

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ
ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ μ ΧΡΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕ-CARLO**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της
ΚΥΡΙΑΚΗΣ Γ. ΦΩΤΕΙΝΑΚΗ**

Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επ. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Δ.Ι.Καράγγελος & Μ.Ι. Σάββα

ΑΘΗΝΑ 2012

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ κατά το χρονικό διάστημα Μαρτίου-Οκτωβρίου 2012.

Ξεκινώντας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία.. Κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών μου μετέδωσε πλήθος γνώσεων και προκάλεσε το ενδιαφέρον μου για την Πυρηνική Τεχνολογία. Η στήριξη και βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας ήταν πολύτιμη.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την υποψήφια διδάκτορα δις Μ.Σάββα για την πολύτιμη και ουσιαστική συμβολή της στην πραγματοποίηση αυτής της ΔΕ. Την ευχαριστώ για τις συμβουλές της, την καθοδήγηση, το ενδιαφέρον, την ηθική στήριξη, την υπομονή και όλη τη βοήθεια της στην επίλυση των όποιων προβλημάτων παρουσιάστηκαν. Διέθεσε πολύτιμο προσωπικό χρόνο και η συνεργασία μας ήταν πάντα άψογη.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδάκτορα κ. Δ.Καράγγελο για τη συνεργασία και τις συμβουλές του, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κ.Καρφόπουλο για τις πάντα εύστοχες παρατηρήσεις του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ για τη βοήθεια που μου προσέφεραν και το κλίμα συνεργασίας.

Κυριακή Γ. Φωτεινάκη

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1:

Εισαγωγή.....	1
---------------	---

Κεφάλαιο 2:

Γ-φασματοσκοπική ανάλυση με φωτόνια χαμηλών ενεργειών

2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Η γ-φασματοσκοπική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή τύπου LEGe ...	6
2.2.1 Η ανιχνευτική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ, με ανιχνευτή LEGe.....	6
2.2.2 Ο ανιχνευτής LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	7
2.2.3 Η θωράκιση του ανιχνευτή LEGe.....	9
2.3 Το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.....	9
2.3.1 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος-Βασικές έννοιες	9
2.3.2 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.....	12
2.3.3 Το πρόβλημα της αναγωγής της απόδοσης, λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος.....	15
2.3.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης, κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.....	19
2.3.4.1 Μέθοδοι που βασίζονται στην παρασκευή πρότυπων πηγών βαθμονόμησης της ίδιας γεωμετρίας, και σύστασης ίδιας ή όμοιας με τη σύσταση των αναλυόμενων δειγμάτων.....	20
2.3.4.2 Μέθοδοι που βασίζονται στη βαθμονόμηση απόδοσης με πρότυπη πηγή και την εκτίμηση συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ των υλικών πηγής βαθμονόμησης και δείγματος.....	21
2.3.4.2.1 Μέθοδοι που βασίζονται σε αναλυτική σχέση για την εκτίμηση του βαθμού αυτοαπορρόφησης σε ένα δείγμα.....	21

2.3.4.2.2 Μέθοδος που βασίζεται σε απευθείας εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης.....	23
2.3.4.3 Μέθοδοι που βασίζονται στην απευθείας εκτίμηση της απόδοσης για τη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή και τη συγκεκριμένη σύσταση υλικού.....	26
2.3.4.3.1 Μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo.....	27
2.4 Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης φωτονίων (μ).....	29
2.4.1 Εξασθένηση των φωτονίων κατά την αλληλεπίδρασή τους με τη ύλη....	30
2.4.1.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ή φωτοηλεκτρική απορρόφηση.....	30
2.4.1.2 Σκέδαση Compton	32
2.4.1.3 Δίδυμη γέννεση.....	33
2.4.1.4 Σκέδαση Rayleigh.....	33
2.4.2 Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης (μ).....	34
2.4.3 Βιβλιογραφικές πηγές δεδομένων για το γραμμικό και μαζικό συντελεστή εξασθένησης.....	37

Κεφάλαιο 3:

Μέθοδοι προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ

3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Πειραματικός προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ	40
3.2.1 Ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ	43
3.2.2 Πειράματα για τον προσδιορισμό του μ με την αρχική γεωμετρία δέσμης.....	45
3.3 Προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (μ) μέσω τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo.....	51
3.3.1 Η προσομοίωση Monte Carlo.....	52
3.3.1.1 Ο κώδικας Monte-Carlo PENELOPE:.....	53
3.3.1.1.1 Κυρίως προγράμματα του κώδικα PENELOPE.....	54
3.3.1.1.2 Υπορουτίνες που καλούνται από τον κώδικα PENELOPE.....	54
3.3.1.1.3 Αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE.....	55
3.3.1.1.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές του κώδικα PENELOPE	56
3.3.1.1.5 Αρχεία εξόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE	57

3.3.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης (μ) με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo.....	58
3.3.2.1 Επιλογή του εύρους του ενεργειακού παραθύρου.....	60
3.3.2.2 Τροποποίηση του κυρίως προγράμματος PENMAIN για προσομοίωση πηγής όγκου.....	61
3.3.2.3 Προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή LEGe.....	62
3.4 Προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό του μ , με την αρχική γεωμετρία δέσμης.....	63
3.4.1 Μελέτη της επίδρασης του επιπέδου λεπτομέρειας στην περιγραφή της πειραματικής διάταξης κατά την προσομοίωση.....	64
3.4.2 Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με σημειακή πηγή και πηγή όγκου για απορροφητή νερό.....	70
3.4.3 Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με σημειακή πηγή και πηγή όγκου για απορροφητή SiO_2	72
3.5 Αναζήτηση νέων γεωμετριών δέσμης για ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή μ	74
3.5.1 Προσομοιώσεις για γεωμετρία σημειακής πηγής τοποθετημένη σε διάφορες αποστάσεις από τον ανιχνευτή	75
3.5.2 Πειράματα για τη νέα γεωμετρία σημειακής πηγής τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.....	80
3.5.3 Προσομοιώσεις γεωμετρίας με χρήση κατευθυντών δέσμης (collimators).....	81
3.5.4 Πειράματα με χρήση κατευθυντών δέσμης οπής διαμέτρου 5mm.....	85
3.6 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....	90

Κεφάλαιο 4:

Εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η λόγω αυτοαπορρόφησης

4.1 Εισαγωγή.....	94
4.2 Υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης με την ολοκληρωτική μέθοδο.....	95

4.2.1 Αποτελέσματα υπολογισμών για το συντελεστή αναγωγής της απόδοσης με το πρόγραμμα <i>factor</i> , για υλικό H ₂ O.....	98
4.2.2 Αποτελέσματα υπολογισμών για το συντελεστή αναγωγής της απόδοσης με το πρόγραμμα <i>factor</i> , για υλικό SiO ₂	102
4.3 Υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης ως ο λόγος της απόδοσης της πηγής βαθμονόμησης προς την απόδοση του αναλυόμενου δείγματος.....	102
4.4 Ανάλυση ευαισθησίας της επίδρασης του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ στο συντελεστή αναγωγής απόδοσης η	106
4.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου.....	109
Κεφάλαιο 5:	
Συμπεράσματα και μελλοντικά βήματα.....	112
Παράρτημα Α- Πιστοποιητικά ανιχνευτικών διατάξεων και πηγών	117
Παράρτημα Β- Κατάλογος φασμάτων που ελήφθησαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ.....	124
Παράρτημα Γ- Αρχεία εισόδου του προγράμματος PENELOPE.....	130
Παράρτημα Δ- Τροποποίηση του κώδικα PENELOPE για γεωμετρία όγκου.....	194
Παράρτημα Ε- Άντληση δεδομένων από τη Βάση Δεδομένων του NIST.....	196
Παράρτημα Στ- Πρόγραμμα <i>factor</i>	198
Παράρτημα Ζ: Αναλυτικά αποτελέσματα συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης.....	211
Βιβλιογραφία.....	214

Κεφάλαιο 1:

Εισαγωγή

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος με χρήση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, είναι η απορρόφηση των φωτονίων μέσα στο ίδιο το δείγμα (αυτοαπορρόφηση). Η αυτοαπορρόφηση αυτή εξαρτάται σημαντικά από το υλικό του δείγματος και εν γένει είναι διαφορετική από την αυτοαπορρόφηση που παρουσιάζεται μέσα στην πρότυπη πηγή που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού συχνά χρησιμοποιείται κατάλληλος συντελεστής αναγωγής της απόδοσης, για τον υπολογισμό του οποίου απαιτείται η γνώση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ , τόσο για το υλικό του δείγματος, όσο και για το υλικό της πηγής βαθμονόμησης.

Μέχρι σήμερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται κατάλληλη πειραματική μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή μ που εισήχθη στη [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] και η οποία βασίζεται στη χρήση ανοικτής δέσμης φωτονίων. Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ ελέγχθηκε η υπόψη γεωμετρία δέσμης και στη συνέχεια εισήχθησαν και εξετάστηκαν νέες γεωμετρίες δέσμης, με στόχο τον ακριβέστερο προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ . Ο έλεγχος της ισχύουσας γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε μέσω πειραματικής διαδικασίας, ενώ κάθε νέα γεωμετρία που εισήχθη εξετάστηκε αρχικά με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Οι δύο νέες γεωμετρίες δέσμης, για τις οποίες τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπέδειξαν πλεονέκτημα σε σχέση με τη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία δέσμης, ελέγχθηκαν εν συνεχεία πειραματικά. Τελικά, με τον τρόπο αυτό προτάθηκε πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ για κάθε μία από τις ενέργειες που εξετάστηκαν.

Στη συνέχεια, οι βέλτιστες τιμές του συντελεστή μ που εκτιμήθηκαν πειραματικά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή αναγωγής που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τιμές του συντελεστή αναγωγής που εκτιμήθηκαν για τις θεωρητικές τιμές του ολικού

γραμμικού συντελεστή γραμμικής εξασθένησης μ . Στα πλαίσια της ΔΕ εκτιμήθηκε και η τιμή του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης με χρήση αμιγώς τεχνικών προσομοίωσης και τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Η ΔΕ αποτελείται από πέντε κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια:

Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται οι βασικές αρχές της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, με έμφαση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών και των ιδιοτήτων που παρουσιάζει. Αρχικά, περιγράφεται η γ-φασματοσκοπική διάταξη με ανιχνευτή LEGe που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Δίνονται τα χαρακτηριστικά ολόκληρης της ανιχνευτικής διάταξης, με έμφαση σε αυτά του ανιχνευτή LEGe και της θωράκισής του. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, και παρουσιάζεται η θεωρητική θεμελίωση του προβλήματος αναγωγής της απόδοσης, λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης φωτονίων μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος. Ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του φαινομένου, με έμφαση σε εκείνη που στηρίζεται στη χρήση συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η ο οποίος εκτιμάται με την ολοκληρωτική μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Στο ίδιο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εξασθένησης που υφίσταται ένα φωτόνιο κατά την αλληλεπίδρασή του με την ύλη, ορίζεται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , ο οποίος αποτελεί τη βασική παράμετρο για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης και εξετάζονται οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται αυτός. Κλείνοντας, παρατίθενται οι κυριότερες βιβλιογραφικές πηγές του συντελεστή μ και επισημαίνονται οι ελλείψεις, οι οποίες οδηγούν στην ανάγκη για αναζήτηση πειραματικών τεχνικών για την εκτίμησή του.

Το 3^ο Κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους προσδιορισμού του ολικού γραμμικού εξασθένησης μ . Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή μ , η οποία εφαρμόζεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και παρουσιάζονται οι πρότυπες ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον έλεγχο της

χρησιμοποιούμενης γεωμετρίας και διαπιστώνεται η ανάγκη για αναζήτηση νέων γεωμετριών. Προς αυτή την κατεύθυνση, όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μέσω τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo και για το λόγο αυτό, πριν την παρουσίασή τους, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της λογικής που ακολουθούν τέτοιοι κώδικες, ενώ δίνονται περισσότερα στοιχεία για τον κώδικα PENELOPE που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ακόμα, περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , χρησιμοποιώντας αμιγώς τεχνικές προσομοίωσης και επεξηγούνται οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζονται στον εν λόγω υπολογισμό. Εν συνεχεία, εξετάζονται τα αποτελέσματα των γεωμετριών που δοκιμάστηκαν και επιλέγονται δύο από αυτές, καταδεικνύοντας τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τη χρησιμοποιούμενη σήμερα γεωμετρία δέσμης. Ακολουθούν οι αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες για τις υπόψιν γεωμετρίες και ελέγχονται τα αποτελέσματά τους. Πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της ΔΕ διερευνήθηκε η δυνατότητα πειραματικού προσδιορισμού του μ και προτείνεται και η αντίστοιχη μεθοδολογία για ενέργεια φωτονίων 32.19keV – πολύ χαμηλότερη από την ελάχιστη ενέργεια 46.54keV που μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αυτό θα επιτρέψει μελλοντικά την επέκταση των διορθώσεων λόγω αυτοαπορρόφησης που γίνονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, σε χαμηλότερες ενέργειες. Το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια ανασκόπηση των γεωμετριών δέσμης που μελετήθηκαν, και προτείνεται η βέλτιστη γεωμετρία για κάθε ενέργεια φωτονίων που εξετάστηκε.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνονται εκτιμήσεις του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, για πηγή βαθμονόμησης από υλικό 4M HCl και τα υλικά δείγματος νερό και SiO₂. Αρχικά, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης βάσει της ισχύουσας μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ των υλικών, θεωρητικές τιμές και τις τιμές που εκτιμήθηκαν πειραματικά βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ακολούθως, προτείνεται και ελέγχεται μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης που βασίζεται αμιγώς σε προσομοίωση. Στην προκειμένη περίπτωση ο συντελεστής αναγωγής εκτιμάται ως ο λόγος των δύο αποδόσεων που υπολογίζονται από την προσομοίωση για την πηγή βαθμονόμησης και το αναλυόμενο δείγμα. Στο τέλος του

κεφαλαίου, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της επίδρασης του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ στο συντελεστή αναγωγής απόδοσης, κάτι που είναι το πρώτο βήμα προκειμένου να γίνει εκτίμηση της αβεβαιότητας που εισάγεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση εξαιτίας της διόρθωσης λόγω αυτοαπορρόφησης.

Η ΔΕ ολοκληρώνεται με 7 Παραρτήματα και συγκεκριμένα:

Παράρτημα Α: Πιστοποιητικά ανιχνευτικών διατάξεων και πηγών

Παράρτημα Β: Κατάλογος φασμάτων που ελήφθησαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ

Παράρτημα Γ: Αρχεία εισόδου του προγράμματος PENELOPE

Παράρτημα Δ: Τροποποίηση του κώδικα PENELOPE για γεωμετρία όγκου

Παράρτημα Ε: Άντληση δεδομένων από τη Βάση Δεδομένων του NIST.

Παράρτημα Στ: Πρόγραμμα factor

Παράρτημα Ζ: Αναλυτικά αποτελέσματα συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης

Κεφάλαιο 2:

Γ-φασματοσκοπική ανάλυση με φωτόνια χαμηλών ενεργειών

2.1 Εισαγωγή

Η γ-φασματοσκοπία είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ανάλυσης δειγμάτων, για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των περιεχομένων σε αυτά γ-ραδιενεργών ισοτόπων. Η μέθοδος στηρίζεται στην επεξεργασία του φάσματος των ακτίνων-γ που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων και ανιχνεύονται από κατάλληλο ανιχνευτικό σύστημα. Κατά τον ποιοτικό προσδιορισμό, γίνεται εκτίμηση του είδους των πυρήνων που διασπώνται και κατά συνέπεια του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου. Κατά τον ποσοτικό προσδιορισμό, γίνεται εκτίμηση του πλήθους των πυρήνων που διασπώνται ανά μονάδα χρόνου, για κάθε είδος πυρήνα, δηλαδή προσδιορίζεται η ραδιενέργεια του προς ανάλυση δείγματος. Η γ-φασματοσκοπία είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανίχνευσης ραδιενεργών ισοτόπων, καθώς τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα που συνήθως μελετώνται εκπέμπουν ακτίνες-γ. Ένα βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι αναλύει ταυτόχρονα όλα τα ισότοπα που περιέχονται στο δείγμα, χωρίς να απαιτείται εκ των προτέρων διαδικασία ή γνώση της ύπαρξής του για κάποιο από αυτά. Επιπλέον, είναι σημαντικό το γεγονός ότι η μέθοδος δεν είναι καταστρεπτική για το δείγμα, διότι δεν απαιτεί ειδική προετοιμασία, όπως για παράδειγμα στην α-φασματοσκοπία, όπου προηγείται η ραδιοχημική επεξεργασία του δείγματος.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι η απορρόφηση χαμηλής ενέργειας φωτονίων μέσα στο δείγμα από το οποίο εκπέμπονται. Το φαινόμενο αυτό που είναι γνωστό ως «αυτοαπορρόφηση» εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό του δείγματος.

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιούνται δύο ανιχνευτικές διατάξεις για την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών που βασίζονται σε έναν ανιχνευτή Ge χαμηλών ενεργειών (**L**ow **E**nergy **G**e, LEGe) και έναν ανιχνευτή Ge ευρείας περιοχής (**E**Xtended **R**ange, XtRa).

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται, αρχικά, η περιγραφή της γ-φασματοσκοπικής διάταξης του ανιχνευτή LEGe που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ και δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, επιχειρείται η θεωρητική θεμελίωση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης των φωτονίων μέσα στο αναλυόμενο δείγμα και γίνεται εισαγωγή του *συντελεστή αναγωγής της απόδοσης (η)*, επισημαίνεται η ιδιαιτερότητα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται, ενώ στη συνέχεια παρατίθεται μια σειρά μεθόδων που συναντώνται στη βιβλιογραφία, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν λόγω του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης.

Η τελευταία παράγραφος του κεφαλαίου αναφέρεται στον *ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης φωτονίων (μ)*, ο οποίος – όπως εξηγείται – αποτελεί τη βασική παράμετρο για τον υπολογισμό του *συντελεστή αναγωγής της απόδοσης (η)*. Καταρχήν παρουσιάζονται τα είδη αλληλεπιδράσεων με την ύλη που μπορεί να υποστεί ένα φωτόνιο κατά τη διέλευσή του από ένα υλικό, από τα οποία αθροιστικά, προκύπτει η εξασθένιση του φωτονίου και εν συνεχεία, εισάγεται ο συντελεστής μ και μελετώνται οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται, ενώ κλείνοντας παρατίθενται οι κυριότερες βιβλιογραφικές πηγές του συντελεστή.

2.2 Η γ-φασματοσκοπική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή τύπου LEGe

2.2.1 Η ανιχνευτική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ, με ανιχνευτή LEGe

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, από το 1988 είναι εγκατεστημένη και λειτουργεί γ-φασματοσκοπική διάταξη με ανιχνευτή Ge χαμηλών ενεργειών (Low Energy Germanium Detector - LEGe). Η διάταξη αυτή είναι βαθμονομημένη για την ανίχνευση φωτονίων σε δύο ενεργειακές περιοχές. Αρχικά, η διάταξη βαθμονομήθηκε για την ενεργειακή περιοχή 0-2000keV, η οποία αποτελεί τον ανιχνευτή “3”, σύμφωνα με την κωδικοποίηση που έχει γίνει στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και αργότερα για την ενεργειακή περιοχή 0-200keV, [Δ.Δ. Αναγνωστάκης Μ., 1998], που αποτελεί τον ανιχνευτή “6”. Τα πειράματα στην παρούσα ΔΕ έγιναν με τον ανιχνευτή LEGe ρυθμισμένο και στις δύο περιοχές ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες.

Η διάταξη αποτελείται από:

- Επίπεδο ανιχνευτή Ge χαμηλών ενεργειών LEGe, τύπου GL2020-7500 της Canberra Industries (CI).
- Προενισχυτή τύπου, 2001CP της CI, ενσωματωμένο στον κρυστάτη.
- Ενισχυτή ύψους παλμών, τύπου 2020 της CI.
- Διαχωριστή ύψους παλμών, τύπου 1432 της CI.
- Καταμετρητή παλμών, τύπου 2071 της CI.
- Αναλογοψηφιακό μετατροπέα, τύπου 8075 της CI.
- Πολυκαναλικό αναλυτή, τύπου AIM 556A της CI.
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3105 της CI.
- Δοχείο υγρού αζώτου όγκου 30l, στο οποίο είναι εμβαπτισμένος ο κρυστάτης.
- Ελεγκτή στάθμης του αζώτου, τύπου 1786 της CI.
- Θωράκιση του ανιχνευτή, σχεδιασμένη στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- Μονάδα NIM-BIN, τύπου 2100 της CI.

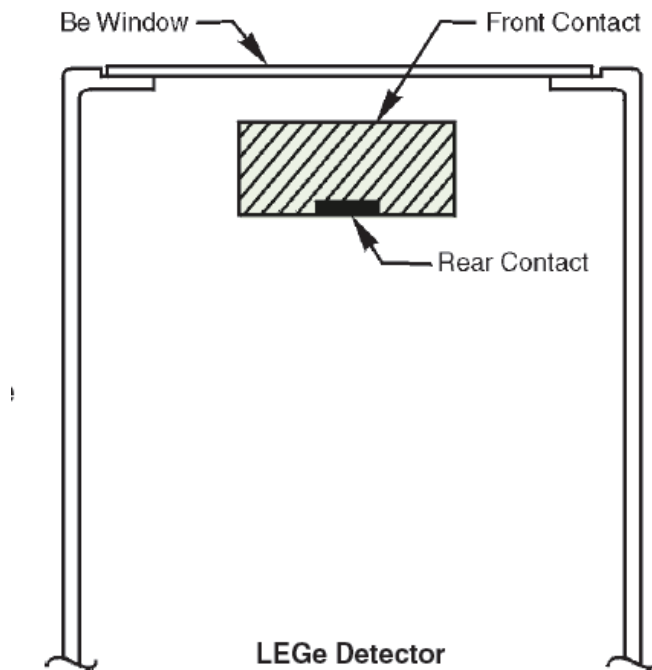
Ο πολυκαναλικός αναλυτής είναι συνδεδεμένος σε Η/Υ. Για λόγους προστασίας της διάταξης από αυξομειώσεις τάσης του δικτύου ή διακοπές ρεύματος, η διάταξη τροφοδοτείται μέσω μονάδας αδιάλειπτης παροχής τάσης (UPS), ικανής να εξασφαλίσει τη λειτουργία των γ-φασματοσκοπικών διατάξεων του ΕΠΤ-ΕΜΠ για χρονική διάρκεια περίπου 15'.

2.2.2 Ο ανιχνευτής LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Πρόκειται για τον ανιχνευτή γερμανίου χαμηλών ενεργειών (LEGe) τύπου GL2020-7500 της Canberra Industries (CI), με s/n b87547. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίνονται στο σχετικό πιστοποιητικό, το οποίο παρατίθεται στο παράρτημα Α. Είναι ένας επίπεδος ανιχνευτής γερμανίου κυλινδρικού σχήματος και μικρού πάχους, ενεργού διαμέτρου 50.5mm, ενεργού επιφάνειας 2000mm² και ύψους 20mm. Η συνιστώμενη τάση λειτουργίας για το σχηματισμό ισχυρού πεδίου μέσα στον ανιχνευτή είναι 2000V. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος από τον κατασκευαστή μέσα σε κατακόρυφο κρυστάτη τύπου 7500 της CI. Το παράθυρο του κρυστάτη είναι κατασκευασμένο από

Be πάχους 0.5mm, με συνέπεια τη μικρή εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Λόγω του μικρού πάχους του παραθύρου, αλλά και της ύπαρξης κενού μέσα στον κρυστάτη, το παράθυρο Be καθίσταται ιδιαίτερα ευαίσθητο. Για το λόγο αυτό έχει τοποθετηθεί στον ανιχνευτή κατάλληλη βάση από plexiglass, επάνω στην οποία τοποθετούνται όλα τα προς ανάλυση δείγματα [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Επιπλέον του ανιχνευτή, μέσα στον κρυστάτη βρίσκεται και το τμήμα του προενισχυτή, έτσι ώστε με την ψύξη του να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του. Ο ανιχνευτής ψύχεται σε θερμοκρασία υγρού αζώτου. Το δοχείο Dewar που χρησιμοποιείται είναι χωρητικότητας 30L και πληρούται με υγρό άζωτο κάθε 7 ημέρες. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, όπως δίνεται στο πιστοποιητικό του κατασκευαστή, σε όρους εύρους ημίσειας ύψους είναι:

- για ενέργεια φωτονίων **5.9keV, FWHM=341eV**
- για ενέργεια φωτονίων **122keV, FWHM=530eV** και **FWTM=996eV**



Σχήμα 2. 1

Σχηματική απεικόνιση του ανιχνευτή LGe

2.2.3 Η θωράκιση του ανιχνευτή LEGe

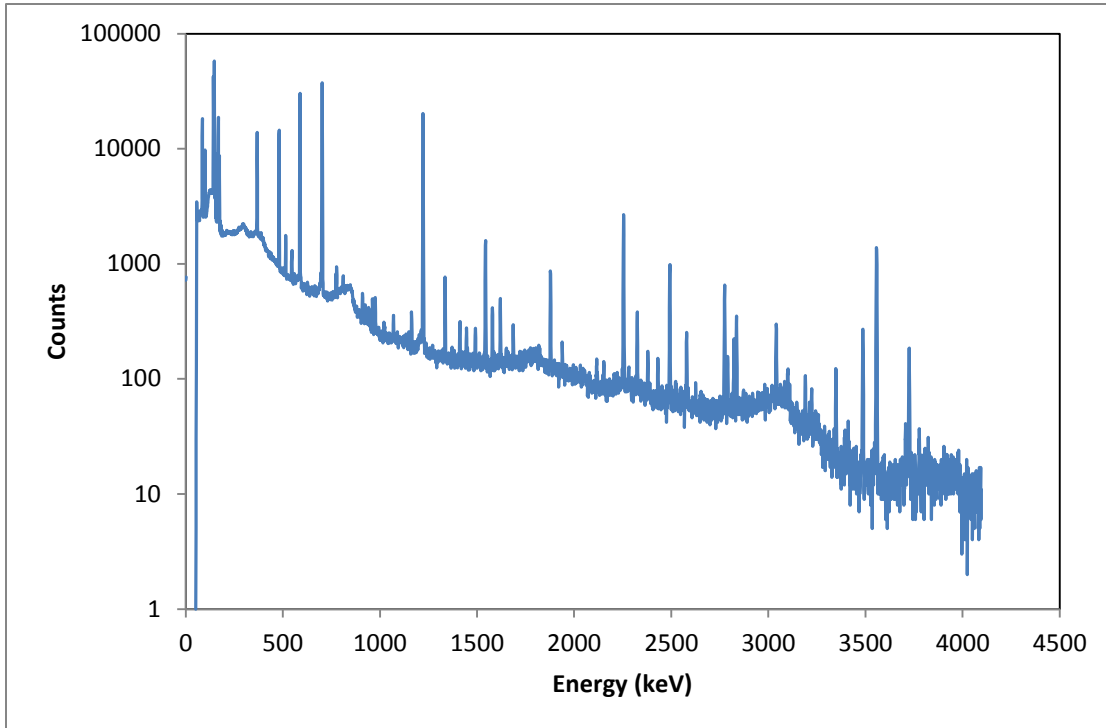
Η θωράκιση του ανιχνευτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο κατά την ανάλυση ενός δείγματος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την περιοχή χαμηλών ενεργειών. Ο ανιχνευτής ιδανικά θα πρέπει να προσβάλλεται μόνο από φωτόνια προερχόμενα από το δείγμα, και όχι από εκείνα που προέρχονται από τον περιβάλλοντα χώρο, και αποτελούν το φυσικό υπόστρωμα. Στην πραγματικότητα, δεν είναι εφικτό να εξαλειφθεί τελείως το υπόστρωμα, αφού σε αυτό συνεισφέρει και η ίδια η θωράκιση με τις προσμείξεις ισοτόπων, που έστω και σε ελάχιστα ποσά, διαθέτει. Επιπλέον, η ύπαρξη της θωράκισης οδηγεί σε αύξηση των φωτονίων που προσβάλλουν τον ανιχνευτή λόγω προηγούμενης αλληλεπίδρασης με τη θωράκιση. Ωστόσο, το υπόστρωμα μπορεί να μειωθεί σημαντικά, με μια προσεκτική σχεδίαση και κατασκευή της θωράκισης.

Η θωράκιση που χρησιμοποιείται στον ανιχνευτή LEGe έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί στον Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Αποτελείται από ατσάλι πάχους 100mm, το οποίο εσωτερικά είναι επενδεδυμένο με φύλλα καδμίου (Cd) και χαλκού (Cu), πάχους 1mm το καθένα. Το κάδμιο έχει την ιδιότητα να απορροφά τις K_{α} και K_{β} ακτίνες-X του Pb, ο οποίος υπάρχει ως πρόσμιξη στο ατσάλι, ενώ ο χαλκός απορροφά τις ακτίνες-X που προέρχονται από το κάδμιο. Οι εσωτερικές διαστάσεις της θωράκισης είναι 30x30x50cm. Έχει υπολογιστεί ότι το υπόστρωμα του ανιχνευτή με κλειστή θωράκιση μειώνεται κατά τρεις φορές (σε ~2.5cps).

2.3 Το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση

2.3.1 Η γ -φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος-Βασικές έννοιες

Η γ -φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων, έχει ως στόχο τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των περιεχομένων σε αυτά γ -ραδιενεργών ισοτόπων. Κάνοντας χρήση κατάλληλων ανιχνευτικών διατάξεων, η καταγραφή των εκπεμπόμενων φωτονίων οδηγεί στη λήψη ενός ενεργειακού φάσματος (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2. 2

Ενεργειακό φάσμα φωτονίων ανιχνευτή Ge

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την ανάλυση του γ -φάσματος χρησιμοποιείται ο κώδικας SPUNAL, ο οποίος, δίνει πληροφορίες για τις φωτοκορυφές που εντοπίζονται στο φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχει για την ύπαρξη απλών και πολλαπλών φωτοκορυφών, προσδιορίζει την επιφάνεια τους, καθώς και την αβεβαιότητα που τη συνοδεύει, σε επίπεδο 1.65 σ . Επίσης, αποδίδει κάθε φωτοκορυφή σε συγκεκριμένο ισότοπο (ποιοτικός προσδιορισμός) και εκτιμά και τη ραδιενέργεια των ισότοπων που ανιχνεύονται (ποσοτικός προσδιορισμός). Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ραδιενέργειας ενός δείγματος, πρέπει να έχει προηγηθεί η διαδικασία βαθμονόμησης απόδοσης φωτοκορυφής. Η *βαθμονόμηση απόδοσης* είναι η διαδικασία εύρεσης της συσχέτισης μεταξύ της απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας από την ανιχνευτική διάταξη, με την ενέργεια των φωτονίων.

Ως *απόδοση φωτοκορυφής* (full energy peak efficiency) ορίζεται ο λόγος των γεγονότων που καταγράφονται από την ανιχνευτική διάταξη, και τα οποία οφείλονται σε πλήρη

απορρόφηση φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας, προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων της ίδιας ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή:

$$eff_{peak} = \frac{cps}{gps} \quad (\text{σχέση 2.1})$$

όπου,

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

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

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

Η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται από τον ανιχνευτή, τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και την ενέργεια των φωτονίων.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται για τη πειραματική βαθμονόμηση απόδοσης μιας διάταξης:

- i. Προετοιμασία εργαστηριακών προτύπων πηγών της συγκεκριμένης γεωμετρίας, με χρήση πιστοποιημένων πηγών (certified reference sources). Προτείνεται οι πρότυπες πηγές να εκπέμπουν φωτόνια σε όλο το εύρος της ενεργειακής περιοχής που ενδιαφέρει.
- ii. Τοποθέτηση των προτύπων πηγών στην προκαθορισμένη θέση-γεωμετρία και συλλογή του φάσματος για επαρκές χρονικό διάστημα, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική.
- iii. Γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φάσματος και προσδιορισμός των επιφανειών των φωτοκορυφών που ενδιαφέρουν.
- iv. Για κάθε ενέργεια φωτονίων, υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής με βάση τη σχέση 2.2:

$$eff = \frac{area}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (\text{σχέση 2.2})$$

όπου,

eff : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για την υπόψη ενέργεια,

area : η καθαρή επιφάνεια της αντίστοιχης φωτοκορυφής στο φάσμα,

time : ο χρόνος συλλογής του φάσματος (live time) (sec),

yield : το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή,

activity : η ραδιενέργεια του εξεταζόμενου ισοτόπου (Bq).

- v. Τοποθέτηση των πειραματικών σημείων (E_i , eff_i) σε λογαριθμικό διάγραμμα, για να γίνει προσαρμογή τους σε μία ή περισσότερες κατάλληλες συναρτήσεις αναδρομής, ανάλογα με τον τύπο του ανιχνευτή και την περιοχή ενεργειών. Συνήθως προκύπτουν δύο συναρτήσεις αναδρομής, μία για χαμηλές και μεσαίες ενέργειες ($< \sim 200 \text{keV}$) και μία για υψηλές ενέργειες ($> 200 \text{keV}$).
- vi. Επανάληψη των προηγούμενων βημάτων για κάθε πηγή, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία πρότυπες πηγές. Τότε, η τελική καμπύλη αναδρομής προκύπτει με χρήση όλων των σημείων (E_i , eff_i) που προκύπτουν.

Αφού πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση απόδοσης, η ραδιενέργεια ενός ισοτόπου που ανιχνεύεται σε δείγμα, δίνεται από τη σχέση (2.2). Σε αυτή την περίπτωση, είναι γνωστές όλες οι άλλες παράμετροι, ενώ ζητείται το μέγεθος activity (σχέση 2.3):

$$activity = \frac{area}{time \cdot yield \cdot eff} \quad (\text{σχέση 2.3})$$

2.3.2 Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση με χρήση φωτονίων χαμηλών ενεργειών παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα που απαιτούν την προσοχή κάθε ερευνητή. Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται τα κυριότερα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται, προκειμένου να επισημανθεί η ιδιαιτερότητα των αναλύσεων στη συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή. Το άνω όριο της περιοχής χαμηλών ενεργειών δεν είναι σαφώς ορισμένο στη βιβλιογραφία και καθορίζεται σχετικά αυθαίρετα από τον εκάστοτε ερευνητή, σύμφωνα με την εμπειρία που διαθέτει και τις μεθόδους ανάλυσης

που χρησιμοποιεί. Στην παρούσα εργασία, υιοθετείται η ενεργειακή περιοχή 0-200keV, όπως ορίστηκε στην [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998].

Τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών είναι συνοπτικά τα παρακάτω:

- Η ισχυρή εξασθένιση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη.
- Το μεγάλο πλήθος ακτίνων-γ και ακτίνων-Χ που ανιχνεύονται στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.
- Το συχνά χαμηλό ποσοστό εκπομπής (yield) πολλών σημαντικών φωτονίων χαμηλών ενεργειών.

ι. Εξασθένιση φωτονίων χαμηλών ενεργειών κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη:

Η εξασθένιση που υφίστανται τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών, από τη στιγμή που εκπέμπονται από ένα δείγμα μέχρι να καταγραφούν στον ανιχνευτή αποτελείται από δύο συνιστώσες:

- Την εξασθένιση που υφίστανται τα φωτόνια κατά τη διέλευσή τους μέσα από τα υλικά που παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής φωτονίων και της περιοχής καταγραφής του ανιχνευτή. Η εξασθένιση αυτή έχει ως συνέπεια τη χαμηλή απόδοση ανίχνευσης φωτονίων χαμηλών ενεργειών, για τους περισσότερους ανιχνευτές. Το πρόβλημα εν μέρει αντιμετωπίζεται με ανιχνευτές κατάλληλους για ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών.
- Αφετέρου, την εξασθένιση που υφίστανται τα φωτόνια που εκπέμπονται μέσα στο δείγμα, από το υλικό του δείγματος, στις περιπτώσεις δείγματος που έχει όγκο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αυτοαπορρόφηση**, και είναι το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση με φωτόνια χαμηλών ενεργειών. Η δημιουργία δειγμάτων μεγάλου όγκου είναι πολλές φορές απαραίτητη, λόγω της χαμηλής ειδικής ραδιενέργειας του υπό εξέταση δείγματος,

με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις περιπτώσεις ανάλυσης περιβαλλοντικών υλικών. Η αυτοαπορρόφηση των φωτονίων εξαρτάται έντονα από:

- την ενέργεια των φωτονίων, και
- τη σύσταση και την πυκνότητα του υπό ανάλυση υλικού.

Είναι συνεπώς αναγκαίο, κατά την ανάλυση δειγμάτων μεγάλου όγκου με εκμετάλλευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών, να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης. Το ζήτημα αυτό, αποτελεί και το κυρίως αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

ii. Ακτίνες-X που ανιχνεύονται στην περιοχή χαμηλών ενεργειών

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών και κυρίως για φωτόνια ενέργειας μικρότερης από $\sim 100\text{keV}$ αντιμετωπίζεται ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα. Το πρόβλημα συνίσταται στην εκπομπή – εκτός των ακτίνων- γ – και πολλών ακτίνων-X, οι οποίες προέρχονται είτε από το προς ανάλυση δείγμα, είτε από άλλα υλικά που περιβάλλουν τον ανιχνευτή, όπως η θωράκιση και ο κρυστάλλος. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι ακτίνες-X που προέρχονται από τη θωράκιση είναι δυνατόν να μειωθούν με την κατάλληλη σχεδίαση και κατασκευή της. Επιπλέον αυτών των ακτίνων, στην περιοχή χαμηλών ενεργειών του φάσματος παρατηρούνται και οι αιχμές Compton των φωτονίων υψηλότερων ενεργειών. Συνέπεια του μεγάλου πλήθους των φωτονίων τα οποία καταγράφονται στο φάσμα, είναι η λήψη πολύπλοκων φασμάτων, με πολλαπλές φωτοκορυφές, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις λόγω της μικρής ενεργειακής διαφοράς δεν μπορούν να αναλυθούν στις συνιστώσες τους.

iii. Ποσοστά εκπομπής (yield) για φωτόνια χαμηλών ενεργειών

Ένα ακόμα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, είναι ότι για πολλά φωτόνια που εκπέμπονται το ποσοστό εκπομπής (yield) είναι πολύ χαμηλό, ενώ ταυτόχρονα στη βιβλιογραφία ανευρίσκονται διαφορετικές τιμές για φωτόνια ίδιας ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο παραδείγματα:

- ^{210}Pb , ο οποίος εκπέμπει και φωτόνια ενέργειας 46.54keV, με το ποσοστό εκπομπής να ποικίλει, με τιμές, 4% [Erdtman G., 1979], 4.05% [Roy J.C., 1983], 4.5% [JEF-2, 1992].
- ^{234}Th , το οποίο εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 63.29keV, με το ποσοστό εκπομπής να δίνεται στις τιμές: 6.5% [Johansson, S.A.E., 1954], 5.0% [Ong Ping Hok, et al., 1956], 4.05% [Momeni, M.H., 1982], 3.6% [Scott, H.L. and Marlow, K.W., 1990], 3.7% [Adsley I., al., 1996].

Λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα αναφέρθηκαν νωρίτερα, γίνεται αντιληπτό πως η γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Αναφορικά με το πρόβλημα που δημιουργείται από την ύπαρξη στην περιοχή χαμηλών ενεργειών του φάσματος πολλών φωτονίων, επισημαίνεται ότι το μέγεθος του προβλήματος εξαρτάται κυρίως από τη διακριτική ικανότητα του χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή και τη μέθοδο ανάλυσης που χρησιμοποιείται. Πλέον, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ανιχνευτές με πολύ υψηλή διακριτική ικανότητα που είναι κατάλληλοι για την ανάλυση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Σε ότι αφορά το πρόβλημα της αυτοαπορρόφησης, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την αντιμετώπισή του, οι οποίες καταγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

2.3.3 Το πρόβλημα της αναγωγής της απόδοσης, λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση φωτονίων στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, είναι η αυτοαπορρόφηση των φωτονίων μέσα στον όγκο του αναλυόμενου δείγματος. Το μέγεθος της αυτοαπορρόφησης ποικίλει ανάλογα με τη σύσταση των υλικών, με αποτέλεσμα η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων που υπολογίζεται από την πηγή βαθμονόμησης, να διαφέρει από την απόδοση κατά την ανάλυση του δείγματος.

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, για συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανίχνευτή και χρήση προτύπου πηγής βαθμονόμησης με ενέργεια φωτονίων E, η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής δίνεται από τη σχέση (2.4):

$$eff_a = \frac{area}{(time \cdot yield) \cdot activity} \quad (\text{σχέση 2.4})$$

όπου,

eff_a : η φαινόμενη απόδοση, η οποία ορίζεται ως η απόδοση φωτοκορυφής που προσδιορίζεται μέσω της προτύπου πηγής βαθμονόμησης και θεωρείται ότι ισχύει για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ανεξαρτήτως του υλικού του δείγματος (κάτι τέτοιο θα συνέβαινε εάν η αυτοαπορρόφηση του αναλυόμενου δείγματος ήταν ίδια με την αυτοαπορρόφηση της πηγής βαθμονόμησης),

area: η επιφάνεια της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας E, τα οποία εκπέμπονται από την πρότυπο πηγή, όπως εκτιμάται από την ανάλυση του φάσματος,

time: η διάρκεια συλλογής του φάσματος (s) (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής),

yield: το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της υπόψιν ενέργειας (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής),

activity: η ονομαστική ραδιενέργεια του ισότοπου που περιέχεται στην πρότυπο πηγή βαθμονόμησης και το οποίο εκπέμπει φωτόνια ενέργειας E, κατά το χρόνο συλλογής του φάσματος (Bq).

Στην ιδανική περίπτωση, όπου δε θα υπήρχε αυτοαπορρόφηση μέσα στην πηγή, η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής θα υπολογίζονταν από τη σχέση (2.5):

$$eff_o = \frac{area_o}{(time \cdot yield) \cdot activity} \quad (\text{σχέση 2.5})$$

όπου,

eff_o : η απόδοσης φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση φωτονίων στο υλικό της πηγής,

$area_o$: η επιφάνεια που θα είχε η φωτοκορυφή που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας E, εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση φωτονίων στο υλικό της πηγής.

