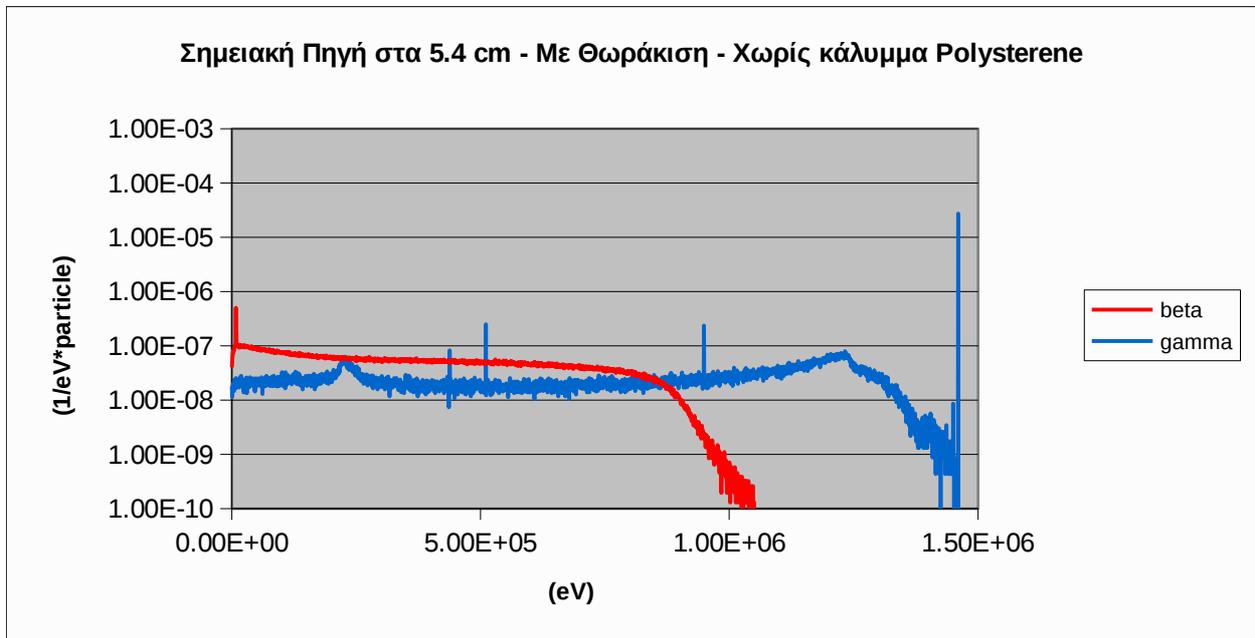


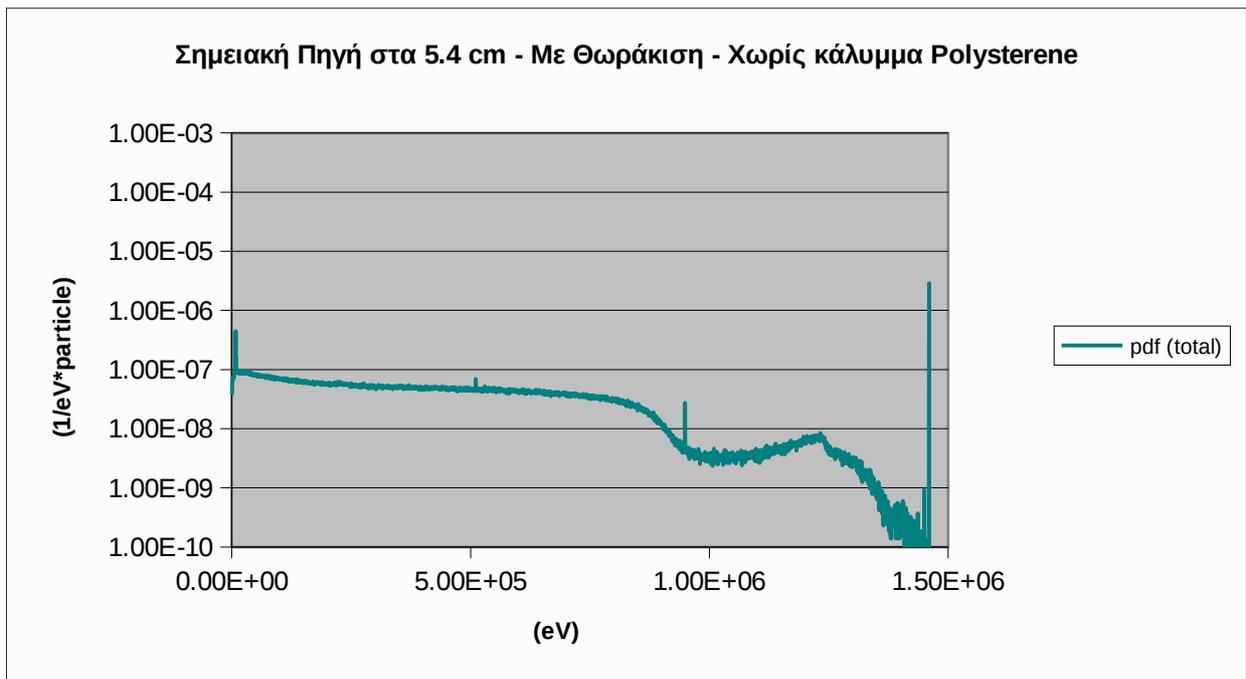
(4.6.3.8) Απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση, φίλτρο 0.4 cm Aluminum και επένδυση 0.65 cm beryllium



