



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ
ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΟΣΗΣ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ MONTE-CARLO**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της

ΕΥΘΥΜΙΑΣ ΜΠΑΒΙΟΛΗ

Σπουδάστρια της Σχολής

Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Μ.Ι. Αναγνωστάκης, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεργασία: Α. Μποζιάρη, Τμήμα Δοσιμετρίας & Βαθμονομήσεων ΕΕΑΕ

ΑΘΗΝΑ 2024

Περίληψη

Σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη ακρίβειας στις μετρήσεις ακτινοπροστασίας από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και την προστασία του πληθυσμού και των εργαζομένων, είναι η χρήση βαθμονομημένων οργάνων μέτρησης. Η βαθμονόμηση των οργάνων ιοντιζουσών ακτινοβολιών στο πεδίο της ακτινοπροστασίας, πραγματοποιείται με χρήση καθορισμένων πεδίων ακτινοβολίας και θαλάμων ιονισμού υψηλής μετρολογικής επίδοσης, σε εθνικά ή διεθνή εργαστήρια βαθμονόμησης.

Στην Ελλάδα, το Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Μέτρησης Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (EBOIA) της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) και συνεργαζόμενο εργαστήριο του Εθνικού Μετρολογικού Ινστιτούτου (ΕΙΜ), διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση των μετρολογικών προτύπων ως εθνικό εργαστήριο στο πεδίο των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Τα υποπρότυπα εργαστήρια βαθμονόμησης (Secondary Standards Calibration Laboratories, SSDLs) πρέπει να γνωρίζουν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των δεσμών ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση, μέσα από πειράματα σε πραγματικές συνθήκες και προσομοιώσεις MONTE CARLO.

Στην παρούσα ΔΕ έγινε πειραματική μελέτη στην δέσμη ακτινοβολίας Cs-137, και στην συνέχεια αναπαραγωγή και ανάλυσή του με τεχνικές Monte Carlo μέσω του προγράμματος PENELOPE (έκδοση 2011). Με τον τρόπο αυτό ερευνήθηκε η δυνατότητα αναπαραγωγής πεδίων βαθμονόμησης του EBOIA και η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβειά τους και συνεπώς και την ακρίβεια των βαθμονομήσεων στην ακτινοπροστασία.

Abstract

An important factor in achieving accuracy in radiation protection measurements from ionizing radiation and in safeguarding the population and workers is the use of calibrated measuring instruments. The calibration of ionizing radiation instruments in the field of radiation protection is performed using defined radiation fields and ionization chambers of high metrological performance in national or international calibration laboratories.

In Greece, the Calibration Laboratory of Ionizing Radiation Measuring Instruments (EVOIA) of the Greek Atomic Energy Commission (EEAE) and a collaborating laboratory of the National Metrology Institute (NMI) play a key role in ensuring metrological standards as a national laboratory in the field of ionizing radiation.

Secondary Standards Calibration Laboratories (SSDLs) must possess accurate knowledge of the characteristics of the radiation beams used in calibration through real-world experiments and MONTE CARLO simulations.

In this thesis, an experimental study was performed on the Cs-137 radiation beam, followed by its reproduction and analysis using Monte Carlo techniques with the PENELOPE program (2011 version). In this way, the possibility of reproducing EVOIA calibration fields and studying the factors affecting their accuracy, and consequently the accuracy of the calibrations in radiation protection, was investigated.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Εργαστήρια Δοσιμετρίας: Ακτινοπροστασία και Βαθμονόμηση	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.1.1 Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας.....	9
2.1.2 Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιονιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ)	10
2.1.3 Σύνομη αναδρομή στην ιστορία του ΕΒΟΙΑ	12
2.1.4 Σκοπός του ΕΒΟΙΑ	12
2.2 Υποπρότυπα Εργαστήρια Δοσιμετρίας (SSDL)	13
2.2.1 Το δίκτυο SSDL των ΙΑΕΑ/WHO	13
2.2.2 SSDL και μετρολογία	14
2.3 Βαθμονομήσεις στο πεδίο της Ακτινοπροστασίας.....	14
2.3.1 Μεγέθη, μονάδες και σύμβολα.....	14
2.3.2 Σκοπός της βαθμονόμησης	16
2.3.3 Διακρίβωση σε εφαρμογές ακτινοπροστασίας.....	16
2.3.4 Ακτινοβολία γάμμα.....	17
2.3.5 Δευτερογενή πρότυπα	19
2.3.6 Η διαδικασία ελέγχου των οργάνων	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Θεωρητικό Υπόβαθρο	21
3.1 Αλληλεπίδραση φωτονίων-ύλης.....	21
3.1.1 Ελαστική σκέδαση	22
3.1.2 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	22
3.1.3 Σκέδαση Compton	23
3.1.4 Δίδυμη Γένεση	24
3.1.5 Πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου	24
3.1.6 Νόμος της εκθετικής εξασθένησης δέσμης φωτονίων	25
3.1.7 Πάχος υποδιπλασιασμού	26
3.1.8 Σχέση έντασης ακτινοβολίας και απόστασης.....	26
3.2 Βασικά δοσιμετρικά μεγέθη	27
3.2.1 ΚΕΡΜΑ	27
3.2.2 Απορροφούμενη δόση.....	28
3.2.3 Ισοδύναμη δόση	28
3.2.4 Ενεργός δόση	29
3.2.5 Περιβαλλοντικό ισοδύναμο δόσης $H^*(10)$	29
3.3 Τύποι ανιχνευτών ιονιζουσών ακτινοβολιών.....	30