Με σκοπό να ληφθεί υπόψη η αυτοαπορρόφηση των φωτονίων μέσα στην πηγή, και να συνδεθεί η ιδεατή περίπτωση, με την πραγματική, εισάγεται ο *συντελεστής φ*. Ο συντελεστής φ εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων που εκπέμπονται από τη πηγή προς τον ανιχνευτή, τα οποία δεν υφίστανται αυτοαπορρόφηση μέσα στη πηγή, και δίνεται από τη σχέση (2.6):

$$\varphi = \frac{area}{area_o}, 0 < \varphi < 1 \quad (\text{σχέση 2.6})$$

Συνδέοντας τις σχέσεις (2.5) και (2.6), η ιδεατή απόδοση φωτοκορυφής δίνεται συναρτήσει της eff_a και του συντελεστή φ, σύμφωνα με τη σχέση (2.7):

$$eff_o = \frac{eff_a}{\varphi} \quad (\text{σχέση 2.7})$$

Όπως έχει περιγραφεί και νωρίτερα, για τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός ισότοπου που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας E, η ραδιενέργεια (activity) του ισότοπου υπολογίζεται από την επιφάνεια κάτω από τη φωτοκορυφή, η οποία αντιστοιχεί στα φωτόνια ενέργειας E, (σχέση 2.8):

$$activity = \frac{area}{eff_a \cdot (time \cdot yield)} \quad (\text{σχέση 2.8})$$

όπου,

activity: η εκτιμώμενη ραδιενέργεια του δείγματος, μέσω των φωτονίων ενέργειας E, κατά το χρόνο συλλογής του φάσματος (Bq).

- area: η επιφάνεια της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας E, όπως εκτιμάται από την ανάλυση του φάσματος,
- time: η διάρκεια συλλογής του φάσματος (s) (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής)
- yield: το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της υπόψιν ενέργειας (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής)

Ωστόσο, η σχέση (2.7) δε λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της διαφοράς αυτοαπορρόφησης των φωτονίων μεταξύ των υλικών του δείγματος και της πηγής βαθμονόμησης. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της πραγματικής ραδιενέργειας του δείγματος, $activity_o$, στην οποία θα λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα αυτοαπορρόφησης, διαφορετικά για το αναλυόμενο δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης. Για το σκοπό εισάγεται ο *συντελεστής* ω , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό φωτονίων του δείγματος που εκπέμπονται προς τον ανιχνευτή, τα οποία δεν υφίστανται αυτοαπορρόφηση μέσα στο δείγμα, και δίνεται από τη σχέση (2.9):

$$\omega = \frac{area}{area_o}, 0 < \omega < 1 \quad (\text{σχέση 2.9})$$

Σύμφωνα με αυτόν, η πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος θα δίνεται από τη σχέση (2.10):

$$activity_o = \frac{area_o}{eff_o \cdot (time \cdot yield)} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{area}{\left(\frac{eff_a}{\varphi}\right) \cdot (time \cdot yield)} \quad (\text{σχέση 2.10})$$

όπου,

$activity_o$: η πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος

$area_o$: η επιφάνεια που θα είχε η φωτοκορυφή εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση μέσα στο αναλυόμενο δείγμα.

Η *πραγματική απόδοση (effective)* κατά τη διάρκεια ανάλυ

σης ενός δείγματος, ορίζεται ως ο λόγος του πλήθους των φωτονίων ενέργειας E που ανιχνεύονται, προς το πλήθος των φωτονίων ίδιας ενέργειας που εκπέμπονται από το δείγμα. Συνδέοντάς τη με την έννοια της φαινόμενης απόδοσης, που δόθηκε νωρίτερα, προκύπτει:

$$eff_e = \frac{\omega}{\varphi} \cdot eff_a = \eta \cdot eff_a \quad (\text{σχέση 2.11})$$

όπου,

η : ο *συντελεστής αναγωγής της απόδοσης* μεταξύ πηγής βαθμονόμησης και αναλυόμενου δείγματος, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, το συγκεκριμένο ζεύγος υλικών της προτύπου πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος, και για την υπόψιν ενέργεια φωτονίων E .

Τελικά, η σχέση (2.10) δίνεται ως:

$$activity_o = \frac{area}{eff_e \cdot (time \cdot yield)} \quad (\text{σχέση 2.12})$$

η οποία υπολογίζει την πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος, λαμβάνοντας υπόψη την αυτοαπορρόφηση, τόσο μέσα στην πρότυπη πηγή βαθμονόμησης, όσο και μέσα στο αναλυόμενο δείγμα.

2.3.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης, κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών

Καθώς ο βαθμός αυτοαπορρόφησης σε ένα δείγμα εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από το υλικό του δείγματος, είναι προφανές ότι αυτή είναι εν γένει διαφορετική μεταξύ του δείγματος που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση μία ανιχνευτικής

διάταξης και των δειγμάτων που αναλύονται σε καθημερινή βάση. Κατά συνέπεια, η απόδοση που εκτιμάται κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης δεν είναι εν γένει ίδια με την απόδοση που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά την ανάλυση ενός δείγματος. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, λόγω της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης φωτονίων χαμηλών ενεργειών μεταξύ του υλικού της πηγής βαθμονόμησης και του υλικού του αναλυόμενου δείγματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια.

2.3.4.1 Μέθοδοι που βασίζονται στην παρασκευή πρότυπων πηγών βαθμονόμησης της ίδιας γεωμετρίας, και σύστασης ίδιας ή όμοιας με τη σύσταση των αναλυόμενων δειγμάτων

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί από αρκετούς ερευνητές και περιλαμβάνει την παρασκευή πρότυπων πηγών βαθμονόμησης της ίδιας γεωμετρίας και σύστασης ίδιας ή όμοιας¹, με αυτή των αναλυόμενων δειγμάτων και στη συνέχεια εκτίμηση της απόδοσης για κάθε μια από τις πρότυπες πηγές βαθμονόμησης. Κατά την ανάλυση των δειγμάτων χρησιμοποιείται η απόδοση που έχει εκτιμηθεί από την πρότυπη πηγή της ίδιας γεωμετρίας και σύστασης ίδιας ή όσο το δυνατόν πλησιέστερης προς εκείνη του δείγματος. Τέτοιες μέθοδοι εφαρμόζονται συχνά, παρότι παρουσιάζουν μειονεκτήματα και στηρίζονται σε παραδοχές. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι ότι συνήθως απαιτείται η παρασκευή και πιστοποίηση πολύ μεγάλου πλήθους πρότυπων πηγών, ανάλογα πάντα με το πλήθος και την ποικιλία των δειγμάτων που αναλύονται, καθώς και τα ισότοπα, η ανάλυση των οποίων ενδιαφέρει. Ακόμη, στις περιπτώσεις εκείνες, που οι πηγές βαθμονόμησης παρασκευάζονται από υλικά ίδιας πυκνότητας, αλλά διαφορετικής σύστασης από τα αναλυόμενα υλικά, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι είναι δυνατό να παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες εξασθένισης φωτονίων.

¹ Ως προς τις ιδιότητες απορρόφησης φωτονίων,

2.3.4.2 Μέθοδοι που βασίζονται στη βαθμονόμηση απόδοσης με πρότυπη πηγή και την εκτίμηση συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ των υλικών πηγής βαθμονόμησης και δείγματος

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται στην εκτίμηση του βαθμού αυτοαπορρόφησης συγκεκριμένης ενέργειας φωτονίων μέσα στο υπό ανάλυση δείγμα, έτσι ώστε αυτός να ληφθεί υπόψη κατά την τελική εκτίμηση της ραδιενέργειας του δείγματος. Ο βαθμός αυτός αυτοαπορρόφησης εκτιμάται με χρήση μίας σειράς καταλλήλων σχέσεων. Με εφαρμογή των σχέσεων αυτών για το αναλυόμενο δείγμα και για την πηγή βαθμονόμησης, μπορεί να εκτιμηθεί ο **συντελεστής αναγωγής απόδοσης (η)**, εξαιτίας της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης που υφίστανται τα φωτόνια στην πηγή βαθμονόμησης και το αναλυόμενο δείγμα. Ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης, σε συνδυασμό με την απόδοση που έχει ευρεθεί για την πρότυπη πηγή βαθμονόμησης, δίνουν τελικά μια εκτίμηση για την απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας του ανάλυση δείγματος. Στις παραγράφους που ακολουθούν, δίνονται ορισμένες ενδεικτικές μέθοδοι εκτίμησης του βαθμού αυτοαπορρόφησης.

2.3.4.2.1 Μέθοδοι που βασίζονται σε αναλυτική σχέση για την εκτίμηση του βαθμού αυτοαπορρόφησης σε ένα δείγμα

Οι μέθοδοι της κατηγορίας αυτής στηρίζονται σε μία αναλυτική σχέση, η οποία εισάγεται στη συνέχεια και η οποία υπό προϋποθέσεις, μπορεί να οδηγήσει σε εκτίμηση του βαθμού αυτοαπορρόφησης.

Έστω μία πηγή όγκου φωτονίων τοποθετημένη κεντρικά σε μεγάλη απόσταση πάνω από τον ανιχνευτή. Η πηγή μπορεί να είναι είτε δείγμα υπό ανάλυση, είτε πηγή βαθμονόμησης. Η εξασθένιση των φωτονίων που εκπέμπονται από ένα στοιχειώδη όγκο της πηγής, και τα οποία διανύουν παρθενικά απόσταση h μέσα στην πηγή, συνιστώντας παράλληλη δέσμη φωτονίων με διεύθυνση κάθετη προς τον ανιχνευτή, δίνεται από τη γνωστή σχέση εξασθένισης δέσμης φωτονίων:

$$I(h) = I_0(h) \cdot e^{-\mu \cdot h} \quad (\text{σχέση 2.13})$$

όπου,

$I_0(h)$: Η ένταση που θα είχε η παράλληλη δέσμης εάν δεν είχε υποστεί εξασθένηση μέσα στο υλικό της πηγής (φωτόνια/cm²s).

μ : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής (cm⁻¹), που εκφράζει την ανά μονάδα μήκους διαδρομής των φωτονίων πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν με το υλικό μέσα από το οποίο διέρχονται. Λεπτομερής ανάλυση για το συγκεκριμένο συντελεστή ακολουθεί στην παράγραφο 2.4.

h : Το πάχος του υλικού της πηγής, στο οποίο υφίστανται εξασθένηση τα φωτόνια που εκπέμπονται από το στοιχειώδη όγκο. Το πάχος αυτό ισοδυναμεί με το μήκος διαδρομής των φωτονίων μέσα στην πηγή (cm).

Η συνολική εξασθένηση των φωτονίων που προέρχονται από όλη την πηγή πάχους H , μέσα στην πηγή, προκύπτει με ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης (2.13) από ύψος 0 έως H [Miller K.M., 1987] και δίνεται από την παρακάτω σχέση, η οποία ονομάζεται και **σχέση αυτοαπορρόφησης**:

$$A/O = \frac{(1 - e^{-\mu \cdot h})}{(\mu \cdot H)} \quad (\text{σχέση 2.14})$$

Ο λόγος A/O εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων που εξέρχονται από την πηγή παρθενικά και προσβάλλουν κάθετα τον ανιχνευτή, σε σχέση με εκείνα που θα εξέρχονταν εάν η πηγή δεν παρουσίαζε αυτοαπορρόφηση. Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της σχέσης είναι τα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή και τελικά προσβάλλουν τον ανιχνευτή, να συνιστούν παράλληλη δέσμη φωτονίων, η οποία να προσπίπτει κάθετα στον ανιχνευτή. Η προϋπόθεση αυτή θεωρητικά ικανοποιείται μόνο για άπειρη απόσταση μεταξύ πηγής και ανιχνευτή, γεγονός που εξασφαλίζει ότι όλα τα φωτόνια που προσπίπτουν στον ανιχνευτή έχουν την ίδια πιθανότητα να απορροφηθούν από αυτόν, ανεξάρτητα από τη θέση που προέρχονται μέσα στην πηγή. Στην πράξη, όταν οι διαστάσεις πηγής και ανιχνευτή είναι πολύ μικρότερες της μεταξύ τους απόστασης, θεωρείται ότι ικανοποιείται επαρκώς η προϋπόθεση παράλληλης δέσμης, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση αυτοαπορρόφησης. Ωστόσο, συχνά στις εφαρμογές γ -

φασματοσκοπικών αναλύσεων, η πηγή είναι πολύ κοντά στον ανιχνευτή, αν όχι πρακτικά πάνω σε αυτόν. Συνεπώς, δεν ικανοποιείται η προϋπόθεση της παράλληλης δέσμης, εφόσον πολλά από τα φωτόνια προσπίπτουν στον ανιχνευτή υπό διάφορες γωνίες. Τότε, το μήκος που διανύουν τα φωτόνια μέσα στο δείγμα εξαρτάται από τη θέση, αλλά και τη γωνία εκπομπής ως προς τον ανιχνευτή, και ενδέχεται να είναι πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση του σημείου εκπομπής του φωτονίου από τον ανιχνευτή. Παρόλα αυτά, στη βιβλιογραφία συναντώνται αρκετές περιπτώσεις που η σχέση αυτοαπορρόφησης χρησιμοποιείται και για γεωμετρίες πολύ κοντά στον ανιχνευτή. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες από τις μεθόδους που ακολουθούνται:

- Μέθοδος που στηρίζεται στο συνδυασμό της σχέσης αυτοαπορρόφησης και της σχέσης εξασθένισης δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων από εξωτερική πηγή, στις περιπτώσεις τις οποίες ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης (μ) δεν είναι γνωστός. [Cutshall N.H., 1983], [Gilmore G., 1996]
- Μέθοδος προσδιορισμού του βαθμού αυτοαπορρόφησης, με εκτίμηση της επίδρασης του υλικού του δείγματος στη μεταβολή της ενεργού στερεάς γωνίας μεταξύ δείγματος - ανιχνευτή. [Galloway R.B., 1991]

2.3.4.2.2 Μέθοδος που βασίζεται σε απευθείας εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης

Η μέθοδος που περιγράφεται στην παρούσα παράγραφο οδηγεί στην εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης από το υλικό της πηγής βαθμονόμησης, στο υλικό του αναλυόμενου δείγματος, λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ των δύο υλικών. Η μέθοδος εισήχθη από τον [Debertin K., 1988] αφορά σε κυλινδρική γεωμετρία πηγής χωρίς περιορισμό ύψους και βασίζεται στη σχέση:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_p(0, d) \cdot \frac{2 \cdot d^2}{R^2 \cdot H} \cdot \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x+d)^2} \cdot r \cdot dx \cdot dr \quad (\text{σχέση 2.15})$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόδοσης μίας ανιχνευτικής διάταξης, όπου:

ϵ_v : Η απόδοση φωτοκορυφής για φωτόνια ενέργειας E , και για την χρησιμοποιούμενη γεωμετρία κυλινδρικής πηγής-ανιχνευτή.

$\epsilon_p(0,d)$: Η απόδοση για σημειακή πηγή τοποθετημένη στη θέση $(0,d)$ μέσα στην πηγή, δηλαδή πάνω στον άξονα συμμετρίας του ανιχνευτή και σε απόσταση d από το σημειακό ανιχνευτή.

μ : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής (cm^{-1}) για τα φωτόνια της υπόψιν ενέργειας.

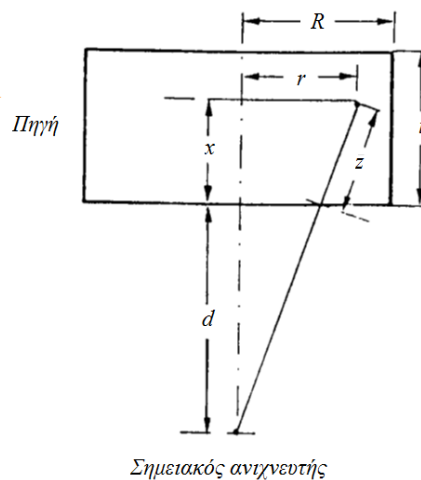
d : Η ιδεατή απόσταση μεταξύ της πηγής και ανιχνευτή (cm), η οποία ορίζεται ως η απόσταση από την επιφάνεια του δείγματος που βρίσκεται απέναντι από τον ανιχνευτή, ως έναν *ιδανικό σημειακό ανιχνευτή*, που βρίσκεται μέσα στον ανιχνευτή. Η απόσταση εισάγεται έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνονται και τα φωτόνια μέσα στον ανιχνευτή, και όχι μόνον στην επιφάνεια του.

R : Ακτίνα της πηγής (cm).

t : Ύψος της πηγής (cm).

z : Μήκος εντός της πηγής που διανύεται από ένα φωτόνιο, το οποίο προσπίπτει στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή, χωρίς προηγουμένως να έχει υποστεί κάποια αλληλεπίδραση μέσα στην πηγή ή στα ενδιάμεσα υλικά που παρεμβάλλονται, αλληλεπιδρώντας με τον ανιχνευτή, και αποδίδοντας όλη την ενέργειά του σε αυτόν με φωτοηλεκτρική απορρόφηση. Η σχέση υπολογισμού του είναι η εξής:

$$z = x \cdot [r^2 + (x+d)^2]^{0.5} / (x+d) \quad (\text{σχέση 2.16})$$



Σχήμα 2. 3

Γεωμετρικά μεγέθη απαραίτητα για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής απόδοσης με την ολοκληρωτική μέθοδο [Debertin K., 1988]

Στην σχέση (2.15), το μέγεθος $J(\mu)$ που περιγράφεται από τη σχέση :

$$J(\mu) = \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x+d)^2} r \cdot dx \cdot dr \quad (\text{σχέση 2.17})$$

εξαρτάται από το υλικό της πηγής, ενώ όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες εξαρτώνται μόνο από καθαρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παραμένουν τα ίδια για το δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης.

Σύμφωνα με τον [Debertin K., 1988] ένας συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η που να λαμβάνει υπόψη τη διαφορά της αυτοαπορρόφησης μεταξύ δείγματος και πηγής βαθμονόμησης μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση :

$$\eta = \frac{J(\mu_s)}{J(\mu_c)} \quad (\text{σχέση 2.18})$$

όπου :

μ_s : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για το υλικό του δείγματος,

μ_c : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για την πηγή βαθμονόμησης.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι ότι στηρίζεται μόνο στην παραδοχή του σημειακού ανιχνευτή, τοποθετημένου σε βάθος d μέσα στον ανιχνευτή, το οποίο και εκτιμάται πειραματικά. Ενώ πρέπει να είναι γνωστή η τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ , για την πηγή βαθμονόμησης και το αναλύόμενο δείγμα. Όπως εξηγείται και παρακάτω, μολονότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν δεδομένα για όλα τα στοιχεία και για αρκετές χημικές ενώσεις, δεν υπάρχουν δεδομένα για το συντελεστή μ για τα περιβαλλοντικά δείγματα που συνήθως αναλύονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στο επόμενο κεφάλαιο, αναλύονται οι πειραματικές μέθοδοι, αλλά και οι μέθοδοι προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν, για την εκτίμηση του συντελεστή μ .

2.3.4.3 Μέθοδοι που βασίζονται στην απευθείας εκτίμηση της απόδοσης για τη γεωμετρία πηγής - ανιχνευτή και τη συγκεκριμένη σύσταση υλικού

Οι μέθοδοι που βασίζονται στην απευθείας εκτίμηση της απόδοσης για τη γεωμετρία και τη συγκεκριμένη σύσταση υλικού που ενδιαφέρει, πραγματοποιούνται είτε με προσομοίωση Monte Carlo, είτε με αριθμητικό υπολογισμό. Ο αριθμητικός υπολογισμός της απόδοσης, αφορά κυλινδρική πηγή και συγκεκριμένο υλικό, και μπορεί να βασισθεί στις τιμές της απόδοσης για γεωμετρία σημειακής πηγής, οι οποίες έχουν προηγουμένως προσδιορισθεί πειραματικά σε διάφορες θέσεις μέσα στην κυλινδρική πηγή. Η απαιτούμενη πειραματική εργασία μπορεί να είναι επίπονη, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Στην ίδια κατηγορία μεθόδων ανήκει και ο υπολογισμός της απόδοσης για γεωμετρία όγκου, η οποία γίνεται μέσω του υπολογισμού της ενεργού στερεάς γωνίας για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και υλικό και σημειακή πηγή μονοενεργειακών φωτονίων σε θέση αναφοράς. Και οι δύο μέθοδοι έχουν δυσκολίες στην εφαρμογή, αφενός λόγω των προϋποθέσεων που πρέπει να τηρούνται, και αφετέρου λόγω των επίπονων πειραματικών διαδικασιών που απαιτούνται. Η συνήθης εφαρμογής τους, είναι για τον έλεγχο της ορθότητας μιας άλλης, ταχύτερης μεθόδου.

2.3.4.3.1 Μέθοδοι προσομοίωσης Monte Carlo

Μία άλλη προσέγγιση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του υλικού του δείγματος στην απόδοση ανίχνευσης είναι η εφαρμογή κωδίκων προσομοίωσης Monte Carlo, οι οποίοι βασίζονται στην υπολογιστική προσομοίωση της ατομικής ιστορίας των φωτονίων. Οι κώδικες Monte Carlo που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι οι εξής: PENELOPE, GEANT4 και MCNP. Και οι τρεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη αναφορά στους κώδικες αυτούς και τις εφαρμογές τους:

- **PENELOPE** (*Penetration and ENERgy LOss of Positrons and Electrons*):
Ο κώδικας PENELOPE είναι ο κώδικας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι προσομοιώσεις στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Για το λόγο αυτό, γίνεται εκτενής περιγραφή του στο επόμενο κεφάλαιο. Συνοπτικά αναφέρεται ότι ο συγκεκριμένος κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα Fortran και αναπτύχθηκε το 1996 στο πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης. Προσομοιώνει τη διάδοση ποζιτρονίων, ηλεκτρονίων και φωτονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από σύνθετα υλικά.
- **GEANT4** (*for GEometry ANd Tracking*):
Ο κώδικας αυτός είναι ο διάδοχος του κώδικα GEANT, ο οποίος αποτελεί μία σειρά εργαλείων λογισμικού που αναπτύχθηκε από το CERN, και ο πρώτος που χρησιμοποίησε προγραμματισμό σε C++. Αποτελεί κώδικα με ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως για παράδειγμα εφαρμογές στη φυσική υψηλής ενέργειας, το διάστημα, την ακτινοβολία, την ιατρική και τις τεχνολογίες μεταφοράς.
- **MCNP** (*Monte Carlo N-Particle transport code*):
Πρόκειται για ένα πακέτο λογισμικού για την προσομοίωση πυρηνικών διαδικασιών, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Los Alamos National Laboratory. Χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση των πυρηνικών διεργασιών, όπως η σχάση, αλλά έχει την ικανότητα να προσομοιώνει και τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων που αφορούν νετρόνια, φωτόνια και ηλεκτρόνια. Χρησιμοποιείται σε ποικιλία εφαρμογών, όπως ακτινοπροστασία και δοσιμετρία, ραδιογραφία, ιατρική φυσική,

θωρακίσεις, σχεδιασμό και ανάλυση ανιχνευτών, σχεδιασμό επιταχυντών, σχεδιασμό αντιδραστήρων σχάσης και σύντηξης, απορρύπανση και αρκετές άλλες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί κώδικες Monte Carlo οι οποίοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για τον υπολογισμό της απόδοσης ανιχνευτών ακτίνων-γ, και για το λόγο αυτό είναι περισσότερο φιλικό προς το χρήστη και ταχύτεροι, σε σύγκριση με τους περισσότερους κώδικες πολλαπλών χρήσεων, που έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο τέτοιοι κώδικες, οι GESPECOR και DETEFF:

- ***GESPECOR (GErmanium SPEctra CORrection):***

Ο κώδικας GESPECOR αρχικά αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των διορθώσεων που απαιτούνται λόγω των φαινομένων αυτοαπορρόφησης και πραγματικής σύμπτωσης-τυχαίας άθροισης και διατίθεται από την CID Media GmbH. Αργότερα, προστέθηκε και η δυνατότητα υπολογισμού της ολικής απόδοσης φωτοκορυφής. Μεταξύ των κωδίκων προσομοίωσης που διατίθενται για την επίλυση των ίδιων προβλημάτων, ο κώδικας GESPECOR είναι μοναδικός σε ότι αφορά την ακρίβεια, την ευελιξία και την ευκολία χειρισμού του από το χρήστη.

Πρακτικά είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι διορθώσεις αυτοαπορρόφησης και σύμπτωσης-τυχαίας άθροισης, με μια καθαρά πειραματική προσέγγιση. Το λογισμικό, GESPECOR ωστόσο, αποτελεί ένα εξελιγμένο υπολογιστικό πακέτο που λαμβάνει υπόψη τις λεπτομέρειες της πειραματικής διάταξης και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo, λαμβάνει υπόψη όλες τις σημαντικές φυσικές διεργασίες. Επιπλέον, παρέχει στο χρήστη ευκολίες ώστε να εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα για τον ανιχνευτή και τη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία. Η χρήση καταλλήλων γραφικών βοηθάει στην αποφυγή σφαλμάτων κατά την περιγραφή της γεωμετρίας. Κάθε είδους δείγμα μπορεί να προσομοιωθεί, εφόσον είναι γνωστή η σύνθεσή του, ή εφόσον μπορεί να υποτεθεί μία τυπική σύνθεση. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον κώδικα GESPECOR είναι θεωρητικά τεκμηριωμένες, ενώ τα αποτελέσματα έχουν ελεγχθεί διεξοδικά, μετά από συγκρίσεις με πειραματικές μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany).

Σε γενικές γραμμές, για τις γεωμετρίες και δείγματα που συνήθως χρησιμοποιούνται, η αβεβαιότητα των υπολογισμών αυτοαπορρόφησης είναι μικρότερη (συντά πολύ μικρότερη) από 5% για ενέργειες φωτονίων μεταξύ 50keV και 100keV, και κάτω από 1% για ενέργειες φωτονίων πάνω από 100keV. Ακόμη και στις περιπτώσεις όπου το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης είναι υπεύθυνο για σημαντική μείωση της απόδοσης κατά 10-20 φορές, οι υπολογισμοί αναπαράγουν πολύ καλά τις μετρούμενες τιμές, εντός των ορίων των πειραματικών σφαλμάτων.

- **DETEFF (DETEctor EFFiciency):**

Πρόκειται για κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo ο οποίος χρησιμοποιείται για βαθμονόμηση απόδοσης σε τυπικό ομοαξονικό ανιχνευτή ακτίνων-γ. Η γλώσσα που χρησιμοποιείται είναι Borland Delphi 3, ενώ ο κώδικας αποτελείται από επτά βασικές ενότητες με σαφώς καθορισμένα καθήκοντα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης του ανιχνευτή εισάγοντας διάφορες παραμέτρους. Ο κώδικας μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορα είδη γεωμετρίας δειγμάτων, που χρησιμοποιούνται συνήθως για τις μετρήσεις με ομοαξονικό ανιχνευτή, όπως σημειακή, ορθογώνια, δισκοειδή, κυλινδρική και Marinelli, η οποία συμπεριλήφθηκε στην τελευταία έκδοση του 2008. Στην περίπτωση της πηγής όγκου, ο χρήστης πρέπει να δώσει το πάχος των τοιχωμάτων, καθώς και τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης, για την ενέργεια των φωτονίων που ενδιαφέρει και το υλικό του τοιχώματος. Το πρόγραμμα παρέχει ένα απλό εργαλείο για να διευκολυνθεί ο υπολογισμός των συντελεστών αυτοαπορρόφησης, για ορισμένα τυπικά υλικά που συναντώνται στους ανιχνευτές ακτίνων-γ και σε περιβαλλοντικά δείγματα. Τέλος, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εξέτασης της περίπτωσης, να χρησιμοποιείται φίλτρο το οποίο τοποθετείται μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή.

2.4 Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης φωτονίων (μ)

Όπως έγινε κατανοητό από τις προηγούμενες παραγράφους, προϋπόθεση για την εφαρμογή ορισμένων μεθόδων προσδιορισμού της διόρθωσης της απόδοσης, λόγω αυτοαπορρόφησης των φωτονίων χαμηλών ενεργειών μέσα στο δείγμα, είναι η τιμή του

ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης φωτονίων μ . Ο συντελεστής αυτός πρέπει να είναι γνωστός για συγκεκριμένη κάθε φορά ενέργεια, τόσο για το υλικό του αναλυόμενου δείγματος, όσο και για το υλικό της πηγής βαθμονόμησης. Ο συντελεστής μ είναι ένας δείκτης της εξασθένησης που υφίσταται δέσμη μονοενεργειακών φωτονίων, τα οποία διέρχονται μέσα από την ύλη, λόγω των αλληλεπιδράσεών τους με αυτή. Πριν γίνει περαιτέρω παρουσίαση του συντελεστή μ , κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη παρουσίαση των αλληλεπιδράσεων των φωτονίων με την ύλη.

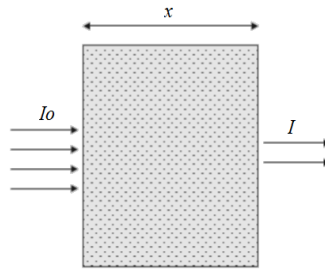
2.4.1 Εξασθένηση των φωτονίων κατά την αλληλεπίδρασή τους με τη ύλη

Κάθε φορά που μία μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων διέρχεται μέσα από το υλικό ενός απορροφητή υφίσταται εξασθένηση. Με τον όρο εξασθένηση εννοείται η απομάκρυνση φωτονίων από τη δέσμη, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί λόγω μιας σειράς αλληλεπιδράσεων των φωτονίων με το υλικό. Η εξασθένηση της παράλληλης μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων περιγράφεται από τη γνωστή σχέση εξασθένησης φωτονίων:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (\text{σχέση 2.19})$$

όπου,

- I: Η ένταση της παράλληλης δέσμης φωτονίων που εξέρχεται από στοιχειώδη όγκο υλικού, αφού προηγουμένως έχει υποστεί εξασθένηση στο υλικό (φωτόνια/cm²s).
- I₀: Η ένταση που θα είχε η παράλληλη δέσμη φωτονίων εάν δεν είχε υποστεί εξασθένηση μέσα στο υλικό της πηγής (φωτόνια/cm²s).
- μ : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής (cm⁻¹), που εκφράζει την ανά μονάδα μήκους διαδρομής των φωτονίων πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν με το υλικό μέσα από το οποίο διέρχονται.
- x: Το πάχος του υλικού, στο οποίο υφίστανται εξασθένηση τα φωτόνια που εκπέμπονται από το στοιχειώδη όγκο (cm).



Σχήμα 2. 4

Εξασθένιση δέσμης φωτονίων

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κυριότερες αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με την ύλη που έχουν ως συνέπεια την εξασθένιση της δέσμης.

2.4.1.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ή φωτοηλεκτρική απορρόφηση

Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φωτόνιο ενέργειας E_γ αλληλεπιδρά με ένα από τα ισχυρά συνδεδεμένα ηλεκτρόνια ενός ατόμου του απορροφητή, με αποτέλεσμα το φωτόνιο να εξαφανίζεται και το ηλεκτρόνιο να απελευθερώνεται με κινητική ενέργεια T [Λεωνίδου Δ., 1984]. Το φωτοηλεκτρικό, είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου τελικά απορροφάται η ενέργεια ενός φωτονίου μέσα στον ανιχνευτή, ενώ είναι πιθανότερο να συμβεί με υλικά μέτριου ή μεγάλου ατομικού αριθμού Z και φωτόνια ενέργειας χαμηλότερης των 100keV, όπου μάλιστα χαρακτηρίζεται και ως το κυρίαρχο φαινόμενο αλληλεπίδρασης. Η πιθανότητα ανά μονάδα μήκους διαδρομής του φωτονίου ενέργειας E_γ , αυτό να υποστεί απομάκρυνση από τη δέσμη λόγω φωτοηλεκτρικής απορρόφησης μέσα στο υλικό, ορίζεται ως ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου μ_{ph} (cm^{-1}). Μία εμπειρική σχέση που δίνει το συντελεστή μ_{ph} συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων και τον ατομικό αριθμό Z του απορροφητή δίνεται από τον [Debertin K.M., 1988]:

$$\mu_{ph} = const \cdot Z^{4.5} \cdot E_\gamma^{-3} \quad (\text{σχέση 2.20})$$

2.4.1.2 Σκέδαση Compton

Κατά τη σκέδαση Compton φωτόνιο ενέργειας E_γ αλληλεπιδρά με περιφερειακό ηλεκτρόνιο ατόμου (συνήθως από τα ασθενέστερα συνδεδεμένα), σκεδαζόμενο μη ελαστικά πάνω σε αυτό, με αποτέλεσμα να αλλάζει η διεύθυνση του και ταυτόχρονα να μειώνεται η ενέργειά του. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται με κινητική ενέργεια ίση με την απολεσθείσα ενέργεια του φωτονίου. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι το κυρίαρχο φαινόμενο για ενέργεια φωτονίων υψηλότερη των 50-150keV και έως τα 10MeV, ανάλογα με το υλικό.

Η ενέργεια του σκεδαζομένου φωτονίου εξαρτάται τόσο από την ενέργεια του αρχικού φωτονίου, όσο και από τη γωνία σκέδασης και δίνεται από τη σχέση:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha \cdot (1 - \cos \theta)} \quad (\text{σχέση 2.21})$$

όπου:

E'_γ : ενέργεια του φωτονίου, αφού υποστεί σκέδαση Compton

E_γ : αρχική ενέργεια του φωτονίου, πριν υποστεί σκέδαση Compton

α : ποσότητα ίση με $(h \cdot \nu) / (m_0 \cdot c^2)$

θ : γωνία μεταξύ της τροχιάς που κινείται το σκεδαζόμενο φωτόνιο και της τροχιάς του αρχικού φωτονίου

Όπως προκύπτει από τη σχέση 2.21, μικρή εκτροπή του φωτονίου συνοδεύεται από μικρή απώλεια ενέργειας. Ειδικά για τα χαμηλότερης ενέργειας φωτόνια, η μικρή απώλεια ενέργειας μπορεί να παρουσιάζεται και για αξιόλογη γωνία εκτροπής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για φωτόνια ενέργειας 40keV τα οποία υφίστανται σκέδαση Compton και εκτρέπονται υπό γωνία μικρότερη των 20°, η ενέργεια των σκεδαζομένων φωτονίων έχει τιμή μεταξύ 39.8 - 40.0 keV. Για φωτόνια ενέργειας 661keV που υφίστανται σκέδαση Compton και εκτρέπονται κατά 20° η ενέργεια των σκεδαζομένων

φωτονίων είναι 613 keV. Συμπερασματικά, μετά από μία σκέδαση Compton, η πιθανότητα να προκύψει το σκεδαζόμενο φωτόνιο με ενέργεια παραπλήσια της αρχικής, είναι υψηλότερη, όσο η ενέργεια του αρχικού φωτονίου είναι χαμηλότερη.

Για τη σκέδαση Compton ορίζεται, αντίστοιχα, ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης λόγω σκέδασης Compton μ_{sc} (cm^{-1}). Ο συντελεστής μ_{sc} εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου και τον ατομικό αριθμό Z του υλικού του απορροφητή, ενώ εμπειρικά υπολογίζεται από τη σχέση του [Debertin K.M., 1988]:

$$\mu_{sc} = \text{const} \cdot Z \cdot E_{\gamma}^{-1} \quad (\text{σχέση 2.22})$$

2.4.1.3 Δίδυμη γένεση

Κατά τη δίδυμη γένεση, ένα φωτόνιο με ενέργεια υψηλότερη των 1.02MeV, υπό την επίδραση του πεδίου του πυρήνα του απορροφητή, εξαφανίζεται και αντικαθίσταται από ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Προϋπόθεση για την πραγματοποίηση αυτής της αλληλεπίδρασης είναι η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον αυτή της υλοποίησης των δύο σωματιδίων, δηλαδή $2 \cdot 0.511 = 1.02 \text{MeV}$, ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια ισοκατανέμεται στα δύο σωματίδια ως κινητική ενέργεια. Εύλογα συμπεραίνεται ότι λόγω της ύπαρξης του ενεργειακού κατωφλίου των 1.02MeV η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση δεν έχει κάποια συνεισφορά στις αλληλεπιδράσεις φωτονίων χαμηλών ενεργειών με την ύλη, οι οποίες εξετάζονται στην παρούσα ΔΕ, αναφέρεται παρόλα αυτά, για λόγους πληρότητας. Όπως και στις προηγούμενες, έτσι και για τη συγκεκριμένη αλληλεπίδραση ορίζεται ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης λόγω δίδυμης γένεσης μ_{pair} (cm^{-1}).

2.4.1.4 Σκέδαση Rayleigh:

Κατά τη σκέδαση Rayleigh ένα φωτόνιο σκεδάζεται από δεσμευμένο ηλεκτρόνιο του ατόμου, χωρίς το άτομο να υποστεί διέγερση ή ιονισμό και χωρίς αντίστοιχη απώλεια ενέργειας του φωτονίου [Hubbell J.H., 1969], [Debertin K.M., 1988]. Για φωτόνια υψηλών ενεργειών η σκέδαση Rayleigh οδηγεί σε εκτροπή των φωτονίων κατά πολύ μικρές γωνίες, ενώ για χαμηλότερες ενέργειες φωτονίων, και εντονότερα για υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό Z , η γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων φωτονίων είναι

αρκετά μεγάλη. Το φαινόμενο της σκέδασης Rayleigh είναι έντονο για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, ενώ για φωτόνια ενέργειας 100keV η πιθανότητα της υπόψιν αλληλεπίδρασης είναι 1-2 τάξεις μικρότερη από την πιθανότητα σκέδασης Compton [Fano U., 1953]. Η αλληλεπίδραση είναι πιθανότερη για υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό. Αντίστοιχα με τις άλλες αλληλεπιδράσεις ορίζεται, ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ_{scR} (cm^{-1}), που εκφράζει την ανά μονάδα μήκους διαδρομής των φωτονίων πιθανότητα να υποστεί την υπόψιν αλληλεπίδραση. Η αλληλεπίδραση αυτή συχνά αμελείται κατά τη μελέτη εξασθένησης φωτονίων, καθώς η πιθανότητα φωτοηλεκτρικής απορρόφησης είναι αρκετά υψηλότερη για φωτόνια χαμηλών ενεργειών. Ωστόσο, έχει ιδιαίτερη σημασία το γεγονός ότι σε μία ανιχνευτική διάταξη είναι δυνατόν φωτόνια τα οποία δεν είχαν αρχικά διεύθυνση προς τον ανιχνευτή, μετά από ελαστική σκέδαση να οδεύσουν προς αυτόν και τελικά να ανιχνευθούν. Τα φωτόνια αυτά καθώς δεν έχουν υποστεί απώλεια ενέργειας θα ανιχνευθούν τελικά κάτω από τη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης ενέργειας του φάσματος. Κατά συνέπεια, κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση, η παρουσία υλικών στην περιοχή περί τον ανιχνευτή στα οποία μπορούν να γίνουν ελαστικές σκεδάσεις φωτονίων χαμηλών ενεργειών, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων αυτών.

2.4.2 Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης (μ)

Κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν ενδιαφέρει η πιθανότητα ένα φωτόνιο να υποστεί αλληλεπίδραση συγκεκριμένου τύπου κατά τη διέλευσή του μέσα από το δείγμα, αλλά η πιθανότητα να υποστεί οποιαδήποτε από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις και τελικά να μην φτάσει στον ανιχνευτή. Έτσι, ένα φωτόνιο κατά την αλληλεπίδρασή του με την ύλη μπορεί να υποστεί αλλαγή στη διεύθυνσή του, μείωση της ενέργειάς του, ή και πλήρη απορρόφηση. Το τελευταίο ενδεχόμενο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, στην περίπτωση που το φωτόνιο ανήκει σε δέσμη, καθώς αυτό σημαίνει την απομάκρυνσή του από αυτή. Ένα μέγεθος το οποίο αποτελεί δείκτη του βαθμού εξασθένησης που υφίσταται μια μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων, κατά τη διέλευσή της μέσα από ένα υλικό είναι ο **ολικός γραμμικός**

συντελεστής εξασθένησης (μ) σε (cm^{-1}). Στο συντελεστή μ , συμπεριλαμβάνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις που περιγράφηκαν παραπάνω και κατά συνέπεια ισχύει :

$$\mu = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{scC}} + \mu_{\text{scR}} + \mu_{\text{pair}} \quad (\text{σχέση 2.23})$$

Ο συντελεστής μ εκφράζει την ανά μονάδα μήκους πιθανότητα ένα φωτόνιο που κινείται μέσα σε υλικό απορροφητή να υποστεί οποιαδήποτε από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις. Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης είναι η ενέργεια των φωτονίων και η σύσταση και πυκνότητα του υλικού, από το οποίο διέρχεται η δέσμη φωτονίων. Στη βιβλιογραφία, όπως περιγράφεται στη συνέχεια, ανευρίσκονται πίνακες και σχέσεις, οι οποίες προσδιορίζουν το συντελεστή μ συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων και του αριθμού Z του υλικού ή της σύστασής του – εφόσον αυτή είναι γνωστή. Έχουν αναπτυχθεί, ακόμη, εμπειρικές σχέσεις που εκτιμούν με σχετική ακρίβεια το συντελεστή μ για διάφορα υλικά. Συγκεκριμένα, έχει προταθεί από τον [Oresugan M.O., 1993] η εμπειρική σχέση:

$$\mu(E, Z) = R(Z)^{-3.15} + S(Z) \cdot \exp\left[0.408 \cdot (\ln E) - 0.066 \cdot (\ln E)^2\right] \quad (\text{σχέση 2.24})$$

όπου:

$\mu(E, Z)$: ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) του υλικού με ατομικό αριθμό Z και ενέργεια φωτονίων $E(\text{keV})$

$R(Z), S(Z)$: σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την πυκνότητά του

Μετά από διερεύνηση [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998], προέκυψε ότι η παραπάνω σχέση οδηγεί σε ικανοποιητική εκτίμηση του μ για φωτόνια με ενέργειες υψηλότερες των 200keV, όπου η μεταβολή της τιμής του μ με την ενέργεια των φωτονίων δεν είναι τόσο έντονη. Αντίθετα, για φωτόνια στην περιοχή χαμηλών ενεργειών (40-200keV), η εκτίμηση του μ δεν κρίνεται ικανοποιητική. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση νέων εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων – σημείων (E_i, μ_i), στην περιοχή χαμηλών ενεργειών. Συγκεκριμένα, μετά από μετά από διερεύνηση, για ένα υλικό προτείνεται η συνάρτηση [Δ.Δ. Αναγνωστάκης Μ., 1998]:

$$\ln(\mu) = a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot (\ln(E))^2 \quad (\text{σχέση 2.25})$$

Η σχέση αυτή, όπως προέκυψε μετά από διερεύνηση για διάφορα υλικά (H₂O, 4M HCl, KCl, SiO₂) και για ενέργειες φωτονίων 40-200keV, προσαρμόζεται πολύ ικανοποιητικά σε πειραματικά σημεία (E_i, μ_i) και για το λόγο αυτό έχει υιοθετηθεί και χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Εξίσου σημαντική είναι και η εξάρτηση του συντελεστή μ από τη σύσταση και την πυκνότητα του υλικού από το οποίο διέρχεται η δέσμη φωτονίων. Για ένα συγκεκριμένο υλικό και ορισμένη ενέργεια φωτονίων, ο συντελεστής μ μπορεί ακόμη να ποικίλει, καθώς μπορεί να υφίσταται υπό διάφορες φάσεις ή υπό διάφορες πυκνότητες. Ενδεικτικό είναι το παράδειγμα του νερού, το οποίο απαντάται σε στερεά, υγρή και αέριο φάση, όπως και η ιπτάμενη τέφρα η οποία παρουσιάζει ποικιλία πυκνοτήτων, εξαιτίας της συμπιεστότητάς της. Αυτό σημαίνει, ουσιαστικά, ότι η εξασθένιση των φωτονίων είναι ανάλογη της ποσότητας της μάζας του υλικού μέσα από το οποία διέρχονται τα φωτόνια, και όχι της απόστασης την οποία διανύουν. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο μαζικός συντελεστής εξασθένισης, μ_m , ο οποίος είναι ανεξάρτητος της πυκνότητας ρ , και ορίζεται ως ο λόγος μ/ρ (cm²/g). Αντίστοιχα ορίζονται και οι μερικοί μαζικοί συντελεστές εξασθένισης των αλληλεπιδράσεων: λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου μ_{ph}/ρ , λόγω σκέδασης Compton μ_{sc}/ρ , λόγω δίδυμης γέννησης μ_{pair}/ρ , και λόγω σκέδασης Rayleigh μ_{scR}/ρ .