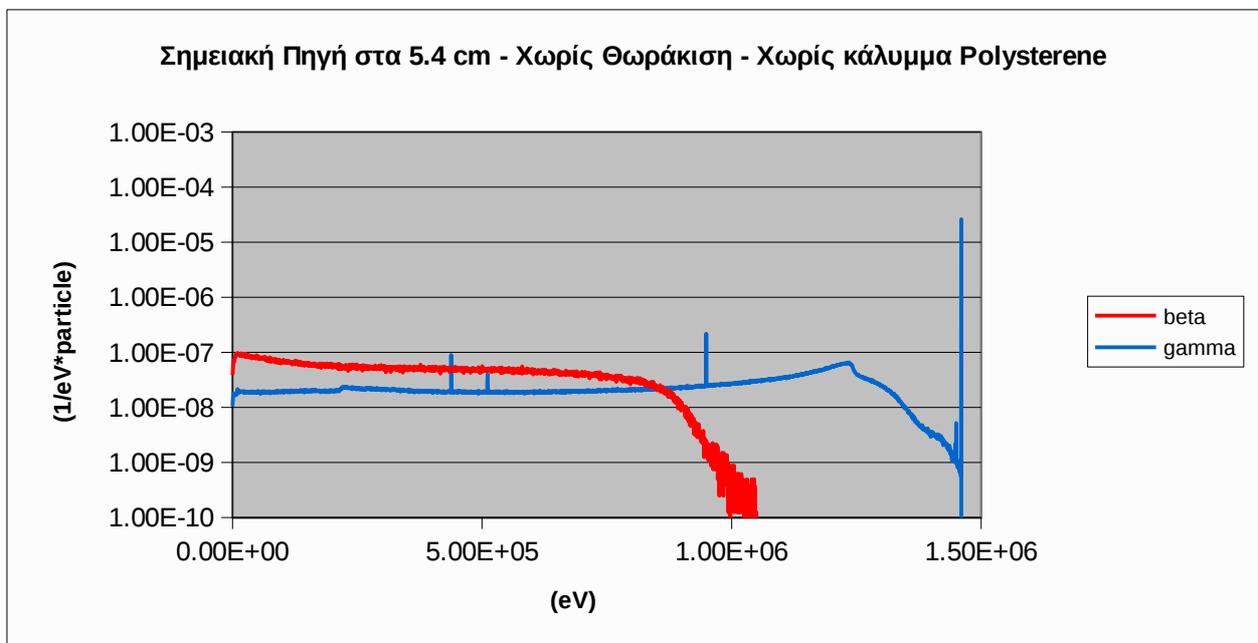


(5.3.1) Απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή με θωράκιση μετά την αφαίρεση του καλύμματος του ανιχνευτή πάχους 0.4 cm από polysterene