3.3.1	Ανιχνευτές με αέριο.....	30
3.3.2	Τα είδη ακτινοβολίας που ανιχνεύονται	31
3.3.3	Ο ρόλος της διαφοράς δυναμικού του ανιχνευτή	31
3.3.4	Θάλαμοι Ιονισμού	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Η διαδικασία βαθμονόμησης στο ΕΒΟΙΑ		40
4.1	Περιγραφή πειράματος.....	40
4.1.1	Η πηγή ¹³⁷ Cs του ΕΒΟΙΑ	40
4.1.2	Θωράκιση πηγής και κυκλικός κατευθυντήρας δέσμης	41
4.1.3	Θάλαμος ιονισμού PTW UNIDOS type 32002.....	42
4.1.4	Ηλεκτρόμετρο PTW UNIDOS	44
4.1.5	Βαρόμετρο και Θερμόμετρο.....	45
4.1.6	Οι μολύβδινοι απορροφητές (φίλτρα) A1-A6.	46
4.1.7	Αίθουσα ακτινοβολήσης του ΕΒΟΙΑ	51
4.2	Αναλυτική Περιγραφή πειράματος.....	52
4.2.1	Πειραματική Διαδικασία	52
4.2.2	Πειραματικές μετρήσεις.....	54
4.2.3	Αφαίρεση του υποστρώματος από τις μετρήσεις.....	55
4.2.4	Συντελεστής βαθμονόμησης από ΕΒΟΙΑ	56
4.2.5	Μετατροπή μονάδων από <i>nCmin</i> σε <i>Gyphoton</i>	56
4.2.6	Αποτελέσματα πειράματος	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE.....		60
5.1	Εισαγωγή	60
5.2	Η προσομοίωση Monte Carlo	60
5.3	Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE 2011	61
5.4	Οι εικονικοί ανιχνευτές.....	63
5.5	Το πρόγραμμα PENMAIN	64
5.5.1	Το αρχείο εισόδου (.in)	64
5.5.2	Το αρχείο γεωμετρίας (.geo).....	67
5.5.3	Τα αρχεία υλικών (.mat).....	71
5.5.4	Τα αρχεία αποτελεσμάτων (.dat ή .rep).....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Δοκιμαστικές προσομοιώσεις.....		72
6.1	Εισαγωγή	72
6.2	Πρώτος κύκλος προσομοιώσεων - Επιλογή του τύπου Ανιχνευτή	73
6.2.1	Η εξελικτική πορεία των προσεγγίσεων στον πρώτο κύκλο προσομοιώσεων:	73
6.2.2	Ο ανιχνευτής Dose Enclosure	74
6.2.3	Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσομοίωσης	74