Σε περίπτωση που το υλικό του απορροφητή είναι χημική ένωση ή μίγμα, όπως για παράδειγμα χρώμα που αναλύεται στη συνέχεια, τότε ο υπολογισμός του μ γίνεται από την παρακάτω σχέση, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η κατά βάρος σύσταση:

$$\mu_m = \sum_i w_i \cdot \mu_{mi} \quad (\text{σχέση 2.26})$$

όπου,

μ_{mi} : ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης της συνιστώσας i , και

w_i : η κατά βάρος αναλογία της συνιστώσας i .

2.4.3 Βιβλιογραφικές πηγές δεδομένων για το γραμμικό και μαζικό συντελεστή εξασθένισης

Στην παράγραφο αυτή δίνονται πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα που διατίθενται στη βιβλιογραφία για τους συντελεστές εξασθένισης μ και μ_m . Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη βιβλιογραφία υπάρχουν θεωρητικές και εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του συντελεστή μ , συναρτήσεως του στοιχείου του υλικού του απορροφητή και της ενέργειας των φωτονίων. Από τους πρώτους πλήρεις πίνακες που διατίθενται, είναι εκείνοι στη δημοσίευση [Hubbell J.H., 1982], όπου δίνονται οι τιμές του συντελεστή μ_m για τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα, για υλικά που ενδιαφέρουν για ακτινοπροστασία (μπετόν, μολυβδύαλος, αέρας, νερό), για υλικά που ενδιαφέρουν για τη δοσιμετρία (ανθρώπινοι ιστοί), για ορισμένα συνθετικά υλικά (PVC, nylon, mylar), και για υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ανιχνευτών ακτινοβολίας (NaI, CsI).

Επιπλέον, τιμές του συντελεστή μ_m για ενέργειες φωτονίων μεγαλύτερες από 100keV, διατίθενται στη βιβλιογραφία από τους [Etherington H., 1958] και [Hubbell J.H., 1969] για διάφορα υλικά που ενδιαφέρουν εξαιτίας των ιδιοτήτων θωράκισης φωτονίων που παρουσιάζουν, όπως για παράδειγμα μπετόν και πετρώματα διαφόρων ειδών.

Από το 1999, η μεγαλύτερη και πιο αξιόπιστη βάση δεδομένων μαζικού συντελεστή εξασθένισης (μ/ρ) είναι διαθέσιμη από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology – NIST). Περιλαμβάνει πίνακες και γραφήματα μαζικού συντελεστή εξασθένισης μ/ρ για όλα τα στοιχεία $Z = 1$ έως 92, και για 48 ενώσεις και μίγματα ραδιολογικού ενδιαφέροντος, που καλύπτουν την ενεργειακή περιοχή 1 keV έως 20 MeV. Οι πίνακες που περιλαμβάνονται στη συγκεκριμένη βάση δεδομένων, αντικατέστησαν και επέκτειναν τους πίνακες της δημοσίευσης [Hubbell J.H., 1982]. Η βάση δεδομένων είναι προσβάσιμη από την ιστοσελίδα του NIST, στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/>. Ενδεικτικό παράδειγμα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτή, με διάγραμμα και πίνακα, παρατίθεται στο παράρτημα Ε.

Παρόλα αυτά, διαπιστώνεται ότι για τους συντελεστές μ και μ_m περιβαλλοντικών υλικών, που κυρίως ενδιαφέρει η ανάλυσή τους, οι πληροφορίες που διατίθενται είναι

ελάχιστες. Λόγω της έλλειψης δεδομένων, συχνά παρατηρείται να προσομοιώνονται υλικά όπως το χόμα, με άλλα υλικά ίδιας πυκνότητας. Τα αποτελέσματα αυτά, όπως έχει αποδειχτεί [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998], δεν είναι ακριβή για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, τα οποία ενδιαφέρουν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. Η λύση η οποία συνήθως επιλέγεται είναι ο προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μέσω πειραματικής διαδικασίας. Οι δυσκολίες της επιλογής αυτής δεν πρέπει να παραβλέπονται, κυρίως, διότι θα πρέπει να διατίθεται κατάλληλη πειραματική διάταξη, η οποία να δίνει σε εύλογο χρόνο στατιστικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, για το εύρος των ενεργειών φωτονίων που εξετάζονται, αλλά και των πυκνοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται. Το ζήτημα αυτό, αποτελεί το αντικείμενο του κεφαλαίου που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 3:

Μέθοδοι προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας ΔΕ είναι να μελετηθεί το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης μέσα σε ένα δείγμα και να ληφθεί υπόψη στη γ -φασματοσκοπική ανάλυση, διορθώνοντας την απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης με τον κατάλληλο συντελεστή διόρθωσης λόγω αυτοαπορρόφησης. Οι μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή αυτού ποικίλουν και εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους. Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ βασίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης αυτοαπορρόφησης με ολοκληρωτική μέθοδο [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαραίτητη παράμετρος είναι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ . Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού του συντελεστή μ , καθώς και προσδιορισμού του μέσω τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo. Η ενεργειακή περιοχή που ενδιαφέρει για την παρούσα ΔΕ είναι η περιοχή χαμηλών ενεργειών (<200keV) στην οποία το φαινόμενο αυτοαπορρόφησης είναι σημαντικότερο. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν κατάλληλες πηγές φωτονίων που να καλύπτουν επαρκώς την παραπάνω ενεργειακή περιοχή, και αντίστοιχα κατάλληλος ανιχνευτής, για την ανίχνευση των φωτονίων αυτών.

Αρχικά, στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα πρώτα πειράματα που διεξήχθησαν με σκοπό τον έλεγχο της γεωμετρίας που έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ . Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν προέκυψε ότι, ενδεχομένως υπάρχουν περιθώρια ο συντελεστής μ να προσδιορισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, με χρήση διαφορετικής πειραματικής διαδικασίας και διαφορετικής γεωμετρίας. Κατά συνέπεια αποφασίσθηκε η περαιτέρω διερεύνηση με στόχο τη βελτίωση της υπάρχουσας πειραματικής διαδικασίας. Η διερεύνηση αυτή έγινε με εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo. Εν συνεχεία, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo και συγκεκριμένα του κώδικα

PENELOPE που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, με τον οποίο έγιναν όλες οι δοκιμές με στόχο την αναζήτηση καλύτερης γεωμετρίας για τον προσδιορισμό του μ . Περιγράφονται ακόμη, όλες οι δοκιμές που έγιναν με χρήση διαφορετικής γεωμετρίας, τα αντίστοιχα αποτελέσματα και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν σε όλα τα στάδια της διερεύνησης. Τελικά, δύο από τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν αναλύονται εκτενέστερα, καθώς παρουσίασαν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ήδη χρησιμοποιούμενες, και για αυτές θα παρουσιαστούν και τα αντίστοιχα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

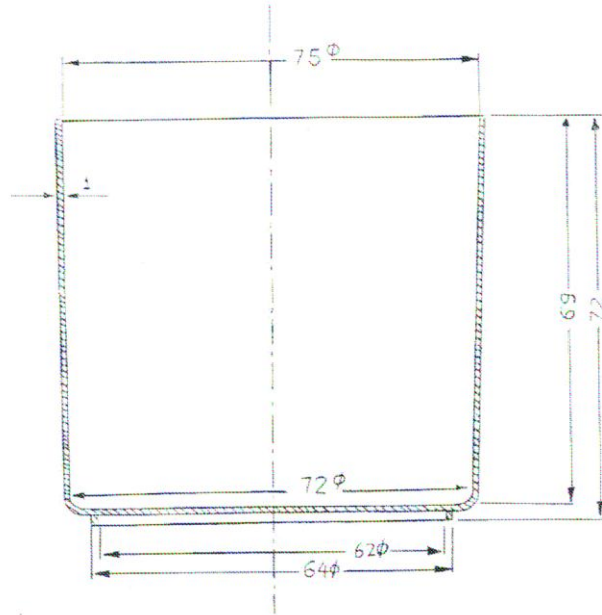
3.2 Πειραματικός προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης (μ)

Ο πειραματικός είναι ένας συνήθης τρόπος προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης, καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν υπάρχει μεγάλο εύρος δεδομένων στη βιβλιογραφία, ειδικά για υλικά περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος όπως το χόμα κλπ. Έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές για τον πειραματικό προσδιορισμό του, όπως λεπτή μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων (narrow beam), και ανοιχτή μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων (broad beam). Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε, και αναλύεται παρακάτω, η τεχνική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ για περιβαλλοντικά υλικά.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί από την αρχή ότι κατά τη διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή μ , ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις περιπτώσεις υλικών τα οποία παρουσιάζουν υψηλή συμπίεστικότητα, λόγω τη έντονης εξάρτησης του μ από την πυκνότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι περιβαλλοντικά υλικά όπως το χόμα, ο λιγνίτης, το τσιμέντο και η τέφρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις συναντάται το φαινόμενο τα διαδοχικά στρώματα ίδιου πάχους του απορροφητή (x_i) να έχουν διαφορετική πυκνότητα, λόγω διαφορετικής συμπίεσης. Προς αποφυγή του προβλήματος αυτού, εισήχθη ο όρος της *φαινόμενης πυκνότητας* ενός υλικού, η οποία ορίζεται ως η πυκνότητα που παρουσιάζει το υλικό κατά τη συσκευασία του μέσα σε δοχείο τυποποιημένων διαστάσεων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δειγμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Έτσι, για τη δημιουργία των διαδοχικών στρωμάτων του απορροφητή με πάχος x_i το καθένα, αρκεί να τοποθετείται κατάλληλη μάζα m_i υλικού στο δοχείο.

Κατά τα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό δοχείο² (Σχήμα 3.1) όγκου 282ml και ύψους 69mm το οποίο παρουσιάζει ελαφρά κωνικότητα. Η ακτίνα R που αντιστοιχεί σε ύψος h δίδεται από τη σχέση [ΔΕ Βασιλοπούλου Θ., 2008] :

$$R(cm) = 0.029 \cdot h(cm) + 3.54(cm) \quad (\text{σχέση 3.1})$$



Σχήμα 3. 1

Διαστάσεις τυποποιημένου κυλινδρικού δοχείου που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται, σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή μ :

1. Πλήρωση του δοχείου όγκου 282ml και ζύγιση του περιεχόμενου υλικού, ώστε να εκτιμηθεί η φαινόμενη πυκνότητα του υλικού.
2. Εκτίμηση της μάζας m_i του υλικού, η οποία πρέπει να τοποθετείται στο κυλινδρικό δοχείο προκειμένου να δημιουργείται στρώμα απορροφητή επιθυμητού πάχους

² Πρόκειται για το δοχείο που χρησιμοποιείται στις τυποποιημένες γεωμετρίες όγκου (2, 5 & 8) του ΕΠΤ-ΕΜΠ

(π.χ. 5mm) για τη συγκεκριμένη φαινόμενη πυκνότητα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα επιθυμητά πάχη x_i του απορροφητή.

3. Τοποθέτηση ποσότητας υλικού m_i στο κυλινδρικό δοχείο προκειμένου να επιτευχθεί πάχος υλικού³ x_i .
4. Τοποθέτηση του δοχείου πάνω στον ανιχνευτή και της εξωτερικής πηγής φωτονίων πάνω από το δοχείο και ομοαξονικά προς αυτό, σε καθορισμένη απόσταση, ανάλογα με το είδος της πηγής και την ενέργεια των φωτονίων που εκπέμπει.
5. Για κάθε πάχος x_i απορροφητή, συλλογή του αντίστοιχου φάσματος των φωτονίων της εξωτερικής πηγής για επαρκή χρόνο, έτσι ώστε οι σχηματιζόμενες φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στα φωτόνια που ενδιαφέρουν, να έχουν σχηματιστεί με καλή στατιστική και το επιθυμητό κατά περίπτωση σφάλμα.
6. Μεταφορά του φάσματος σε αρχείο H/Y και γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του, για προσδιορισμό της επιφάνειας των φωτοκορυφών, που αντιστοιχούν στις ενέργειες των φωτονίων της πηγής που ενδιαφέρουν. Η μεταφορά και η ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιείται με τον κώδικα SPUNAL, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και χρησιμοποιείται για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.
7. Για κάθε ενέργεια φωτονίων που ενδιαφέρει, εκτίμηση του λόγου της επιφάνειας της αντίστοιχης φωτοκορυφής προς τη διάρκεια συλλογής του φάσματος ($\text{counts}\cdot\text{s}^{-1}$, cps). Η ποσότητα αυτή είναι ανάλογη ρυθμού I_i των καταμετρούμενων από τον ανιχνευτή φωτονίων ($\text{φωτόνια}\cdot\text{s}^{-1}$) για το πάχος x_i του απορροφητή.
8. Προσαρμογή των πειραματικών σημείων $(x_i, \ln I_i)$ ⁴ σε γραμμική συνάρτηση αναδρομής. Η κλίση της ευθείας αναδρομής είναι η ζητούμενη εκτίμηση του συντελεστή μ για το υλικό του απορροφητή και τη συγκεκριμένη ενέργεια.
9. Απεικόνιση σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, των σημείων (x_i, I_i) και της αντίστοιχης ευθείας αναδρομής, για κάθε ενέργεια φωτονίων.

³ Στην περίπτωση αυτή, το πάχος του στρώματος που προστίθεται κάθε φορά ενδεχομένως δεν είναι ακριβώς το ίδιο για όλα τα στρώματα.

⁴ Η εξασθένηση μίας δέσμης φωτονίων που διέρχεται μέσα από ένα υλικό πάχους d περιγράφεται από τον εκθετικό νόμο της εξασθένησης $I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$. Απλή λογαρίθμηση οδηγεί στη σχέση $\ln(I) = \ln(I_0) - \mu \cdot d$, η οποία υποδεικνύει ότι τα σημεία $(x_i, \ln(I_i))$ πρέπει να προσαρμόζονται σε ευθεία γραμμή.

10. Η αβεβαιότητα του συντελεστή μ υπολογίζεται ως η αβεβαιότητα της κλίσης της ευθείας αναδρομής.

Πριν ξεκινήσει η περιγραφή των πειραμάτων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της ΔΕ κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια αναφορά στις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν.

3.2.1 Ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ

Καθώς η ενεργειακή περιοχή στην οποία ενδιαφέρει ο υπολογισμός του μ , είναι η περιοχή χαμηλών ενεργειών, 0-200keV, για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έγινε η επιλογή των πηγών με στόχο να καλύπτεται επαρκώς η συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή τους, ενώ τα πιστοποιητικά τους παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

1. Σημειακή πηγή Cs-137, της Amersham International plc, με κωδικό CDR.121, ονομαστικής ραδιενέργειας 0.993 μ Ci, η οποία κυρίως εκπέμπει φωτόνια στις ενέργειες: 31.82keV (2.06%), 32.19keV (3.80%), 36.40keV (1.12%), 37.30keV (2.66%) και 661.66keV (89.90%).
2. Σημειακή πηγή Cs-137, της Amersham International plc, με κωδικό CDR.151, ονομαστικής ραδιενέργειας 12.29 μ Ci, η οποία εκπέμπει φωτόνια στις ίδιες ενέργειες με την προηγούμενη πηγή Cs-137.
3. Σημειακή πηγή Ra-226 της Amersham International plc, με κωδικό RAR8121, ονομαστικής ραδιενέργειας 57.1kBq. Η υπόψη πηγή είναι αεροστεγώς συσκευασμένη σε πλαστική θήκη που εμποδίζει τη διαρροή του παραγομένου από τη διάσπαση του Ra-226, αερίου Rn-222. Τα σημαντικότερα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή στην ενεργειακή περιοχή που εξετάζεται προέρχονται τόσο από το Ra-226 όσο και από τα θυγατρικά του: 46.54keV (Pb-210), 74.8keV (Pb-214), 77.10keV (Pb-214), 186.25keV (Ra-226, 3.5%).
4. Σημειακή πηγή Am-241, της Amersham International plc, με κωδικό AMR1121, ονομαστικής ραδιενέργειας 40.2 kBq (1.09 μ Ci), η οποία εκπέμπει φωτόνια στις ενέργειες: 13.90keV (28.0%), 26.34keV (2.4%), 59.54keV (35.9%).
5. Σημειακή πηγή Eu-152, της Amersham International plc, με κωδικό προϊόντος EFR1121, ονομαστικής ραδιενέργειας 46.2 kBq. Τα σημαντικότερα φωτόνια που

εκπέμπονται από τη συγκεκριμένη πηγή στην ενεργειακή περιοχή που εξετάζεται είναι: 39.52keV, 40.12keV, 45.36keV, 46.63keV και 121.78keV (28.41%).

6. Κυλινδρική πηγή Am-241 όγκου 282ml, η οποία έχει παρασκευαστεί από το πρότυπο ραδιενεργό παρασκεύασμα AMZ.44 της Amersham International plc [Amersham, 1984], το οποίο βρίσκεται υπό μορφή διαλύματος Am-241 σε 0.5M HCl χωρίς φορείς (carrier free). Κατά την ημερομηνία αναφοράς του παρασκευάσματος (01/12/84) η συνολική ραδιενέργεια σε Am-241 ήταν 228kBq, ενώ η συγκέντρωση στο παρασκεύασμα άλλων ισοτόπων που εκπέμπουν σωματίδια-α είναι μικρότερη του 0.005%. Η πρότυπη πηγή φυλάσσεται υπό συνεχή ψύξη. Οι ενέργειες στις οποίες εκπέμπει φωτόνια αναφέρονται παραπάνω, στη σημειακή πηγή Am-241.

Πρέπει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι δεν εξετάστηκαν οι φωτοκορυφές που σχηματίζονται από όλα τα φωτόνια που εκπέμπουν οι παραπάνω πηγές. Η περιοχή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, είναι η περιοχή χαμηλών ενεργειών, 0-200keV, οπότε το ενδιαφέρον περιορίστηκε μόνο στα φωτόνια με ενέργειες <200keV. Επιπλέον, δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα τα φωτόνια με ενέργειες <200keV, αλλά κατά περίπτωση επιλέχθηκαν ορισμένες μόνο ενέργειες και ειδικότερα:

- για το Cs-137 χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα φωτόνια 32.19keV τα οποία σχηματίζουν διπλή φωτοκορυφή με το φωτόνια ενέργειας 31.82keV. Τα φωτόνια ενέργειας 36.40keV και 37.30keV δεν χρησιμοποιήθηκαν,
- για το Am-241 χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα φωτόνια 59.54keV τα οποία σχηματίζουν ικανοποιητική φωτοκορυφή σε κάθε περίπτωση,
- για το Ra-226, έγινε καταγραφή μόνο των φωτοκορυφών στα 46.54keV και 186.25keV, και όχι των 74.8keV και 77.1keV βασιζόμενοι στις παρατηρήσεις του [Δ.Δ Αναγνωστάκης Μ., 1998],
- για το Eu-152 έγινε αρχικά προσπάθεια για αξιοποίηση των φωτοκορυφών στα 45.36keV και 46.63keV, όμως η ανάλυση τους ως συνιστώσες της διπλής φωτοκορυφής που δημιουργείται δεν έδινε πάντα στατιστικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, οπότε τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν. Παρόμοιο πρόβλημα

παρατηρείται και για τις ενέργειες 39.52keV και 40.12keV, οπότε από το Eu-152 χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα φωτόνια ενέργειας 121.78keV.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα φωτόνια που τελικά χρησιμοποιήθηκαν.

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Πηγή</i>
32.19	Cs-137
46.54	Ra-226
59.54	Am-241
121.78	Eu-152
186.25	Ra-226

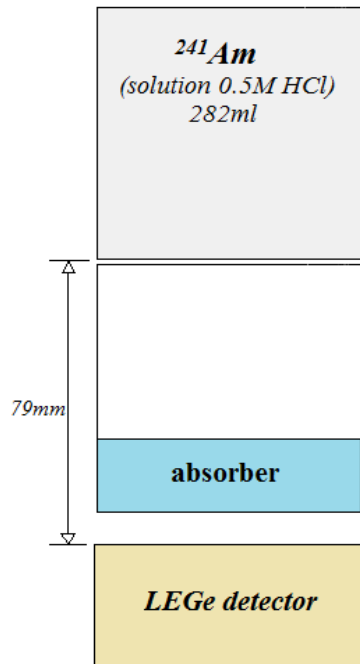
Πίνακας 3. 1

Ενέργειες των φωτονίων που αξιοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μ

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα γίνει περιγραφή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με τις παραπάνω πηγές για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ , τόσο με τη γεωμετρία δέσμης η οποία προτείνεται στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998], όσο και με άλλες γεωμετρίες οι οποίες δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της ΔΕ.

3.2.2 Πειράματα για τον προσδιορισμό του μ με την αρχική γεωμετρία δέσμης

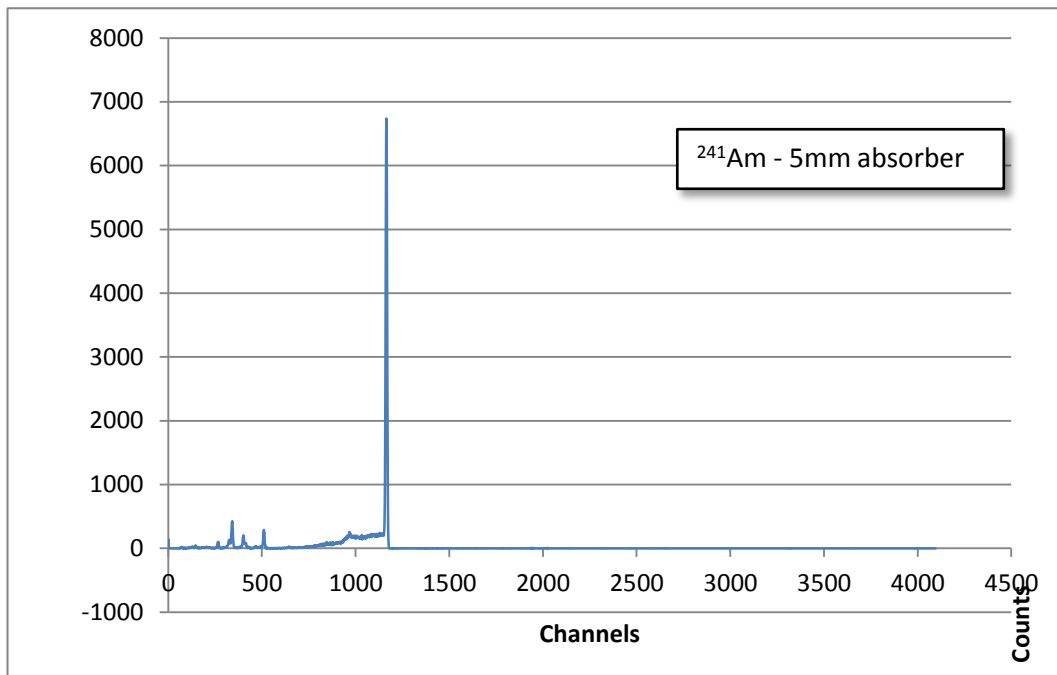
Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μ , με χρήση της γεωμετρίας δέσμης που προτείνεται στη [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Τα πρώτα πειράματα που έγιναν με σκοπό την εξοικείωση με τη διαδικασία, αφορούσαν στον προσδιορισμό του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ για απορροφητή νερό. Τα πειράματα έγιναν με χρήση της πηγής όγκου Am-241 και τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, ενώ ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο LEGe που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που είχε προταθεί και χρησιμοποιηθεί στα αντίστοιχα πειράματα [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998], με την πηγή να βρίσκεται σε απόσταση 79mm από τον ανιχνευτή τοποθετημένη μέσα σε ένα τυποποιημένο κυλινδρικό δοχείο όγκου 282ml (Σχήμα 3.2). Ο απορροφητής τοποθετείται μέσα σε ένα όμοιο δοχείο, διαδοχικά σε πάχη: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 και 40mm.



Σχήμα 3. 2

Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή μ με πηγή όγκου ^{241}Am

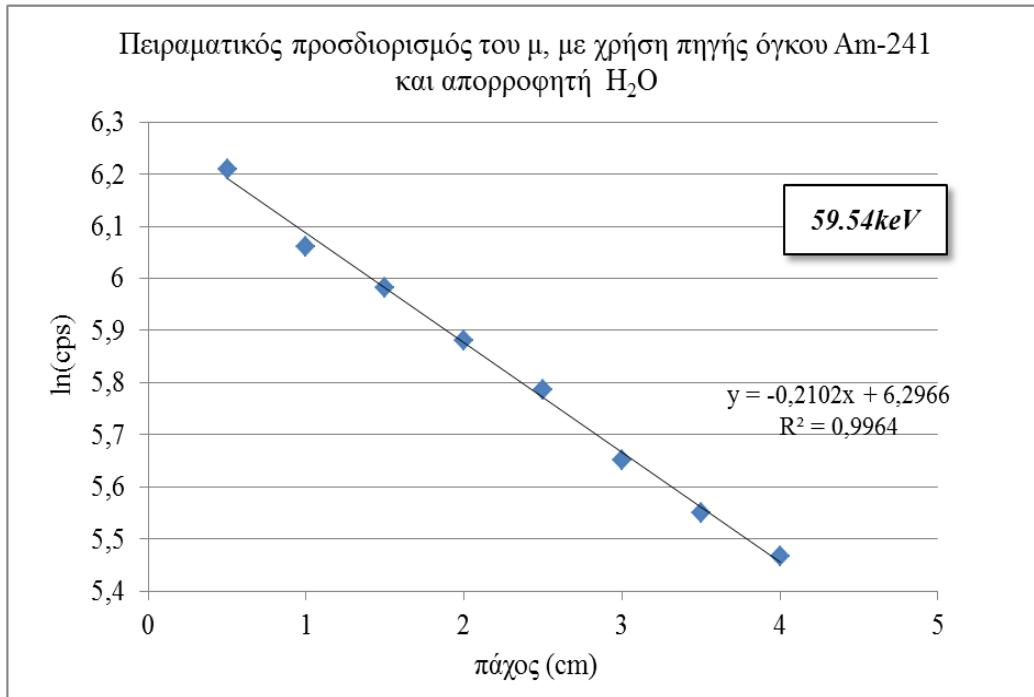
Στο Σχήμα 3.3 παρατίθεται ενδεικτικά ένα από τα φάσματα που ελήφθησαν με απορροφητή νερό πάχους 5mm και την πηγή όγκου Am-241.



Σχήμα 3. 3

Ενεργειακό φάσμα ^{241}Am με απορροφητή νερό πάχους 5mm

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 δημιουργείται ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ το οποίο παρατίθεται στο Σχήμα 3.4:



Σχήμα 3. 4

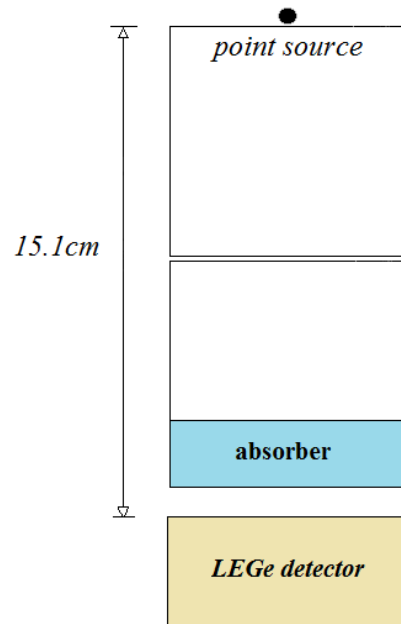
Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για νερό και ενέργεια 59.65keV

Η τιμή που προέκυψε από το πείραμα στην παρούσα εργασία είναι $\mu=0.210\pm 0.002 \text{ cm}^{-1}$ (τυπικό σφάλμα, σε επίπεδο 1σ). Η τιμή του μ που είχε προσδιορισθεί από το αντίστοιχο πείραμα που είχε γίνει στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] ήταν $\mu=0.198 \pm 0.014 \text{ cm}^{-1}$, ενώ η θεωρητική τιμή που δίνεται στην ιστοσελίδα του NIST⁵ είναι $\mu=0.2066\text{cm}^{-1}$.

⁵ Η ιστοσελίδα του NIST, είναι βάση δεδομένων για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και βρίσκεται στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. Ενδεικτικό παράδειγμα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτή, με διάγραμμα και πίνακα, παρατίθεται στο παράρτημα Ε.

Στο εξής, οποτεδήποτε αναφέρεται ότι υπολογίζεται πειραματικά ο συντελεστής μ , εννοείται ότι ακολουθείται όλη η διαδικασία που περιγράφεται προηγουμένως, χωρίς όμως να δίνονται κάθε φορά τα αντίστοιχα φάσματα και διαγράμματα, αλλά μόνον το τελικό αποτέλεσμα του μ . Στο παράρτημα Β παρατίθενται οι πληροφορίες για όλα τα φάσματα που έχουν συλλεχθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Μετά τις πρώτες δοκιμές με τη γεωμετρία του Σχήματος 3.2, αποφασίσθηκε να γίνει μία συστηματική σειρά πειραμάτων για απορροφητή νερό, για όλες τις ενέργειες φωτονίων του Πίνακα 3.1 με χρήση της γεωμετρίας του Σχήματος 3.5, η οποία είχε υιοθετηθεί στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι σημειακές πηγές Ra-226, Eu-152, Cs-137 και Am-241.



Σχήμα 3. 5

Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή μ με χρήση σημειακής πηγής

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων αποφασίσθηκε να γίνεται κάθε φορά σύγκριση με τις τιμές του μ που διατίθενται στη βιβλιογραφία και συγκεκριμένα στην ιστοσελίδα του NIST. Παρόμοιες συγκρίσεις γίνονταν σε κάθε στάδιο της εργασίας, ενώ, όπου κρίθηκε απαραίτητο, πραγματοποιήθηκε και στατιστικό

test για να ελεγχθεί κατά πόσον η εκτιμώμενη τιμή διέφερε στατιστικά σημαντικά από τη θεωρητική τιμή NIST, εφόσον ήταν γνωστή και η αβεβαιότητα που συνόδευε την εκτιμώμενη τιμή. Το στατιστικό test που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στη μεταβλητή ελέγχου z_0 , η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται με δεδομένη τιμή, που προκύπτει από την υπόθεση ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή ($\mu=0$, $\sigma=1$) και το επίπεδο εμπιστοσύνης (95% για την παρούσα εργασία). Η τιμή της μεταβλητής z_0 δίνεται από τη σχέση:

$$z_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{se} \quad (\text{σχέση 3.2})$$

όπου :

\bar{x} η εκτιμώμενη τιμή,

μ_0 η θεωρητική τιμή,

(se) το τυπικό σφάλμα της τιμής \bar{x}

Κατά τη σύγκριση των τιμών της μεταβλητή z_0 διακρίνονται τρεις βασικές περιπτώσεις:

- Εάν $z_0 < 1.96$, τότε οι δύο τιμές \bar{x} και μ_0 θεωρείται ότι δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, (σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%).
- Εάν $z_0 > 2.57$, τότε οι δύο τιμές \bar{x} και μ_0 θεωρείται ότι διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, (επίπεδο εμπιστοσύνης 99%).
- Εάν $1.96 < z_0 < 2.57$, τότε δε μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.

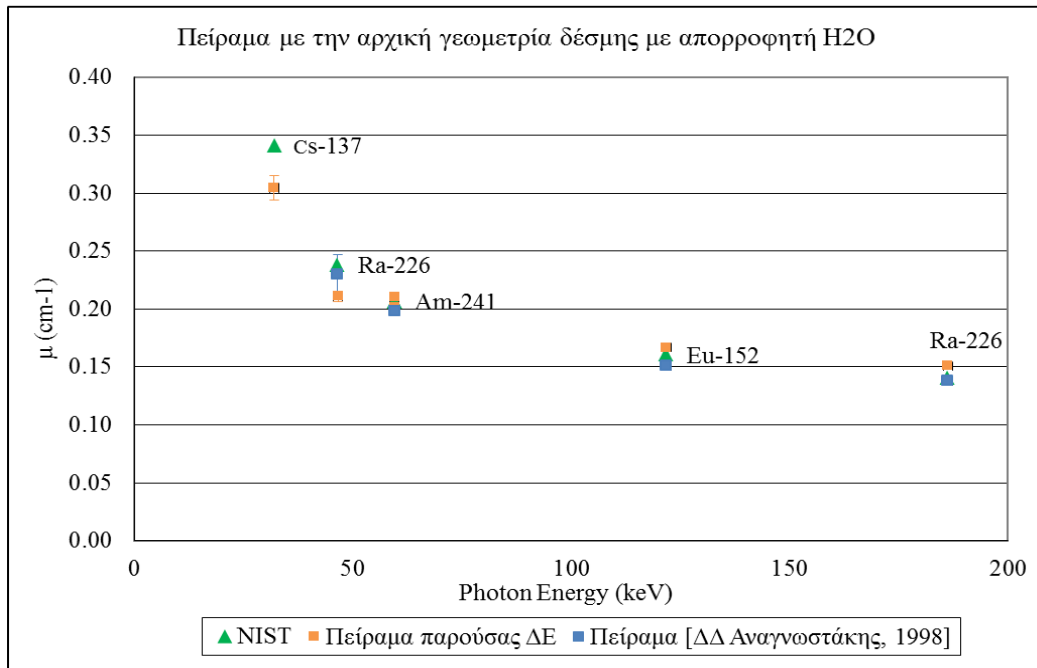
Στον Πίνακα 3.2 και το Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται: τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ, τα αντίστοιχα αποτελέσματα που είχαν προκύψει στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]⁶ και οι θεωρητικές τιμές κατά NIST και γίνονται οι σχετικές συγκρίσεις.

⁶ Στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998] δεν είχαν γίνει πειράματα για την ενέργεια των 32.19keV

Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1})						
		Παρούσα ΔΕ			[ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]	
Ενέργεια (keV)	NIST	Πείραμα \pm Αβεβαιότητα	Απόκλιση	Στατιστικό τεστ	Πείραμα \pm Αβεβαιότητα	Απόκλιση
32.19	0.3407	$0.3045 \pm 3.35\%$	-11.9%	3.55	-	-
46.54	0.2378	$0.2110 \pm 2.11\%$	-12.7%	6.02	$0.23 \pm 7.2\%$	-3.4%
59.54 (point)	0.2066	$0.2011 \pm 0.60\%$	-2.7%	4.56	-	-
59.54 (volume)	0.2066	$0.2102 \pm 0.51\%$	1.7%	3.36	$0.198 \pm 1.4\%$	-4.3%
121.78	0.1606	$0.1668 \pm 0.37\%$	3.7%	10.05	$0.151 \pm 1.5\%$	-10.5%
186.25	0.1403	$0.1510 \pm 1.25\%$	7.1%	5.67	$0.138 \pm 1.1\%$	-1.7%

Πίνακας 3. 2

Αποτελέσματα για το συντελεστή μ με απορροφητή H_2O , από τα πειράματα στη ΔΕ και ΔΔ με την αρχική γεωμετρία δέσμης, συγκριτικά με τις θεωρητικές τιμές (NIST)



Σχήμα 3. 6

Αποτελέσματα για το συντελεστή μ με απορροφητή H_2O , από τα πειράματα στη ΔΕ και ΔΔ με την αρχική γεωμετρία δέσμης, συγκριτικά με τις θεωρητικές τιμές (NIST)

Από τον Σχήμα 3.6 διαπιστώνεται ότι για το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ, υπάρχει σύμπτωση τιμών στην ενέργεια των 59.54keV για την περίπτωση της πηγής όγκου. Για τις υπόλοιπες ενέργειες τα αποτελέσματα διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χαμηλή αβεβαιότητα που εκτιμήθηκε

για τις τιμές του μ . Παρόμοια αποτελέσματα είχαν προκύψει και από τα πειράματα που είχαν γίνει στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Στις χαμηλότερες ενέργειες 32.19keV και 46.54keV παρουσιάζεται αρκετά μεγάλη απόκλιση τιμών, η οποία ωστόσο συνοδεύεται και από σημαντική αβεβαιότητα στην πειραματική τιμή. Εξάγεται, συνεπώς, το συμπέρασμα ότι, ενώ με τη γεωμετρία σημειακής πηγής μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του μ , υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της γεωμετρίας, κυρίως για τις χαμηλότερες ενέργειες, 32.19keV και 46.54keV.

Ως στόχος, λοιπόν, για τη συνέχεια τέθηκε η αναζήτηση μίας νέας γεωμετρίας δέσμης, η οποία να μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων του μ , με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές (NIST). Η αναζήτηση της νέας γεωμετρίας δέσμης μπορεί να γίνει είτε καθαρά πειραματικά, είτε και με τη βοήθεια της τεχνικής προσομοίωσης Monte-Carlo. Εξυπακούεται ότι η οποία νέα γεωμετρία δέσμης θα προκριθεί θα ελεγχθεί τελικά και πειραματικά, καθώς ο τελικός σκοπός είναι η ανάπτυξη μίας νέας *πειραματικής τεχνικής* για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του μ .

3.3 Προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης (μ) μέσω τεχνικών προσομοίωσης

Στη συνέχεια περιγράφονται οι δοκιμές που έγιναν με χρήση τεχνικών προσομοίωσης, με στόχο την εύρεση κατάλληλης γεωμετρίας δέσμης που θα οδηγήσει σε ακριβέστερη εκτίμηση του μ . Η προσομοίωση στο σημείο αυτό παρέχει τη δυνατότητα εύκολης διερεύνησης της αποτελεσματικότητας διαφόρων γεωμετριών. Ωστόσο, πριν περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε κρίνεται σκόπιμο στην παρούσα παράγραφο, να γίνει μια σύντομη παρουσίαση της προσομοίωσης Monte Carlo, του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή μ χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα προσομοιώσεων.

3.3.1 Η προσομοίωση Monte Carlo

Οι μέθοδοι Monte Carlo είναι μια κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που στηρίζονται στην επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για την επίλυση

προβλημάτων τα οποία έχουν περιγραφεί κατάλληλα με χρήση μαθηματικών μοντέλων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε περιπτώσεις προβλημάτων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, ή σημαντικές αβεβαιότητες στα αρχικά δεδομένα, στις οποίες ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι ή αναλυτικές σχέσεις δεν μπορούν να δώσουν ακριβείς λύσεις στο πρόβλημα. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχος με εκείνο της ρίψης ενός ζαριού και γι' αυτό στα τέλη της δεκαετίας του '40, οπότε και εμφανίστηκε η συγκεκριμένη μέθοδος προσομοίωσης, πήρε το όνομά της από το δημοφιλές καζίνο του Monte Carlo. Οι κώδικες Monte-Carlo βρίσκουν πολύ μεγάλη εφαρμογή στη μελέτη των φαινομένων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με την ύλη. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης και της μεταφοράς των πάσης φύσεως ακτινοβολιών οι οποίες εμπλέκονται περιγράφεται με λεπτομέρεια. Για παράδειγμα, περιγράφεται στη μέθοδο η πιθανότητα ένα φωτόνιο να πραγματοποιήσει συγκεκριμένου τύπου αλληλεπίδραση με ένα υλικό με προκαθορισμένες κατανομές πιθανότητας (Probability Distribution Functions). Με χρήση γεννητριών τυχαίων αριθμών επιλέγεται η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση η οποία θα πραγματοποιηθεί. Η μέθοδος προσομοίωσης Monte-Carlo στηρίζεται στη δημιουργία της «ιστορίας» ενός σωματιδίου ή φωτονίου ως μία σειρά διαδρομών από τη στιγμή που εκπέμπεται από την πηγή έως ότου αυτό εξέλθει των ορίων του συστήματος ή αποθέσει όλη του την ενέργεια. Κάθε διαδρομή ξεκινά από τη στιγμή εκπομπής και ολοκληρώνεται με την αλληλεπίδραση με την ύλη, είτε αλλάζοντας κατεύθυνση, είτε χάνοντας μέρος της ενέργειάς του. Η προσομοίωση μεγάλου πλήθους ιστοριών επιτρέπει εντέλει τον προσδιορισμό διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος, όπως π.χ. την ενέργεια που αποτίθεται από τα σωματίδια στο υλικό με το οποίο αλληλεπιδρούν. Ωστόσο, η προσομοίωση δε μπορεί να έχει πάντα ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με μία πραγματική πειραματική διαδικασία, καθώς η διαδικασία που προσομοιώνεται είναι συνήθως απλοποιημένη και επιπλέον, συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα όπως η δημιουργία του σήματος σε έναν ανιχνευτή, ή η ακτινοβολία περιβάλλοντος, γεγονότα που δημιουργούν ένα φυσικό υπόβαθρο και διαφοροποιούν το φάσμα.

3.3.1.1 Ο κώδικας Monte-Carlo PENELOPE:

Τα τελευταία χρόνια στο ΕΠΤ-ΕΜΠ οι προσομοιώσεις αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης γίνονται μέσω του κώδικα PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons). Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα Fortran και αναπτύχθηκε το 1996 στο πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης. Έκτοτε ακολούθησαν αρκετές νέες εκδόσεις του κώδικα και συνεχίζει μέχρι και σήμερα να εμπλουτίζεται. Η έκδοση που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και κατά συνέπεια και στην παρούσα ΔΕ είναι η έκδοση του 2005. Ο αρχικός σχεδιασμός του κώδικα ήταν να προσομοιώνει τη διάδοση ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από σύνθετα υλικά. Αργότερα, προστέθηκε και η δυνατότητα να προσομοιώνει αντίστοιχα και φωτόνια (αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτόνια δε συμπεριλαμβάνονται στην ονομασία του κώδικα).