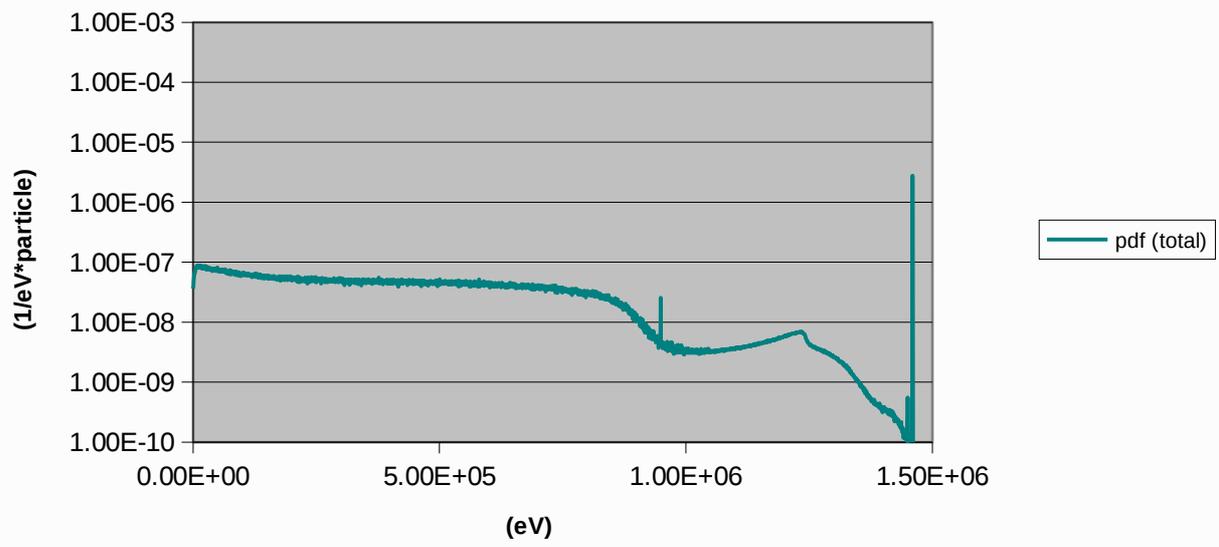




(5.3.1) Απόσταση 5.4 cm από τον ανιχνευτή χωρίς θωράκιση μετά την αφαίρεση και της πλαστικής βάσης 0.4 cm από polypropylene



Σημειακή Πηγή στα 5.4 cm - Χωρίς Θωράκιση - Χωρίς κάλυμμα Polyesterene



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΤΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΑΡΧΕΙΑ `pm_geometry.rep` ΚΑΙ `pengeom_tree.rep`

Σε αυτό το παράρτημα θα αναφερθούμε σε μια κρίσιμη παράμετρο που δεν αναφέρεται στο εγχειρίδιο του κώδικα και που μπορεί να οδηγήσει σε λάθη. Όπως έχουμε ήδη δει, σε κάθε σώμα του αρχείου γεωμετρίας αντιστοιχεί ο αριθμός που του έχουμε δώσει κατά την κατασκευή του αρχείου. Όπως είναι φυσικό η αρίθμηση των σωμάτων γίνεται σε αύξουσα σειρά ξεκινώντας από το σώμα «1».

E.1 Το βοηθητικό αρχείο “`pm_geometry.rep`”