6.2.4 Προσομοιώσεις.....	76
6.3 Δεύτερη προσέγγιση - Επιλογή του εικονικού ανιχνευτή Energy Deposition Detector	79
6.3.1 Ο ανιχνευτής Energy Deposition	79
6.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου src-enddet-##.dat και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα	80
6.3.3 Υπολογισμός της σχετικής αβεβαιότητας σε επίπεδο 3σ	82
6.3.4 Προσομοιώσεις.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Τελικές προσομοιώσεις.....	93
7.1 Εισαγωγή	93
7.1.1 Αρχείο εισόδου	93
7.1.2 Αρχεία υλικών	94
7.1.3 Αρχείο γεωμετρίας	94
7.2 Αποτελέσματα Τελικών Προσομοιώσεων	98
7.2.1 Ενεργειακά φάσματα των τελικών προσομοιώσεων	99
7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ΕΒΟΙΑ-Προσομοιώσεων	104
7.3.1 Παράγοντες που προκύπτουν στη διαδικασία της προσομοίωσης	105
7.3.2 Παράγοντες που οφείλονται στο πραγματικό πείραμα	106
7.4 Συνολικά Συμπεράσματα και Σύνοψη Κεφαλαίου	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Επίλογος	108
Βιβλιογραφία.....	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) είναι η εξέταση της δυνατότητας αναπαραγωγής με προσομοίωση Monte-Carlo των πεδίων ακτινοβολήσης τα οποία χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση οργάνων μέτρησης δόσης στο Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ) της ΕΕΑΕ¹ και η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια των βαθμονομήσεων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη στην δέσμη ακτινοβολίας πηγής Cs-137, και στην συνέχεια προσομοίωση και ανάλυσή της με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo. Το πειραματικό μέρος της παρούσας ΔΕ έλαβε χώρα στο (ΕΒΟΙΑ), ενώ η μελέτη με τεχνικές προσομοιώσεων Monte-Carlo πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια τα οποία αναλύονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Το 2ο κεφάλαιο περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση του ρόλου και της λειτουργίας της ΕΕΑΕ και ειδικότερα του ΕΒΟΙΑ, ενώ εστιάζει στην ανάλυση των Υποπρότυπων Εργαστηρίων Βαθμονόμησης, του τρόπου λειτουργίας τους στο πλαίσιο των βαθμονομήσεων για σκοπούς ακτινοπροστασίας και τις μεθόδους που ακολουθούν.

Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που στηρίζει το πείραμα που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Αυτό αφορά τον τρόπο που η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη, τα βασικά δοσιμετρικά μεγέθη που συναντώνται στο πεδίο της ακτινοπροστασίας, καθώς και τη λειτουργία των θαλάμων ιονισμού που χρησιμοποιήθηκαν και τη χρήση τους στο πεδίο της δοσιμετρίας για σκοπούς ακτινοπροστασίας.

Το 4ο Κεφάλαιο αφορά την παρουσίαση του πειραματικού μέρους της παρούσας ΔΕ, που πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του ΕΒΟΙΑ. Περιλαμβάνει λεπτομερή αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και την παρουσίαση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα αντίστοιχα πειράματα.

Στο 5ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κώδικας PENELOPE (Έκδοση του 2011), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις της εργασίας, καθώς και τα βασικά του στοιχεία. Συγκεκριμένα, περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση της λειτουργίας και των στοιχείων του κώδικα χρήστη (user-code) penmain που διατίθεται με τον κώδικα PENELOPE και χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των προσομοιώσεων.

Το 6ο Κεφάλαιο εστιάζει στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Αρχικά, παρουσιάζονται οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που έτρεξαν και η διαδικασία που ακολουθήθηκε, καθώς και τα προβλήματα και εμπόδια που προέκυψαν αλλά και οι ιδέες που οδήγησαν βήμα-βήμα, μέχρι την διαμόρφωση της τελικής προσομοίωσης της ΔΕ. Επίσης, παρουσιάζεται εκτενώς η μεθοδολογία της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων από τα αρχεία εξόδου, έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα με τα πειράματα στο ΕΒΟΙΑ, καθώς και η μεταξύ τους σύγκριση.