Ο κώδικας έχει δυνατότητα προσομοίωσης σημειακών πηγών β^+ , β^- και γ -ακτινοβολιών για εύρος ενεργειών 50eV – 1GeV. Αρχικά απαιτείται η αναλυτική περιγραφή του εκάστοτε προβλήματος, ενώ τα απαραίτητα δεδομένα δίνονται από το χρήστη με κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία εισόδου. Τα αρχεία εισόδου αυτά, σε συνδυασμό με τους φυσικούς νόμους και μηχανισμούς των αλληλεπιδράσεων που εμπεριέχονται σε ένα σύνολο υπορουτινών, επιτρέπουν στον κώδικα να παρακολουθήσει τον αριθμό ιστοριών που ζητείται από το χρήστη και τελικά να δώσει τα αποτελέσματα των ζητούμενων μεγεθών. Ο αλγόριθμος βασίζεται στο μοντέλο του διασκορπισμού, στο οποίο συνδυάζονται αριθμητικές βάσεις δεδομένων με αναλυτικά μοντέλα των διαφόρων μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Για να επιτευχθεί η ομαλή επικοινωνία μεταξύ των αρχείων εισόδου και των υπορουτινών απαιτείται από τη χρήστη να συντάξει το δικό του κώδικα, τον καλούμενο *κώδικα χρήστη* ή κυρίως πρόγραμμα. Το κυρίως πρόγραμμα είναι εκείνο που παρακολουθεί την ιστορία κάθε σωματιδίου ή φωτονίου και με τη βοήθεια εικονικών ανιχνευτών, καταγράφει σε ειδικά αρχεία εξόδου τα ζητούμενα από το χρήστη μεγέθη. Στη συνέχεια, θα περιγραφούν αναλυτικότερα οι συνιστώσες του κώδικα, το κυρίως πρόγραμμα, οι υπορουτίνες, τα αρχεία εισόδου, οι εικονικοί ανιχνευτές και τα αρχεία εξόδου.

3.3.1.1.1 Κυρίως προγράμματα του κώδικα PENELOPE

Στην έκδοση του 2005 του κώδικα PENELOPE διατίθενται τρία έτοιμα προγράμματα χρήστη, τα PENSLAB, PENCYL και PENMAIN. Τα πρώτα δύο εφαρμόζονται σε προβλήματα αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με συγκεκριμένες γεωμετρίες. Ειδικότερα, το πρόγραμμα PENSLAB χρησιμοποιείται σε επίπεδη πλάκα, ενώ το PENCYL σε κυλινδρικές γεωμετρίες. Το πρόγραμμα PENMAIN έχει γενικότερο χαρακτήρα, δεν περιορίζεται από πλευράς γεωμετριών και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις σύνθετων κατασκευών. Το πλεονέκτημα του προγράμματος αυτού έναντι των προηγούμενων δύο είναι ότι η γεωμετρία της υπό εξέταση κατασκευής περιγράφεται σε ανεξάρτητο αρχείο, που ονομάζεται αρχείο γεωμετρίας, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα προσομοίωσης αρκετά πολύπλοκων κατασκευών. Πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι κανένα από τα τρία έτοιμα προγράμματα δε δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης προβλημάτων όπου η εκπομπή φωτονίων γίνεται από πηγή όγκου, παρά μόνον από σημειακή. Στις περιπτώσεις αυτές, ο χρήστης καλείται να τροποποιήσει κατάλληλα έναν από τους έτοιμους κώδικες και να δημιουργήσει ένα νέο κώδικα χρήστη, όπως αναλύεται αργότερα. Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας χρήστη PENMAIN, τόσο αυτούσιος στην περίπτωση που προσομοιώνονται σημειακές πηγές, όσο και τροποποιημένος στην περίπτωση πηγής όγκου. Για το λόγο αυτό, στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η λειτουργία των αρχείων εισόδου και εξόδου κυρίως από το πρόγραμμα PENMAIN, οι εικονικοί ανιχνευτές που αυτό χρησιμοποιεί καθώς και οι υπορουτίνες που καλούνται από αυτό.

3.3.1.1.2 Υπορουτίνες που καλούνται από τον κώδικα PENELOPE

Στις υπορουτίνες του κώδικα PENELOPE περιγράφονται οι μηχανισμοί που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα και είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης. Συνδέονται απευθείας με τον κώδικα χρήστη και ο χρήστης δεν επεμβαίνει σε αυτές. Είναι γραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και κατανέμονται σε τέσσερα αρχεία με τις ονομασίες PENELOPE.F, PENGEOM.F, PENVARED.F και TIMER.F, τα οποία αναλύονται ακολούθως:

- *PENELOPE.F*: Σε αυτό το αρχείο εμπεριέχονται οι υπορουτίνες που αφορούν τη διάδοση των σωματιδίων και των φωτονίων στην ύλη, και γενικότερα ότι άλλο μπορεί να σχετίζεται με τους φυσικούς νόμους της αλληλεπίδρασης.
- *PENGEOM.F*: Σε αυτό το αρχείο εμπεριέχονται οι υπορουτίνες που είναι υπεύθυνες για τη σύνδεση του κυρίως προγράμματος με το αρχείο εισόδου γεωμετρίας.
- *PENVARED.F*: Σε αυτό το αρχείο εμπεριέχονται οι υπορουτίνες που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της στατιστικής των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.
- *TIMER.F*: Σε αυτό το αρχείο εμπεριέχονται οι υπορουτίνες που παρακολουθούν χρονικά την πορεία του σωματιδίου ή του φωτονίου και καταγράφουν τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

3.3.1.1.3 Αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα *PENELOPE*

Για την πραγματοποίηση προσομοίωσης με τον κώδικα χρήστη *PENMAIN* είναι απαραίτητη η δημιουργία τριών αρχείων εισόδου:

- Αρχείο εισόδου γεωμετρίας, τύπου *.geo*: Στο αρχείο αυτό περιγράφεται λεπτομερώς η γεωμετρία του προβλήματος που προσομοιώνεται. Ο χρήστης καλείται να δώσει τις ακριβείς διαστάσεις της γεωμετρίας, τις επιφάνειες και τους όγκους που την απαρτίζουν, καθώς επίσης και τα υλικά της κάθε συνιστώσας. Για καλύτερη εποπτεία της γεωμετρίας που κατασκευάζει ο χρήστης παρέχονται συμπληρωματικά τα απεικονιστικά προγράμματα *gview2D* και *gview3D*.
- Αρχείο εισόδου υλικών, τύπου *.mat*: Στο αρχείο αυτό ορίζονται όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή του προβλήματος. Δίνονται όλες οι απαραίτητες φυσικές σταθερές που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα συγκεκριμένα υλικά. Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται με τη βοήθεια του ανεξάρτητου προγράμματος *material* το οποίο παρέχεται με τον κώδικα *PENELOPE*. Στις περιπτώσεις εκείνες που η γεωμετρία περιλαμβάνει περισσότερα του ενός υλικά, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη μέσω κατάλληλης εντολής, να δημιουργήσει ένα ενιαίο αρχείο στο οποίο θα εμπεριέχονται όλα τα

υλικά, τοποθετημένα με τη σειρά που αναγράφονται και στο αρχείο γεωμετρίας [Αθανασίου, 2006].

- Γενικό αρχείο εισόδου, τύπου .in: Το αρχείο αυτό είναι ουσιαστικά το βασικό αρχείο δεδομένων, το οποίο ορίζει το πρόβλημα που θα προσομοιωθεί. Μέσα σε αυτό περιγράφεται αρχικά ότι αφορά την πηγή ακτινοβολίας, δηλαδή, το είδος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σημειακής πηγής (π.χ. κωνικότητα της δέσμης), καθώς και η απόστασή της από τον ανιχνευτή. Ορίζεται, εν συνεχεία, η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης ή/και ο αριθμός των ιστοριών που θα προσομοιωθούν, όπως επίσης και το χρονικό βήμα με το οποίο θα καταγράφονται τα αποτελέσματα στα αρχεία εξόδου. Ακόμη, παρέχονται πληροφορίες όπως το είδος και ο αριθμός των ανιχνευτών που θα χρησιμοποιηθούν, το κατώφλι ενέργειας (κάτω από το οποίο το σωματίδιο ή φωτόνιο παύει να παρακολουθείται) και η ενεργειακή διαμέριση. Τέλος, στο αρχείο αυτό δίνονται οι ονομασίες των δύο άλλων αρχείων εισόδου, το αρχείο γεωμετρίας και το αρχείο υλικών.

3.3.1.1.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές του κώδικα *PENELOPE*

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ο κώδικας καταγράφει διάφορες πληροφορίες μέχρι τελικά να καταλήξει στην επίλυση του προβλήματος που του δόθηκε. Για το σκοπό αυτό, ο χρήστης πρέπει να οριοθετήσει την περιοχή την οποία θα παρακολουθεί ο κώδικας και αυτό επιτυγχάνεται με τους εικονικούς ανιχνευτές. Ένας εικονικός ανιχνευτής είναι μία σειρά εντολών που περιλαμβάνονται μέσα στο κυρίως πρόγραμμα και ορίζουν τα τμήματα της γεωμετρίας στα οποία παρακολουθούνται και καταγράφονται οι ζητούμενες τιμές. Στο πρόγραμμα PENMAIN υπάρχουν διαθέσιμοι τρεις τύποι εικονικών ανιχνευτών· ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης, ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας και ο ανιχνευτής δόσης:

- Ανιχνευτής αλληλεπίδρασης- Impact detector: Ο ανιχνευτής αυτός ορίζεται από το χρήστη στο γενικό αρχείο εισόδου τύπου .in και αποτελείται από ένα ή περισσότερα σώματα που έχουν οριστεί στο αρχείο εισόδου γεωμετρίας τύπου .geo. Σε αυτόν καταγράφεται η ενέργεια που έχει το σωματίδιο ή φωτόνιο τη στιγμή της εισόδου το

σε αυτόν. Ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης λαμβάνεται σε ένα ειδικό αρχείο εξόδου το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή φωτονίων που εισήλθαν στο συγκεκριμένο ανιχνευτή.

- Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας- Energy deposition detector: Ο ανιχνευτής αυτός ορίζεται αντίστοιχα με τον προηγούμενο θεωρείται και πάλι ένα σώμα ή ένα σύνολο σωμάτων της προς μελέτη γεωμετρίας. Σε αυτόν καταγράφεται η ενέργεια της ακτινοβολίας που αποτίθεται σε αυτόν. Στο τέλος της προσομοίωσης έχει δημιουργηθεί ένα ξεχωριστό αρχείο εξόδου, στο οποίο δίνεται το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε μέσα στο συγκεκριμένο ανιχνευτή.
- Ανιχνευτής δόσης- Dose enclosure: Ο ανιχνευτής αυτός ορίζεται από το χρήστη στο γενικό αρχείο εισόδου τύπου .in, όμως αντίθετα από τους προηγούμενους δύο δεν αποτελείται από σώματα που έχουν οριστεί στο αρχείο εισόδου γεωμετρίας, αλλά θεωρείται ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα. Σε αυτόν καταγράφεται η συνολική δόση που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων ή φωτονίων με την ύλη εντός του πλέγματος. Μετά το πέρας της προσομοίωσης λαμβάνεται σε ένα ειδικό αρχείο εξόδου η κατανομή δόσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή.

3.3.1.1.5 Αρχεία εξόδου δεδομένων του κώδικα PENELOPE

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης τα αποτελέσματά της λαμβάνονται από το χρήστη από τα αρχεία εξόδου. Το πλήθος και το είδος τους ποικίλει ανάλογα με τα μεγέθη που έχει επιλέξει να παρακολουθήσει ο χρήστης στο κυρίως πρόγραμμα αλλά και στο αρχείο εισόδου τύπου .in. Όπως έχει προαναφερθεί, θα περιγραφούν μόνο τα αρχεία εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ΔΕ με τη χρήση του κώδικα PENMAIN· τα αρχεία pm_spc_enddet_#.dat και penmain.dat . Εκτενής περιγραφή όλων των πιθανών αρχείων εξόδου μπορεί να αναζητηθεί στη [ΔΕ Αθανασίου Ν., 2006].

- Το αρχείο εξόδου penmain.dat περιέχει αρχικά τις πληροφορίες των βασικών παραμέτρων της προσομοίωσης. Ενδεικτικά καταγράφονται η ημερομηνία και ώρα της προσομοίωσης, ο τίτλος της, η περιγραφή της πηγής ακτινοβολίας δίνοντας τον τύπο, την ενέργεια και τη θέση της, η ονομασία των αρχείων εισόδου γεωμετρίας (τύπου .geo) και υλικών (τύπου .mat), οι διαστάσεις των ενεργειακών καναλιών

(bins) όπως έχουν οριστεί από το χρήστη, τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης, αποτιθέμενης ενέργειας και δόσης εφόσον υπάρχουν, η ονομασία των αρχείων στα οποία με ένα χρονικό βήμα δίνονται οι τιμές των μεγεθών που ζητούνται (dump) καθώς και το χρονικό αυτό βήμα. Έπειτα, εμφανίζονται οι τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με το ίδιο χρονικό βήμα όπως και στα αρχεία dump. Στα αποτελέσματα δίνονται, ακόμη, πληροφορίες όπως η χρονική διάρκεια και η ταχύτητα της προσομοίωσης, ο συνολικός αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που προσομοιώθηκαν, ο αριθμός των σωματιδίων που διέφυγαν της γεωμετρίας, οπισθοσκεδάστηκαν και απορροφήθηκαν, οι πιθανότητες εκπομπής, οπισθοσκέδασης και απορρόφησης σωματιδίων και φωτονίων, η μέση τιμή της ενέργειας που εναποτίθεται σε κάθε σώμα της κατασκευής, οι μέσες τιμές ενέργειας που καταγράφονται από τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης και εναποτιθέμενης ενέργειας, καθώς και οι τιμές των αριθμών που επιλέχθηκαν από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

- Το αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat* περιέχει τις πληροφορίες που αφορούν την ενεργειακή κατανομή των σωματιδίων ή φωτονίων που αποθέτουν την ενέργειά τους, ολόκληρη ή μέρος της, εντός των ορίων που έχουν οριστεί ως ο εικονικός ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας. Μπορούν να δημιουργηθούν έως 5 τέτοια αρχεία, έναν για κάθε ανιχνευτή (#:1-5).

3.3.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo

Στην παράγραφο που ακολουθεί θα περιγραφεί η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΕ προκειμένου να προσομοιωθεί η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ . Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE και ο κώδικας χρήστη PENMAIN. Συγκεκριμένα αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που καταγράφονται στο αρχείο εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*. Τα αποτελέσματα του αρχείου αυτού είναι χωρισμένα σε τρεις στήλες με την πρώτη στήλη να αναφέρεται στην ενέργεια των σωματιδίων ή φωτονίων (σε eV) που καταγράφονται από τον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που

χρησιμοποιήθηκε. Η ενέργεια δίνεται χωρισμένη σε ενεργειακά κανάλια, τα οποία ορίζονται από το χρήστη μετά από διαίρεση της συνολικής ενεργειακής περιοχής της προσομοίωσης. Στη δεύτερη στήλη, δίνεται η πιθανότητα $p(E)$ ένα σωματίδιο ή φωτόνιο να εναποθέσει ενέργεια στο συγκεκριμένο ενεργειακό κανάλι (σε $1/(eV \cdot \text{particle})$), ενώ στην τρίτη το μέγιστο πιθανό σφάλμα της πιθανότητας σε επίπεδο 3σ. Για τον υπολογισμό του μ χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της δεύτερης στήλης του αρχείου εξόδου *pm_spc_enddet_#.dat*. Η πιθανότητα φωτόνια να αποθέσουν όλη την ενέργειά τους στο υλικό που χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής, αντιστοιχεί στην *απόδοση φωτοκορυφής* $eff(E)$ για την υπόψη ενέργεια φωτονίων και μπορεί να εκτιμηθεί από την πιθανότητα που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο ενεργειακό παράθυρο $p(E)$, μέσω της σχέσης:

$$eff(E) = p(E) \cdot bin_width \quad (\text{σχέση 3.3})$$

όπου, ως *bin_width* ορίζεται το εύρος του ενεργειακού παραθύρου, το οποίο πρέπει να επιλέγεται με προσοχή, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Στην περίπτωση που προσομοιώνονται N φωτόνια, το γινόμενο του μεγέθους $eff(E) \cdot N$ αντιστοιχεί στο πλήθος φωτονίων που αποθέτουν όλη την ενέργειά τους στον ανιχνευτή, δηλαδή αντιστοιχεί στο μέγεθος *Net_Area* (επιφάνεια φωτοκορυφής) του φάσματος. Το μέγεθος $eff(E)$ αντιστοιχεί στο ρυθμό καταμετρούμενων από τον ανιχνευτή φωτονίων I_i (area/time σε cps), το οποίο προσδιορίζεται πειραματικά⁷.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, προσομοιώνοντας τη διέλευση των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας μέσα πάχος x_i του απορροφητή, με πολύ απλό υπολογισμό προκύπτουν ζεύγη σημείων (x_i, I_i) – αντίστοιχα των πειραματικών. Απεικονίζοντας εν συνεχεία σε ημιλογαριθμικό σχήμα τα σημεία (x_i, I_i) και εκτιμώντας την αντίστοιχη ευθεία αναδρομής, υπολογίζεται η κλίση της ευθείας αναδρομής, η οποία είναι η ζητούμενη εκτίμηση του συντελεστή μ , για το υλικό του απορροφητή και τη συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων. Η αβεβαιότητα του μ ταυτίζεται με την αβεβαιότητα της κλίσης της ευθείας αναδρομής.

⁷ υπενθυμίζεται η σχέση: $eff = area / (\text{time} \cdot \text{yield} \cdot \text{activity})$ όπου τα μεγέθη *yield* και *activity* είναι σταθερά κατά τη διάρκεια ενός πειράματος.

3.3.2.1 Επιλογή του εύρους του ενεργειακού παραθύρου

Αν και η διαδικασία προσδιορισμού του μεγέθους I_i από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σχετικά απλή, θα πρέπει ωστόσο να επιλέγεται προσεκτικά το εύρος του ενεργειακού παραθύρου bin_width το οποίο χρησιμοποιείται για την καταγραφή των φωτονίων που θα αξιοποιηθούν. Προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα πειραματικά, θα πρέπει το πλήθος των φωτονίων που καταγράφονται σε ένα ενεργειακό παράθυρο να αντιστοιχεί στο πλήθος των φωτονίων τα οποία καταγράφονται κάτω από την φωτοκορυφή του αντίστοιχου φάσματος. Κατά τη λήψη ενός φάσματος, κάτω από τη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης, καταγράφονται όχι μόνο τα φωτόνια τα οποία αποθέτουν όλη την ενέργειά τους στον ανιχνευτή, αλλά και ορισμένα φωτόνια τα οποία αποθέτουν ελαφρώς μειωμένο ποσό ενέργειας. (π.χ. λόγω προηγούμενης σκέδασης με μικρή απώλεια ενέργειας), φαινόμενο το οποίο είναι εντονότερο για χαμηλές ενέργειες φωτονίων. Το ποια φωτόνια τελικά καταγράφονται κάτω από τη φωτοκορυφή εξαρτάται από τη διακριτική ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης. Για το λόγο αυτό, και προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα τα φωτόνια τα οποία καταγράφονται κατά την προσομοίωση μέσα σε ένα ενεργειακό παράθυρο με εύρος ($photopeak_bin_width$) ίσο με το ενεργειακό εύρος της φωτοκορυφής πλήρους απόθεσης. Κατά συνέπεια, αν για την καταγραφή χρησιμοποιούνται ενεργειακές διαμερίσεις εύρους bin_width , τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν συνολικά n ενεργειακές διαμερίσεις, όπου n υπολογίζεται από τη σχέση [ΔΕ Βασιλοπούλου Θ., 2008]⁸:

$$n = \frac{1.5 \cdot FWHM}{bin_width} \quad (\text{σχέση } 3.4)$$

όπου bin_width το πλάτος μίας ενεργειακής διαμέρισης που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση σε eV και FWHM η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή σε eV.

⁸ Καθώς στην φωτοκορυφή καταγράφονται φωτόνια που αποθέτουν πλήρως την ενέργειά τους καθώς και ορισμένα φωτόνια που αποθέτουν ελαφρώς μειωμένη ενέργεια, το ενδιαφέρον εστιάζεται μόνο στο αριστερό ήμισυ της φωτοκορυφής, που έχει πλάτος $\sim 1.5 \cdot FWHM$.

3.3.2.2 Τροποποίηση του κυρίως προγράμματος *PENMAIN* για προσομοίωση πηγής όγκου

Το κυρίως πρόγραμμα *PENMAIN* του κώδικα *PENELOPE* έχει δυνατότητα προσομοίωσης μόνο σημειακών πηγών, και συνεπώς απαιτείται τροποποίηση του προγράμματος για την προσομοίωση πηγής όγκου [ΔΕ Αθανασίου Ν., 2006]. Πιο συγκεκριμένα, για την προσομοίωση σημειακής πηγής ο χρήστης εισάγει (αρχείο τύπου .in) τις καρτεσιανές συντεταγμένες της θέσης της πηγής και από το σημείο αυτό ξεκινά κάθε φορά η προσομοίωση μίας ιστορίας. Στην περίπτωση πηγής όγκου, το σημείο εκκίνησης της ιστορίας ενός φωτονίου είναι τυχαία επιλεγμένο μέσα στην πηγή. Για το λόγο γίνεται σχετική τροποποίηση στον κώδικα, ώστε κάθε φορά να επιλέγεται τυχαίο σημείο μέσα στην υπό προσομοίωση γεωμετρία. Η επιλογή του σημείου γίνεται με χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών, μια για κάθε άξονα του συστήματος συντεταγμένων (x , y , z). Το σημείο αυτό πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων της γεωμετρίας που μελετάται και έτσι η γεννήτρια επιλέγει ένα τυχαίο αριθμό από το 0 έως το 1 ο οποίος πολλαπλασιάζεται με τη διάσταση της πηγής στον αντίστοιχο άξονα της γεωμετρίας. Στη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ ο τυχαίος αριθμός που αφορά στον άξονα z πολλαπλασιάζεται με το ύψος της πηγής, ενώ οι αριθμοί που αφορούν στους άξονες x και y πολλαπλασιάζονται με την ακτίνα R του κυλινδρικού δοχείου. Εν συνεχεία ακολουθεί έλεγχος για το κατά πόσον το τυχαία επιλεγμένο σημείο βρίσκεται εντός του όγκου της πηγής. Σε περίπτωση που δεν βρίσκεται, το σημείο απορρίπτεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο με τον πρωτότυπο (για την περίπτωση σημειακών πηγών), όσο και με τον τροποποιημένο (για την περίπτωση πηγών όγκου) κώδικα *PENMAIN* στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι για την ακρίβεια της προσομοίωσης έχει μεγάλη σημασία η ακρίβεια των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γεωμετρίας που προσομοιώνεται – εν προκειμένω της πειραματικής διάταξης και του ανιχνευτή.

3.3.2.3 Προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή LEGe

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης είναι σχετικά εύκολο να προσδιορισθούν, με εξαίρεση αυτά του ανιχνευτή, ο οποίος βρίσκεται μέσα στον κρυστάτη. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που θα πρέπει να είναι γνωστά είναι :

- το πάχος κρυστάλλου του ανιχνευτή
- η διάμετρος κρυστάλλου του ανιχνευτή
- οι διαστάσεις της εσωτερικής κυλινδρικής οπής, εφόσον διαθέτει⁹
- το εύρος της νεκρής ζώνης του ανιχνευτή (dead layer)

Σε ότι αφορά τις εξωτερικές διαστάσεις του ανιχνευτή (πάχος, διάμετρος) χρησιμοποιήθηκαν εκείνες που παρέχονται στο πιστοποιητικό του ανιχνευτή που διατίθεται από τον κατασκευαστή. Όσον αφορά στο εύρος της νεκρής ζώνης, δεν διατίθενται σχετικές πληροφορίες και μόνο εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν με βάση πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός της νεκρής ζώνης με εφαρμογή μίας επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία έχει αναπτυχθεί και δοκιμασθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [ΔΕ Βασιλοπούλου, 2008]. Η επαναληπτική διαδικασία στηρίζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, αρχικά χρησιμοποιούνται οι “καλύτερες” διαθέσιμες εκτιμήσεις για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή. Εν συνεχεία, μετά τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης, τροποποιούνται ορισμένα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και η προσομοίωση επαναλαμβάνεται με στόχο την καλύτερη σύγκλιση. Συγκεκριμένα, στην προκειμένη περίπτωση:

- i. Ως τιμές εκκίνησης για τις προσομοιώσεις ελήφθησαν τα στοιχεία για το dead layer που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία Canberra για τον ανιχνευτή BEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- ii. Ακολούθησε προσομοίωση και προσδιορισμός της απόδοσης του ανιχνευτή LEGe για την ενέργεια 88.06keV.

⁹ Ο ανιχνευτής LEGe που χρησιμοποιήθηκε είναι επίπεδος ανιχνευτής και δεν διαθέτει εσωτερική οπή

- iii. Η πειραματική τιμή της απόδοσης του ανιχνευτή LEGe για ενέργεια φωτονίων 88.06keV έχει την τιμή 0.091241, και με βάση αυτή έγινε σύγκριση της πειραματικής τιμής και της τιμής προσομοίωσης.
- iv. Τροποποιήθηκε το πάχος του dead layer, ακολούθησε νέα προσομοίωση, νέος υπολογισμός της απόδοσης και νέα σύγκριση με την αντίστοιχη πειραματική τιμή.
- v. Τα βήματα iv και v επαναλήφθηκαν μέχρι που η πειραματική τιμή και η τιμή προσομοίωσης να συγκλίνουν σε βαθμό που κρίθηκε επαρκής.

<i>Διαστάσεις front dead layer (cm)</i>	<i>Διαστάσεις side dead layer (cm)</i>	<i>Πειραματική απόδοση (SPUNAL)</i>	<i>Απόδοση προσομοίωσης</i>	<i>Απόκλιση αποδόσεων</i>
0.005	0.042	0.091241	0.0937	2.62%
0.010	0.042	0.091241	0.0911	-0.15%
0.011	0.042	0.091241	0.0912	-0.09%
0.0108	0.042	0.091241	0.0913	0.02%
0.012	0.042	0.091241	0.0906	-0.66%
0.015	0.042	0.091241	0.0892	-2.34%

Πίνακας 3. 3

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό των διαστάσεων dead layers

Τα αποτελέσματα των διαδοχικών προσομοιώσεων παρατίθενται στον παραπάνω Πίνακα 3.3. Τελικά, η τιμή για το dead layer εκτιμήθηκε σε front dead layer=0.0108cm και side dead layer=0.042cm.

3.4 Προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό του μ με την αρχική γεωμετρία δέσμης

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ με στόχο τη διερεύνηση του κατά πόσον η διαδικασία προσομοίωσης που έχει περιγραφεί προηγουμένως, μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συντελεστή μ , με ικανοποιητική ακρίβεια και σε εύλογο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα:

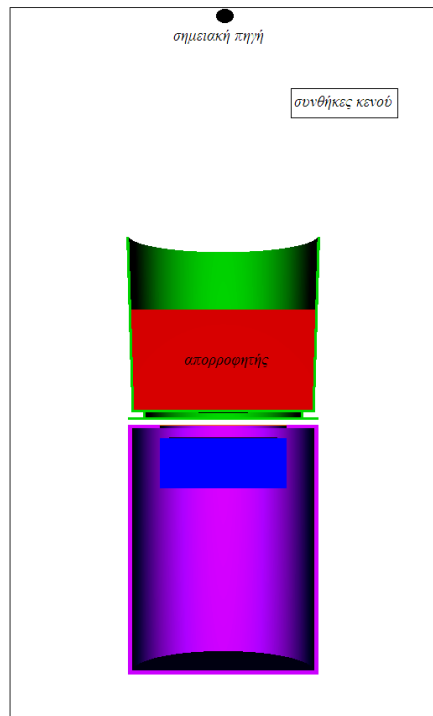
- Διερευνήθηκε η επίδραση που έχει η λεπτομέρεια με την οποία περιγράφεται κατά την προσομοίωση η πειραματική διάταξη. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά.
- Έγινε προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με χρήση σημειακής πηγή και πηγής όγκου Am-241, για απορροφητή νερό. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά και τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές.
- Έγινε προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με χρήση σημειακής πηγής και πηγής όγκου για SiO₂. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές.

Ο συντελεστής μ προσδιορίστηκε για όλες τις ενέργειες που αναφέρονται στον Πίνακα 3.1, δηλαδή 32.19keV, 46.54keV, 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV, και για πάχη απορροφητή 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, και 40mm για κάθε ενέργεια. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 1000 ενεργειακές διαμερίσεις, ενώ από τη σχέση (3.4) υπολογίστηκε για κάθε ενέργεια ο απαραίτητος αριθμός καναλιών που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό του μεγέθους *cps*. Η αβεβαιότητα αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε επίπεδο 1σ ήταν σε κάθε περίπτωση μικρότερη από 1%.

3.4.1 Μελέτη της επίδρασης του επιπέδου λεπτομέρειας στην περιγραφή της πειραματικής διάταξης κατά την προσομοίωση

Κατά την περιγραφή της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης ενδεχομένως γίνονται απλοποιήσεις, χάριν ευκολίας, οι οποίες όμως ενδεχομένως εισάγουν συστηματικό σφάλμα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ, αναφορικά με την επίδραση της πληρότητας της περιγραφής της γεωμετρίας στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτό έγινε σε διάφορα βήματα, από την απλούστερη στην οποίαν είχαν παραληφθεί διάφορα υλικά τα οποία αρχικά είχαν κριθεί ότι δεν θα είχαν μεγάλη επίδραση στην προσομοίωση, έως την πληρέστερη περιγραφή όπου περιλαμβάνεται και η θωράκιση της διάταξης. Η όλη διερεύνηση έγινε με απορροφητή H₂O και για την πειραματική διάταξη του Σχήματος 3.5.

Στο πρώτο βήμα προσομοιώθηκε η πειραματική διάταξη με αρκετές απλουστεύσεις. Συγκεκριμένα, στο αρχείο γεωμετρίας (.geo) περιγράφηκε μόνον το δοχείο που περιέχει τον απορροφητή χωρίς το κάλυμμα του και δεν περιελήφθη το δοχείο πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένη η πηγή. Επιπλέον, οπουδήποτε δεν ορίστηκε κάποιο υλικό (π.χ. απορροφητής, ανιχνευτής κλπ) θεωρήθηκε κενό (Σχήμα 3.7). Το αρχείο υλικών (.mat) περιείχε πέντε υλικά: αλουμίνιο, βηρύλλιο, γερμάνιο, πλεξιγκλάς και νερό.



Σχήμα 3. 7

1^η προσέγγιση γεωμετρίας: προσομοίωση με τον ανιχνευτή LEGe, τον απορροφητή και τη σημειακή πηγή χωρίς το δοχείο στήριξης και τα καλύμματα, χωρίς θωράκιση– συνθήκες κενού.

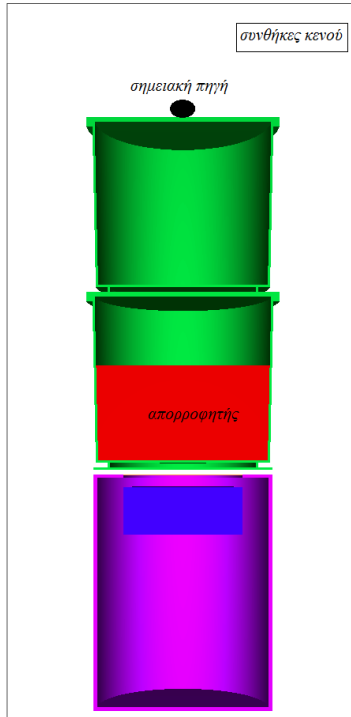
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Πείραμα</i>	<i>Προσομοίωση: 1η προσέγγιση</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	0.3045	0.2908	-4.7%
46.54	0.2110	0.2019	-4.5%
59.54	0.2011	0.1893	-6.2%
121.78	0.1668	0.1507	-10.7%
186.25	0.1510	0.1365	-10.6%

Πίνακας 3. 4

Αποτελέσματα προσομοίωσης με την 1^η προσέγγιση της γεωμετρίας

Οι τιμές του μ που προέκυψαν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τις αντίστοιχες πειραματικές, κυρίως για τις υψηλότερες ενέργειες 121.78keV και 186.25keV. Η απόκλιση αυτή αυτό θα μπορούσε – ενδεχομένως – να αποδοθεί στο γεγονός ότι κατά την προσομοίωση της απλοποιημένης γεωμετρίας δεν λαμβάνονται υπόψη ελαστικές σκεδάσεις στα υλικά που έχουν εξαιρεθεί από τη γεωμετρία (π.χ. αέρας). Τέτοιου είδους σκεδαζόμενα φωτόνια μπορεί τελικά να φτάσουν στον ανιχνευτή και να καταγραφούν στη φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης. Εύλογα, θεωρήθηκε πως η πρώτη αυτή γεωμετρία του Σχήματος 3.7 δεν προσομοιώνει ικανοποιητικά την πειραματική διάταξη και στη συνέχεια δοκιμάστηκαν νέες προσεγγίσεις της γεωμετρίας, σε μία προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις.

Στο δεύτερο βήμα, προστέθηκε στη γεωμετρία και το δοχείο, επάνω στο καπάκι του οποίου τοποθετείται η εκάστοτε σημειακή πηγή, καθώς και τα καλύμματα και των δύο δοχείων, (Σχήμα 3.8). Και πάλι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες κενού, ενώ το αρχείο υλικών παρέμεινε ως είχε.



Σχήμα 3. 8

2^η προσέγγιση γεωμετρίας: προσομοίωση με τον ανιχνευτή LEGe, τον απορροφητή και τη σημειακή πηγή με το δοχείο στήριξης και τα καλύμματα, χωρίς θωράκιση – συνθήκες κενού.

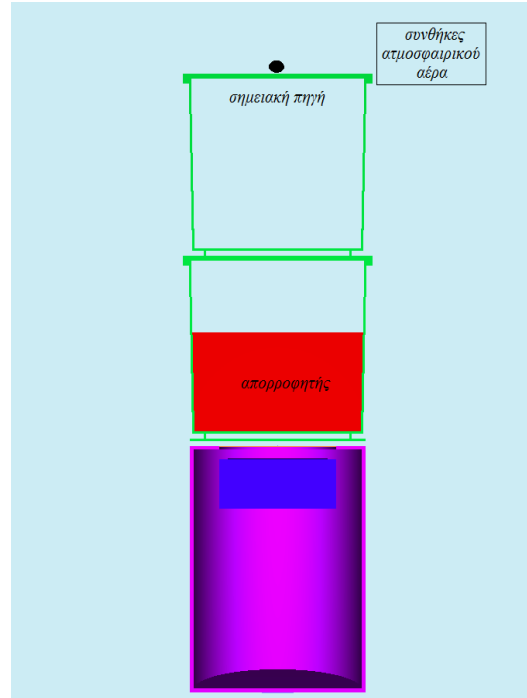
	Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1})		
Ενέργεια (keV)	Πείραμα	Προσομοίωση: 2η προσέγγιση	Απόκλιση
32.19	0.3045	0.2883	-5.6%
46.54	0.2110	0.2063	-2.3%
59.54	0.2011	0.1864	-7.9%
121.78	0.1668	0.1724	3.2%
186.25	0.1510	0.1308	-15.4%

Πίνακας 3. 5

Αποτελέσματα προσομοίωσης με την 2^η προσέγγιση της γεωμετρίας

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.5 διαπιστώνεται ότι αν και υπήρξαν ορισμένες διαφοροποιήσεις, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει ουσιαστική βελτίωση. Έτσι, στη

συνέχεια ακολούθησε το τρίτο βήμα, όπου προστέθηκε και ο αέρας, (Σχήμα 3.9). Αυτό έγινε με προσθήκη στο αρχείο υλικών του υλικού: *αέρας ξηρός, στο επίπεδο της θάλασσας*.



Σχήμα 3. 9

3^η προσέγγιση γεωμετρίας: προσομοίωση με τον ανιχνευτή LEGe, τον απορροφητή και τη σημειακή πηγή με το δοχείο στήριξης και τα καλύμματα, χωρίς θωράκιση – συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα.

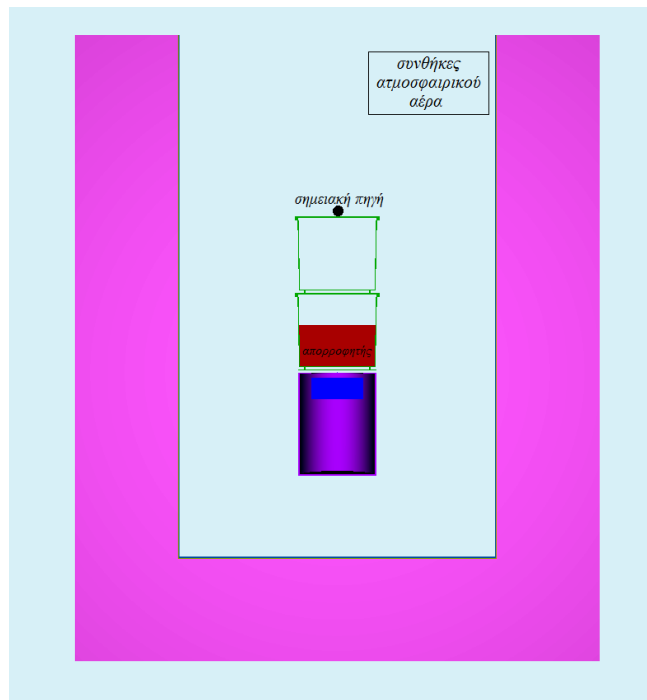
	Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ (cm^{-1})		
Ενέργεια (keV)	Πείραμα	Προσομοίωση: 3^η προσέγγιση	Απόκλιση
32.19	0.3045	0.2947	-3.3%
46.54	0.2110	0.2072	-1.8%
59.54	0.2011	0.1858	-8.2%
121.78	0.1668	0.1529	-9.1%
186.25	0.1510	0.1343	-12.4%

Πίνακας 3. 6

Αποτελέσματα προσομοίωσης με την 3^η προσέγγιση της γεωμετρίας

Και πάλι, στα αποτελέσματα δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική βελτίωση σε σχέση με την προηγούμενη προσέγγιση.

Στο τέταρτο βήμα χρησιμοποιήθηκε η πληρέστερη γεωμετρία, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10 και η οποία περιλαμβάνει και τη θωράκιση του ανιχνευτή LEGe ανοιχτή από την επάνω πλευρά. Η θωράκιση αποτελείται από τρία υλικά, εσωτερικά από χαλκό (Cu) 0.1cm, ενδιάμεσα από κάδμιο (Cd) 0.1cm και εξωτερικά από ατσάλι (Fe) 10cm, τα οποία προστέθηκαν αντίστοιχα και στο αρχείο υλικών.



Σχήμα 3. 10

4^η προσέγγιση γεωμετρίας - πλήρης γεωμετρία: προσομοίωση με τον ανιχνευτή LEGe, τον απορροφητή και τη σημειακή πηγή με το δοχείο στήριξης και τα καλύμματα, με θωράκιση – συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα.

	Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ (cm^{-1})		
Ενέργεια (keV)	Πείραμα	Προσομοίωση: 4η προσέγγιση	Απόκλιση
32.19	0.3045	0.2948	-3.3%
46.54	0.2110	0.2029	-4.0%
59.54	0.2011	0.1869	-7.6%
121.78	0.1668	0.1557	-7.1%
186.25	0.1510	0.1355	-11.4%

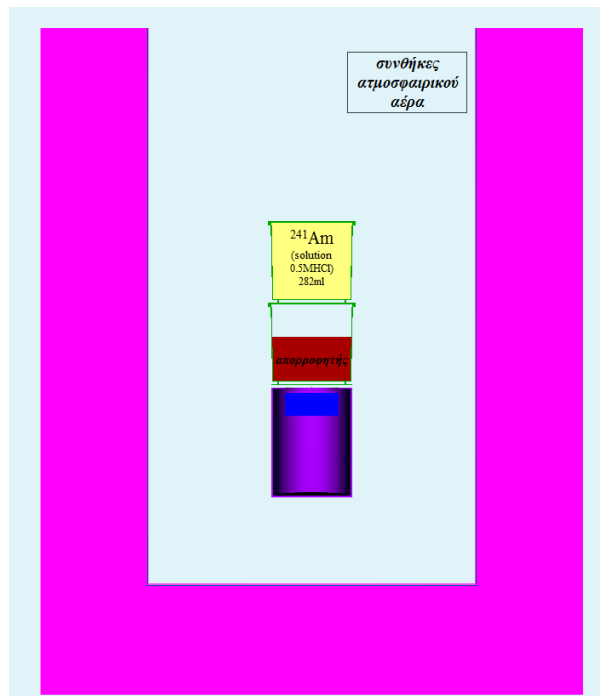
Πίνακας 3. 7

Αποτελέσματα προσομοίωσης με την 4^η προσέγγιση της γεωμετρίας – πλήρης γεωμετρία

Και στην περίπτωση της πληρέστερης γεωμετρίας παρατηρούνται αποκλίσεις των τιμών του μ που προσδιορίζονται από το πείραμα και την προσομοίωση, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις είναι στατιστικά σημαντικές, όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Αυτό δείχνει ότι η προσομοίωση, όπως τουλάχιστον πραγματοποιήθηκε, δεν περιγράφει πλήρως την πειραματική διαδικασία. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται σε αδυναμίες κατά την περιγραφή της πειραματικής διάταξης και ειδικότερα του ανιχνευτή. Παρόλα αυτά κρίνεται ότι η προσομοίωση μπορεί να βοηθήσει στην αναζήτηση νέας γεωμετρίας για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή μ . Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] θα χρησιμοποιείται η πληρέστερη δυνατή περιγραφή της εκάστοτε γεωμετρίας (αέρας, θωράκιση κλπ).

3.4.2 Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με σημειακή πηγή και πηγή όγκου για απορροφητή νερό

Κατά τις προσομοιώσεις με απορροφητή νερό για τις γεωμετρίες με χρήση σημειακής πηγής και πηγής όγκου, χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρίες που παρατίθενται στα Σχήματα 3.10 και 3.11 αντίστοιχα.