Όταν το εκτελέσιμο πρόγραμμα που έχουμε δημιουργήσει τρέξει για πρώτη φορά, διαβάζει το αρχείο γεωμετρίας, το όνομα του οποίου δίνεται στο αρχείο εισόδου, και δημιουργεί μέσα στον ίδιο φάκελο το αρχείο “`pm_geometry.rep`”. Το αρχείο αυτό, που μπορεί να διαβαστεί με ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου, είναι ένα αντίγραφο του αρχείου γεωμετρίας και είναι αυτό το αρχείο στο οποίο στη συνέχεια απευθύνεται το εκτελέσιμο πρόγραμμα για να πάρει πληροφορίες για τη γεωμετρία. Γιατί όμως το εκτελέσιμο δεν παίρνει απ’ ευθείας πληροφορίες από το αρχείο γεωμετρίας; Αυτό συμβαίνει διότι κάποιος χρήστης μπορεί να μην έχει αρίθμηση τα σώματα με αύξουσα σειρά αλλά μπορεί να έχει βάλει τυχαίους αριθμούς, να έχει παραλείψει κάποιους κτλ. Σε αυτή την περίπτωση το πρόγραμμα δεν μπορεί να αντεπεξεχθεί και χρειάζεται αναδιάταξη της αρίθμησης των σωμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό δεν δημιουργεί πρόβλημα καθώς η αλλαγή δεν επηρεάζει την ορθότητα της προσομοίωσης. Πρόβλημα δημιουργείται όταν στο αρχείο εισόδου έχουν δηλωθεί κάποιες μορφής ανιχνευτές.

Όταν στο αρχείο εισόδου θέλουμε να δηλώσουμε τα σώματα που αντιστοιχούν στο ενεργό υλικό του ανιχνευτή τα δηλώνουμε δίνοντας τον αριθμό του αρχείου γεωμετρίας. Η αναδιάταξη όμως της αρίθμησης αφήνει ανεπηρέαστο το αρχείο εισόδου και τελικά ο ανιχνευτής τοποθετείται σε άλλο σώμα από το αρχικό. Αυτή η αναφορά έχει ιδιαίτερη αξία σε προσομοιώσεις όπως αυτές του συγκεκριμένου κεφαλαίου στις οποίες υπάρχει συνεχής πρόσθεση και αφαίρεση νέων υλικών, επενδύσεων κτλ. Είναι συνήθης πρακτική, μιας και τα ίδια αρχεία γεωμετρίας χρησιμοποιούνται σε πολλές προσομοιώσεις, οι μικρές αλλαγές να γίνονται με παράληψη σειρών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και όχι με αλλαγή ολόκληρου του αρχείου. Στην περίπτωση που η παράληψη γίνει αφαιρώντας τα σώματα όπως φαίνεται στο σχήμα δεν παρουσιάζεται πρόβλημα. Αν όμως ο χρήστης παραλείψει και τις σειρές στις οποίες έχει δημιουργήσει το σώμα η αρίθμηση στο αρχείο

pm_pengeom.rep αλλάζει.

<pre>BODY (22) BODY (23) BODY (24) BODY (25) BODY (26) BODY (27) C BODY (28) C BODY (29) BODY (28) BODY (29) 000000000000000000000000 END 0000000000000000</pre>	<pre>BODY (22) BODY (23) BODY (24) BODY (25) BODY (26) BODY (27) C BODY (28) C BODY (29) BODY (31) BODY (35) 000000000000000000000000 END 0000000000000000</pre>
--	--

Σχήμα E.1 Τμήμα αρχείου γεωμετρίας και το αντίστοιχο “pm_geometry.rep”

Πρέπει εδώ να επισημάνουμε πως στην περίπτωση που η αλλαγή γίνει στην αρίθμηση σωμάτων που είναι «μετά» από τα σώματα του ανιχνευτή, η αλλαγή δεν επηρεάζει την αρίθμηση των σωμάτων του ανιχνευτή. Αυτός είναι και ο λόγος που μπορεί κάποιες φορές η αναδιάταξη της αρίθμησης να μην γίνει αντιληπτή.

E.2 Το βοηθητικό αρχείο “pengeom_tree.rep”

Κατά την εκτέλεση του εκτελέσιμου αρχείου δημιουργείται και ένα άλλο αρχείο το “pengeom_tree.rep”. Η λειτουργία του είναι να ελέγχει κατά πόσο η γεωμετρία που καλείται να προσομοιώσει ο κώδικας είναι αποδοτική σε σχέση πάντα με την ταχύτητα της προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη Δ.Ε. η γεωμετρία της ανιχνευτικής διάταξης προήλθε σε μεγάλο βαθμό από προϋπάρχουσες Δ.Ε και δεν δόθηκε έμφαση στην βελτιστοποίηση της γεωμετρίας γι’ αυτό και οι περισσότερες προσομοιώσεις δεν είχαν ικανοποιητική ταχύτητα. Δύο διαφορετικά αρχεία “pengeom_tree.rep” από δύο διαφορετικές προσομοιώσεις φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

```
C
C ***** Adequacy of the geometry definition.
C
C The largest number of bodies in a module or
C   bodies limiting a single body is ..... 17
C The largest number of limiting surfaces for
C   a single body or module is ..... 26
C
C The simulation of this geometry will be very slow,
C   you should optimize the structure of the module tree.
```

```
C
C ***** Adequacy of the geometry definition.
C
C The largest number of bodies in a module or
C   bodies limiting a single body is ..... 3
C The largest number of limiting surfaces for
C   a single body or module is ..... 5
C
C The simulation of this geometry will be relatively fast,
C   no further optimization seems to be required.
```