¹ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας

Στο 7ο Κεφάλαιο παρατίθενται οι τελικές προσομοιώσεις της παρούσας ΔΕ, καθώς και οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις αυτές. Επιπλέον, μελετάται η επίδραση των δεδομένων των προσομοιώσεων στην ταχύτητα και το χρόνο εκτέλεσής τους, αλλά και στα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν. Επιπλέον μελετάται το ενεργειακό φάσμα κάθε προσομοίωσης και η ανάλυσή του. Τέλος, γίνεται η τελική σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων στο ΕΒΟΙΑ και η επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

Το 8ο Κεφάλαιο περιέχει τη σύνοψη της ΔΕ καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα τελικά αποτελέσματα και τη σύγκριση των προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα πειράματα στο ΕΒΟΙΑ. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνονται ιδέες και προτάσεις για την μελλοντική επέκταση και συνέχιση της εργασίας.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε και μία σειρά από παραρτήματα με επιπλέον θεωρητικά στοιχεία και αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εργαστήρια Δοσιμετρίας: Ακτινοπροστασία και Βαθμονόμηση

2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αναλύει εκτενώς τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) και το Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Μέτρησης Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ) στον τομέα της ακτινοπροστασίας. Εστιάζοντας στα Υποπρότυπα Εργαστήρια Βαθμονόμησης (Secondary Standards Dosimetry Laboratories, SSDL)², αναδεικνύεται η σημασία τους ως κρίσιμοι παράγοντες για τη διασφάλιση της ακρίβειας στις μετρήσεις ακτινοβολίας. Η παρουσίαση του υποπρότυπου εξοπλισμού και της διαδικασίας βαθμονόμησης στον τομέα της ακτινοπροστασίας προσφέρουν εις βάθος κατανόηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη διασφάλιση της ακρίβειας στις μετρήσεις. Στόχος του κεφαλαίου είναι η ανάδειξη της σημασίας και του σκοπού της παρούσας ΔΕ.

2.1.1 Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) αποτελεί τον αρμόδιο ρυθμιστικό φορέα για τον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας, ακτινοπροστασίας, ραδιολογικής και πυρηνικής ασφάλειας στην Ελλάδα. Αποστολή της ΕΕΑΕ είναι η προστασία του πληθυσμού, των εργαζομένων και του περιβάλλοντος από τις ιοντίζουσες και τις τεχνητά παραγόμενες μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Αναλαμβάνει τον κανονιστικό έλεγχο, τη ρύθμιση, και την εποπτεία του συγκεκριμένου τομέα. Η ΕΕΑΕ λειτουργεί ως τεχνολογικός οργανισμός και έχει χαρακτήρα Νομικού Προσώπου Δημοσίου Δικαίου (ΝΠΔΔ), διαθέτοντας πλήρη αυτονομία στον διοικητικό και οικονομικό τομέα. Υπάγεται στον Υπουργό Ανάπτυξης και Επενδύσεων και υπόκειται στην επίβλεψή του.



Εικόνα 2.1: Οι εγκαταστάσεις της ΕΕΑΕ στο campus του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

² Βλέπε παράγραφο 2.2

Η συνεισφορά της ΕΕΑΕ στην εθνική οικονομία και το κοινωνικό σύνολο είναι σημαντική και πολυδιάστατη, καθώς η εργασία και το ρυθμιστικό έργο της επηρεάζουν διάφορους τομείς και φορείς στην κοινωνία. Ορισμένοι από τους ενδιαφερόμενους φορείς και φυσικά πρόσωπα που συμπεριλαμβάνονται στο πεδίο δράσης της ΕΕΑΕ περιλαμβάνουν επαγγελματίες που εκτίθενται σε ακτινοβολίες, ιατρούς που εκτίθενται σε ακτινοβολίες, επιχειρήσεις και εταιρείες, φορείς τοπικής αυτοδιοίκησης, φορείς εκπαίδευσης, φορείς προστασίας του περιβάλλοντος και δημόσιας υγείας, καθώς και πρεσβείες και μόνιμες Αντιπροσωπείες.

Οι επαγγελματίες που εκτίθενται σε ακτινοβολίες, όπως οι εργαζόμενοι στην ιατρική και τη βιομηχανία, αποτελούν σημαντικό κομμάτι της πληθυσμιακής ομάδας ενδιαφέροντος. Ειδικά οι ιατροί οι οποίοι εκτελούν ιατρικές εξετάσεις διάγνωσης και θεραπείας χρησιμοποιώντας ακτινοβολία υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της ΕΕΑΕ. Παράλληλα, οι επιχειρήσεις και εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως η βιομηχανία, το εμπόριο και οι υπηρεσίες, υπόκεινται στη ρύθμιση και τον έλεγχο της ακτινοπροστασίας και της πυρηνικής ασφάλειας. Επίσης, οι φορείς τοπικής αυτοδιοίκησης έχουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή των κανονισμών ασφαλείας σε τοπικό επίπεδο, και εποπτεύονται από την ΕΕΑΕ. Σε ό,τι αφορά τους φορείς προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας, η συνεργασία της ΕΕΑΕ μαζί τους αποτελεί σημαντικό μέρος του έργου της για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Τέλος, η συνεργασία και ανταλλαγή πληροφοριών με διεθνείς οργανισμούς και αντιπροσωπείες αποτελεί σημαντική διεθνή διάσταση του έργου της ΕΕΑΕ σε θέματα ασφαλείας και ραδιολογικής ακτινοπροστασίας [1].