Σχήμα 3. 11

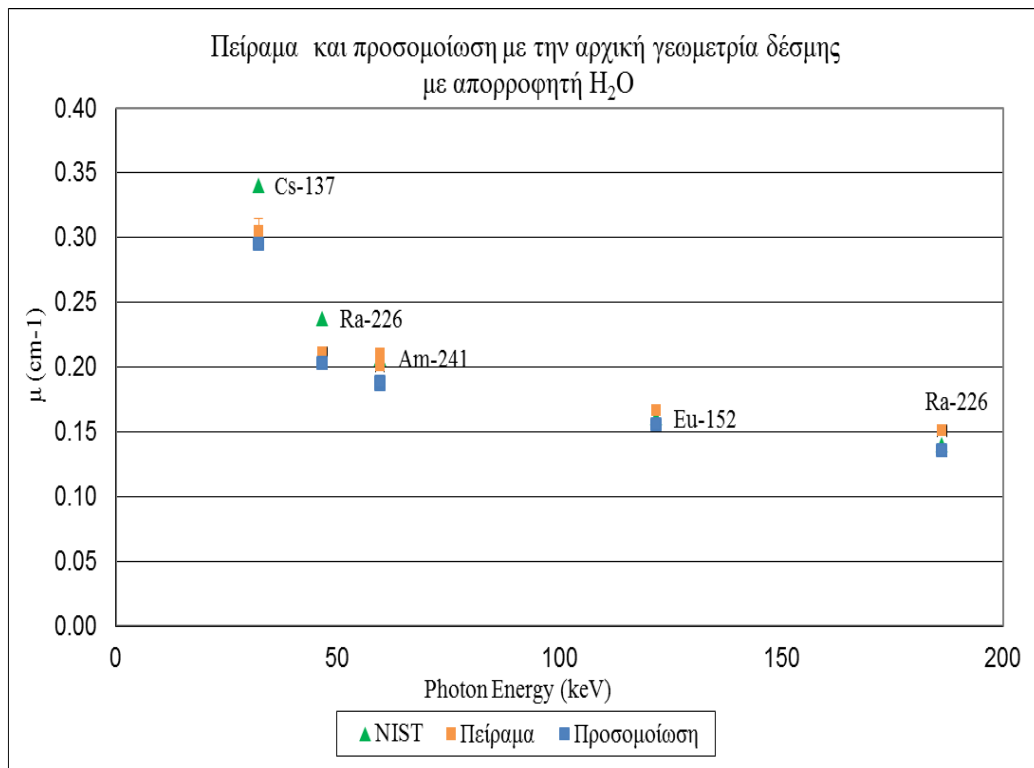
Πλήρης γεωμετρία για προσομοίωση κυλινδρικής πηγής με απορροφητή H_2O σε συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον Πίνακα 3.8 και στο Σχήμα 3.12. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται επιπλέον και οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές (NIST).

Ενέργεια (keV)	Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm ⁻¹)			
	Πείραμα \pm Αβεβαιότητα (1 σ)	Προσομοίωση \pm Αβεβαιότητα (1 σ)	Απόκλιση	U-Test
32.19	0.3045 \pm 3.35%	0.2948 \pm 0.09%	-3.3%	0.95
46.54	0.2110 \pm 2.11%	0.2029 \pm 0.11%	-4.0%	1.82
59.54 (point)	0.2011 \pm 0.60%	0.1869 \pm 0.06%	-7.6%	11.72
59.54 (volume)	0.2102 \pm 0.51%	0.1886 \pm 0.14%	-11.5%	19.56
121.78	0.1668 \pm 0.37%	0.1557 \pm 0.08%	-7.1%	17.63
186.25	0.1510 \pm 1.25%	0.1355 \pm 0.08%	-11.4%	8.20

Πίνακας 3. 8

Σύγκριση τιμών προσομοίωσης – πειράματος για την πλήρη γεωμετρία δέσμης και απορροφητή H₂O



Σχήμα 3. 12

Σύγκριση τιμών του μ που προέκυψαν από το πείραμα και την προσομοίωση, με τις θεωρητικές τιμές (NIST)

Προκειμένου να γίνει σύγκριση των πειραματικών τιμών και των τιμών που προκύπτουν από την προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος U-Test. Το U-Test έχει όμοια λογική με το στατιστικό test που περιγράφηκε νωρίτερα, ελέγχοντας εάν οι δύο υπολογιζόμενες τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους, όταν είναι γνωστές οι αβεβαιότητες που τις συνοδεύουν. Η μεταβλητή ελέγχου που ορίζεται από το U-Test και η οποία συγκρίνεται με τις δεδομένες τιμές είναι δίνεται από τη σχέση:

$$U = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{se(x_1)^2 + se(x_2)^2}} \quad (\text{σχέση 3.5})$$

όπου :

x_1 η πρώτη συγκρινόμενη τιμή,

x_2 η δεύτερη συγκρινόμενη τιμή,

$se(x_1)$ τυπικό σφάλμα της τιμής x_1 ,

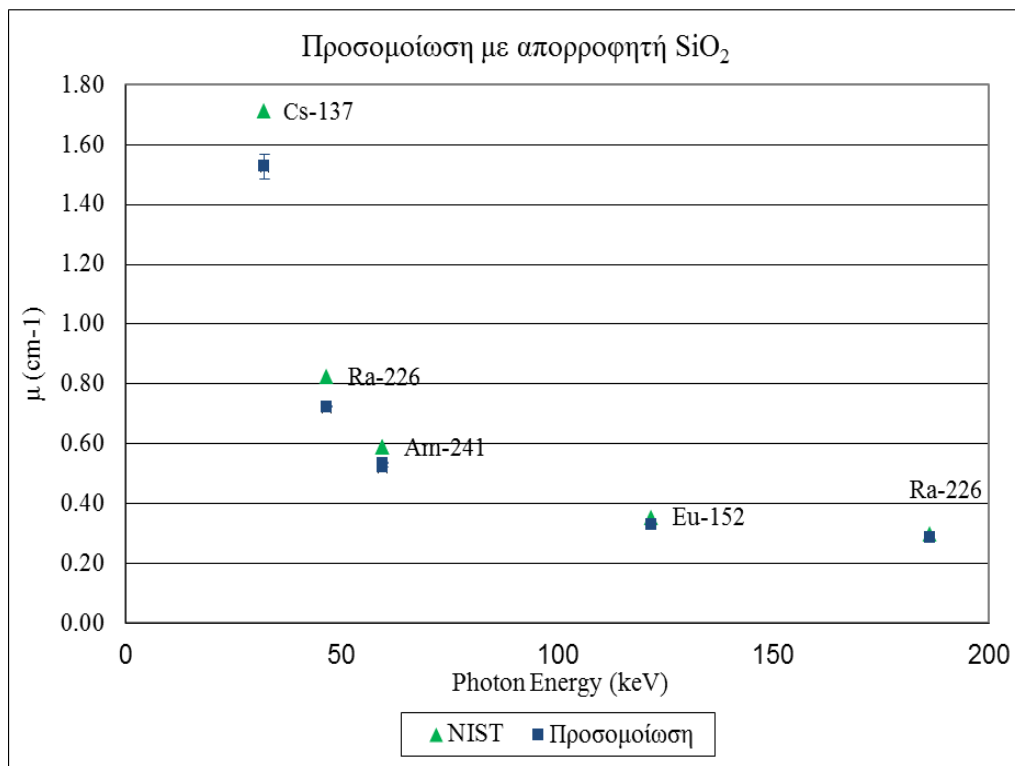
$se(x_2)$ τυπικό σφάλμα της τιμής x_2 .

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.8 παρατηρείται ότι η προσομοίωση δίνει συστηματικά μικρότερη τιμή για το συντελεστή μ από ότι το πείραμα, με τις αποκλίσεις να κυμαίνονται μεταξύ του 3.3% - 11.5%. Με βάση τα αποτελέσματα του U-Test οι αποκλίσεις αυτές για τις ενέργειες 32.19keV και 46.54keV δεν είναι στατιστικά σημαντικές ($U < 1.96$). Για τις ενέργειες 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV το U-Test υποδεικνύει ότι οι διαφορές στον υπολογισμό του μ είναι στατιστικά σημαντικές ($U > 2.57$). Ωστόσο, εφόσον η περιγραφή της γεωμετρίας είναι η πληρέστερη δυνατή, θεωρείται ότι προσομοίωση προσεγγίζει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του πειράματος.

3.4.3 Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με σημειακή πηγή και πηγή όγκου για απορροφητή SiO_2

Καθώς το H_2O ως απορροφητής παρουσιάζει χαμηλή εξασθένιση φωτονίων λόγω της μικρής του πυκνότητας, κρίθηκε σκόπιμο να προσομοιωθεί η όλη πειραματική

διαδικασία και με ένα δεύτερο υλικό, αρκετά μεγαλύτερης πυκνότητας για να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητά της διαδικασίας για μεγαλύτερο εύρος πυκνοτήτων υλικών. Για το σκοπό αυτό επελέγη ως απορροφητής το SiO_2 πυκνότητας 2.32 g/cm^3 . Με το υλικό αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για όλες τις ενέργειες και για τις γεωμετρίες με χρήση σημειακής πηγής και πηγής όγκου στην περίπτωση Am-241. Η μοναδική τροποποίηση που έπρεπε να γίνει στην περίπτωση αυτή αφορούσε στο αρχείο υλικών, όπου έγινε αντικατάσταση του H_2O με το SiO_2 , ενώ τα υπόλοιπα υλικά παρέμειναν ίδια. Στο Σχήμα 3.13, καθώς και στον πίνακα 3.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές του μ όπως υπολογίστηκαν από το NIST για το SiO_2 , καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο 1σ . Επισημαίνεται ότι και στην περίπτωση αυτή η διάρκεια προσομοίωσης επελέγη έτσι ώστε η αβεβαιότητα λόγω προσομοίωσης να μην υπερβαίνει το 1%.



Σχήμα 3. 13

Σύγκριση τιμών του μ που προέκυψαν από την προσομοίωση, με τις θεωρητικές τιμές (NIST) για απορροφητή SiO_2

<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ - SiO_2</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>NIST</i>	<i>Προσομοίωση \pm Αβεβαιότητα (1σ)</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	1.7133	1.5266 \pm 2.71%	-12.2%
46.54	0.8257	0.7231 \pm 0.22%	-14.2%
59.54 (<i>point</i>)	0.5886	0.5222 \pm 0.13%	-12.7%
59.54 (<i>volume</i>)	0.5886	0.5357 \pm 0.14%	-9.9%
121.78	0.3550	0.3312 \pm 0.20%	-7.2%
186.25	0.2990	0.2877 \pm 0.28%	-3.9%

Πίνακας 3. 9

Αποτελέσματα του συντελεστή μ που προέκυψαν από την προσομοίωση για απορροφητές SiO_2 και H_2O και οι αντίστοιχες αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.9 προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών της προσομοίωσης και των αντίστοιχων θεωρητικών. Είναι επιπλέον εμφανές πως στις χαμηλότερες ενέργειες υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των θεωρητικών τιμών, κάτι που παρατηρείται και στο Σχήμα 3.12 για απορροφητή H_2O . Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη ενδεχομένως δεν είναι η πλέον κατάλληλη για τον υπολογισμό του μ στην περιοχή των ενεργειών που εξετάζεται στην παρούσα ΔΕ, ιδιαίτερα για τις χαμηλότερες ενέργειες. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστεί η προσπάθεια που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ μέσα από προσομοιώσεις, να ευρεθεί νέα γεωμετρία δέσμης, με την οποία θα υπολογίζεται ακριβέστερα ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ .

3.5 Αναζήτηση νέων γεωμετριών δέσμης για ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή μ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν με στόχο την εύρεση γεωμετρίας δέσμης, η οποία θα οδηγεί σε ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή μ από τις ήδη χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες. Τελικός αντικειμενικός σκοπός είναι η γεωμετρία αυτή η οποία θα προκύψει από την προσομοίωση να χρησιμοποιηθεί σε

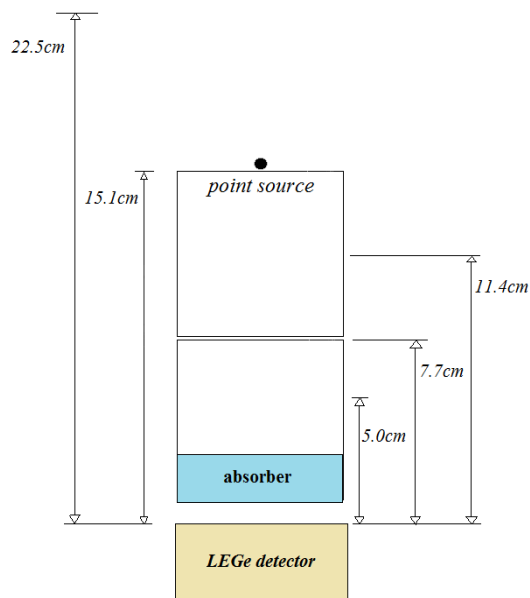
κατάλληλη πειραματική διάταξη προσδιορισμού του συντελεστή μ για υλικά άγνωστης σύστασης. Συγκεκριμένα έγιναν οι παρακάτω δοκιμές:

- Τοποθέτηση της πηγής σε μικρότερη και μεγαλύτερη απόσταση από τον ανιχνευτή.
- Χρήση κατευθυντών δέσμης προκειμένου οι δέσμη φωτονίων που διέρχεται από το υλικό και ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή, να πλησιάζει περισσότερο στην παράλληλη δέσμη.

Η αρχική διερεύνηση έγινε με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo. Η προσέγγιση αυτή δίνει τη δυνατότητα να μελετηθεί η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάθε γεωμετρίας με σχετική ευκολία. Εξυπακούεται ότι τελικός στόχος είναι η συγκρότηση πειραματικής διάταξης.

3.5.1 Προσομοιώσεις για γεωμετρία σημειακής πηγής τοποθετημένη σε διάφορες αποστάσεις από τον ανιχνευτή

Η πρώτη σκέψη ήταν η τοποθέτηση της πηγής σε διαφορετικό ύψος από τον ανιχνευτή, θεωρώντας ότι αυτή η αλλαγή της απόστασης θα έχει επίδραση στο ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που καταγράφεται υπό την φωτοκορυφή πλήρους απόθεσης, και συνεπώς στον προσδιορισμό του μ . Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, μία απομακρύνοντας και μία πλησιάζοντας την πηγή στον ανιχνευτή στα 22.5cm και 11.4cm αντίστοιχα (Σχήμα 3.14). Στόχος των προσομοιώσεων ήταν να διερευνηθεί καταρχήν πως επιδρά η μείωση ή αύξηση της απόστασης. Όλες οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα παράγραφο για τις δοκιμές, έγιναν μόνον για ενέργειες φωτονίων 46.54keV (Ra-226) και 59.54keV (Am-241), για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου.



Σχήμα 3. 14

Τοποθέτηση σημειακής πηγής σε διαφορετικές αποστάσεις από τον ανιχνευτή

Στον πίνακα 3.10 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις δύο πρώτες δοκιμές επανατοποθέτησης. Σε κάθε περίπτωση, η αβεβαιότητα του μ ήταν μικρότερη από 1%.

Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Πηγή σε απόσταση 22.5cm από τον ανιχνευτή				
Ενέργεια (keV)	NIST	Προσομοίωση	Απόκλιση	Βελτίωση από αρχική γεωμετρία
46.54	0.2378	0.2006	-18.5%	-1.3%
59.54	0.2066	0.1832	-12.8%	-2.2%
Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Πηγή σε απόσταση 11.4cm από τον ανιχνευτή				
Ενέργεια (keV)	NIST	Προσομοίωση	Απόκλιση	Βελτίωση από αρχική γεωμετρία
46.54	0.2378	-	-	-
59.54	0.2066	0.1877	-10.1%	0.5%

Πίνακας 3. 10

Αποτελέσματα του συντελεστή μ για προσομοιώσεις με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 22.5cm και 11.4cm από τον ανιχνευτή

Παρόλο το μικρό πλήθος των αποτελεσμάτων, φαίνεται ότι η απομάκρυνση της πηγής από τον ανιχνευτή έχει αρνητική επίδραση στον προσδιορισμό του μ , κάτι που δεν φαίνεται να συμβαίνει, όταν η πηγή πλησιάζει στον ανιχνευτή¹⁰. Έτσι, συνεχίστηκαν οι δοκιμές προς αυτή την κατεύθυνση, δηλαδή φέρνοντας την πηγή πλησιέστερα προς τον ανιχνευτή,:

- σε απόσταση 7.7cm (τοποθετημένη ακριβώς πάνω στο καπάκι του κυλινδρικού δοχείου του απορροφητή) και,
- σε απόσταση 5.0cm από τον ανιχνευτή.

Στον πίνακα 3.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές του μ που προέκυψαν από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις δύο ενέργειες, και για τις γεωμετρίες με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 7.7cm και 5.0cm από τον ανιχνευτή.

<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Πηγή σε απόσταση 11.4cm από τον ανιχνευτή</i>				
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>NIST</i>	<i>Προσομοίωση</i>	<i>Απόκλιση</i>	<i>Βελτίωση από αρχική γεωμετρία</i>
46.54	0.2378	0.2099	-13.3%	3.9%
59.54	0.2066	0.187	-10.5%	0.1%
<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή</i>				
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>NIST</i>	<i>Προσομοίωση</i>	<i>Απόκλιση</i>	<i>Βελτίωση από αρχική γεωμετρία</i>
46.54	0.2378	0.2096	-13.5%	3.7%
59.54	0.2066	0.1894	-9.1%	1.5%

Πίνακας 3. 11

Αποτελέσματα του συντελεστή μ για προσομοιώσεις με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 7.7cm και 5.0cm από τον ανιχνευτή

¹⁰ Μία παρατήρηση που θα πρέπει να ελεγχθεί στη συνέχεια

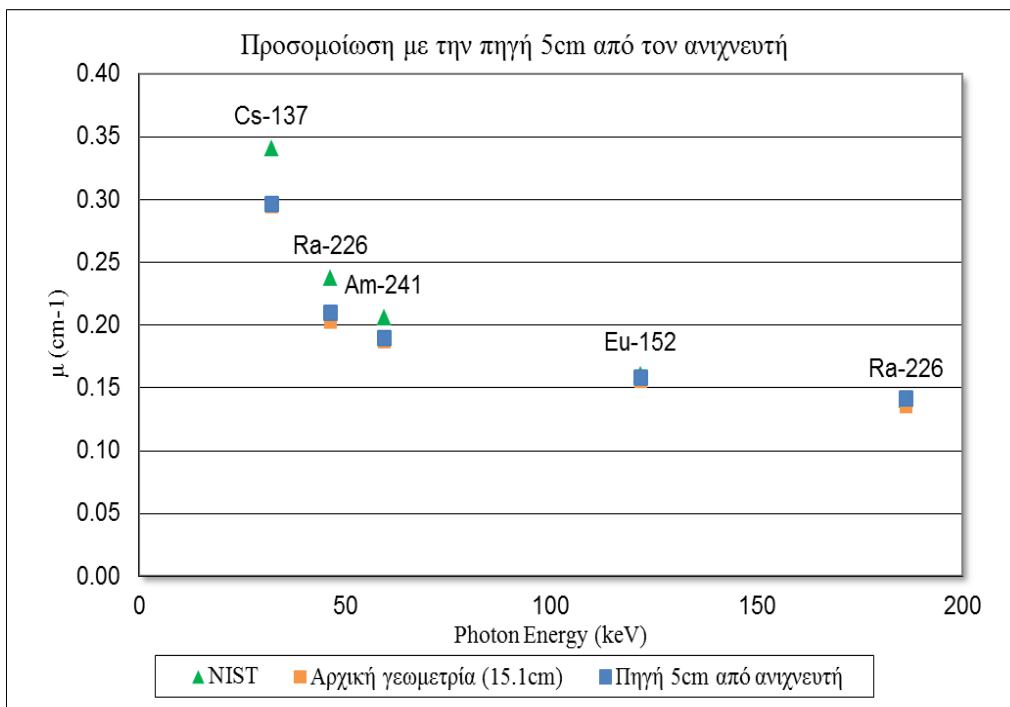
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.11, επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση ότι η ελάττωση της απόστασης οδηγεί σε καλύτερη εκτίμηση του μ , ειδικά για τα χαμηλότερης ενέργειας φωτόνια 46.54keV. Λαμβάνοντας όμως υπόψη το γεγονός ότι υπάρχει βελτίωση και στις δύο ενέργειες, επιλέγεται τελικά η γεωμετρία με την πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.

Έτσι, επιλέγοντας τη συγκεκριμένη γεωμετρία, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για όλες τις ενέργειες του πίνακα 3.1, ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του μ και για τις υπόλοιπες ενέργειες. Επισημαίνεται ότι και πάλι η διάρκεια προσομοίωσης επελέγη έτσι ώστε η αβεβαιότητα λόγω προσομοίωσης να μην υπερβαίνει το 1%. Οι τιμές που προέκυψαν δίνονται στον επόμενο πίνακα 3.12, με τις αποκλίσεις τους από τις θεωρητικές τιμές αλλά και συγκριτικά με την αρχική γεωμετρία δέσμης. Τα αποτελέσματα φαίνονται και εποπτικά στο Σχήμα 3.15 που ακολουθεί.

<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή</i>				
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>NIST</i>	<i>Προσομοίωση</i>	<i>Απόκλιση</i>	<i>Βελτίωση από αρχική γεωμετρία</i>
32.19	0.3407	0.2964	-14.9%	0.6%
46.54	0.2378	0.2096	-13.5%	3.7%
59.54 (<i>point</i>)	0.2066	0.1894	-9.1%	1.5%
59.54 (<i>volume</i>)	0.2066	0.1952	-5.8%	3.7%
121.78	0.1606	0.1585	-1.3%	1.8%
186.25	0.1403	0.1420	1.2%	2.3%

Πίνακας 3. 12

Αποτελέσματα προσομοιώσεων με την πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή



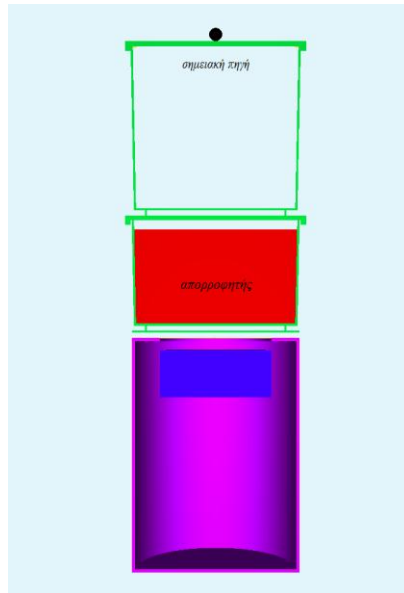
Σχήμα 3. 15

Σύγκριση τιμών του μ που προέκυψαν από την προσομοίωση με την πηγή στα 15.1cm και 5.0cm από τον ανιχνευτή, με τις θεωρητικές τιμές, με απορροφητή H_2O

Παρατηρείται ότι για με τη νέα γεωμετρία, και για όλες τις ενέργειες υπήρξε μείωση της απόκλισης από τις θεωρητικές τιμές, της τάξης του 0.6% - 4.7%. Η νέα γεωμετρία δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα, όμως αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι το κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο που επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση της πηγής σε μικρότερη απόσταση. Συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις με την πηγή στα 5cm για να πετύχουν την ίδια στατιστική με την πηγή στα 15.1cm από τον ανιχνευτή, απαιτούν έως και 9 φορές μικρότερο χρόνο. Η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης ποικίλει ανάλογα με το πάχος του απορροφητή και την ενέργεια φωτονίων που εξετάζεται. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για να επιτευχθεί αβεβαιότητα μικρότερη από 1%, για την ενέργεια των 186.25keV ο χρόνος της προσομοίωσης κυμάνθηκε μεταξύ 15min-1h. Εξυπακούεται ότι παρόμοια βελτίωση αναμένεται να υπάρχει και κατά τον πειραματικό προσδιορισμό του μ με τη νέα γεωμετρία.

3.5.2 Πειράματα για τη νέα γεωμετρία σημειακής πηγής τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή

Έχοντας ολοκληρώσει τις προσομοιώσεις με την πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή, ακολούθησαν τα αντίστοιχα πειράματα με τις πηγές Am-241 και Ra-226 με σκοπό να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα με πρακτική εφαρμογή. Για να επιτευχθεί η αλλαγή στη γεωμετρία, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο κυλινδρικό δοχείο με προηγουμένως, το οποίο μετρήθηκε και κόπηκε σε τέτοιο ύψος ώστε όταν η πηγή τοποθετηθεί επάνω στο καπάκι του δοχείου να βρίσκεται σε απόσταση 5.0cm από τον ανιχνευτή (Σχήμα 3.16). Η υπόλοιπη διάταξη παρέμεινε ως είχε. Για λόγους ασφαλείας για την περίπτωση που προσδιορίζεται ο συντελεστής μ για υγρά δείγματα, το πάχος του απορροφητή που τοποθετείται στο δοχείο δεν υπερβαίνει στην περίπτωση αυτή τα 3.0cm.



Σχήμα 3. 16

Τμήμα γεωμετρίας με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13 που ακολουθεί, μαζί με τις σχετικές συγκρίσεις με τις θεωρητικές τιμές NIST.

<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή</i>				
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>NIST</i>	<i>Πείραμα \pm Αβεβαιότητα (1σ)</i>	<i>Απόκλιση</i>	<i>Στατιστικό test</i>
46.54	0.2378	0.2086 \pm 0.64%	-14.0%	21.87
59.54	0.2066	0.1945 \pm 0.59%	-6.2%	10.54
186.25	0.1433	0.1426 \pm 0.30%	-0.5%	1.64

Πίνακας 3. 13

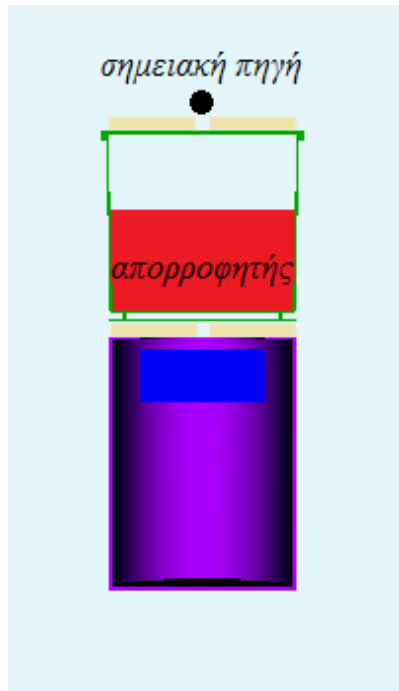
Αποτελέσματα του μ από το πείραμα με την πηγή σε απόσταση 5.0 cm από τον ανιχνευτή και η αντίστοιχη απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι αντίστοιχα με εκείνα των προσομοιώσεων, με την ενέργεια των 186.25keV να παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση, εφόσον και η τιμή που προέκυψε δε διαφέρει στατιστικά από τη θεωρητική τιμή. Για τις ενέργειες 46.54keV και 59.54keV, σύμφωνα με το αποτέλεσμα του στατιστικού test, η διαφορά των πειραματικών τιμών από τις αντίστοιχες θεωρητικές προέκυψε στατιστικά σημαντική. Εκείνο που πρέπει και πάλι να επισημανθεί είναι ότι για τη γεωμετρία αυτή σημειώθηκε σημαντική μείωση του πειραματικού χρόνου. Η παρατήρηση αυτή δίνει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα της νέας γεωμετρίας έναντι της προηγούμενης, και μπορεί να βρει εφαρμογή στις περιπτώσεις εκείνες που δεν απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό του μ , παρέχοντας μια πολύ καλή και γρήγορη εκτίμησή του.

3.5.3 Προσομοιώσεις γεωμετρίας με χρήση κατευθυντών δέσμης (collimators)

Με την αλλαγή στη γεωμετρία που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως σημειώθηκε σημαντική βελτίωση από πλευράς υπολογιστικού χρόνου, αλλά πολύ μικρή σε ότι αφορά τον ακριβέστερο προσδιορισμό του μ . Αποφασίστηκε, συνεπώς, να εξεταστεί και νέα γεωμετρία, η οποία θα χρησιμοποιεί δέσμη που θα πλησιάζει περισσότερο σε παράλληλη δέσμη. Προτάθηκε, η τοποθέτηση δύο κατευθυντών δέσμης (collimators), κατασκευασμένων από φύλλα μολύβδου πάχους 0.6cm, κυλινδρικού σχήματος, με διάμετρο ίση με το δοχείο του απορροφητή και κυκλική οπή στο κέντρο τους. Ο πρώτος κατευθυντής τοποθετείται πάνω από τον ανιχνευτή στην προστατευτική βάση από plexiglass και κάτω από το δοχείο του απορροφητή. Ο δεύτερος τοποθετείται στο καπάκι του δοχείου, και ακριβώς επάνω στην οπή του τοποθετείται κάθε φορά η σημειακή πηγή

(Σχήμα 3.17). Ακολουθεί η περιγραφή των προσομοιώσεων και των πειραμάτων που ακολούθησαν, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών.



Σχήμα 3. 17
Τμήμα γεωμετρίας με χρήση collimators

Προς αναζήτηση της βέλτιστης γεωμετρίας προτάθηκαν τρεις εναλλακτικές γεωμετρίες με παράμετρο τη διάμετρο της οπής των κατευθυντών δέσμης. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με διαμέτρους κατευθυντών 1cm, 0.5cm και 0.3cm. Και πάλι, οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, έγιναν για την ενέργεια των 59.54keV ($Am-241$). Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στον πίνακα 3.14 που ακολουθεί, με τις τιμές του μ για κάθε οπή και την αντίστοιχη απόκλιση από τη θεωρητική τιμή, καθώς και τη βελτίωση που παρουσιάζει κάθε γεωμετρία σε σχέση με την αρχική πλήρη γεωμετρία δέσμης.

<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) :</i> <i>59.54keV</i>				
<i>Διάμετρος οπής (cm)</i>	<i>NIST</i>	<i>Προσομοίωση</i>	<i>Απόκλιση</i>	<i>Βελτίωση από αρχική γεωμετρία</i>
1.0	0.2066	0.1918	-7.7%	2.8%
0.5	0.2066	0.2015	-2.5%	8.0%
0.3	0.2066	0.2034	-1.6%	9.0%

Πίνακας 3. 14

Αποτελέσματα δοκιμών για τη διάμετρο της οπής του κατευθυντή δέσμης

Στην πρώτη περίπτωση (οπή 1cm), η βελτίωση δεν κρίθηκε σημαντική, ενώ αντίθετα στη δεύτερη (οπή 0.5cm), αρκετά ικανοποιητική. Για λόγους πληρότητας πραγματοποιήθηκε και η τρίτη (οπή 0.3cm), η οποία, όμως, απαιτεί μεγάλη χρονική διάρκεια, γεγονός που την καθιστά απαγορευτική, παρότι παρουσίασε κάποια βελτίωση στη σύγκλιση των τιμών του μ . Εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα, ότι η γεωμετρία με κατευθυντές δέσμης και οπή διαμέτρου $d=0.5cm$, δίνει τα καλύτερα μέχρι στιγμής αποτελέσματα – τουλάχιστον για την ενέργεια των 59.54keV. Σε ότι αφορά το χρόνο που απαιτεί για την επίτευξη καλής στατιστικής, αναφέρεται ενδεικτικά ότι απαιτείται μέση διάρκεια $\sim 4h$, χρόνος που αν και είναι περίπου τριπλάσιος από το χρόνο που απαιτείται για την αρχική γεωμετρία ($\sim 1.5h$), εντούτοις κρίνεται ως αποδεκτός χρόνος, ειδικά στην περίπτωση που ενδιαφέρει η βελτίωση της ακρίβειας στον προσδιορισμό του μ .

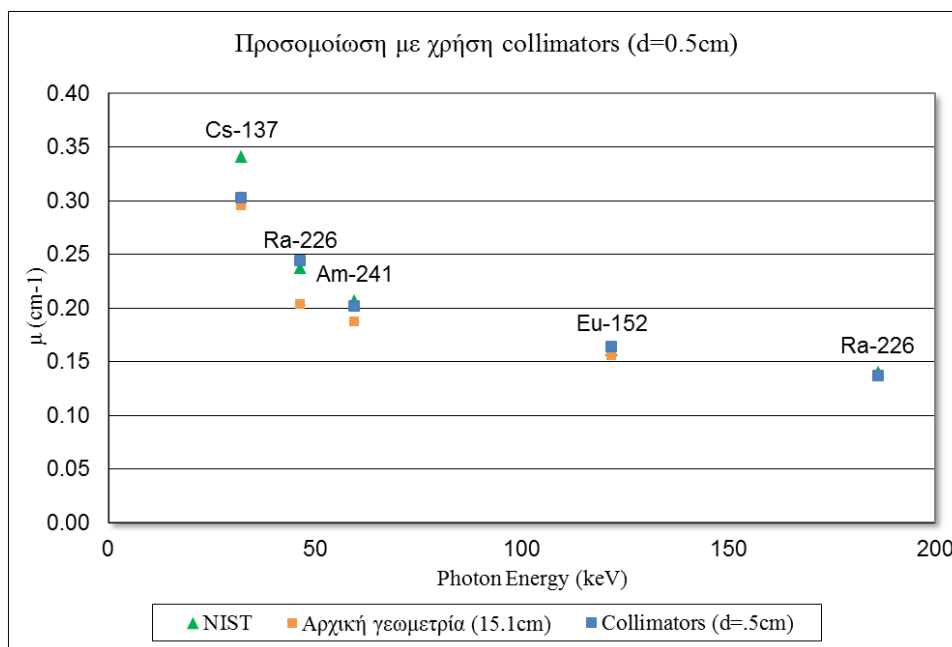
Για τη συγκεκριμένη γεωμετρία (οπή διαμέτρου $d=0.5cm$), η οποία επελέγη καταρχήν ακολούθησε προσομοίωση για όλες τις ενέργειες του πίνακα 3.1. Οι τιμές που προέκυψαν δίνονται στον επόμενο πίνακα 3.15, με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες, αλλά και τις αποκλίσεις τους από τις θεωρητικές τιμές (NIST).

Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Χρήση collimators				
Ενέργεια (keV)	NIST	Προσομοίωση	Απόκλιση	Βελτίωση από αρχική γεωμετρία
32.19	0.3407	0.3025	-12.6%	2.9%
46.54	0.2378	0.2436	2.4%	14.8%
59.54	0.2066	0.2015	-2.5%	8.0%
121.78	0.1606	0.1637	1.9%	1.3%
186.25	0.1403	0.1370	-2.4%	1.1%

Πίνακας 3. 15

Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διάμετρο οπής κατευθυντή δέσμης $d=0.5\text{cm}$ και η αντίστοιχη απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές

Παρατηρείται στα αποτελέσματα αρκετά καλή σύγκλιση των τιμών του μ της προσομοίωσης με τις θεωρητικές τιμές για όλες τις ενέργειες, με εξαίρεση την ενέργεια των 32.19keV, όπου σημειώνεται μεν βελτίωση σε σχέση με τις αρχική γεωμετρία δέσμης, χωρίς ωστόσο να μπορεί ακόμη να θεωρηθεί ικανοποιητική. Ακολουθεί το Σχήμα 3.18, το οποίο δίνει την εικόνα όσων περιγράφηκαν παραπάνω, συγκρίνοντας τις τιμές του μ με την επιλεγθείσα γεωμετρία με κατευθυντές δέσμης και οπή διαμέτρου $d=0.5\text{cm}$, με τις θεωρητικές τιμές του NIST, αλλά και με την αρχική γεωμετρία δέσμης με την πηγή στα 15.1cm από την ανιχνευτή χωρίς κατευθυντές δέσμης.



Σχήμα 3. 18

Σύγκριση τιμών του μ που προέκυψαν από την προσομοίωση με την αρχική γεωμετρία δέσμης και με χρήση κατευθυντών δέσμης ($d=0.5\text{cm}$), με τις θεωρητικές τιμές (NIST), με απορροφητή H_2O

3.5.4 Πειράματα με χρήση κατευθυντή δέσμης οπής διαμέτρου 5mm

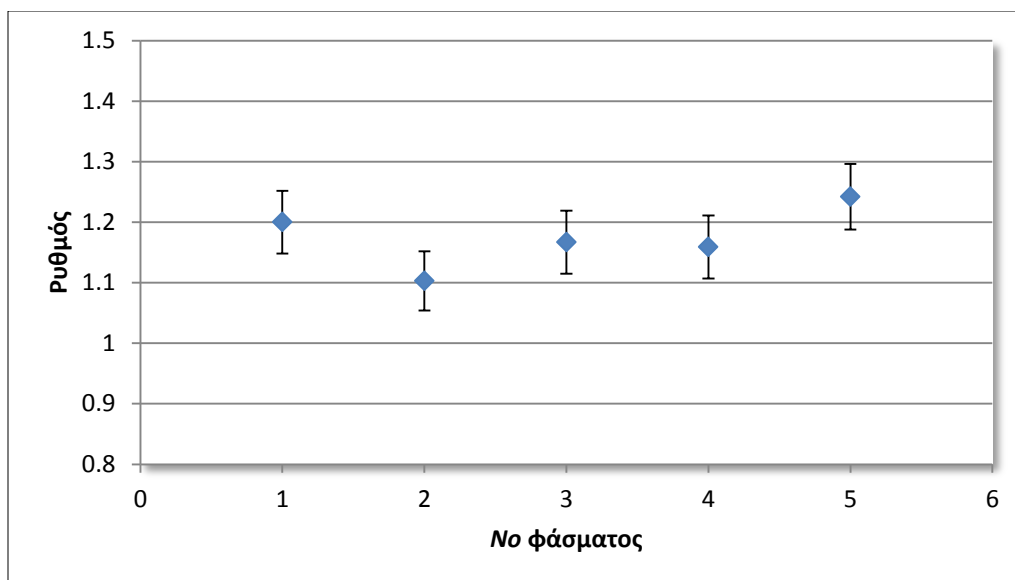
Μετά την καταρχήν υιοθέτηση της γεωμετρίας με κατευθυντή δέσμης οπής 5mm, ακολούθησαν τα σχετικά πειράματα που έγιναν για τις σημειακές πηγές Cs-137¹¹, Ra-226 και Am-241, με σκοπό να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πρακτική εφαρμογή. Καθώς κατά την εκτέλεση των πειραμάτων απαιτείται αφαίρεση του άνω κατευθυντή δέσμης και της πηγής και επανατοποθέτησή τους για το νέο πάχος απορροφητή, εκφράστηκε προβληματισμός για το κατά πόσον, η τοποθέτησή τους γίνεται κατά επαναλήψιμο τρόπο. Για το λόγο αυτό, και προκειμένου να διερευνηθεί η επαναληψιμότητα κατά την τοποθέτηση του άνω κατευθυντή δέσμης και της πηγής, έγινε μία σειρά τεσσάρων πειραμάτων αφαίρεσης και επανατοποθέτησής τους. Επιπλέον, έγινε και πείραμα, με τον κατευθυντή δέσμης να τοποθετείται έκκεντρα κατά 5mm, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση ακραίας τοποθέτησης του κατευθυντή και της πηγής. Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων καταγράφονται στον πίνακα 3.16, καθώς και στο Σχήμα 3.19.

<i>Επανατοποθέτηση collimator στην αρχική θέση</i>				
<i>No φάσματος</i>	<i>Διάρκεια (sec)</i>	<i>Επιφάνεια</i>	<i>Ρυθμός (cps)</i>	<i>Αβεβαιότητα (1σ,%)</i>
1	251.72	302	1.20	0.043
2	250.19	276	1.10	0.042
3	251.05	293	1.17	0.043
4	250.27	290	1.16	0.043
<i>Μετακίνηση πάνω collimator 5mm σε τυχαία διεύθυνση</i>				
<i>No φάσματος</i>	<i>Διάρκεια (sec)</i>	<i>Επιφάνεια</i>	<i>Ρυθμός (cps)</i>	<i>Αβεβαιότητα (1σ,%)</i>
5	251.14	312	1.24	0.045

Πίνακας 3. 16

Αποτελέσματα ελέγχου για ευαισθησία στην επανατοποθέτηση του collimator

¹¹ Στη φάση αυτή επελέγη να χρησιμοποιηθεί πηγής Cs-137 ενεργότητας 10μCi, για επιτάχυνση της πειραματικής διαδικασίας



Σχήμα 3. 19
Αποτελέσματα ελέγχου για ευαισθησία στην επανατοποθέτηση του collimator

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες της μέτρησης σε κάθε περίπτωση, οι τιμές του μεγέθους cps που καταγράφονται σε κάθε περίπτωση δεν διαφέρουν σημαντικά, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι εξασφαλίζεται η επαναληψιμότητα κατά την τοποθέτηση κατευθυντή δέσμης και πηγής.

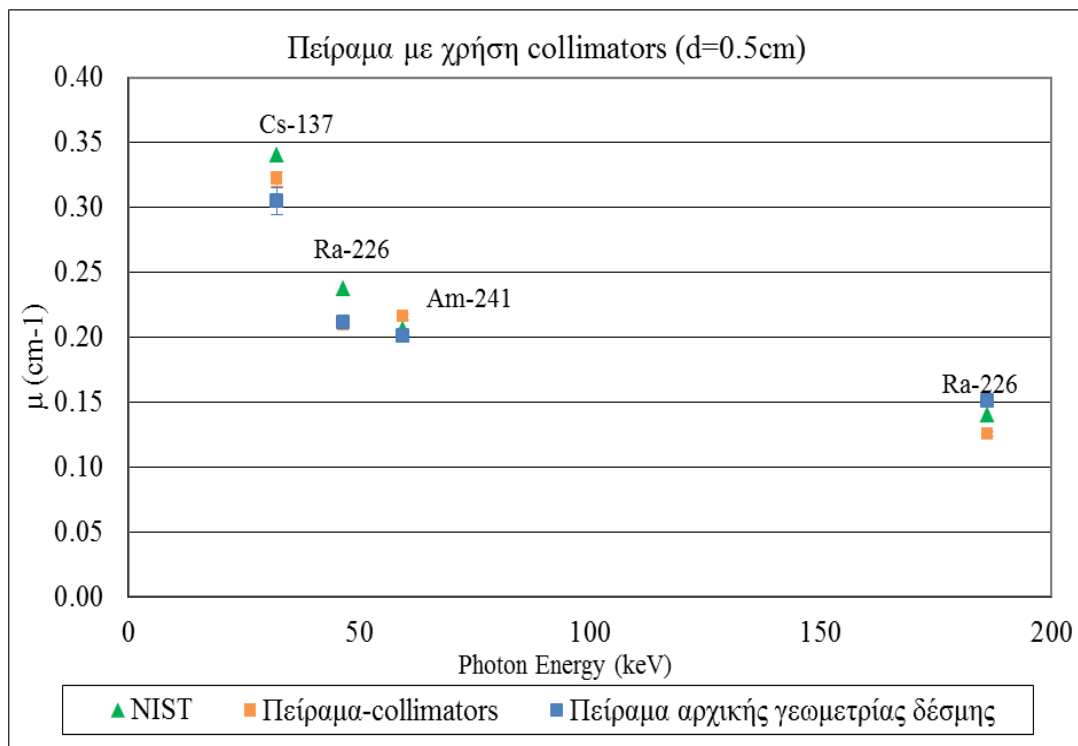
Καθώς με τη χρήση του κατευθυντή δέσμης, ο ρυθμός των καταγραφομένων φωτονίων κάτω από την εκάστοτε φωτοκορυφή είχε ελαττωθεί σημαντικά, διαπιστώθηκε ότι απαιτείτο πολύς χρόνος για την επίτευξη ικανοποιητικής στατιστικής. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων αυτών να χρησιμοποιηθεί ο ανιχνευτής «3», (LEGe βαθμονομημένος στην περιοχή 0-2000keV). Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι το πλήθος των καναλιών μίας φωτοκορυφής είναι μικρό (3-5 κανάλια) με συνέπεια την καλύτερη στατιστική της επιφάνειας φωτοκορυφής. Κατά τη λήψη, ωστόσο, του πρώτου ενεργειακού φάσματος με τον ανιχνευτή «3» παρατηρήθηκε ότι, λόγω των ρυθμίσεων της διάταξης, στο φάσμα καταγράφονται μόνο φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης των 40keV. Έτσι, για την καταγραφή των φωτονίων ενέργειας 46.54keV και 186.25keV (Ra-226) και 59.54keV (Am-241) χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής «3», ενώ για τα φωτόνια ενέργειας 32.19keV (Cs-137) αναγκαστικά χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής «6».