Σχήμα E.2 Τμήματα αρχείων “pengeom_tree.rep”

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασίου Ν, “Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονιακών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE – Εφαρμογή σε προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων και βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων”, Διπλωματική Εργασία , Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα (2006)
- Αναγνωστάκης Μ.Ι, “ γ - Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χαμηλών Ραδιενεργειών στην Περιοχή Χαμηλών Ενεργειών”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα (1998)
- Βασιλοπούλου Θ, “Προσδιορισμός Συντελεστών Διόρθωσης Απόδοσης Ανιχνευτή HPGe Λόγω Του Φαινομένου της Πραγματικής Σύμπτωσης μέσω Προσομοίωσης Monte Carlo”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- Λεωνίδου Δ, “Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Ύλης – Δοσιμετρία – Θωράκιση”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα (1984)
- D. Mrdja, I. Bikit, M. Veskovic, S. Forkapic, “Contribution of Pb-210 bremsstrahlung to the background of lead shielded gamma spectrometers”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 739 – 744
- D. Mrdja, I. Bikit . and J. Slivka, “The Pb-210 bremsstrahlung component in the background spectrum of lead shielded γ -spectrometers”, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia (2006)
- David E. Alburger, “Beta-Ray Spectrum of K-40”, Brookhaven National Laboratory (1949)
- G.B. Bishop, A.M. Marafie, “Experimental Benchmark Data Showing the Importance of Bremsstrahlung in shielding Calculations”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 5, pp35 to 45, Pergamon Press (1978)

- Gilmore G, Hemingway J, “*Practical Gamma-Ray Spectrometry – 2nd Ed*”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester (2008)
- Glenn F Knoll, “*Radiation Detection and Measurement*” - 3d Ed”, John Wiley & Sons, Inc, Chichester (2000)
- H. Leutz, G. Schulz, H. Wenninger, “*The Decay of Potassium-40*”, *Zeitschrift fur Physik* 187, (1965), 151 – 164
- H. L. Malt, M. M. Watt, I Bostok, J.L. Campbell, P. Jagam, J. J. Simson, “*Background Reduction in Germanium Spectrometers: Materials Selection, Geometry and shielding*”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 223 (1984) 420 – 425
- Kazuo Shin and Yoshihisa Hayashida, “*Shielding Study of Bremsstrahlung in Bulk Media with Electrons Part1: Monte Carlo Calculations of Thick – Target Bremsstrahlung Spectrum*”, *Nuclear Instruments and Methods* 151 (1978) 271 – 276
- M.L. Smith, L. Bignell, D. Alexiev, L. Mo, J. Harrison, “*Evaluation og lead shielding for a gamma-spectroscopy system*”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 589 (2008) 275 – 279
- McCallum G.J. and Coote G.E., “*Nuclear Instruments and Methods*” 130 (1975) 189
- R. Nunez – Lagos and A. Virto, “*Shielding and Background Reduction*”, *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 47, No 9/10, pp. 1011 – 1021 (1996)
- Robley D Evans, “*The Atomic Nucleus*”, McGraw Hill, Inc, New York (1955)
- 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*
- Tsoulfanidis Nicholas, “*Measurement and detection of radiation*”, Taylor & Francis (1995)

- V. Sundararaman, “*Effect of Bremsstrahlung on Scattered Gamma Ray Spectra*”, Nuclear Instruments and Methods 171 (1980) 561 – 565
- <http://www.canberra.com>