2.1.2 Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ)

Το Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ), της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), είναι το εθνικό εργαστήριο βαθμονόμησης οργάνων ιοντιζουσών ακτινοβολιών και στις εγκαταστάσεις του πραγματοποιήθηκε το πειραματικό μέρος της παρούσας ΔΕ.

Το ΕΒΟΙΑ είναι ένα υποπρότυπο εργαστήριο που έχει αναπτύξει και διατηρεί υποπρότυπα μεγέθη (Gy , Sv , $\frac{C}{kg}$) ιοντιζουσών ακτινοβολιών (γ , X και β) και διενεργεί βαθμονομήσεις οργάνων μέτρησης ακτινοβολιών σε: Air Kerma, Απορροφούμενη Δόση, Ατομικό Ισοδύναμο Δόσης $H_p(10)$ και $H_p(0,07)$, Περιβαλλοντικό Ισοδύναμο Δόσης $H^*(10)$ και Έκθεση στα πεδία της ακτινοθεραπείας, διαγνωστικής ακτινολογίας, μαστογραφίας, ακτινοπροστασίας και της ατομικής δοσιμέτρησης εργαζομένων. Τα δοσιμετρικά μεγέθη που έχουν αναπτυχθεί στο ΕΒΟΙΑ είναι [2]:

1. Απορροφούμενη Δόση στο νερό (Gy) και ρυθμός Απορροφούμενης Δόσης στο νερό ($Gy s^{-1}$) από γ -ακτινοβολία
2. Απορροφούμενη Δόση στο νερό (Gy) και ρυθμός Δόσης στο νερό ($Gy s^{-1}$) από ηλεκτρόνια
3. Air Kerma (Gy) και ρυθμός Air Kerma ($Gy s^{-1}$) από γ και X ακτινοβολία
4. Έκθεση ($C kg^{-1}$ και R) και ρυθμός Έκθεσης $C kg^{-1} s^{-1}$ και $R s^{-1}$) από X ακτινοβολία
5. Γινόμενο Δόσης Επιφάνειας ($Gy mm^2$) από X -ακτινοβολία
6. Γινόμενο Δόσης Μήκους ($Gy mm$) από X ακτινοβολία
7. Περιβαλλοντική Ισοδύναμη Δόσης $H^*(10)$ (Sv) και Ρυθμός Περιβαλλοντικής Ισοδύναμης Δόσης ($Sv hr^{-1}$) από γ - και X -ακτινοβολία
8. Ατομικό Ισοδύναμο Δόσης $H_p(10)$ (Sv) και $H_p(0,07)$ (Sv)

9. Παράμετροι λειτουργίας ακτινολογικών συστημάτων: Υψηλή τάση λυχνίας ακτίνων-Χ (kV), φορτίο (mAs) και ρεύμα (mA) λυχνίας ακτίνων-Χ, καθώς και χρόνος έκθεσης-ενεργοποίησης (ms) λυχνίας ακτίνων-Χ.



Εικόνα 2.2: Ο χώρος βαθμονόμησης οργάνων στο Εργαστήριο ΕΒΟΙΑ [1]

Οι παρεχόμενες υπηρεσίες του ΕΒΟΙΑ έχουν διαπιστευτεί σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17025 από το ΕΣΥΔ (Εθνικό Συμβούλιο Διαπίστευσης). Το σύστημα ποιότητας που εφαρμόζεται στο Εργαστήριο Βαθμονόμησης εξασφαλίζει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δοσιμετρικών μεγεθών και μεθόδων που παρέχονται. Τα πεδία διαπίστευσης καλύπτουν όλα τα πεδία διακριβώσεων:

- ακτινοθεραπευτικές εφαρμογές
- εφαρμογές διαγνωστικής ακτινολογίας
- ατομική δοσιμέτρηση
- ακτινοπροστασία

Για την ανάπτυξη και διατήρηση των υπο-πρότυπων δοσιμετρικών μεγεθών, χρησιμοποιούνται όργανα αναφοράς (reference instruments-transfer instruments) που διακρίνονται για την υψηλή τους ακρίβεια και ποιότητα. Τα όργανα αυτά υπόκεινται σε περιοδική βαθμονόμηση στα πρότυπα εργαστήρια (primary laboratories) : BIPM (Bureau International des Poids et Mesures, Γαλλία), PTB (Physikalisch-Technische-Bundesanstalt, Γερμανία) [2].

Στη συνέχεια, το ΕΒΟΙΑ, με τη χρήση διαδικασιών υψηλής ακρίβειας και ποιότητας, διασφαλίζει ότι η ακρίβεια των πρότυπων εργαστηρίων μεταφέρεται στους χρήστες μέσω της ιχνηλασιμότητας των δοσιμετρικών μεγεθών, δηλαδή της δυνατότητας παρακολούθησης της ακρίβειάς τους από το αρχικό πρότυπο έως τον χρήστη.

2.1.3 Σύντομη αναδρομή στην ιστορία του ΕΒΟΙΑ

Το ΕΒΟΙΑ άρχισε να δημιουργείται από το 1997 με την υλοποίηση δύο προγραμμάτων. Το πρώτο πρόγραμμα ήταν το τριετές πρόγραμμα της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) με τίτλο "Εκσυγχρονισμός Εργαστηρίου Ελέγχων και Αδειών και Εργαστηρίου Δοσιμέτρησης Προσωπικού". Το πρόγραμμα χρηματοδοτήθηκε με περίπου 195 εκατομμύρια δραχμές³ και διήρκεσε από το 1997 έως το 2000. Το δεύτερο πρόγραμμα ήταν το τριετές πρόγραμμα του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) με τίτλο "Establishment of the National Calibration Laboratory for Ionizing Radiation" GRE/1/037, το οποίο χρηματοδοτήθηκε με περίπου 290.000 δολάρια ΗΠΑ και διήρκεσε από το 1999 έως το 2000. Το ΕΒΟΙΑ ξεκίνησε να λειτουργεί τον Απρίλιο του 2000 και άρχισε να παρέχει υπηρεσίες σε τρίτους από τον Αύγουστο της ίδιας χρονιάς [1].

2.1.4 Σκοπός του ΕΒΟΙΑ

Ο κύριος σκοπός και έργο του Εργαστηρίου Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ) περιλαμβάνει τα εξής [2]:

Ανάπτυξη και Διατήρηση Προτύπων: Το ΕΒΟΙΑ ως εθνικό εργαστήριο αναπτύσσει και διατηρεί τα υποπρότυπα μεγέθη δοσιμετρίας και τις υποπρότυπες μεθόδους μέτρησης ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Ιχνηλασιμότητα των Μετρήσεων: Το ΕΒΟΙΑ διασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων δοσιμετρικών μεγεθών που διενεργούν οι χρήστες οργάνων μέτρησης ιοντιζουσών ακτινοβολιών σε πρότυπα μεγέθη δοσιμετρίας (primary standards). Επιπλέον, γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των διεθνών προτύπων εργαστηρίων δοσιμετρίας (primary laboratories) και των τελικών χρηστών (end users), δηλαδή των εργαστηρίων που κάνουν χρήση ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Αυτό εξασφαλίζει την αξιοπιστία και τη συγκρισιμότητα των μετρήσεων.

Διακρίβωση, Βαθμονόμηση και Έλεγχος Οργάνων Μέτρησης: Το ΕΒΟΙΑ διακριβώνει, βαθμονομεί και ελέγχει όργανα μέτρησης ιοντιζουσών ακτινοβολιών, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια των μετρήσεων σε διάφορους τομείς.

Βελτίωση της Ακρίβειας και της Αξιοπιστίας: Το ΕΒΟΙΑ συμβάλλει στη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων δοσιμετρικών μεγεθών σε διάφορα εργαστήρια ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Πρώθηση της Ομογενοποίησης και Συμβατότητας: Το ΕΒΟΙΑ εργάζεται για την πρώθηση μεθόδων δοσιμετρίας που εξασφαλίζουν την ομογενοποίηση και τη συμβατότητα των μετρήσεων μεταξύ των χρηστών.