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν με όλες τις πηγές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.17 συνοδευόμενα από τις αβεβαιότητες τους και τις αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές, ενώ ακολουθεί και το αντίστοιχο Σχήμα 3.20.

<i>Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) - Χρήση collimators</i>				
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>NIST</i>	<i>Πείραμα \pm Αβεβαιότητα (1σ)</i>	<i>Απόκλιση</i>	<i>Στατιστικό τεστ</i>
32.19	0.3407	0.3219 \pm 1.76%	-5.8%	19.204
46.54	0.2378	0.2091 \pm 1.50%	-13.7%	9.150
59.54	0.2066	0.2156 \pm 1.15%	4.2%	3.630
186.25	0.1433	0.1256 \pm 1.60%	-14.1%	8.808

Πίνακας 3. 17

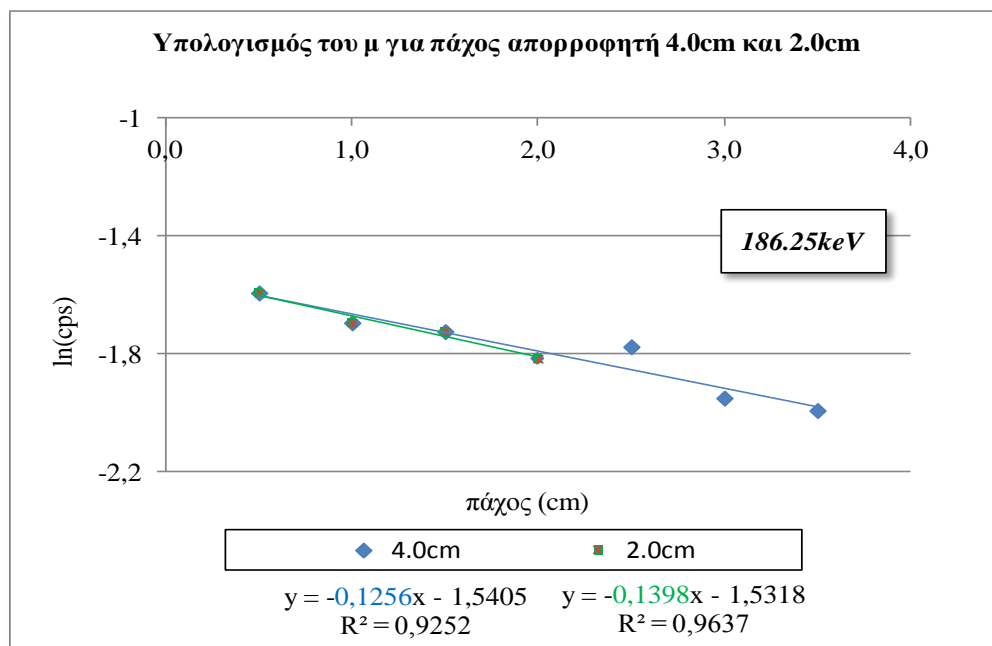
Αποτελέσματα πειραμάτων με κατευθυντές δέσμης ($d=0.5cm$), και η αντίστοιχη απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές



Σχήμα 3. 20

Σύγκριση τιμών του μ που προέκυψαν από το πείραμα με κατευθυντές δέσμης ($d=0.5cm$), με τις θεωρητικές τιμές (NIST)

Εστιάζοντας στις αποκλίσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα παρατηρείται ότι σημειώθηκε σημαντική βελτίωση στη σύγκλιση με τη θεωρητική τιμή για την ενέργεια 32.19keV (Cs-137), η οποία μέχρι στιγμής παρουσίαζε μεγάλη απόκλιση αλλά και σημαντική αβεβαιότητα. Η συγκεκριμένη γεωμετρία φαίνεται να είναι η καλύτερη από όσες δοκιμάστηκαν, δίνοντας την τιμή του μ πλησιέστερα στη θεωρητική τιμή της (NIST). Βελτίωση, επίσης, παρουσίασε η τιμή του μ για την ενέργεια 59.54keV (Am-241), πλησιάζοντας σημαντικά τη θεωρητική της τιμή. Σε ότι αφορά την πηγή Ra-226, τα αποτελέσματα του μ και για τις δύο ενέργειες 46.54keV και 186.25keV, δεν ήταν τα αναμενόμενα ως προς τη σύγκλιση. Από την προσομοίωση που είχε προηγηθεί, αναμενόταν να υπάρξει σημαντική μείωση στην απόκλιση, γεγονός που όχι μόνον δε συνέβη, αλλά αντίθετα η απόκλιση μεγάλωσε. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων – τα οποία υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο κατευθυντής δέσμης είναι πολύ μεγαλύτερης διάρκειας – παρατηρήθηκε ότι, για την ενέργεια των 186.25keV, με την αύξηση του πάχους του απορροφητή, αυξανόταν και η απόκλιση της υπολογιζόμενης τιμής του από τη θεωρητική. Χαρακτηριστικά παρατίθεται το παρακάτω Σχήμα 3.21, υπολογισμού του μ , για πάχη απορροφητή 4cm και 2cm.



Σχήμα 3. 21

Συγκριτικό σχήμα υπολογισμού του μ , για πάχη απορροφητή 4.0cm και 2.0cm, για ενέργεια 186.25keV

Στην περίπτωση πειραμάτων με πάχος έως 4cm, ο συντελεστής μ εκτιμάται σε 0.1256, δηλαδή παρουσιάζει απόκλιση από τη θεωρητική τιμή 14.1%, ενώ στην περίπτωση πειραμάτων με πάχος έως 2cm, ο συντελεστής μ εκτιμάται σε 0.1398cm^{-1} με απόκλιση 2.5%. Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να προκύψει ασφαλές συμπέρασμα παρά μόνο με επανάληψη των πειραμάτων αυτών, θα πρέπει να επισημανθούν ορισμένες ιδιαιτερότητες οι οποίες παρουσιάζονται για τα φωτόνια ενέργειας 46.54keV και 186.25keV, τα οποία εκπέμπονται από τα ισότοπα φυσικής ραδιενέργειας Pb-210 και Ra-226 αντίστοιχα:

- Και οι δύο φωτοκορυφές ανιχνεύονται στο φυσικό ραδιενεργό υπόστρωμα της ανιχνευτικής διάταξης και δεν είναι σαφές το πώς επηρεάζεται το υπόστρωμα αυτό από την τοποθέτηση απορροφητή με διάφορα πάχη πάνω από τον ανιχνευτή κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ειδικότερα για τα φωτόνια ενέργειας 46.54keV που παρουσιάζουν υψηλή εξασθένηση, καθώς:
 - όσο αυξάνει το πάχος απορροφητή αυξάνει η θωράκιση του φυσικού υποστρώματος,
 - όσο αυξάνει το πάχος απορροφητή απαιτείται η λήψη μεγαλύτερης διάρκειας φάσματος.
- Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ για πραγματικά υλικά (π.χ. χώμα) δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι τα υλικά αυτά περιέχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα και κατά συνέπεια εκπέμπουν και φωτόνια 46.54keV και 186.25keV. Μάλιστα η συνεισφορά του απορροφητή στη διαμόρφωση των αντίστοιχων φωτοκορυφών στο φάσμα, αναμένεται να είναι μεγαλύτερη όσο υψηλότερο είναι το πάχος του απορροφητή.
- Τέλος, δεν πρέπει να αγνοείται η επίδραση της ακτινοβολίας που ενδεχομένως εκπέμπεται από τον κατευθυντή δέσμης, καθώς ως γνωστόν ο μόλυβδος περιέχει ίχνη φυσικών ραδιενεργών ισωτόπων, όπως Pb-210 και Ra-226.

Για τους λόγους αυτούς θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο να χρησιμοποιείται μικρότερο πάχος απορροφητή κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ειδικά στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται κατευθυντής δέσμης, οπότε η διάρκεια των πειραμάτων είναι μεγαλύτερη.

3.6 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε, έγινε διερεύνηση της πειραματικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ . Επιπλέον, έγινε προσπάθεια επέκτασης της μεθοδολογίας αυτής σε χαμηλότερες ενέργειες και βελτίωσης της πειραματικής διάταξης, για τον ακριβέστερο και ταχύτερο προσδιορισμό του μ για υλικά άγνωστης σύστασης. Αφού παρουσιάστηκαν τα πειράματα και οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με την αρχική γεωμετρία δέσμης, εξετάστηκαν νέες γεωμετρίες για ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή μ . Συγκεκριμένα, έγιναν δοκιμές με τοποθέτηση της πηγής σε μεγαλύτερη αλλά και μικρότερες αποστάσεις από τον ανιχνευτή, καθώς και με χρήση κατευθυντών δέσμης με διαφορετικές διαμέτρους οπών, προκειμένου οι δέσμη φωτονίων να πλησιάζει περισσότερο στην παράλληλη δέσμη. Η όλη διερεύνηση έχει καταρχήν με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo, η οποία ακολούθησε με εφαρμογή πειραματικών τεχνικών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, επιλέχθηκαν τελικά τρεις γεωμετρίες, στις οποίες έγινε η εκτίμηση του συντελεστή μ . Συγκεκριμένα, για τις ενέργειες που εξετάστηκαν προτείνονται κάθε φορά μία από τις γεωμετρίες:

- Γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή – πρόκειται για την ήδη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία
- Γεωμετρία δέσμης με την σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή. Πρόκειται για γεωμετρία που εισάγεται στα πλαίσια της ΔΕ
- Γεωμετρία με χρήση σημειακής πηγής και κατευθυντών δέσμης πριν και μετά το δοχείο του απορροφητή με διάμετρο οπής $d=0.5\text{cm}$. Πρόκειται για γεωμετρία που εισάγεται στα πλαίσια της ΔΕ

Ένα γενικό συμπέρασμα το οποίο προκύπτει παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή των παραπάνω γεωμετριών, είναι ότι η εκτίμηση του συντελεστή μ παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στις χαμηλότερες ενέργειες, κυρίως 32.19keV και 46.54keV, και 59.54keV, ενώ στις ενέργειες 121.78keV και 186.25keV η απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές είναι εν γένει μικρότερη. Ακολουθεί σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, καθώς και η προτεινόμενη γεωμετρία για κάθε ενέργεια.

- **32.19keV (Cs-137):** Εκείνο που, αρχικά, πρέπει να σημειωθεί για την υπόψη ενέργεια είναι ότι δεν είχε μελετηθεί στο παρελθόν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, αλλά εξετάστηκε για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, και συνεπώς δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή σε αυτήν. Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε με την αρχική γεωμετρία δέσμης έδωσε σημαντική απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές (11.9%). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο εναλλακτικές γεωμετρίες υπέδειξαν ακριβέστερο τον προσδιορισμό του μ μέσω της γεωμετρίας με χρήση κατευθυντών δέσμης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε και πειραματικά, δίνοντας εκτίμηση του μ με απόκλιση 5.8% από τη θεωρητική τιμή. Η τιμή αυτή, είναι σαφώς βελτιωμένη σε σχέση με την αρχική, οπότε η γεωμετρία με χρήση κατευθυντών δέσμης είναι αυτή που προτείνεται, όταν εξετάζονται φωτόνια ενέργειας κοντά στα 32.19keV. Κατά τον πειραματικό προσδιορισμό του μ θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο ανιχνευτής «3» και για λόγους ταχύτητας η πηγή Cs-137 ονομαστικής ραδιενέργειας 10 μ Ci.
- **46.54keV (Ra-226):** Για τη συγκεκριμένη ενέργεια παρουσιάστηκαν δυσκολίες στην εκτίμηση του συντελεστή μ . Το πείραμα με την αρχική γεωμετρία δέσμης έδωσε την εκτίμηση του μ με μία απόκλιση από τη θεωρητική τιμή της περίπου 12.7%. Αντίστοιχη απόκλιση (~14%) προέκυψε, τόσο από την προσομοίωση όσο και από το πείραμα, και για τη γεωμετρία με τη σημειακή πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή. Δοκιμάστηκε, εν συνεχεία, και η γεωμετρία με χρήση collimators, η προσομοίωση της οποίας οδήγησε σε υπολογισμό του μ με πολύ μικρή απόκλιση (2.4%). Ωστόσο, το αποτέλεσμα αυτό δεν επιβεβαιώθηκε πειραματικά, εφόσον ο συντελεστής παρουσίασε απόκλιση 13.7% από τη θεωρητική τιμή, γεγονός που, όπως προαναφέρεται, πιθανώς να οφείλεται στο φυσικό υπόστρωμα, το οποίο δε λαμβάνεται υπόψη κατά την προσομοίωση. Για την υπόψη ενέργεια, η πειραματική εκτίμηση του συντελεστή μ δεν κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική για καμία από τις γεωμετρίες, οπότε προτείνεται η χρήση της γεωμετρίας που δίνει ταχύτερα αποτελέσματα, δηλαδή με τη σημειακή πηγή σε απόσταση 5cm.
- **59.54keV (Am-241):** Πρόκειται για την ενέργεια που είχε εξεταστεί κατά κύριο λόγο στη [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998], και με βάση αυτή είχε προταθεί η γεωμετρία για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ . Για το λόγο αυτό, από το πρώτο πείραμα με την αρχική γεωμετρία δέσμης επετεύχθη ικανοποιητική σύγκλιση του συντελεστή μ

με τη θεωρητική τιμή του. Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια, ως ενέργεια αναφοράς σε όλες τις δοκιμές. Οι εκτιμήσεις του μ από τα πειράματα στις δύο άλλες γεωμετρίες δεν έδωσαν μεγάλες αποκλίσεις από τη θεωρητική τιμή, ωστόσο η αρχική γεωμετρία δέσμης παρέμεινε η ακριβέστερη για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ στη συγκεκριμένη ενέργεια. Εκείνο που παρατηρήθηκε είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις, η πηγή όγκου Am-241 έδινε ακριβέστερα αποτελέσματα από τη σημειακή πηγή. Συνεπώς, προτείνεται για τη συγκεκριμένη ενέργεια η χρήση της αρχικής γεωμετρίας δέσμης με πηγή όγκου.

- **121.78keV (Eu-152):** Το πρώτο πειραματικό αποτέλεσμα του συντελεστή μ για την υπόψιν ενέργεια θεωρήθηκε ικανοποιητικό, αφού παρουσίασε μικρή απόκλιση από τη θεωρητική τιμή (3.7%). Έτσι, στη συνέχεια δεν κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν νέα πειράματα για την ενέργεια αυτή, παρά μόνον προσομοιώσεις για λόγους πληρότητας των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματά τους, και για τις δύο εναλλακτικές γεωμετρίες, παρουσίασαν πολύ καλή σύγκλιση με τις θεωρητικές τιμές, γεγονός που υποδεικνύει ότι πιθανώς να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι τρεις γεωμετρίες για τη συγκεκριμένη ενέργεια. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι μόνον η πρώτη είναι επιβεβαιωμένη πειραματικά.
- **186.25keV (Ra-226):** Για την ενέργεια αυτή και με βάση το πρώτο πειραματικό αποτέλεσμα με την αρχική γεωμετρία δέσμης, η εκτίμηση του μ σημείωσε απόκλιση από τη θεωρητική τιμή της τάξης του 7.1%. Εκτελώντας, αρχικά προσομοίωση και έπειτα πείραμα, με τη γεωμετρία πηγής σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή διαπιστώθηκε ότι επιτυγχάνεται τιμή του μ πολύ κοντά στη θεωρητική, με την απόκλιση να έχει μειωθεί στο 0.5%. Με τη γεωμετρία αυτή, όπως έχει επισημανθεί και νωρίτερα, μειώνεται σημαντικά και ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση του πειράματος, οπότε είναι τελικά η γεωμετρία που προτείνεται για τη συγκεκριμένη ενέργεια. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί και η περίπτωση της γεωμετρίας με χρήση κατευθυντών δέσμης, η οποία παρουσιάζει ιδιαιτερότητες στην υπόψιν ενέργεια, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 3.5.4. Παρόλα αυτά, διαπιστώθηκε πειραματικά ότι μειώνοντας το πάχος του απορροφητή στο μισό, προκύπτει τιμή του μ με απόκλιση 2.5%. Το συμπέρασμα της περίπτωσης αυτής δεν κρίνεται ασφαλές, και για

το λόγο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί παρά μία πρόταση προς μελλοντική διερεύνηση.

Όλα τα προηγούμενα συμπεράσματα προέκυψαν βάσει πειραματικών διαδικασιών και προσομοιώσεων για υλικό απορροφητή H_2O . Έχοντας πραγματοποιήσει ορισμένες δοκιμές και έχοντας κάνει τις απαραίτητες συγκρίσεις με υλικό απορροφητή SiO_2 , τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα έως έναν βαθμό. Ωστόσο, προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση των νέων γεωμετριών και για άλλα υλικά, κυρίως μεγαλύτερης πυκνότητας, όπως το SiO_2 .

Κεφάλαιο 4

Εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πρόβλημα που επιχειρείται να αντιμετωπιστεί στα πλαίσια της ΔΕ είναι η διαφορετική αυτοαπορρόφηση που εμφανίζεται μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, ιδιαίτερα στην περιοχή χαμηλών ενεργειών. Στόχος του κεφαλαίου είναι η εύρεση κατάλληλου συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, ο οποίος να χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης. Αρχικά, για να τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η , επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ολοκληρωτική μέθοδος [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Με τις τιμές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ , ήδη υπολογισμένες από το προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή η μέσω κατάλληλου προγράμματος H/Y. Ο υπολογισμός του συντελεστή η γίνεται χρησιμοποιώντας τις θεωρητικές τιμές NIST των συντελεστών μ , αλλά και τις τιμές των συντελεστών μ που λαμβάνονται από τον κώδικα SPUNAL που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και γίνονται οι απαραίτητες συγκρίσεις. Στη συνέχεια, προτείνεται και εξετάζεται ως προς την ακρίβειά της, μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η , ως ο λόγος των αποδόσεων που προκύπτουν με εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης για το υλικό της πηγής βαθμονόμησης και το υλικό του αναλυόμενου δείγματος. Τέλος στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία μελέτη της ευαισθησίας του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η στις μεταβολές του συντελεστή μ , προκειμένου να υπάρξει μία εκτίμηση της αβεβαιότητας που εισάγεται λόγω του συντελεστή η κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

4.2 Υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης μέσω του προγράμματος *factor*

Ο υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης με την ολοκληρωτική μέθοδο έχει περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.3.4.2.2. Υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για μία μέθοδο η οποία οδηγεί στην εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η από το υλικό της πηγής βαθμονόμησης, στο υλικό του αναλυόμενου δείγματος, λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ των δύο υλικών, σε περιπτώσεις κυλινδρικής γεωμετρίας πηγής χωρίς περιορισμό ύψους και βασίζεται στη σχέση:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_p(O, d) \cdot \frac{2 \cdot d^2}{R^2 \cdot H} \cdot \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x+d)^2} \cdot r \cdot dx \cdot dr$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόδοσης μίας ανιχνευτικής διάταξης. Στη σχέση αυτή, ορίζεται το μέγεθος $J(\mu)$ που περιγράφεται από τη σχέση :

$$J(\mu) = \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x+d)^2} r \cdot dx \cdot dr$$

και εξαρτάται από το υλικό της πηγής, ενώ όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες εξαρτώνται μόνο από καθαρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παραμένουν τα ίδια για το δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης. Έτσι, ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η που λαμβάνει υπόψη τη διαφορά της αυτοαπορρόφησης μεταξύ δείγματος και πηγής βαθμονόμησης μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση :

$$\eta = \frac{J(\mu_s)}{J(\mu_c)}$$

όπου :

μ_s : ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για το υλικό του δείγματος,

μ_c : ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για την πηγή βαθμονόμησης.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η χρησιμοποιείται το πρόγραμμα H/Y **factor** σε γλώσσα FORTRAN [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Το πρόγραμμα αποτελείται από το κυρίως πρόγραμμα (*factor*), δύο υπορουτίνες (*integ1*, *integ2*) και δύο functions (*fun*, *sf*). Στην παρούσα ΔΕ για την εκτίμηση του συντελεστή η , χρησιμοποιήθηκε τροποποιημένη¹² έκδοση του προγράμματος (έκδοση 04/10/12) η οποία παρατίθεται στο Παράρτημα Στ. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος, αρχικά, γίνεται η επικοινωνία με το χρήστη, ο οποίος καλείται να επιλέξει:

- Τον ανιχνευτή, ο οποίος χρησιμοποιείται, με δυνατότητα επιλογής μεταξύ του ανιχνευτή «3» και του ανιχνευτή «4» (ΕΠΤ-ΕΜΠ).
- Τη γεωμετρία πηγής–ανιχνευτή για την οποία ζητείται η εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η . Υπάρχει δυνατότητα επιλογής, είτε της γεωμετρίας «2» (default), είτε περιγραφής άλλης επιθυμητής κυλινδρικής γεωμετρίας.
- Τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_c του υλικού της πηγής βαθμονόμησης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, είτε να επιλέξει το υλικό 4MnCl το οποίο χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή LEGe (default), είτε να εισάγει την επιθυμητή τιμή του συντελεστή μ_c και την αντίστοιχη αβεβαιότητα.
- Τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_s του υλικού για το οποίο ζητείται ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης και και την αντίστοιχη αβεβαιότητα.
- Την ενέργεια φωτονίων για την οποία γίνεται η εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα καλεί τις δύο υπορουτίνες κάθε μία από τις οποίες υπολογίζει την τιμή του ολοκληρώματος $J(\mu_c)$ και $J(\mu_s)$, καθώς και τις αντίστοιχες αβεβαιότητές τους. Ακολούθως, υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή αναγωγής η και η αβεβαιότητά του, και εκτυπώνονται.

¹² Το πρόγραμμα *factor*, μετά την αρχική του σύνταξη, έχει διαδοχικά τροποποιηθεί προκειμένου να περιλαμβάνει και επιπλέον δυνατότητες, κυρίως σε ότι αφορά στην επικοινωνία με το χρήστη, από τους Κ. Καρφόπουλο και Δ. Καράγγελο.

Ο συντελεστής η εκτιμήθηκε για τις εξής συνθήκες:

- Για τον ανιχνευτή LEGe «3».
- Για τη γεωμετρία «2» πηγής-ανιχνευτή που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, στην οποία το δείγμα γεμίζει πλήρως το κυλινδρικό δοχείο όγκου 282ml.
- Για την πηγή βαθμονόμησης QCY12 (4MHC1 πυκνότητας 1.04g/cm^3) του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Οι τιμές του συντελεστή μ_c που εισήχθησαν στο πρόγραμμα για κάθε ενέργεια, ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων NIST και από τον κώδικα SPUNAL με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Για τα υλικά H_2O και SiO_2 . Προκειμένου να μελετηθεί η ευαισθησία του συντελεστή η ως προς τις μεταβολές του συντελεστή μ , χρησιμοποιήθηκαν για κάθε υλικό ένα μεγάλο εύρος τιμών για το συντελεστή μ_s , μέσα στο οποίο εμπίπτουν οι πειραματικές τιμές για το συντελεστή μ_s όπως προσδιορίζονται από όλες τις πειραματικές διατάξεις-τεχνικές που δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της ΔΕ και οι οποίες παρουσιάζονται στο προηγούμενο Κεφάλαιο.
- Για τις ενέργειες φωτονίων για τις οποίες είχε υπολογιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , δηλαδή 32.19keV, 46.54keV, 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV (Πίνακας 3.1).

Πριν γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθεί η δοκιμαστική εκτέλεση του κώδικα, προκειμένου να επαληθευτεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων του και να γίνει η σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του κώδικα SPUNAL, για την πηγή βαθμονόμησης 4MHC1 και για υλικό νερό, για όλες ενέργειες (Πίνακας 4.1):

Κώδικας SPUNAL	
Ενέργεια (keV)	Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η
32.19	- ¹³
46.54	1.167
59.54	1.099
121.78	1.021
186.25	1.020

Πίνακας 4.1

Αποτελέσματα συντελεστή η για την πηγή βαθμονόμησης 4MHCl και για υλικό νερό, από τον κώδικα SPUNAL

Ακολούθως εκτιμήθηκαν οι τιμές του συντελεστή η από το πρόγραμμα factor. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές μ για τα υλικά 4M HCl και νερό, οι οποίοι εκτιμήθηκαν από τις αντίστοιχες συναρτήσεις αναδρομής τις οποίες χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL για τα δύο υλικά:

$$\mu = \exp \left[p1 + p2 \cdot \ln E + p3 \cdot (\ln E)^2 \right] \quad (\text{σχέση 4.1})$$

Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα του προγράμματος factor.

Πρόγραμμα factor			
Ενέργεια (keV)	$\mu_{4MHCl} (cm^{-1})$	$\mu_{H2O} (cm^{-1})$	Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η
32.19	0.5094	0.2993	1.345
46.54	0.3335	0.2394	1.167
59.54	0.2642	0.2104	1.099
121.78	0.1681	0.1573	1.021
186.25	0.1507	0.1408	1.020

Πίνακας 4.2

Αποτελέσματα συντελεστή η για την πηγή βαθμονόμησης 4MHCl και για υλικό νερό, από το πρόγραμμα factor

¹³ Οι συναρτήσεις αναδρομής που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μ για τα υλικά 4M HCl και H₂O έχουν προσδιορισθεί για ενέργεια φωτονίων μεγαλύτερη των 45.54keV. Για το λόγο αυτό ο κώδικας SPUNAL δεν εκτιμά το συντελεστή η για την ενέργεια των 32.19keV.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.1 και 4.2, διαπιστώνεται ότι συμπίπτουν για όλες τις ενέργειες (πλην των 32.19keV, για το λόγο που εξηγήθηκε νωρίτερα), γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του προγράμματος factor.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συντελεστή η μέσω του προγράμματος factor .

4.2.1 Εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η για υλικό νερό

Στην προηγούμενη παράγραφο ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα του προγράμματος factor, με βάση τα δεδομένα για τους συντελεστές μ που είναι ενσωματωμένα στο πρόγραμμα SPUNAL. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος factor για την εκτίμηση του συντελεστή η για υλικό νερό, με βάση τιμές του συντελεστή μ που προέρχονται από τη βιβλιογραφία καθώς και τιμών που εκτιμήθηκαν πειραματικά.

Οι πρώτες δοκιμές του προγράμματος έγιναν με δεδομένα για τους συντελεστές μ_{4MHC1} και μ_{H2O} , τις θεωρητικές τους τιμές τους από τη βάση δεδομένων NIST. Οι τιμές των συντελεστών η που προέκυψαν παρατίθενται στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως συντελεστές αναφοράς, βάσει των οποίων γίνονται όλες οι υπόλοιπες συγκρίσεις.

	NIST		
<i>Energy</i> (keV)	$\mu_{(4MHC1)}$	$\mu_{(H2O)}$	Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η
32.19	0.589	0.3407	1.385
46.54	0.3226	0.2378	1.151
59.54	0.2492	0.2066	1.079
121.78	0.1689	0.1606	1.016
186.25	0.145	0.1403	1.009

Πίνακας 4.3

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό νερό, με βάση τις θεωρητικές τιμές NIST

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για το συντελεστή η που λαμβάνονται δίνοντας ως είσοδο τους συντελεστές μ από το SPUNAL, με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές από το NIST (Πίνακες 4.2 & 4.3) προκύπτει ο Πίνακας 4.4:

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>		
	<i>η (NIST)</i>	<i>η (SPUNAL)</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	1.385	1.346	-3.0%
46.54	1.151	1.167	1.4%
59.54	1.079	1.099	1.9%
121.78	1.016	1.021	0.5%
186.25	1.009	1.020	1.0%

Πίνακας 4.4

Σύγκριση τιμών του συντελεστή η , με δεδομένα από τον κώδικα SPUNAL και τις θεωρητικές τιμές NIST

Παρατηρείται ότι για τις ενέργειες 46.54 keV, 59.54keV, 121.78 keV και 186.25 keV ο κώδικας SPUNAL εκτιμά με πολύ υψηλή ακρίβεια το συντελεστή η , με πολύ μικρή απόκλιση από τη θεωρητική τιμή (0.5%-1.9%), και πάντα με τιμή μεγαλύτερη από αυτή. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή των 32.19keV, η οποία υποεκτιμά το συντελεστή η , παρουσιάζοντας απόκλιση 3%. Υπενθυμίζεται ότι η τιμές των μ_{MHCl} και $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ έχουν εκτιμηθεί για το πρόγραμμα SPUNAL από extrapolation των αντίστοιχων συναρτήσεων αναδρομής που έχουν εκτιμηθεί με πειραματικά σημεία έως την ενέργεια 46.54keV.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγιναν διάφορες εκτιμήσεις για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ σε υλικό νερό, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, επιλέχθηκαν τρεις βασικές γεωμετρίες, με τις οποίες γίνεται η εκτίμηση του συντελεστή μ και κατά συνέπεια του η . Έτσι, πραγματοποιήθηκαν πειράματα και προσομοιώσεις για (α) την αρχική-πλήρη γεωμετρία δέσμης με την πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή, (β) τη γεωμετρία με την πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή, και (γ) τη γεωμετρία με χρήση κατευθυντών δέσμης πριν και μετά το δοχείο του απορροφητή. Οι τιμές του συντελεστή μ που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση, είτε μέσω προσομοίωσης, είτε πειραματικά, εισήχθησαν ως δεδομένα στο πρόγραμμα factor και έγινε σε κάθε περίπτωση εκτίμηση του συντελεστή η . Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Z. Στον Πίνακα 4.5 παρατίθενται

τα σχετικά αποτελέσματα του συντελεστή η και γίνεται η σύγκριση μεταξύ των τιμών που προκύπτουν, χρησιμοποιώντας ως είσοδο στο πρόγραμμα factor συντελεστές μ : (α) του NIST, και (β) τις τιμές που προκύπτουν πειραματικά με την εκάστοτε βέλτιστη για κάθε ενέργεια γεωμετρία, όπως προτάθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο:

- 32.19keV: Γεωμετρία με κατευθυντές δέσμης διαμέτρου οπής $d=0.5\text{cm}$,
- 46.54keV: Γεωμετρία με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.
- 59.54keV: Αρχική γεωμετρία δέσμης με κυλινδρική πηγή,
- 121.78keV: Αρχική γεωμετρία δέσμης, με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή,
- 186.25keV: Γεωμετρία με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>		
	<i>η (NIST)</i>	<i>η (πείραμα)</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	1.385	1.426	2.9%
46.54	1.151	1.212	5.1%
59.54	1.079	1.072	-0.7%
121.78	1.016	1.004	-1.2%
186.25	1.009	1.005	-0.5%

Πίνακας 4.5

Εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης με χρήση πειραματικών δεδομένων

Για ενέργεια φωτονίων 32.19keV παρατηρείται μια απόκλιση 2.9% από τη θεωρητική τιμή, με το πείραμα να υπερεκτιμά το συντελεστή η . Δεδομένου ότι είναι η πρώτη φορά που υπολογίζεται με πειραματικά δεδομένα η τιμή του συντελεστή στην υπόψιν ενέργεια, η προσέγγιση θεωρείται πολύ ικανοποιητική. Στην ενέργεια φωτονίων 46.54keV εντοπίζεται η μεγαλύτερη απόκλιση του συντελεστή η από τη θεωρητική του τιμή

(5.1%), με το πείραμα και πάλι να υπερεκτιμά το συντελεστή. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην εκτίμηση του συντελεστή μ , που όπως ειπώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δεν ήταν ικανοποιητική, καθώς καμία από τις γεωμετρίες που δοκιμάστηκαν δεν οδήγησε σε καλύτερη εκτίμησή του. Σε ότι αφορά τις ενέργειες 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV, παρατηρείται ότι οι πειραματικές γεωμετρίες που προτάθηκαν οδηγούν σε ακριβή εκτίμηση του συντελεστή η , παρουσιάζοντας πολύ μικρή απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές.

4.2.2 Εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η για υλικό SiO_2

Για το υλικό SiO_2 δεν διατίθενται στοιχεία στον κώδικα SPUNAL. Ωστόσο, στο προηγούμενο κεφάλαιο έγιναν εκτιμήσεις για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ , με την αρχική γεωμετρία δέσμης, μέσω προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα αυτά, καθώς και οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές που λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων NIST, εισήχθησαν ως δεδομένα στο πρόγραμμα factor και προέκυψαν οι συντελεστές η , όπως παρατίθενται στον Πίνακα 4.6 που ακολουθεί:

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>		
	<i>η (NIST)</i>	<i>η (προσομοίωση)</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	0.4557	0.4964	8.2%
46.54	0.5540	0.6096	9.1%
59.54	0.6225	0.6621	6.0%
121.78	0.7285	0.7554	3.6%
186.25	0.7584	0.7724	1.8%

Πίνακας 4.6

Σύγκριση τιμών του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό SiO_2 , που προέκυψαν εισάγοντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και τις θεωρητικές τιμές NIST

Παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για υλικό νερό, γεγονός αναμενόμενο, καθώς το για το συγκεκριμένο υλικό δεν έγινε εκτενής διερεύνηση, η οποία και απαιτείται για το μέλλον. Εντοπίζεται

σημαντική απόκλιση, κυρίως, για ενέργεια φωτονίων 46.54keV, αλλά και 32.19keV, ενώ όσο η ενέργεια αυξάνεται, βελτιώνεται και η σύγκλιση με τις θεωρητικές τιμές.

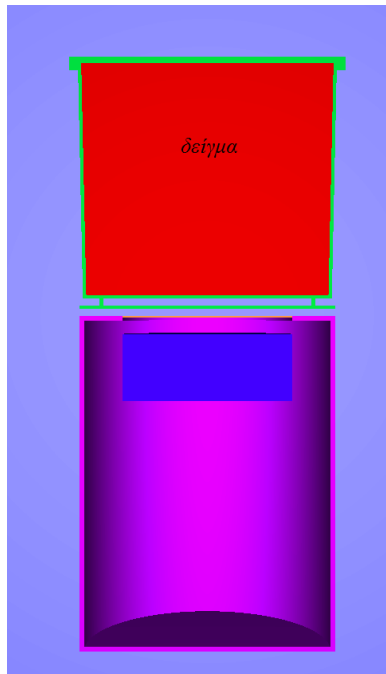
4.3 Εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η ως λόγο της απόδοσης της πηγής βαθμονόμησης προς την απόδοση του αναλυόμενου δείγματος

Καθώς μέσω της προσομοίωσης Monte-Carlo είναι δυνατή η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής για συγκεκριμένη γεωμετρία και υλικό δείγματος, είναι κατά συνέπεια δυνατή και η εκτίμηση ενός συντελεστή διόρθωσης που να λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι υπάρχει διαφορετική αυτοαπορρόφηση μεταξύ των δύο υλικών. Ένας τέτοιος συντελεστής δεν είναι τίποτα άλλο από το λόγο των αποδόσεων που εκτιμώνται για τα δύο υλικά μέσω προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, για την εκτίμηση της απόδοσης για το υλικό του δείγματος, η απόδοση για το υλικό βαθμονόμησης 4M HCl θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή η :

$$\eta = \frac{eff_sim_{\text{δείγμα}}}{eff_sim_{\text{πηγή}}} \quad (4.1)$$

Όπου $eff_sim_{\text{δείγμα}}$ και $eff_sim_{\text{πηγή}}$ οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής που εκτιμώνται από την προσομοίωση για το υλικό του δείγματος και της πηγής αντίστοιχα.

Στα πλαίσια της ΔΕ πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για τον ανιχνευτή LEGe, για γεωμετρία «2» και για τα υλικά της πηγής βαθμονόμησης (4M HCl), καθώς και για τα υλικά νερό και SiO₂. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τις ενέργειες του 32.19keV, 46.54keV, 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV (Πίνακας 3.1). Στο Σχήμα 4.1 παρατίθεται η απεικόνιση της γεωμετρίας η οποία προσομοιώθηκε μέσω του προγράμματος gview3d.



Σχήμα 4.1
Γεωμετρία «2» που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Οι τιμές της απόδοσης φωτοκορυφής που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις αυτές για τα δύο υλικά και για κάθε ενέργεια, καθώς και οι τιμές του συντελεστή η , που υπολογίστηκε από τη σχέση (4.1) παρατίθενται στους Πίνακες 4.7 & 4.8 που ακολουθούν.

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>eff_H₂O</i>	<i>eff_4MHCl</i>	<i>η</i>
32.19	0.00470	0.00315	1.490
46.54	0.01260	0.01083	1.163
59.54	0.01654	0.01527	1.083
121.78	0.01934	0.01911	1.012
186.25	0.01474	0.01460	1.010

Πίνακας 4.7
Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η , ως λόγος αποδόσεων της πηγής βαθμονόμησης και υλικού νερό

<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>eff_SiO₂</i>	<i>eff_4MHCl</i>	<i>η</i>
32.19	0.00126	0.00315	0.401
46.54	0.00581	0.01083	0.537
59.54	0.00949	0.01527	0.622
121.78	0.01383	0.01911	0.724
186.25	0.01099	0.01460	0.753

Πίνακας 4.8

Συντελεστή; αναγωγής απόδοσης η, ως λόγος αποδόσεων της πηγής βαθμονόμησης και υλικού SiO₂

Παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση των τιμών που προέκυψαν με αυτή τη μέθοδο, με τις αντίστοιχες τιμές οι οποίες εκτιμήθηκαν από το πρόγραμμα factor με χρήση θεωρητικών τιμών του μ (NIST), για τα υλικά νερό και SiO₂, η οποία παρουσιάζεται στους Πίνακες 4.9 & 4.10 που ακολουθούν.

<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η από πρόγραμμα factor- Νερό</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>η (NIST)</i>	<i>η (λόγος αποδόσεων)</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	1.385	1.490	7.1%
46.54	1.151	1.163	1.1%
59.54	1.079	1.083	0.4%
121.78	1.016	1.012	-0.4%
186.25	1.009	1.010	0.02%

Πίνακας 4.9

Σύγκριση τιμών του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό νερό που προέκυψαν ως λόγος αποδόσεων, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται από το πρόγραμμα factor για θεωρητικές τιμές του μ από το NIST.

<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η από πρόγραμμα factor - SiO₂</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>η (NIST)</i>	<i>η (λόγος αποδόσεων)</i>	<i>Απόκλιση</i>
32.19	0.4557	0.4007	-13.7%
46.54	0.5540	0.5367	-3.2%
59.54	0.6225	0.6218	-0.1%
121.78	0.7285	0.7236	-0.7%
186.25	0.7584	0.7527	-0.7%

Πίνακας 4.10

Σύγκριση τιμών του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό SiO₂ που προέκυψαν ως λόγος αποδόσεων, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται από το πρόγραμμα factor για θεωρητικές τιμές του μ από το NIST.

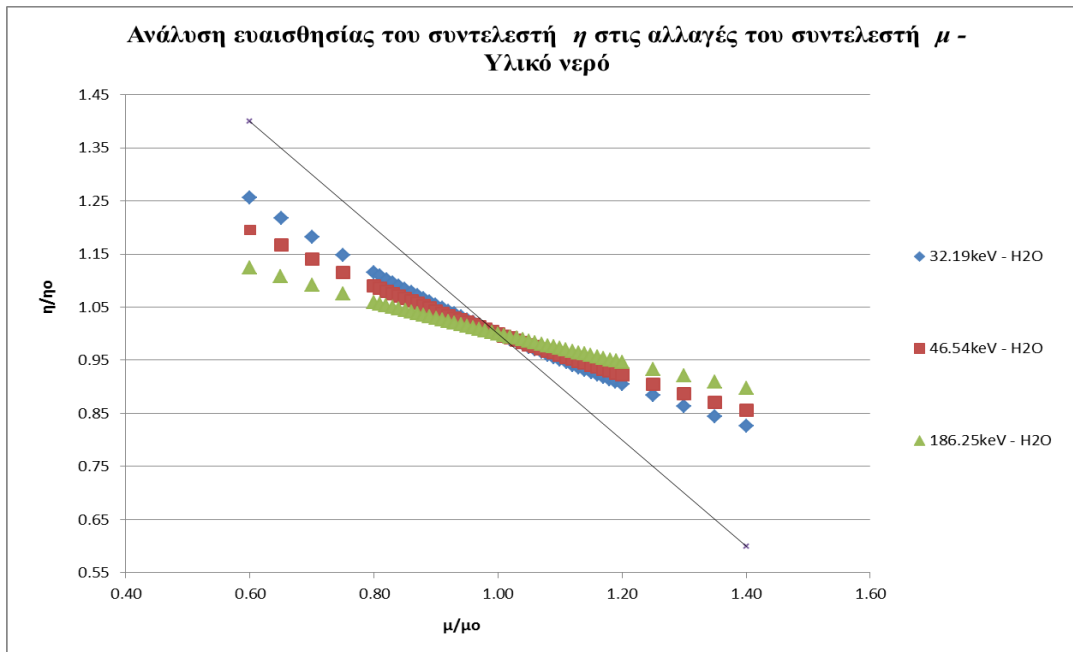
Από τα αποτελέσματα των Πινάκων διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στις χαμηλότερες ενέργειες. Οι αποκλίσεις αυτές ελαττώνονται όσο μεγαλώνει η ενέργεια και για την ενέργεια άνω των 59.54keV είναι πρακτικά αμελητέες. Το πρόβλημα εντοπίζεται στην ενέργεια 32.19keV, όπου οι αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές του NIST κρίνονται σημαντικές, οπότε δε συνίσταται η χρήση της μεθόδου για την υπόψη ενέργεια. Συνεπώς, η συγκεκριμένη μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή η , θεωρείται καταρχήν αποδεκτή για ενέργειες υψηλότερες των 46.54 keV. Το συμπέρασμα αυτό είναι σημαντικό, διότι η χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας η οποία δεν περιλαμβάνει πειραματική διαδικασία, είναι πολύ απλούστερη στην εφαρμογή της, ειδικά για υλικά των οποίων η σύσταση είναι γνωστή. Πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι οι συγκρίσεις έγιναν μόνο για δύο υλικά – αν και με πολύ διαφορετικές ιδιότητες εξασθένησης – γεγονός που δεν καθιστά το συμπέρασμα ασφαλές, οπότε προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση για περισσότερα υλικά.

4.4 Ανάλυση ευαισθησίας της επίδρασης του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ στο συντελεστή αναγωγής απόδοσης η

Στην παράγραφο 4.2 έγινε εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η , χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τους συντελεστές μ , όπως αυτοί εκτιμήθηκαν μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων, για διάφορες γεωμετρίες και ενέργειες. Οι τιμές του συντελεστή μ που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίαζαν αποκλίσεις, ανάλογα με τη μέθοδο πειραματικού προσδιορισμού που κάθε φορά είχε χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συντελεστή η , επισημαίνεται ότι η αντίστοιχες αποκλίσεις ήταν αισθητά μικρότερες (σε ποσοστό %). Καθώς η παρατήρηση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί εκτενέστερα, σε τι βαθμό η απόκλιση που παρουσιάζει η εκτιμώμενη τιμή του συντελεστή μ από τη θεωρητική τιμή του, μεταφέρεται στον συντελεστή η .

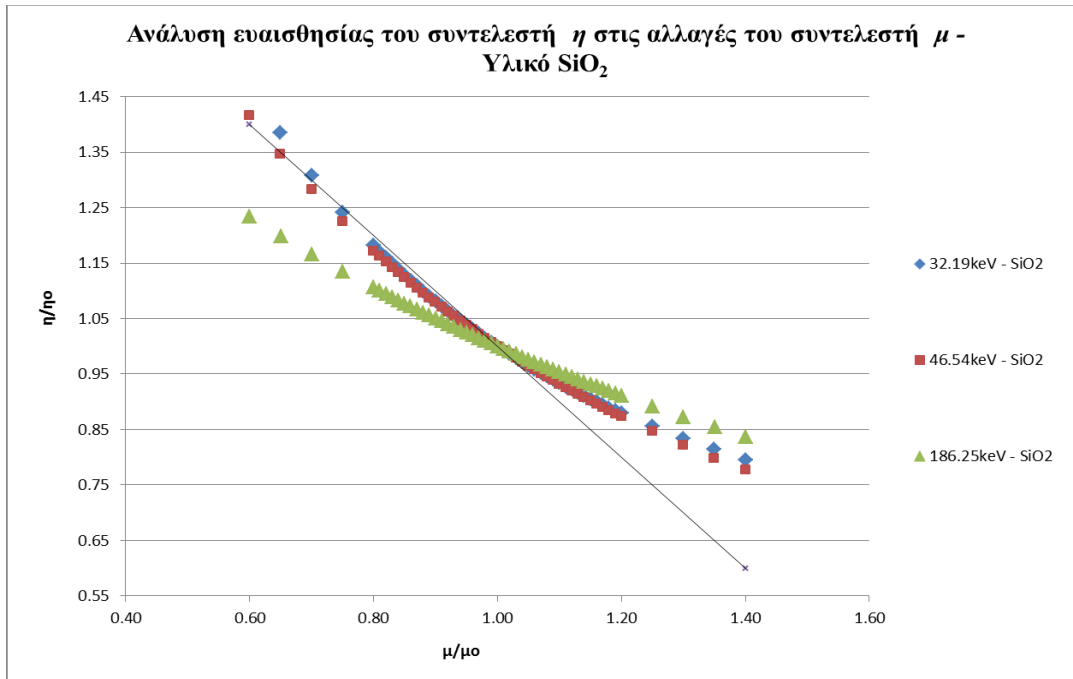
Προκειμένου να γίνει αυτή η διερεύνηση, επιλέχθηκε μια τιμή του συντελεστή μ (και συγκεκριμένα η εκάστοτε θεωρητική τιμή NIST) και δημιουργήθηκε μία περιοχή τιμών $\pm 40\%$ περί αυτόν το συντελεστή. Για αυτό το εύρος τιμών, υπολογίστηκαν από το

πρόγραμμα factor οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή η ως προς το υλικό της πηγής βαθμονόμησης 4M HCl. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για τα υλικά: νερό και SiO₂ και για ενέργειες φωτονίων 32.19keV, 46.54keV και 186.25keV. Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το νερό και το SiO₂, αντίστοιχα και συγκεκριμένα, οι λόγοι των συντελεστών μ και η ως προς την τιμή αναφοράς τους (NIST), και για τις τρεις ενέργειες, ενώ φαίνεται και η ευθεία που θα σχηματιζόταν εάν οι δύο συντελεστές μεταβάλλονταν με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή εάν η απόκλιση του συντελεστή η από τη θεωρητική τιμή του ήταν ίδια με εκείνη του συντελεστή μ από την αντίστοιχη τιμή του.



Σχήμα 4.2

Μεταβολή του συντελεστή η ως συνάρτηση της μεταβολής του συντελεστή μ , για υλικό νερό



Σχήμα 4.3

Μεταβολή του συντελεστή η ως συνάρτηση της μεταβολής του συντελεστή μ , για υλικό SiO_2

Στο Σχήμα 4.2 για υλικό νερό παρατηρείται ότι για όλες τις ενέργειες οι ευθείες που σχηματίστηκαν αποκλίνουν από την ευθεία της αναλογίας ένα-προς-ένα, τείνοντας προς την οριζόντια γραμμή. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την ενέργεια των 32.19 keV, απόκλιση της τιμής του συντελεστή μ για το νερό της τάξης του 20%, οδηγεί σε απόκλιση της τιμής του συντελεστή η της τάξης του 11.5%. Η μεταβολή του συντελεστή η είναι εν γένει πιο αργή σε σύγκριση με αυτή του συντελεστή μ . Επισημαίνεται ότι το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο, όσο αυξάνεται η ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι για τις υψηλότερες ενέργειες φωτονίων η εκτίμηση του συντελεστή μ δεν απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια, καθώς η απόκλιση μεταφέρεται σημαντικά μειωμένη στο συντελεστή η . Για τις χαμηλότερες ενέργειες φωτονίων, υφίσταται και πάλι η ελάττωση της απόκλισης του συντελεστή η σε σχέση με το συντελεστή μ , όχι όμως στον ίδιο βαθμό με προηγουμένως, και συνεπώς απαιτείται ακριβέστερη εκτίμηση του συντελεστή μ .

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.3 για υλικό SiO_2 επιβεβαιώνεται το προηγούμενο συμπέρασμα αναφορικά με την εξάρτηση της μεταβολής της απόκλισης των συντελεστών από την ενέργεια. Παρατηρείται, ωστόσο, ότι η μεταβολή του συντελεστή η

σε σχέση με του συντελεστή μ , δεν είναι το ίδιο αργή όπως στο προηγούμενο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η απόκλιση του συντελεστή η δεν εμφανίζεται κατά πολύ μειωμένη συγκριτικά με εκείνη του συντελεστή μ , ενώ για κάποια περιοχή τιμών στις χαμηλές ενέργειες μεταφέρεται σχεδόν αυτούσια. Στην περίπτωση λοιπόν τέτοιων υλικών που παρουσιάζουν υψηλή τιμή του συντελεστή μ έχει ιδιαίτερη σημασία ο ακριβής υπολογισμός του συντελεστή μ .

Στη συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας 4.11 στον οποίο δίνονται ενδεικτικά ορισμένες από τις αποκλίσεις του συντελεστή μ και οι αντίστοιχες αποκλίσεις του συντελεστή η , και τα δύο υλικά –νερό και SiO_2 - για όλες τις ενέργειες.

Ενέργεια (keV)	Απόκλιση συντελεστή μ	Απόκλιση συντελεστή η	
		H_2O	SiO_2
32.19	30%	18.2%	30.9%
	20%	11.5%	18.2%
	10%	5.5%	8.1%
	5%	2.7%	3.8%
46.54	30%	14.0%	28.3%
	20%	9.0%	17.2%
	10%	4.3%	7.9%
	5%	2.1%	3.8%
186.25	30%	9.1%	16.6%
	20%	5.9%	10.6%
	10%	2.9%	5.0%
	5%	1.4%	2.5%

Πίνακας 4.11

Ενδεικτικές τιμές των αποκλίσεων του συντελεστή μ και των αντίστοιχων του συντελεστή η , για τα υλικά νερό και SiO_2 και για όλες τις ενέργειες

Στα αποτελέσματα του πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές των αποκλίσεων, οι οποίες επιβεβαιώνουν όσα εξηγήθηκαν παραπάνω ποιοτικά στα σχήματα. Καταλήγοντας, το σημαντικό συμπέρασμα το οποίο μπορεί να εξαχθεί από την παραπάνω επεξεργασία είναι ότι η εκτίμηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ πρέπει να γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια, για χαμηλές ενέργειες φωτονίων και υλικά με μεγάλη πυκνότητα. Όσο μεγαλώνει η ενέργεια φωτονίων και

μειώνεται η πυκνότητα των υλικών, η απόκλιση της εκτιμώμενης τιμής του μ από τη θεωρητική τιμή μεταφέρεται κατά πολύ μειωμένη στο συντελεστή η .

4.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο παρόν κεφαλαίο επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, για τις ενέργειες 32.19keV, 46.54keV, 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV, και για τα υλικά νερό και SiO₂. Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ολοκληρωτική μέθοδος, μέσω του προγράμματος factor [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Αφού παρουσιάστηκε η δοκιμαστική εκτέλεση του προγράμματος και επιβεβαιώθηκε η ορθή λειτουργία του, έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή η εισάγοντας ως δεδομένα τις θεωρητικές τιμές του συντελεστή μ από το NIST. Οι τιμές που προέκυψαν –θεωρητικές τιμές- χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια ως τιμές αναφοράς με βάση τις οποίες έγιναν όλες οι απαραίτητες συγκρίσεις. Στη συνέχεια, ελήφθησαν οι τιμές του συντελεστή η όπως υπολογίζονται μέχρι σήμερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μέσω του κώδικα SPUNAL, και συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες θεωρητικές, διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζουν πολύ καλή σύγκλιση για όλες τις ενέργειες (πλην των 32.19keV, αφού ο κώδικας SPUNAL δεν είναι προγραμματισμένος για υπολογισμό σε τόσο χαμηλές ενέργειες). Ακολούθως, υπολογίστηκαν οι συντελεστές η χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των συντελεστών μ , όπως προέκυψαν από το προηγούμενο κεφάλαιο μέσω πειραμάτων και προσομοιώσεων, για όλες τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν. Λαμβάνοντας την τιμή του συντελεστή η από την εκάστοτε βέλτιστη γεωμετρία, έγιναν οι συγκρίσεις με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές και διαπιστώθηκε ικανοποιητική σύγκλιση, παρά το γεγονός ότι η σύγκλιση των συντελεστών του μ δεν ήταν αντίστοιχα καλή. Ακόμη, υπολογισμοί για το συντελεστή η πραγματοποιήθηκαν και για το υλικό SiO₂, με δεδομένα τους συντελεστές μ από προσομοιώσεις. Παρατηρήθηκε, ωστόσο, ότι οι αποκλίσεις στα αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για υλικό νερό, γεγονός αναμενόμενο, καθώς το συγκεκριμένο υλικό το οποίο παρουσιάζει υψηλές τιμές του συντελεστή μ και επιπλέον δεν έγινε τόσον εκτενής διερεύνηση για την ακριβή εκτίμηση του συντελεστή μ – κάτι που απαιτείται να γίνει στο μέλλον. Εν συνεχεία, προτάθηκε και ελέγχθηκε μια εναλλακτική μέθοδος, η οποία προσδιορίζει το συντελεστή

η , ως το λόγο αποδόσεων της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος. Τα αποτελέσματα της μεθόδου κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικά και για τα δύο υλικά, και συνεπώς η μέθοδος προτείνεται καθώς παρουσιάζει το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί πειραματική διαδικασία. Ωστόσο, διατηρείται επιφύλαξη για την ασφάλεια των συμπερασμάτων, καθώς εξετάστηκαν μόνο δύο υλικά και συνίσταται η περαιτέρω διερεύνηση για περισσότερα και ιδιαίτερα για υλικά μεγάλης πυκνότητας. Το κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με μια ποιοτική ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή η στις μεταβολές του συντελεστή μ , ελέγχοντας κατά πόσον η απόκλιση που παρουσιάζει η εκτίμηση του συντελεστή μ από τη θεωρητική του τιμή, επηρεάζει σημαντικά την εκτίμηση του συντελεστή η . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία εκτίμηση της αβεβαιότητας που συνοδεύει το συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Από την ανάλυση αυτή διαπιστώθηκε ότι στην εκτίμηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται χαμηλές ενέργειες φωτονίων και για υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη αυτοαπορρόφηση και κατά συνέπεια υψηλές τιμές του συντελεστή μ .

Κεφάλαιο 5:

Συμπεράσματα και μελλοντική επέκταση της εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη της Διπλωματικής Εργασίας και των όσων παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Υπογραμμίζονται τα βασικά συμπεράσματα, σχολιάζονται τα αποτελέσματα και εκφράζονται οι προβληματισμοί για τις δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν σε κάθε στάδιο της εργασίας. Τέλος επισημαίνονται τα σημεία που απαιτούν περισσότερη διερεύνηση και διατυπώνονται προτάσεις για συνέχιση της εργασίας.

Αρχικός στόχος για την παρούσα ΔΕ ήταν να βρεθεί η κατάλληλη μεθοδολογία για τον υπολογισμό συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα εμφάνισης διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος, στην περιοχή χαμηλών ενεργειών. Για το σκοπό αυτό, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος η οποία είχε προταθεί στη [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998], δηλαδή η μέθοδος που βασίζεται σε απευθείας εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η , υπολογίζοντας μια ολοκληρωτική σχέση, που η μοναδική μη γεωμετρική παράμετρος που περιέχει είναι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ . Έτσι, ως ουσιαστικός στόχος της παρούσης εργασίας τέθηκε ο προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ μέσω πειραματικής διαδικασίας, με τον ακριβέστερο δυνατό τρόπο.

Ξεκινώντας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον έλεγχο της πειραματικής διαδικασίας με χρήση της γεωμετρίας δέσμης που υιοθετήθηκε στη [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η ισχύουσα γεωμετρία δεν υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το συντελεστή μ σε όλο το εύρος ενεργειών το οποίο εξετάζεται. Συνεπώς, ακολούθησε μια προσπάθεια βελτίωσης της πειραματικής διαδικασίας, για τον ακριβέστερο και ταχύτερο προσδιορισμό του μ . Για τις δοκιμές που ακολούθησαν επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν πειραματικές τεχνικές αλλά και τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo. Προκειμένου να περιγραφεί η πειραματική διάταξη, έγινε μια συστηματική σειρά προσομοιώσεων με

σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του επιπέδου λεπτομέρειας στην περιγραφή της διάταξης κατά την προσομοίωση. Το συμπέρασμα από τη διερεύνηση δεν ήταν ξεκάθαρο, καθώς πραγματοποιώντας δοκιμές με σταδιακά βήματα από την απλούστερη προς την πληρέστερη περιγραφή της γεωμετρίας, δε σημειώθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα, τα οποία υπέδειξαν ότι για καμία από τις προσπάθειες η προσομοίωση, όπως πραγματοποιήθηκε, δεν περιγράφει πλήρως την πειραματική διαδικασία. Ωστόσο, αποφασίστηκε ότι στις προσομοιώσεις που θα ακολουθούσαν, θα χρησιμοποιηθεί η πληρέστερη δυνατή περιγραφή της εκάστοτε γεωμετρίας. Χρησιμοποιώντας την ισχύουσα γεωμετρία δέσμης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τα υλικά νερό και SiO_2 , τα αποτελέσματα των οποίων επέδειξαν με τη σειρά τους, ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της πειραματικής διάταξης. Έτσι, τέθηκαν υπό εξέταση νέες γεωμετρίες για ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή μ . Συγκεκριμένα, η πρώτη αλλαγή αφορούσε στην απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή και έγιναν δοκιμές με τοποθέτηση της πηγής σε μεγαλύτερη αλλά και μικρότερες αποστάσεις. Επιλέχθηκε η γεωμετρία εκείνη που η πηγή πλησίασε κοντά στον ανιχνευτή και τοποθετήθηκε σε απόσταση 5cm από αυτόν, με τα πειραματικά αποτελέσματα να την καθιστούν βέλτιστη για τις ενέργειες 186.25keV και 46.54keV. Ακόμη, το βασικό πλεονέκτημα της υπόψιν γεωμετρίας σε σχέση με την προηγούμενη, σε ότι αφορά συνολικά το ενεργειακό φάσμα που εξετάζεται, είναι ότι ενώ η ακρίβεια της εκτίμησης του συντελεστή μ δεν είναι ιδιαίτερα βελτιωμένη, ο πειραματικός χρόνος μειώθηκε σημαντικά. Η επόμενη αλλαγή στη γεωμετρία που δοκιμάστηκε ήταν η χρήση κατευθυντών δέσμης με διαφορετικές διαμέτρους οπών, προκειμένου η δέσμη φωτονίων να πλησιάζει περισσότερο στην παράλληλη δέσμη. Τελικά, επιλέχθηκε η γεωμετρία με χρήση κατευθυντών δέσμης, οπής διαμέτρων $d=0.5\text{cm}$, της οποίας τα πειραματικά αποτελέσματα την υπέδειξαν ως βέλτιστη για την ενέργεια φωτονίων 32.19keV. Εκείνο που γενικά παρατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών είναι ότι η εκτίμηση του συντελεστή μ παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στις χαμηλότερες ενέργειες, κυρίως 32.19keV και 46.54keV, και 59.54keV, ενώ στις ενέργειες 121.78keV και 186.25keV η απόκλιση από τις θεωρητικές τιμές είναι μικρότερη. Κλείνοντας, δίνονται οι προτάσεις που έγιναν σε ότι αφορά τη πειραματική γεωμετρία για κάθε ενέργεια που εξετάστηκε:

- 32.19keV: Γεωμετρία με κατευθυντές δέσμης διαμέτρου οπής $d=0.5\text{cm}$,
- 46.54keV: Γεωμετρία με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή,
- 59.54keV: Αρχική γεωμετρία δέσμης με κυλινδρική πηγή,
- 121.78keV: Αρχική γεωμετρία δέσμης, με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή,
- 186.25keV: Γεωμετρία με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.

Αφού ολοκληρώθηκε η διερεύνηση για τη βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , στο επόμενο κεφαλαίο επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης η . Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ολοκληρωτική μέθοδος, μέσω του προγράμματος factor [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Έχοντας επιβεβαιώσει την ορθή λειτουργία του υπόψιν προγράμματος, έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή η εισάγοντας ως δεδομένα τις θεωρητικές τιμές του συντελεστή μ , όπως δίδονται από τη Βάση Δεδομένων του NIST και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις τιμές του συντελεστή η όπως υπολογίζονται μέχρι σήμερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μέσω του κώδικα SPUNAL. Διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζουν πολύ καλή σύγκλιση για όλες τις ενέργειες (πλην των 32.19keV, αφού ο κώδικας SPUNAL δεν είναι προγραμματισμένος για υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης για τόσο χαμηλές ενέργειες). Στη συνέχεια, ακολούθησε μια σειρά υπολογισμών για τους συντελεστές η χρησιμοποιώντας τις τιμές των συντελεστών μ που υπολογίστηκαν προηγουμένως, από πειράματα και προσομοιώσεις, για όλες τις γεωμετρίες και ενέργειες που εξετάστηκαν. Εστιάζοντας στις τιμές του συντελεστή η από την εκάστοτε βέλτιστη γεωμετρία για κάθε ενέργεια, συγκριτικά με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, διαπιστώθηκε ικανοποιητική σύγκλιση. Επίσης, έγιναν υπολογισμοί για το συντελεστή η και για το υλικό SiO_2 , χρησιμοποιώντας τους συντελεστές μ που προέκυψαν από προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα για το υλικό SiO_2 παρουσιάστηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις αντίστοιχες για υλικό νερό, κάτι

που αναμενόταν, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει μεγάλη αυτοαπορρόφηση (δηλαδή υψηλό συντελεστή μ) και επιπλέον δεν έγινε τόσον εκτενής διερεύνηση για την ακριβή εκτίμηση του συντελεστή μ . Στη συνέχεια, εισήχθη μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό του συντελεστή η , σύμφωνα με την οποία ορίζεται ως ο λόγος της απόδοσης της πηγής βαθμονόμησης προς την απόδοση του αναλυόμενου δείγματος. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η απόδοση εκτιμάται με προσομοίωση, υπό την προϋπόθεση ότι είναι επαρκώς γνωστή η σύσταση του δείγματος και της πηγής βαθμονόμησης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές του συντελεστή η , κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικά και για τα δύο υλικά (νερό και SiO_2). Η χρήση της υπόψη μεθόδου συνιστάται για ενέργειες άνω των 46.54keV. Η εργασία ολοκληρώνεται ελέγχοντας το βαθμό στον οποίο η ανακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή μ , μεταφέρεται στο συντελεστή η . Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής μπορεί να προκύψει μία εκτίμηση της αβεβαιότητας που συνοδεύει το συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Διαπιστώθηκε ότι απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , όταν χρησιμοποιούνται χαμηλές ενέργειες φωτονίων και υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη αυτοαπορρόφηση και κατά συνέπεια υψηλές τιμές του συντελεστή μ . Καθώς η ενέργεια φωτονίων αυξάνεται και η αυτοαπορρόφηση των υλικών μειώνεται, η απόκλιση της εκτιμώμενης τιμής του μ από τη θεωρητική τιμή, μεταφέρεται κατά πολύ μειωμένη στο συντελεστή η .

Ανακεφαλαιώνοντας, η εργασία αυτή οδήγησε στην εύρεση δύο νέων γεωμετριών δέσμης για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ , που κατά περίπτωση, εκτιμούν ακριβέστερα και ταχύτερα τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ , ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης η . Ακόμη έγινε εισαγωγή μίας νέας μεθόδου για τον υπολογισμό του συντελεστή η , η οποία παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων και παρακάμπτει την πειραματική διαδικασία.

Ορισμένα σημεία τα οποία έχει ενδιαφέρον να διερευνηθούν περαιτέρω σε μελλοντική εργασία είναι τα εξής:

- i. Καλύτερη περιγραφή της πειραματικής διάταξης κατά την προσομοίωση, έτσι ώστε να μειωθούν οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος. Παρόλο που για τον προσδιορισμό του μ προτείνεται η χρήση πειραματικών τεχνικών. Η απόκλιση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης της πειραματικής διαδικασίας είναι κάτι που θα πρέπει να διερευνηθεί.
- ii. Εύρεση νέας γεωμετρίας δέσμης, η οποία να προσδιορίζει πειραματικά ακριβέστερα τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ για ενέργειες φωτονίων 32.19keV και 46.54keV.
- iii. Έλεγχος των νέων γεωμετριών που προτάθηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , για όλες τις ενέργειες φωτονίων, με περισσότερα υλικά. Προτείνεται τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν να παρουσιάζουν μεγάλη αυτοαπορρόφηση και συνεπώς μεγάλο συντελεστή μ .
- iv. Έλεγχος της νέας μεθόδου που προτάθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης η (ως ο λόγος της απόδοσης της πηγής βαθμονόμησης προς την απόδοση του αναλυόμενου δείγματος), με περισσότερα υλικά, και ιδιαίτερα με υλικά μεγάλης πυκνότητας.
- v. Ενδελεχής διερεύνηση της αβεβαιότητας που εισάγεται κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η , βάσει της μελέτης ευαισθησίας που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ.
- vi. Εφαρμογή των πειραματικών τεχνικών που αναπτύχθηκαν, για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ για μεγαλύτερο ενεργειακό εύρος έως 32.19keV και επέκταση των συναρτήσεων $\mu=f(\rho,E)$ που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα SPUNAL προκειμένου να γίνουν διορθώσεις αυτοαπορρόφησης για χαμηλότερες ενέργειες. Αυτό θα ήταν χρήσιμο για παράδειγμα για τον προσδιορισμό του I-129 σε δείγματα χώματος από τα φωτόνια ενέργειας 39.6keV που εκπέμπει.

Παράρτημα Α: Πιστοποιητικά ανιχνευτικών διατάξεων και πηγών

Α1: Πιστοποιητικό ανιχνευτή LEGe:

DETECTOR SPECIFICATIONS AND PERFORMANCE DATA

7.1 SPECIFICATIONS Model GL2020-7500 Serial Number b 87547

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

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

Cryostat Description or Drw. No. if special Vertical dipstick, type 7500 + 4" CFE + PHW

7.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA Date September 16th, 1988

Actual performance of this detector when tested is given below.

Active Diameter 50.5 mm

Active Area 2000 mm²

Thickness 20 mm

Distance from Window 5 mm

Window Thickness .5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage (-)1500 Vdc.

Recommended Bias Voltage (-)2000 Vdc.

Reset Rate at Recommended Bias / sec. (PO Preamp only)

Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias + .4 Vdc. (RC Preamp only)

RESOLUTION AND EFFICIENCY - With Amp. Time Constant of 4 microseconds.

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

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

A2: Πιστοποιητικό πηγής ^{137}Cs (1 μCi)



The Radiochemical Centre Amersham England

Certificate of measurement of radioactive gamma reference source

TA 6424

Description	Principal radionuclide: Caesium-137	Product code: CDR.121
		Source number: 7S266
Measurement	Reference time: 1200 GMT on 1st January 1981	
	Activity of the principal radionuclide: 0.993 microcuries	
	Recommended half-life: 30.17 years	
	Method of measurement: The source was measured using equipment calibrated directly or indirectly with similar sources prepared from a series of absolutely standardized solutions.	
Accuracy	The OVERALL UNCERTAINTY in the activity quoted above for the principal radionuclide was estimated to be less than $\pm 6.0\%$	

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

Remarks Tests for leakage and surface contamination have been carried out with satisfactory results.

Further information about this source including details of its construction, purity of the radionuclide, recommended nuclear data and half-life is given in the data sheet accompanying the source.

Approved


Physics Department


for Managing Director

The Radiochemical
Centre Ltd

registered England
1002610

registered office:
White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire
HP7 011

telephone:
Little Chalfont
(024 04)
4444

cables:
Activity
Amersham

telex:
83141

A3: Πιστοποιητικό πηγής ^{137}Cs (10 μCi)



The Radiochemical Centre Amersham England

Certificate of measurement of
radioactive gamma reference source

TA 6423

Description	Principal radionuclide: Caesium-137	Product code: CDR.151
		Source number: 15604
Measurement	Reference time:	1200 GMT on 1st February 1981
	Activity of the principal radionuclide:	12.29 microcuries
	Recommended half-life:	30.17 years
	Method of measurement:	The source was measured using equipment calibrated directly or indirectly with similar sources prepared from a series of absolutely standardized solutions.
Accuracy	The OVERALL UNCERTAINTY in the activity quoted above for the principal radionuclide was estimated to be less than $\pm 3.7\%$	

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

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

Approved


Physics Department


for Managing Director

The Radiochemical
Centre Ltd
registered England

registered office:
White Lion Road
Amersham
Buckinghamshire
4444

telephone:
Little Chalfont
(024 04)
4444

cables:
Activity
Amersham

telex:
83141

- 59 -

A4: Πιστοποιητικό πηγής ²²⁶Ra

Amersham Buchler GmbH & Co KG

Gieselweg 1 · W-3300 Braunschweig
Telefon (0 53 07) 2 06 - 0
Telefax Allgemein (0 53 07) 20 62 37
Telefax Strahlerproduktion (0 53 07) 20 62 93
Teletex 5307812 = ambuttx

Servicecentren in Frankfurt und Berlin

Amersham

Page 1 of 2 pages
Issue 8/92

CERTIFICATE

No: 761525 for a Sealed Radioactive Source

Source Type: Reference Source

Product Code	RAR8121
Drawing	VZ-590/1E
Source No.	DF 740
Nuclide	Radium-226

Measurement Data

Activity	57.1 kBq
Overall Uncertainty*	± 5 %
Reference Date	1 December 1992
Traceability*	Defined on page 2
Radionuclidic Purity	No gamma emitting impurities detected.

Leakage and Contamination Test(s)

Test Method(s)*	IV and I
Test(s) passed on	27 November 1992

Additional Information

ISO Classification*	C.11111
Recommended Working Life*	---
Remark	

* see page 2 for explanation

Amersham Buchler



Braunschweig, 30 November 1992 Men/AM

Sitz Braunschweig, Registergericht Braunschweig, HRA 8621
Persönlich haftende Gesellschafterin: Amersham Buchler GmbH, Sitz Braunschweig
Registergericht Braunschweig, HRB 638, Geschäftsführer: Dr. Anthony J. D'Eustachio
Vorsitzender des Aufsichtsrates: Wolfgang Büsselberg

Deutsche Bank AG Braunschweig, BLZ 270 700 30,
Konto 0168815
Postgiroamt Hannover: BLZ 250 100 30, Konto 3133 30-300

A5: Πιστοποιητικό πηγής ²⁴¹Am

Amersham Buchler GmbH & Co KG

Wolfsbergweg 1, D-3300 Braunschweig
Telefon (0 53 07) 2 06 0 Telex 5 307 812 ambutx
Telefax (0 53 07) 20 62 37

Vertriebsbüros
Friedrichstraße 227 4000 Düsseldorf Telefon (02 11) 74 20 66 - 69
Friedenstädter Landstr. 92 6000 Frankfurt/M. Telefon (0 69) 62 10 62 - 65

Amersham Buchler GmbH & Co KG Postfach 11 49 D-3300 Braunschweig
Amersham International
Amersham Laboratories
White Lion Road Amersham

GB-Buckinghamshire HP7 9LL England

Amersham

Certificate no. 591559

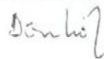
Type	AMR1121 to drawing VZ-1240/E
Source No	CP 716
Activity	40.2 kBq (1.09 µCi) Americium-241
Reference date	1 July 1991
Overall uncertainty*	± 4 %
Capsule	0.5 mm plastic (density 1.18 g/cm ³)
Integrity ISO/DIN Classification	C.34343
The source passed the tests for leakage** and contamination**	L and A
Date of test	27 June 1991

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

** See overleaf for description of tests

Remarks Traceability: The activity of the source above-mentioned has been measured against a reference source, calibrated by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

Amersham Buchler



Braunschweig, 28 June 1991 Dor/AM

Sitz Braunschweig Registergericht Braunschweig HRA 6021
Persönlich haftende Gesellschafterin: Amersham Buchler GmbH, Sitz Braunschweig
Registergericht Braunschweig, HRB 638 Geschäftsführer: Reinhard W. Muth
Vorsitzender des Aufsichtsrates: Wolfgang Busselberg

Deutsche Bank AG Braunschweig B.L.Z. 270 700 30
Konto 0 168 815
Post giroamt Hannover B.L.Z. 250 100 30, Konto 3133 30 - 300

A6: Πιστοποιητικό πηγής ¹⁵²Eu

Amersham Buchler GmbH & Co KG

Gieselweg 1 · W-3300 Braunschweig
Telefon (0 53 07) 2 06 - 0
Telefax Allgemein (0 53 07) 20 62 37
Telefax Strahlerproduktion (0 53 07) 20 62 93
Teletex 5307812 = ambuttx

Servicecentren in Frankfurt und Berlin



Page 1 of 2 pages
Issue 9/91

CERTIFICATE

No: 753106 for a Sealed Radioactive Source

Source Type: Reference Source

Product Code	EFR1121
Drawing	VZ-1240/1E
Source No.	DE 401
Nuclide	Europium-152

Measurement Data

Activity	46.2 kBq
Overall Uncertainty*	± 5 %
Reference Date	1 November 1992
Traceability*	Defined on page 2
Radionuclidic Purity	No gamma emitting impurities detected.

Leakage and Contamination Test(s)

Test Method(s)*	II and I
Test(s) passed on	23 October 1992

Additional Information

ISO Classification	C.34343
Recommended Working Life*	5 years

* see page 2 for explanation

Amersham Buchler

Braunschweig, 23 October 1992 Men/AM

Sitz Braunschweig, Registergericht Braunschweig, HRA 8621
Persönlich haftende Gesellschafterin: Amersham Buchler GmbH, Sitz Braunschweig
Registergericht Braunschweig, HRB 638, Geschäftsführer: Dr. Anthony J. D'Eustachio
Vorsitzender des Aufsichtsrates: Wolfgang Büsselberg

Deutsche Bank AG Braunschweig, BLZ 270 700 30,
Konto 0168815
Postgiroamt Hannover: BLZ 250 100 30, Konto 3133 30-300

A7: Πιστοποιητικό πηγής AMZ 44 (^{241}Am σε διάλυμα 0.5M HCl)

Amersham International plc
Amersham UK



**BRITISH
CALIBRATION
SERVICE**

Approval No. 0146

**Certificate of calibration
of absolutely standardized
radioactive solution**

P 23374

Description	Principal radionuclide: Americium-241	Product code: AMZ.44
		Solution number: S4/55/18
Measurement	Reference time: 1200 GMT on 1 December 1984	
	Radioactive concentration of americium-241: 1.224 microcuries per gram of solution	
	which is equivalent to: 45.3 kilobecquerels per gram of solution	
	Mass of solution: 5.0437 grams	
	Total activity of americium-241: 6.17 microcuries	
	which is equivalent to: 228 kilobecquerels	
	Method of measurement used (see reverse of the certificate): F	
Accuracy	Overall uncertainty in the radioactive concentration quoted above: $\pm 0.69\%$	
	Random uncertainty: $\pm 0.19\%$	Systematic uncertainty: $\pm 0.50\%$
	Overall uncertainty is defined on the reverse of the certificate.	
Radionuclidic Purity	The estimated activities of any radioactive impurities found by high-resolution gamma ray spectrometry, or in any other examination of the solution, are listed below expressed as percentages of the activity of the principal radionuclide at the reference time.	
	Other alpha particle emitters less than 0.005 %	
Chemical Composition	0.5M HCl. The solution is carrier free.	
Physical Data	Recommended half life: 433 ± 4 years	
	100% alpha particle emission followed in 35.3% of the disintegrations by prompt gamma photons with an energy of 0.0595 MeV.	
Remarks	The result of this standardization is independent of the number of 0.0595 MeV photons assumed to be emitted.	

Approved
Signatory

G.D.M. Parker

Παράρτημα Β: Κατάλογος φασμάτων που ελήφθησαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ

B1: Κατάλογος φασμάτων που ελήφθησαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ

Πίνακας Β.1.1: Φάσματα που ελήφθησαν με την αρχική γεωμετρία δέσμης (πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή).

Αρχική γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή - Απορροφητής H ₂ O				
Φάσμα	Κωδικός SPUNAL	Ημερομηνία ανάλυσης	Πηγή	Πάχος απορροφητή (mm)
WAM05E	16 / 1. 91	5/4/2012	Cs-137	5
WAM10E	16 / 1. 90	4/4/2012	Cs-137	10
WAM15E	16 / 1. 84	4/4/2012	Cs-137	15
WAM20E	16 / 1. 77	4/4/2012	Cs-137	20
WAM25E	16 / 1. 74	4/4/2012	Cs-137	25
WAM30E	16 / 1. 69	3/4/2012	Cs-137	30
WAM35E	16 / 1. 60	3/4/2012	Cs-137	35
WAM40E	16 / 1. 57	3/4/2012	Cs-137	40
WAM05C	16 / 1. 94	5/4/2012	Ra-226	5
WAM10C	16 / 1. 86	4/4/2012	Ra-226	10
WAM15C	16 / 1. 85	4/4/2012	Ra-226	15
WAM20C	16 / 1. 80	4/4/2012	Ra-226	20
WAM25C	16 / 1. 72	4/4/2012	Ra-226	25
WAM30C	16 / 1. 66	3/4/2012	Ra-226	30
WAM35C	16 / 1. 64	3/4/2012	Ra-226	35
WAM40C	16 / 1. 55	3/4/2012	Ra-226	40
WAM05F	16 / 1. 93	5/4/2012	Am-241 (point)	5
WAM10F	16 / 1. 88	4/4/2012	Am-241 (point)	10
WAM15F	16 / 1. 82	4/4/2012	Am-241 (point)	15
WAM20F	16 / 1. 76	4/4/2012	Am-241 (point)	20
WAM25F	16 / 1. 75	4/4/2012	Am-241 (point)	25
WAM30F	16 / 1. 70	3/4/2012	Am-241 (point)	30
WAM35F	16 / 1. 59	3/4/2012	Am-241 (point)	35
WAM40F	16 / 1. 58	3/4/2012	Am-241 (point)	40
WAM05B	16 / 1. 95	5/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	5
WAM10B	16 / 1. 87	4/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	10
WAM15B	16 / 1. 81	4/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	15
WAM20B	16 / 1. 79	4/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	20
WAM25B	16 / 1. 71	4/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	25
WAM30B	16 / 1. 67	3/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	30
WAM35B	16 / 1. 65	3/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	35
WAM40B	16 / 1. 54	3/4/2012	AMZ.44 (Am-241, volume)	40

(συνέχεια πίνακα B.1.1)

Αρχική γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή - Απορροφητής H₂O				
Φάσμα	Κωδικός SPUNAL	Ημερομηνία ανάλυσης	Πηγή	Πάχος απορροφητή (mm)
WAM05D	16 / 1. 92	5/4/2012	Eu-152	5
WAM10D	16 / 1. 89	4/4/2012	Eu-152	10
WAM15D	16 / 1. 83	4/4/2012	Eu-152	15
WAM20D	16 / 1. 78	4/4/2012	Eu-152	20
WAM25D	16 / 1. 73	4/4/2012	Eu-152	25
WAM30D	16 / 1. 68	4/4/2012	Eu-152	30
WAM35D	16 / 1. 61	4/4/2012	Eu-152	35
WAM40D	16 / 1. 56	3/4/2012	Eu-152	40

Πίνακας B.1.2: Φάσματα που ελήφθησαν με τη γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.

Γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή- Απορροφητής H₂O				
Φάσμα	Κωδικός SPUNAL	Ημερομηνία ανάλυσης	Πηγή	Πάχος απορροφητή (mm)
WRAC05A	16 / 1.123	10/7/2012	Ra-226	5
WRAC10A	16 / 1.125	10/7/2012	Ra-226	10
WRAC15A	16 / 1.126	10/7/2012	Ra-226	15
WRAC20A	16 / 1.129	10/7/2012	Ra-226	20
WRAC25A	16 / 1.133	10/7/2012	Ra-226	25
WRAC30A	16 / 1.134	11/7/2012	Ra-226	30
WAMC05A	16 / 1.122	10/7/2012	Am-241 (point)	5
WAMC10A	16 / 1.124	10/7/2012	Am-241 (point)	10
WAMC15A	16 / 1.127	10/7/2012	Am-241 (point)	15
WAMC20A	16 / 1.128	10/7/2012	Am-241 (point)	20
WAMC25A	16 / 1.130	10/7/2012	Am-241 (point)	25
WAMC30A	16 / 1.135	11/7/2012	Am-241 (point)	30

Πίνακας Β.1.3: Φάσματα που ελήφθησαν με τη γεωμετρία δέσμης με χρήση κατευθυντών δέσμης, διαμέτρου οπής $d=0.5\text{cm}$

Γεωμετρία δέσμης με χρήση collimators ($d=0.5\text{cm}$) - Απορροφητής H_2O				
Φάσμα	Κωδικός SPUNAL	Ημερομηνία ανάλυσης	Πηγή	Πάχος απορροφητή (mm)
WRACOL05A	16 / 1.140	18/7/2012	Ra-226	5
WRACOL10A	16 / 1.139	18/7/2012	Ra-226	10
WRACOL15A	11 / 4. 93	29/8/2012	Ra-226	15
WRACOL20A	16 / 1.141	19/7/2012	Ra-226	20
WRACOL25A	11 / 4. 94	30/8/2012	Ra-226	25
WRACOL30A	11 / 3.280	17/7/2012	Ra-226	30
WRACOL35A	12 / 1.290	31/8/2012	Ra-226	35
WCSCOL05A	11 / 3.294	21/8/2012	Cs-137	5
WCSCOL10A	11 / 3.295	21/8/2012	Cs-137	10
WCSCOL15A	11 / 3.297	22/8/2012	Cs-137	15
WCSCOL20B	12 / 1.289	23/8/2012	Cs-137	20
WCSCOL25A	11 / 4. 90	23/8/2012	Cs-137	25
WCSCOL30A	11 / 3.300	23/8/2012	Cs-137	30
WCSCOL35A	11 / 4. 92	24/8/2012	Cs-137	35
WCSCOL40A	11 / 4. 91	24/8/2012	Cs-137	40
WAMCOL05A	16 / 1.138	16/7/2012	Am-241 (point)	5
WAMCOL10A	11 / 3.287	17/7/2012	Am-241 (point)	10
WAMCOL15A	11 / 3.286	17/7/2012	Am-241 (point)	15
WAMCOL20A	11 / 3.285	17/7/2012	Am-241 (point)	20
WAMCOL25A	11 / 3.284	17/7/2012	Am-241 (point)	25
WAMCOL30A	11 / 3.281	17/7/2012	Am-241 (point)	30
WAMCOL35A	11 / 3.282	17/7/2012	Am-241 (point)	35
WAMCOL40A	11 / 3.283	17/7/2012	Am-241 (point)	40

B2: Παράδειγμα ανάλυσης φάσματος από SPUNAL

N.T.U.A. - Nuclear Engineering Section Gamma Spectroscopy
Analysis Package

Analysis of spectrum : WAM10F - 16/ 1. 88

Processing date : 04-Apr-12 at : 16:56:42

Sampled on : 04-Apr-12 at : 16:55 by :
K.Foteinaki

Analysed on : 04-Apr-12 at : 16:50 by : M.Savva

Acquired on : 04-Apr-12 at : 16:53:59 by : msavva_Ω

Remarks : water 10mm, Am-241 point

Spectrum File : /users1/spectra/msavva/tape16/file01/WAM10F

.....
.....