Πληροφόρηση, Διάχυση Γνώσης και Τεχνογνωσίας: Το ΕΒΟΙΑ συμβάλλει στην πληροφόρηση, διάχυση και ανταλλαγή γνώσης και τεχνογνωσίας στον τομέα της μετρολογίας και δοσιμετρίας ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Υποστήριξη της ΕΕΑΕ: Το ΕΒΟΙΑ υποστηρίζει το έργο των άλλων τμημάτων της ΕΕΑΕ (ατομική δοσιμέτρηση εργαζομένων, μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος, εκπαίδευση κλπ). Αυτό συμβάλλει στη διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των μετρήσεων.

³ Περίπου 527.000 Ευρώ

Υποστήριξη Ιατρικών Εφαρμογών: Το ΕΒΟΙΑ δημιουργήθηκε για να ικανοποιήσει τις ανάγκες βαθμονόμησης των οργάνων μέτρησης ιοντιζουσών ακτινοβολιών που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ιατρικής, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούνται στους τομείς της ακτινοθεραπείας, της ακτινολογίας, της πυρηνικής ιατρικής, της βραχυθεραπείας και άλλων εφαρμογών. Οι μετρήσεις αυτές είναι κρίσιμες για την ασφάλεια και την ακρίβεια των ιατρικών εφαρμογών.

Συμμόρφωση με Εθνικούς και Διεθνείς Κανονισμούς: Η δημιουργία του ΕΒΟΙΑ προέκυψε από την ανάγκη συμμόρφωσης με Ευρωπαϊκές Οδηγίες (96/29 και 97/43) και την Ελληνική Νομοθεσία που απαιτούν τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για μετρήσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών.

Συνολικά, το ΕΒΟΙΑ αποτελεί ένα κρίσιμο μέρος της υποδομής μετρολογίας και δοσιμετρίας ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην Ελλάδα, παρέχοντας υπηρεσίες υψηλής ποιότητας και εξυπηρετώντας κρίσιμους τομείς, συμβάλλοντας στην προστασία της υγείας και την ασφάλεια του κοινού.

2.2 Υποπρότυπα Εργαστήρια Δοσιμετρίας (SSDL)

Το ΕΒΟΙΑ ανήκει στην κατηγορία των υποπρότυπων εργαστηρίων δοσιμετρίας (Secondary Standard Dosimetry Laboratories, SSDL). Τα SSDL είναι τα εργαστήρια βαθμονόμησης που αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ των πρότυπων εργαστηρίων βαθμονόμησης, τα οποία διατηρούν τα πρότυπα μεγέθη σε διεθνές επίπεδο, και των υποπρότυπων μεγεθών ακτινοπροστασίας σε εθνικό ή τοπικό επίπεδο, και κατά συνέπεια των τελικών χρηστών των οργάνων. Ένα SSDL είναι εξοπλισμένο με υποπρότυπα όργανα τα οποία είναι ιχνηλάσιμα στα πρωτεύοντα πρότυπα των εργαστηρίων που συμμετέχουν στο διεθνές σύστημα μετρήσεων (Πρωτεύοντα Πρότυπα Εργαστήρια Δοσιμετρίας (Primary Standards Dosimetry Laboratories, PSDLs) και το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (BIPM)) [3].

Η ανάγκη για διεθνή ιχνηλασιμότητα στις μετρήσεις δόσης ακτινοβολίας έχει αναγνωριστεί από τις αρχές της δεκαετίας του '60, όταν αναγνωρίστηκε η έντονη ανάγκη για υψηλή δοσιμετρική ακρίβεια, ιδίως στη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει ο ασθενής. Ακόμη και στον τομέα της διάγνωσης, όπου η αβεβαιότητα στη δοσιμετρία μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της θεραπείας, η σωστή ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων με καθορισμένο επίπεδο αβεβαιότητας είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή ανεπιθύμητης έκθεσης σε ακτινοβολία.