Experimental Conditions :

Detector : 6 - LeGe 0-200 keV
MCA type : 9 - Genie Region : 3 - 4096
Geometry : 2 - Q1232A-man - 282 cc cyl. plastic box
Geom. Volume : 282.00 cm**3
Volume (Net) : 1000.0 gr
Volume (Total) : 1000.0 gr
Mass compress : 1.0000
Decay time : 0.0000000E+00 s - 0 days
Sampling time : 0 min - 0.00 h
Collect time (s) : 192

.....
.....

*** Chernobyl decay difference: 0 - 7166565 : *****

.....
.....

Calibration data :

Calibration Modification :

Energy Calibration Date : 7-Mar-12

Energy = 5.541804E-01 +5.072162E-02 *ch -1.105752E-09 *ch**2

FW.1M = 1.076842E+01 +5.796570E-03 *ch -6.422776E-07 *ch**2

Efficiency Calibration Date : 23-May- 4

Geometry Description : Q1232A-man - 282 cc cyl. plastic box

Low Energy Region : 20.0 - 200.00 keV

Medium Energy Region Efficiency Coefficients :
ln(eff) = -1.410455E+01 +4.854057E+00 *ln(E) -5.564700E-01 *ln(E)**2

Midpoint Energy : 200.00 keV

High Energy Region Efficiency Coefficients
ln(eff) = 5.877472E-39 +5.877472E-39 *ln(E) +5.877472E-39 *ln(E)**2

.....
.....

Background Spectrum : BG6204 Date collected : 28-Nov-99

.....
.....

Analysis Parameters :

Application ID : 1 Start Channel : 1 End Channel
: 4095
Peak Analysis : SO Analysis depth : 7 Debugging
level : 0
Sigma units : 1.0 Energy window (keV) : 1.0 Raw
Efficiency : 0
ID-Library : SOI

Material (LEne): 0 8 - Water - Low energy analysis
applicable

Library file : /users1/spectra/msavva/ISOLIB.SOI

.....
.....
.....
.....

GAMMA SPECTROGRAPHIC ANALYSIS

Channel Energy (keV)	ID Main Peak (keV)	RMS (%)	Area Significance	+/-	90% Err (%)	Count rate (cps)	Energy (keV)	Isotope
265.03			253	+/-	18.3	0.132E+01	14.00	
339.83			771	+/-	19.4	0.401E+01	17.79	
400.24			481	+/-	22.1	0.250E+01	20.85	
410.42			355	+/-	33.2	0.185E+01	21.37	
509.23			553	+/-	10.9	0.288E+01	26.38	
1163.12			11925	+/-	2.0	0.621E+02	59.55	Am-241
59.54	(59.54)							

.....
.....

R A D I O N U C L I D E A N A L Y S I S

Isotope	Activity	90% Error	Net Activity	Energies (kev)
	Bq/kg			Theoretical
Estimated	Shift			

*** Effcor : Abscor returned with error : 2
for material 8 at the energy of 59.55 keV - density
: 3.546 g/cm^3
*** Low energy efficiency correction suspended

Am-241	6.01867E+03	+-	2.0 %	6.01867E+03	59.54
59.55	0.01				

Detector's mean shift : 0.01 kev

.....
.....

RADIONUCLIDE ANALYSIS - Isotopes by alphabetical Order

Isotope	Activity	90% Error	Energies (kev)
	Bq/kg		Theoretical Estimated Shift
Half life			

Am-241	6.01867E+03	+-	2.0 %	59.54	59.55	0.01
432.74 yr						

.....
.....
.....
.....

Παράρτημα Γ: Αρχεία εισόδου του προγράμματος PENELOPE

Γ1: Αρχεία εισόδου τύπου .in

Γ1.1: Αρχείο εισόδου τύπου .in, για ενέργεια φωτονίων 32.19keV και την αρχική γεωμετρία δέσμης, χωρίς θωράκιση-απορροφητής H₂O.

```
TITLE  LEGe detector, 0.5cm water, geometry:caps, air, no shielding.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 32.19e3    [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 15.1  [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   6          [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1 3.2e3 3.2e2 3.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 3.2e3 3.2e2 3.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 3.2e3 3.2e2 3.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 3.2e3 3.2e2 3.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 3.2e3 3.2e2 3.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 3.2e3 3.2e2 3.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

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

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

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 32.19e3 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).
ENDDDET 1e3 32.19e3 1000    [Energy window and number of channels]
EDBODY  7                   [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   1200              [Dumping period, in sec]

TIME    5.0e15            [Allotted simulation time, in sec]
```


Γ1.2: Αρχείο εισόδου τύπου .in, για ενέργεια φωτονίων 46.6keV και την αρχική γεωμετρία δέσμης, με θωράκιση-απορροφητή H₂O.

```
TITLE  LEGe detector, 0.5cm water, geometry: caps, air, shielding.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 46.60e3    [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 15.1  [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   9          [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 4.6e3 4.6e2 4.6e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

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

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

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 46.60e3 100      [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45                  [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18                  [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 46.60e3 1000    [Energy window and number of channels]
EDBODY  7                  [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   1800              [Dumping period, in sec]

TIME    5.0e15            [Allotted simulation time, in sec]
```

Γ1.3: Αρχείο εισόδου τύπου .in, για ενέργεια φωτονίων 59.54keV και τη γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 22.5cm από τον ανιχνευτή-απορροφητή H₂O.

```

TITLE  LEGe detector, geometry: point source 22.5cm from detector

      >>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 59.54e3 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 22.5 [Coordinates of the source]
SDIREC 0 0      [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 180      [Beam aperture, in deg]

      >>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT   9      [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAR 1 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

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

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

      >>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 59.54e3 100      [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45      [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18      [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

      >>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 59.54e3 1000      [Energy window and number of channels]
EDBODY 7      [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   1800      [Dumping period, in sec]

TIME    5.0e15      [Allotted simulation time, in sec]

```

Γ1.4: Αρχείο εισόδου τύπου .in, για ενέργεια φωτονίων 59.54keV και τη γεωμετρία με την πηγή όγκου τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή-απορροφητή H₂O.

```

TITLE  LEGe detector, geometry: volume source 5cm from detector.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2      [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 59.54e3 [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]
SIMPAR 1 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 10 5.9e3 5.9e2 5.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3 [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

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

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN lege_vol50.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE    1e3 59.54e3 100 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH   45             [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   18             [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 59.54e3 1000 [Energy window and number of channels]
EDBODY 7               [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   1800          [Dumping period, in sec]

TIME    5.0e15        [Allotted simulation time, in sec]

```

Γ1.5: Αρχείο εισόδου τύπου .in, για ενέργεια φωτονίων 121.8keV και τη γεωμετρία με χρήση κατευθυντών δέσμης διαμέτρου οπής $d=0.5\text{cm}$ -απορροφητής H_2O .

```
TITLE  LEGe detector, geometry: collimators, d=0.5cm.

      >>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 121.8e3    [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 12.0  [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   9          [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

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

      >>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  lege_col25.geo         [Geometry definition file, 20 chars]

      >>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE     1e3 121.8e3 100        [E-interval and no. of energy bins]
NBTH    45                    [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH    18                    [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

      >>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET  1e3 121.8e3 1000      [Energy window and number of channels]
EDBODY  7                    [Active body; one line for each body]

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

TIME    5.0e15               [Allotted simulation time, in sec]
```

Γ1.6: Αρχείο εισόδου τύπου .in, για ενέργεια φωτονίων 186.25keV και την αρχική γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή-απορροφητή SiO₂.

```

TITLE  LEge detector,SiO2,geometry:point source 15.1cm from detector.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 186.25e3   [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 15.1  [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  9          [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 2 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 3 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 4 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 5 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 6 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 7 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 8 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]
SIMPAR 9 1.9e3 1.9e2 1.9e3 0.1 0.1 1e4 1e3  [M,EABS,C1,C2,WCC,WCR]

The following material data file must be copied from directory
..\mains\pencyl\ to the working directory.
PFNAME lege_SiO2.mat          [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN lege_SiO2.geo         [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE  1e3 186.25e3 100        [E-interval and no. of energy bins]
NBTH  45                    [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH  18                    [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1e3 186.25e3 1000     [Energy window and number of channels]
EDBODY  7                    [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  1800                 [Dumping period, in sec]

TIME  5.0e15                [Allotted simulation time, in sec]

```


Παράρτημα Δ: Τροποποίηση του κώδικα PENELOPE για γεωμετρία όγκου

Δ1: Τροποποίηση κώδικα PENELOPE για γεωμετρία όγκου στην αρχική γεωμετρία.

```
C ---- Initial position ...
4444   Z=rand(3.d0)*6.9d0+8.0d0
      R=0.02173913*Z+3.426087
      X=rand(1.d0)*R
      Y=rand(2.d0)*R
      RRT=X**2.0D0+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
```

Δ2: Τροποποίηση κώδικα PENELOPE για γεωμετρία όγκου στη γεωμετρία με την πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή.

```
C ---- Initial position ...
4444   Z=rand(3.d0)*6.9d0+5.5d0
      R=0.02173913*Z+3.426087
      X=rand(1.d0)*R
      Y=rand(2.d0)*R
      RRT=X**2.0D0+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
```

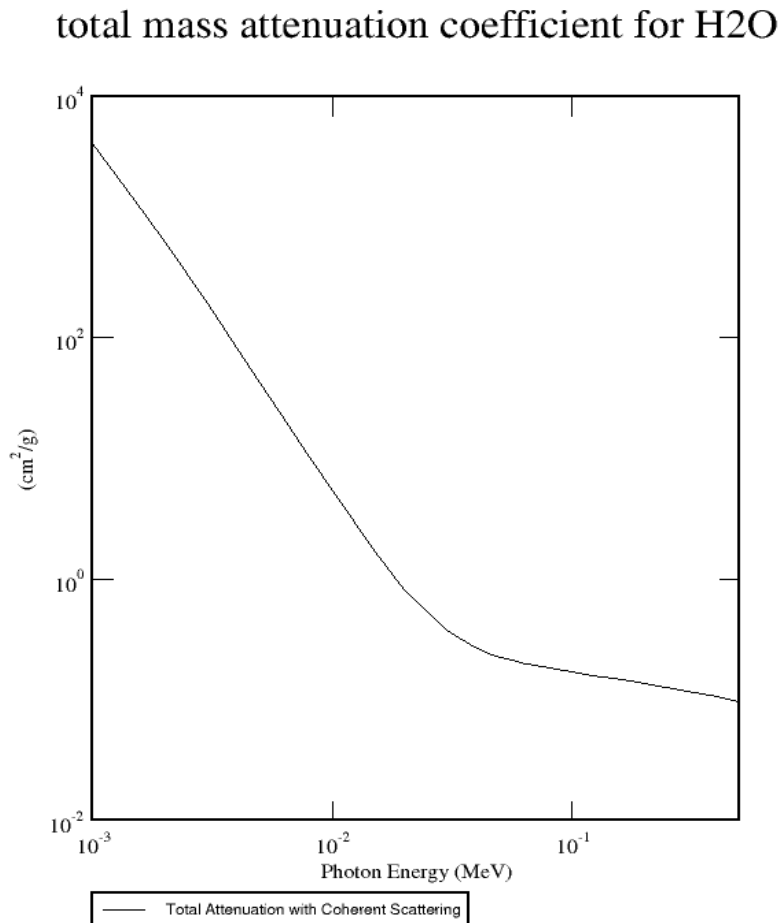

Δ3: Τροποποίηση κώδικα PENELOPE για γεωμετρία όγκου γεωμετρίας «2».

```
C ---- Initial position ...
4444  Z=rand(3.d0)*6.9d0+0.6d0
      R=0.02173913*Z+3.586957
      X=rand(1.d0)*R
      Y=rand(2.d0)*R
      RRT=X**2.0D0+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
```

Παράρτημα Ε: Αντληση δεδομένων από τη Βάση Δεδομένων του NIST.

Η Βάση Δεδομένων NIST είναι, από το 1999, η μεγαλύτερη και πιο αξιόπιστη βάση δεδομένων μαζικού συντελεστή εξασθένισης (μ/ρ). Είναι διαθέσιμη από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology – NIST) είναι προσβάσιμη από την ιστοσελίδα του NIST στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/>. Από αυτήν ελήφθησαν οι θεωρητικές τιμές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ΔΕ.

Ε1:Γράφημα ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης για νερό



E2: Πίνακας συντελεστών εξασθένισης για νερό

Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
	1.000E-03	1.372E+00	1.319E-02	4.076E+03	0.000E+00	0.000E+00	4.077E+03	4.076E+03
	1.500E-03	1.269E+00	2.673E-02	1.374E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.376E+03	1.374E+03
	2.000E-03	1.150E+00	4.184E-02	6.162E+02	0.000E+00	0.000E+00	6.173E+02	6.162E+02
	3.000E-03	9.087E-01	7.075E-02	1.919E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.928E+02	1.919E+02
	4.000E-03	7.082E-01	9.430E-02	8.197E+01	0.000E+00	0.000E+00	8.277E+01	8.207E+01
	5.000E-03	5.579E-01	1.123E-01	4.192E+01	0.000E+00	0.000E+00	4.259E+01	4.203E+01
	6.000E-03	4.489E-01	1.259E-01	2.407E+01	0.000E+00	0.000E+00	2.464E+01	2.419E+01
	8.000E-03	3.102E-01	1.440E-01	9.919E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.037E+01	1.006E+01
	1.000E-02	2.305E-01	1.550E-01	4.944E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.330E+00	5.099E+00
	1.500E-02	1.333E-01	1.699E-01	1.369E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.672E+00	1.539E+00
	2.000E-02	8.856E-02	1.774E-01	5.439E-01	0.000E+00	0.000E+00	8.098E-01	7.213E-01
	3.000E-02	4.694E-02	1.829E-01	1.458E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.756E-01	3.286E-01
	3.220E-02	4.171E-02	1.832E-01	1.157E-01	0.000E+00	0.000E+00	3.405E-01	2.988E-01
	4.000E-02	2.874E-02	1.827E-01	5.680E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.683E-01	2.395E-01
	4.650E-02	2.204E-02	1.813E-01	3.461E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.380E-01	2.159E-01
	5.000E-02	1.936E-02	1.803E-01	2.725E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.269E-01	2.076E-01
	5.950E-02	1.413E-02	1.772E-01	1.534E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.067E-01	1.925E-01
	6.000E-02	1.392E-02	1.770E-01	1.493E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.059E-01	1.920E-01
	8.000E-02	8.165E-03	1.697E-01	5.770E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.837E-01	1.755E-01
	1.000E-01	5.349E-03	1.626E-01	2.763E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.707E-01	1.654E-01
	1.218E-01	3.661E-03	1.555E-01	1.444E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.606E-01	1.570E-01
	1.500E-01	2.442E-03	1.474E-01	7.308E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.505E-01	1.481E-01
	1.863E-01	1.596E-03	1.384E-01	3.624E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.403E-01	1.387E-01
	2.000E-01	1.388E-03	1.353E-01	2.887E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.370E-01	1.356E-01
	3.000E-01	6.215E-04	1.179E-01	8.160E-05	0.000E+00	0.000E+00	1.186E-01	1.180E-01
	4.000E-01	3.506E-04	1.058E-01	3.493E-05	0.000E+00	0.000E+00	1.061E-01	1.058E-01
	5.000E-01	2.247E-04	9.663E-02	1.883E-05	0.000E+00	0.000E+00	9.687E-02	9.665E-02

Παράρτημα Στ: Κώδικας *factor*

```
C*****
***
C*      Program for the calculation of the Efficiency Correction Factor
*
C*      and the associated error (ref. Numerical Recipes in FORTRAN)
*
C*      Version 04 Oct 2012
*
C*****
***
      program factor
      implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
      character*1 ya
      double precision
len(500),lam(500),lsam(500),lams(500),lsams(500)
      double precision cf,scf
      integer nsteps
      common /com/d,sd,r1,t1,r2,t2
      data r1,t1/0.,0./
1000  continue
      print 1
1      format($,"Geometry (2) : ")
      read(5,2) igeom
2      format(i2)
      if(igeom.eq.2.or.igeom.eq.0) then
          r2=3.613
          t2=6.875
1500  print 1501
1501  format($,'Detector (3 or 4) :')
      read(5,2) idet
      if(idet.eq.3.) then
          d=2.1065
      else if(idet.eq.4.) then
          d=3.23
      else
          goto 1500
      endif
c d=3.23 for XtRa and d=2.1 for LEGe d= detector's active depthΨ
      sd=0.022
      else
17      print 3
3      format("Give r,t,d,sd : ")
      read (5,11) r2,t2,d,sd
11      format(4f10.5)
      if(r2.le.0..or.t2.le.0..or.d.le.0.) goto 17
      endif

      print 101
101  format($,"Read input data from file? (y) : ")
      read 10, ya
10  format(a1)
      if(ya.eq.'y'.or.ya.eq.'Y'.or.ya.eq.' ') then
          call get_file_input(len,lam,lsam,lams,lsams,nsteps)
```

```

else
  call get_user_input(len,lam,lsam,lams,lsams,nsteps)
end if

ioutput=0
print 102
102  format($,"Write output to file? (y) : ")
read 10,ya
if(ya.eq.'y'.or.ya.eq.'Y'.or.ya.eq.' ') then
  ioutput=16
  open(ioutput,file='output.txt', status='unknown')
end if

print 2030
2030 format("E(keV)  Source m(cm-1) Sample m(cm-1) Corr. Factor")
do 2100 i=1,nsteps
  call calculate(len(i),lam(i),lsam(i),lams(i),lsams(i),cf,scf)
  write(*,2101)len(i),lam(i),lams(i),cf
2101  format(f7.2,9X,f6.4,9X,f6.4,1X,f12.7)
  if(ioutput.gt.0) then
    write(ioutput,2101)len(i),lam(i),lams(i),cf
  end if
2100  continue

  if(ioutput.gt.0) then
    close(ioutput)
  end if

  goto 1000
9    continue
  stop
  end

subroutine get_file_input(len,lam,lsam,lams,lsams,nsteps)
implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
dimension len(500),lam(500), lsam(500), lams(500),lsams(500)
CHARACTER*255 filename
ifile=15

write(*,1)
1  format($,"Give file name: ")
read 10,filename
10 format(a255)

open(ifile,file=filename,err=20, status='old')

do 30 i=1,500
read(ifile,40, END=50) len(i),lam(i),lsam(i),lams(i),lsams(i)
nsteps=i
40  format(f7.2,1X,f6.4,1x,f6.4,1X,f6.4,1X,f6.4)
  if(len(i).eq.0) then
    go to 50
  end if
30  continue

```

```

50  close(ifile)
    if(len(nsteps).eq.0) then
        nsteps=nsteps-1
    end if
    return

20  write(*,2)
2   format($,"Error while reading file!")
    nsteps=0

    return
end

subroutine get_user_input(len,lam,lsam,lams,lsams,nsteps)
    implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
    dimension len(500),lam(500), lsam(500), lams(500),lsams(500)
    CHARACTER*1 ya

    print 100
100  format($,"Give the Energy (keV) of photons : ")
    read(5,*) en

c Begin determination of calibration source m
    print 4
4    format($,"Calibration with QCY44? (y) ")
    read 10, ya
10   format(a1)
    if(ya.eq.'y'.or.ya.eq.'Y'.or.ya.eq.' ') then
        amc=0
        samc=0
    else
18   print 5
5    format('Give r(m),er(m) for calibration source (cm-1) : ')
    read(5,12) amc,samc
12   format(2e10.0)
    print 7
7    format('WARNING: Same r(m) will be used for all energies!')
    if(amc.le.0.) return
    endif
    am=amc
    sam=samc

c Begin determination of sample m
6    format('Select the sample material: ')
    print 110
110  format('1. HCl',/, '2. NaOH',/, '3. KCl(solid)',
+ /, '4. Manual Entry')
    print 115
115  format($,'Selection : ')
    read(5,120) isel
120  format(i1)
    if (isel.eq.1) then
        call hcl(en,enlog,ams,sams)
    endif
    if (isel.eq.2) then
        call naoh(en,enlog,ams,sams)

```

```

endif
if (isel.eq.3) then
  call kcl(en,enlog,ams,sams)
endif
amin=ams
amax=ams
nsteps=1

if (isel.eq.4) then
  print 2000
  format($,"Minimum abs. coefficient (cm-1):")
  read(*,*)amin
  print 2010
  format($,"Maximum abs. coefficient (cm-1):")
  read(*,*)amax
  print 2020
  format($,"Number of steps:")
  read(*,*)nsteps
  if(nsteps.gt.500) then
    nsteps=500
  end if
  astep=(amax-amin)/nsteps
  sam=samc
endif

ams=amin

do 1000 i=1,nsteps
  len(i)=en
  lam(i)=am
  lsam(i)=sam
  lams(i)=ams
  lsams(i)=0.005
  ams=ams+amstep
1000 continue

end subroutine

subroutine qcy_abs(enk,amc,samc)
  implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)

en=enk/1000
enlog=log(en)

if(en.ge.(0.05)) then
  a0=-2.597622
  a1=-0.485069
  a2=-0.119409
  a3=-0.035686
else
  a0=4.026821
  a1=7.234752
  a2=2.465911
  a3=0.200148
endif

```

```

amc=exp(a0+a1*enlog+a2*(enlog**2)+a3*(enlog**3))
samc=0.005

return
end

c      Ypologismos Syntelesti Diorthosis
c      Input : en      - Energia
c              am      - Syntelestis Eksasthensis pigis
c              sam      - Sfalma am
c              ams      - Syntelestis Eksasthensis deigmatos
c              sams     - Sfalma ams
c      Output: cf      - Syntelestis diorthosis
c              scf      - Sfalma cf
c
c      Oi plirofories geometrias (d,sd,t1,t2,r1,r2) lamvanontai apo
common
c
      subroutine calculate(en,am,sam,ams,sams,cf,scf)
      implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
      double precision imc,ims,cf,scf
      common /com/d,sd,r1,t1,r2,t2

      if(am.eq.0) then
         call qcy_abs(en,am,sam)
      end if

      call integ1(am,sam,ss,si)
      imc=sngl(ss)
      esimc=sngl(si)

      call integ1(ams,sams,ss,si)
      ims=sngl(ss)
      esims=sngl(si)

      cf=ims/imc
      scf=cf*sqrt((esims/ims)**2+(esimc/imc)**2)
c      write(*,*)imc,ims,cf

      return
      end

c*****
***
c subroutine for the calculation of the integral over the height
c*****
***
      subroutine integ1(am,sam,ainte,sainte)
      implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l,g)
      common /com/d,sd,r1,t1,r2,t2
      dimension y(11),sy(11)
      REAL*8 x
      h=(t2-t1)/10.
      aintegr=0.

```



```

saintegr=0.
call integ2(t1,am,sam,gg,sgg)
y(1)=gg
sy(1)=sgg
call integ2(t2,am,sam,gg,sgg)
y(11)=gg
sy(11)=sgg
aintegr=y(1)+y(11)
saintegr=(h/3)**2*(sy(1)**2+sy(11)**2)
do i=2,10
  x=t1+(i-1)*h
  k=i-int(i/2)*2
  if(k.eq.1) then
    l=2
  else
    l=4
  endif
  call integ2(x,am,sam,gg,sgg)
  y(i)=gg
  sy(i)=sgg
  aintegr=aintegr+l*y(i)
  saintegr=saintegr+(l*h/3.)*sy(i)**2
enddo
ainte=(h/3.)*aintegr
sainte=dsqrt(saintegr)
return
end
C*****
***
C      subroutine for the calculation of the integral over the radius
C*****
***
subroutine integ2(t,am,sam,ainte,sainte)
implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
common /com/d,sd,r1,t1,r2,t2
dimension y(11),sy(11)
aintegr=0.
saintegr=0.
h=(r2-r1)/10.
y(1)=fun(t,r1,d,am)
sy(1)=sf(t,r1,d,sd,am,sam)
y(11)=fun(t,r2,d,am)
sy(11)=sf(t,r2,d,sd,am,sam)
aintegr=y(1)+y(11)
saintegr=(h/3.)**2*(sy(1)**2+sy(11)**2)
do i=2,10
  r=r1+(i-1)*h
  k=i-int(i/2)*2
  if (k.eq.1.) then
    l=2
  else
    l=4
  endif
  y(i)=fun(t,r,d,am)
  sy(i)=sf(t,r,d,sd,am,sam)
  aintegr=aintegr+l*y(i)

```

```

    saintegr=saintegr+((1*h/3.)*(sy(i)))**2
  enddo
  ainte=(h/3.)*aintegr
  sainte=dsqrt(saintegr)
  return
end
C*****
***
C    function to be integrated
C*****
***
    function fun(x,r,d,am)
    implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
    double precision x
    a=dsqrt(r*r+(x+d)**2)
    z=(x*a)/(x+d)
    b=1/dexp(am*z)
    fun=(b*r)/(r*r+(x+d)**2)
    return
end

C*****
***
C    function for the calculation of the standard error
C*****
***
    function sf(x,r,d,sd,am,sam)
    implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
    double precision x
    REAL*8 b,c
    a=(x+d)
    b=r*r+a*a
    c=dsqrt(b)*(2*am*x)/a
    q=dexp(-c)
    e=(r*r*x*x)/(a*a*b)
    g=dsqrt(b)*(am*x*r*r)
    h=(g-2*a*a*a)**2
    s=(r*r*h)/((a*b)**4)
    sf=(q*(e*sam*sam+s*sd*sd))**0.5
    return
end

C*****
*****
C    subroutine for the calculation of the mass absorption
C    coefficient of the HCl
C*****
*****
    subroutine hcl(enk,enlog,ams,sams)
    implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)

    en=enk*0.001
    enlog=log(en)

    print 130
130    format($,'Give the Molarity of the sample : ')

```

```

read(5,140) amol
write(*,131) amol
131 format('Calculating for Molarity ',f4.2)
140 format(f4.2)
if(en.le.(0.05)) then
    if (amol.eq.(0.50)) then
        a0=14.06831
        a1=12.66419
        a2=3.107357
        a3=0.2029748
        goto 100
    endif
    if (amol.eq.(1.00)) then
        a0=15.05255
        a1=13.68551
        a2=3.442488
        a3=0.2361997
        goto 100
    endif
    if (amol.eq.(1.50)) then
        a0=15.59924
        a1=14.31937
        a2=3.666367
        a3=0.2592407
        goto 100
    endif
    if (amol.eq.(2.00)) then
        a0=15.85938
        a1=14.69476
        a2=3.814858
        a3=0.2753080
        goto 100
    endif
    if (amol.eq.(2.50)) then
        a0=15.92777
        a1=14.89345
        a2=3.910884
        a3=0.286466
        goto 100
    endif
    if (amol.eq.(3.00)) then
        a0=15.86629
        a1=14.96932
        a2=3.969682
        a3=0.2940952
        goto 100
    endif
    if (amol.eq.(3.50)) then
        a0=15.71662
        a1=14.95903
        a2=4.00171
        a3=0.2991494
        goto 100
    endif
c L.Prentza: Correcting for consistency with main program
    if (amol.eq.(4.00)) then

```

```

    a0=4.026821
    a1=7.234752
    a2=2.465911
    a3=0.200148
    goto 100
endif
if (amol.eq.(4.50)) then
    a0=15.25688
    a1=14.77314
    a2=4.012421
    a3=0.3040121
    goto 100
endif
if (amol.eq.(5.00)) then
    a0=14.98038
    a1=14.62805
    a2=4.000041
    a3=0.3046511
    goto 100
endif
if (amol.eq.(5.50)) then
    a0=14.68757
    a1=14.46189
    a2=3.979917
    a3=0.3044776
    goto 100
endif
if (amol.eq.(6.00)) then
    a0=14.38551
    a1=14.28139
    a2=3.954096
    a3=0.3036863
    goto 100
endif
else
if (amol.eq.(0.50)) then
    a0=-2.632162
    a1=-0.4847088
    a2=-0.07932718
    a3=-0.01582110
    goto 100
endif
if (amol.eq.(1.00)) then
    a0=-2.623233
    a1=-0.4842674
    a2=-0.08445971
    a3=-0.01862116
    goto 100
endif
if (amol.eq.(1.50)) then
    a0=-2.614455
    a1=-0.4838321
    a2=-0.08928156
    a3=-0.02127521
    goto 100
endif

```

```

if (amol.eq.(2.00)) then
  a0=-2.605819
  a1=-0.4834040
  a2=-0.09381865
  a3=-0.02379464
  goto 100
endif
if (amol.eq.(2.50)) then
  a0=-2.597317
  a1=-0.4829832
  a2=-0.09809499
  a3=-0.02619005
  goto 100
endif
if (amol.eq.(3.00)) then
  a0=-2.588942
  a1=-0.4825683
  a2=-0.1021303
  a3=-0.02847049
  goto 100
endif
if (amol.eq.(3.50)) then
  a0=-2.580686
  a1=-0.4821601
  a2=-0.1059435
  a3=-0.03064432
  goto 100
endif
c L.Prentza: Correcting for consistency with main program
if (amol.eq.(4.00)) then
  a0=-2.597622
  a1=-0.485069
  a2=-0.119409
  a3=-0.035686
  goto 100
endif
if (amol.eq.(4.50)) then
  a0=-2.564512
  a1=-0.4813663
  a2=-0.1129713
  a3=-0.03470193
  goto 100
endif
if (amol.eq.(5.00)) then
  a0=-2.556583
  a1=-0.4809797
  a2=-0.1162137
  a3=-0.03659847
  goto 100
endif
if (amol.eq.(5.50)) then
  a0=-2.548753
  a1=-0.4805997
  a2=-0.1192923
  a3=-0.03841463
  goto 100

```

```

        endif
        if (amol.eq.(6.00)) then
            a0=-2.541017
            a1=-0.4802263
            a2=-0.1222184
            a3=-0.04015543
            goto 100
        endif
    endif
100    ams=exp(a0+a1*enlog+a2*(enlog**2)+a3*(enlog**3))
        sams=0.005
        return
    end
C*****
*****
C    subroutine for the calculation of the mass absorption
C    coefficient of the KCl
C*****
*****
    subroutine kcl(enk,enlog,ams,sams)
    implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
    en=enk*0.001
    enlog=log(en)
    if(en.le.(0.05)) then
        a0=0.6669553
        a1=4.299646
        a2=1.792999
        a3=0.1485969
    else
        a0=-2.571452
        a1=-0.4565707
        a2=-0.2005343
        a3=-0.1055106
    endif
    ams=exp(a0+a1*enlog+a2*(enlog**2)+a3*(enlog**3))
    sams=0.005
    return
    end
C*****
*****
C    subroutine for the calculation of the mass absorption
C    coefficient of the NaOH
C*****
*****
    subroutine naoh(enk,enlog,ams,sams)
    implicit double precision(e,r,t,d,a,s,l)
    en=enk*0.001
    enlog=log(en)
    print 130
130    format('Give the Molarity of the sample : ')
        read(5,140) amol
140    format(f4.2)
        write(*,131) amol
131    format('Calculating for Molarity ',f4.2)
        if(en.le.(0.05)) then
            if (amol.eq.(0.50)) then

```

```

a0=12.66927
a1=11.28056
a2=2.673969
a3=0.1610649
goto 100
endif
  if (am01.eq.(1.00)) then
a0=12.38426
a1=11.02991
a2=2.598438
a3=0.1539861
goto 100
endif
if (am01.eq.(1.50)) then
  a0=13.17029
  a1=11.72085
  a2=2.807562
  a3=0.1736383
  goto 100
endif
if (am01.eq.(2.00)) then
  a0=12.38488
  a1=11.03045
  a2=2.598600
  a3=0.1540012
  goto 100
endif
if (am01.eq.(2.50)) then
  a0=13.59301
  a1=12.09149
  a2=2.921068
  a3=0.1843811
  goto 100
endif
if (am01.eq.(3.00)) then
  a0=13.78010
  a1=12.25505
  a2=2.971501
  a3=0.1891738
  goto 100
endif
else
  if (am01.eq.(0.50)) then
a0=-2.621530
a1=-0.4876016
a2=-0.07666805
a3=-0.01368684
goto 100
endif
  if (am01.eq.(1.00)) then
a0=-2.638783
a1=-0.4851688
a2=-0.07382584
a3=-0.01284283
goto 100
endif

```

```

if (amol.eq.(1.50)) then
  a0=-2.586977
  a1=-0.4922569
  a2=-0.08208560
  a3=-0.01529175
  goto 100
endif
if (amol.eq.(2.00)) then
  a0=-2.638748
  a1=-0.4851738
  a2=-0.07383153
  a3=-0.01284451
  goto 100
endif
if (amol.eq.(2.50)) then
  a0=-2.552485
  a1=-0.4966287
  a2=-0.08714824
  a3=-0.01678687
  goto 100
endif
if (amol.eq.(3.00)) then
  a0=-2.535271
  a1=-0.4987119
  a2=-0.08955212
  a3=-0.01749524
  goto 100
endif
endif
100 ams=exp(a0+a1*enlog+a2*(enlog**2)+a3*(enlog**3))
sams=0.005
return
end

```


Παράρτημα Ζ

Αποτελέσματα υπολογισμών του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης λόγω αυτοαπορρόφησης, για κάθε ενέργεια και κάθε γεωμετρία, μέσω του προγράμματος factor

- Αρχική-πλήρης γεωμετρία δέσμης με την πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 15.1cm από τον ανιχνευτή (πείραμα και προσομοίωση):

<i>Αρχική γεωμετρία δέσμης-Πείραμα</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>$\mu_{(4MHC1)}$</i>	<i>$\mu_{(H2O)}$</i>	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>
32.19	0.5890	0.3045	1.466
46.54	0.3226	0.211	1.207
59.54 (point)	0.2492	0.2011	1.090
59.54 (volume)	0.2492	0.2102	1.072
121.78	0.1689	0.1668	1.004
186.25	0.1450	0.151	0.988

Πίνακας 4.11

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό H₂O, με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος με την αρχική γεωμετρία δέσμης

<i>Αρχική γεωμετρία δέσμης-Προσομοίωση</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	<i>$\mu_{(4MHC1)}$</i>	<i>$\mu_{(H2O)}$</i>	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>
32.19	0.5890	0.2948	1.489
46.54	0.3226	0.2029	1.225
59.54 (point)	0.2492	0.1869	1.119
59.54 (volume)	0.2492	0.1886	1.115
121.78	0.1689	0.1557	1.026
186.25	0.1450	0.1355	1.019

Πίνακας 4.12

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό H₂O, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την αρχική γεωμετρία δέσμης

- Γεωμετρία δέσμης με τη σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή (πείραμα και προσομοίωση):

<i>Πηγή 5cm από τον ανιχνευτή -Πείραμα</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	$\mu_{(4MHC1)}$	$\mu_{(H2O)}$	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>
32.19	-	-	-
46.54	0.3226	0.2086	1.212
59.54 (point)	0.2492	0.1945	1.103
59.54 (volume)	-	-	-
121.78	-	-	-
186.25	0.1450	0.1426	1.005

Πίνακας 4.13

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό H₂O, με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος με τη γεωμετρία πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή

<i>Πηγή 5cm από τον ανιχνευτή -Προσομοίωση</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	$\mu_{(4MHC1)}$	$\mu_{(H2O)}$	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>
32.19	0.5890	0.2964	1.485
46.54	0.3226	0.2096	1.210
59.54 (point)	0.2492	0.1894	1.114
59.54 (volume)	0.2492	0.1952	1.102
121.78	0.1689	0.1585	1.020
186.25	0.1450	0.1420	1.006

Πίνακας 4.14

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό H₂O, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη γεωμετρία πηγής τοποθετημένης σε απόσταση 5cm από τον ανιχνευτή

- Γεωμετρίας δέσμης με χρήση κατευθυντών δέσμης πριν και μετά το δοχείο του απορροφητή:

<i>Collimators-Πείραμα</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	$\mu_{(4MHC1)}$	$\mu_{(H2O)}$	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>
32.19	0.5890	0.3219	1.426
46.54	0.3226	0.2091	1.211
59.54	0.2492	0.2156	1.061
121.78	-	-	-
186.25	0.1450	0.1256	1.040

Πίνακας 4.15

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό H₂O, με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος με τη γεωμετρία όπου χρησιμοποιήθηκαν collimators

<i>Collimators-Προσομοίωση</i>			
<i>Ενέργεια (keV)</i>	$\mu_{(4MHC1)}$	$\mu_{(H2O)}$	<i>Συντελεστής αναγωγής απόδοσης η</i>
32.19	0.5890	0.3025	1.471
46.54	0.3226	0.2436	1.139
59.54	0.2492	0.2015	1.089
121.78	0.1689	0.1637	1.010
186.25	0.1450	0.1370	1.016

Πίνακας 4.16

Προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης για υλικό H₂O, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη γεωμετρία όπου χρησιμοποιήθηκαν collimators

Βιβλιογραφία:

1. Αθανασίου Ν., “Προσομοίωση της Αλληλεπίδρασης Φωτονιακών Ακτινοβολιών και Υλης με χρήση του κώδικα PENELOPE-Εφαρμογή και Προβλήματα Υπολογισμού Θωρακίσεων και Βαθμονόμησης Ανιχνευτικών Διατάξεων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
2. Αναγνωστάκης Μ., “Γ-Φασματοσκοπική Ανάλυση Δειγμάτων Χαμηλών Ραδιενεργειών στην Περιοχή Χαμηλών Ενεργειών”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.
3. Αναγνωστάκης Μ., βοήθημα στο μάθημα “Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα και Αναλύσεις”, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
4. Βάση Δεδομένων από International Atomic Energy Agency (IAEA).
[<http://www-nds.iaea.org/sgnucdat/a3.htm>]
5. Βάση Δεδομένων από National Institute of Standards and Technology (NIST), 1999.
[<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/>]
6. Βασιλοπούλου Θ., “Προσδιορισμός Συντελεστών Διόρθωσης Απόδοσης Ανιχνευτή HPGe Λόγω Του Φαινομένου της Πραγματικής Σύμπτωσης μέσω Προσομοίωσης Monte Carlo”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
7. Βιβλιοθήκη ισοτόπων *Radiation Decay* v.3.6 έκδοση 2001.
8. Βιβλιοθήκη ισοτόπων *JEFF 3.1.1* έκδοση 2007.
9. Λεωνίδου Δ., “Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Υλης- Δοσιμετρία-Θωράκιση”, 1984.
10. Πρέντζα Λ., “Εγκατάσταση και Παραμετρική Μελέτη Εξοπλισμού Λειτουργίας Περιβαλλοντικών Δειγμάτων και Εφαρμογή στη Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση”, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
11. Σιμόπουλος Σ.Ε., “Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών”, Δεύτερη Έκδοση, Βιβλιοθήκη Ε.Μ.Π., 1990.

12. Anagnostakis M., Hinis E., Karangelos D., Petropoulos N., Rouni P., Simopoulos S., Zunic Z., “*Determination of depleted uranium in environmental samples by gamma spectroscopic techniques*”, 2001.
13. Bé M.-M. et al., βιβλιοθήκη ισοτόπων “*Tables des Radionucléides*”, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Pavillon de Breteuil, Sèvres, 2004.
14. Cern, “*Geant , Detector Description and Simulation Tool*”, Geneva 1993.
15. Cutshall N.H., Larsen I.L and Olsen C.R., “*Direct Analysis of Pb-210 in Sediment Samples : Self-Absorption Corrections, Nuclear Instruments and Methods*” , (309-312), 1983.
16. Debertin K. and Helmer R.G., “*Gamma- And X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*”, 1988.
17. Erdtman G. and Soyka W., “*The Gamma Rays of the Radionuclides, Verlag Chemie*” ,New York 1979.
18. Etherington H., “*Nuclear Engineering Handbook*” , McGraw-Hill Book Company, 1958.
19. Fano U., “*Gamma - Ray Attenuation - Part I Basic Processes, Nucleonics, 11(8) pp (8-12)*” , 1953.
20. Fano U., “*Gamma-Ray Attenuation – Part II Analysis of Penetration, Nucleonics, 11(9) pp (55-61)*” ,1953.
21. Galloway R.B., “*Correction for Sample Self-absorption in Activity Determination by Gamma Spectrometry , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A300 pp (367-373)*” ,1991.
22. Gilmore G., Hemingway J., “*Practical Gamma-Ray Spectrometry*”, John Wiley & Sons, Chichester ,1995.
23. H. Yucel, A.N. Solmaz ,E. Kose , D. Bor, “*Spectral interference corrections for the measurement of U-238 in materials rich in thorium by a high resolution γ -ray spectrometry*” , 2009.
24. Hubbell J.H., “*Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV*”. International Journal of Applied Radiation and Isotopes 33 (11): (1269-1290), 1982.
25. Hubbell J.H., “*Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV*”. National Standard

- Reference Data System, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce , NSRDS-NBS 29, 1969 .
26. Hurtado S., Garcia-Leon M., Garcia-Tenorio R., “*GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration*”, *Applied Radiation and Isotopes* 61 ,2004,(139–143).
 27. I. Adsley, A.L. Nichols and J.Toole, “ *Decay of Th-234 and Daughter Pa-234m in Secular Equilibrium: Resolution of Observed Anomalies*”, June 1998.
 28. James F., “*Monte Carlo Theory and Practice Data Handling Division*”, CERN,Geneva ,1980.
 29. JEF-2 Nuclides Database, Nuclear Energy Agency Databank, OECD,1992.
 30. Johansson, “ *Phys. Rev., 96, 1075*”, S.A.E. 1954.
 31. Kalos M.H. & Whitlock P.A., “*Monte Carlo Methods*”, Wiley-Interscience, New York , 1986.
 32. Miller K.M., “*Self – absorption Corrections for Gamma Ray Spectral Measurements of Pb-210 in Environmental Samples, Nuclear Instruments and Methods, A258 pp.281-285*”, 1987.
 33. Momeni M.H., “*Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 193, 185*”, 1982.
 34. N. Cornejo Diaz, M. Jurado Vargas , “*An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors*”,2008.
 35. O. Sima, D. Arnold, C. Dovlete , “ *GERmanium SPECTroscopy CORrection factors*”.
 36. Ong Ping Hok , Verschoor J.T. and Born, “*Physica, 22, 465*”,1956.
 37. Oresugan M.O., “*Determination of Self-Absorption Corrections by Computation in Routine Gamma-Ray Spectrometry for Typical Environmental Samples, Radioactivity and Radiochemistry*”, 1993.
 38. Oxley David, “*An Introduction to Geant4*”, Nuclear Physics.
 39. Roy J.C., Cote J.-E and Turcotte J. , “*Measurements With a Planar Germanium Detector of Low Energy γ and X-ray Emitters in Waters sampled by the Floc Method, Nuclear Instruments and Methods , 206 pp. 553-562*” , 1983.
 40. Rubinstein R.Y. , “*Simulation and the Monte Carlo Methods*”, John Wiley and Sons Inc. , 1981.

41. Scott H.L. and Marlow K.W. , “ *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, A286, 549”, 1990.
42. <http://www.canberra.com>
43. <http://geant4.cern.ch/support/index.shtml>
44. <http://www.gespecor.de/en/>