2.2.1 Το δίκτυο SSDL των ΙΑΕΑ/WHO

Το ΕΒΟΙΑ ανήκει στο δίκτυο SSDL των ΙΑΕΑ/WHO⁴. Το 1976, με τον σχηματισμό του Δικτύου SSDL των ΙΑΕΑ/WHO ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για τη δημιουργία ενός φόρουμ στο οποίο τα εθνικά SSDL θα μπορούσαν να πραγματοποιούν αυτές διασυγκρίσεις και να ενισχύσουν έτσι τη συνοχή της δοσιμετρίας ακτινοβολίας παγκοσμίως. Το Δίκτυο SSDL των ΙΑΕΑ/WHO είναι μια ένωση εθνικών SSDL που συμφωνούν να συνεργαστούν για την προώθηση των στόχων του εν λόγω δικτύου υπό διεθνή αιγίδα. Οι στόχοι του είναι [3]:

⁴ ΙΑΕΑ (Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας, ΔΟΑΕ), WHO (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, ΠΟΥ)

1. Βελτίωση της Δοσιμετρικής Ακρίβειας: Το Δίκτυο έχει ως στόχο τη συνεχή βελτίωση της ακρίβειας στις μετρήσεις δόσεων, ιδίως στην επεξεργασία ακτινοβολιών και την ακτινοπροστασία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη στήριξη κέντρων και εργαστηρίων για τη μεταφορά προτύπων ακτινοβολίας και τη δημιουργία και διανομή γνώσεων στην εφαρμοσμένη δοσιμετρία.
2. Προώθηση Ανταλλαγής Εμπειριών: Το Δίκτυο ενθαρρύνει τη συνεχή ανταλλαγή εμπειριών μεταξύ των μελών και των συνδεδεμένων μελών, προσφέροντας αμοιβαία υποστήριξη όπου χρειάζεται.
3. Δημιουργία Δεσμών με το Διεθνές Σύστημα Μετρήσεων: Το Δίκτυο προσπαθεί να δημιουργήσει και να διευκολύνει τους δεσμούς μεταξύ των μελών του και με το διεθνές σύστημα μετρήσεων ακτινοβολίας, μέσω των Primary Standards Dosimetry Laboratories (PSDL).
4. Προώθηση Συμβατότητας Μεθόδων Δοσιμετρίας: Το Δίκτυο προσπαθεί να προωθήσει τη συμβατότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση και την εκτέλεση της δοσιμετρίας, με στόχο την επίτευξη ομοιομορφίας των μετρήσεων σε όλο τον κόσμο.

2.2.2 SSDL και μετρολογία

Η πρωταρχική αποστολή ενός SSDL είναι η παροχή υπηρεσιών στον τομέα της μετρολογίας και αποτελεί ουσιαστικό σύνδεσμο με τα πρότυπα εργαστήρια. Τα υποπρότυπα δοσιμετρικά μεγέθη που διατηρεί ένα SSDL μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να αποτελούν εθνικά πρότυπα μιας χώρας. Συχνά, το SSDL αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου οργανισμού μετρολογίας. Οι λειτουργίες και το καθεστώς του SSDL στον τομέα της μετρολογίας καθορίζονται από το κάθε κράτος. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η αναγνώριση και υποστήριξη από τις αρμόδιες εθνικές αρχές για την καθιέρωση ενός SSDL ως εθνικό εργαστήριο. Η υποστήριξη αυτή αποτελεί προϋπόθεση για την κατοχή πλήρους ιδιότητας μέλους στο δίκτυο SSDL. Το 2003 το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM) ανέθεσε τη μετρολογία των ιοντιζουσών ακτινοβολιών- γ , - X και - β στο εργαστήριο βαθμονόμησης της ΕΕΑΕ. Ως εκ τούτου, το ΕΒΟΙΑ αποτελεί συνεργαζόμενο εργαστήριο του EIM και κατέχει τα εθνικά υποπρότυπα μεγέθη και από το 2000 το εργαστήριο εκπροσωπεί την Ελλάδα στο Ευρωπαϊκό Σύστημα Μετρολογίας (EURAMET) στον τομέα των ιοντιζουσών ακτινοβολιών [3].

2.3 Βαθμονομήσεις στο πεδίο της Ακτινοπροστασίας

Στο πλαίσιο αυτής της ενότητας, θα εξεταστούν οι απαιτήσεις ενός εργαστηρίου βαθμονόμησης στον τομέα της ακτινοπροστασίας, καθώς και οι τεχνικές που είναι αναγκαίες για την υλοποίησή τους. Η διεξοδική ανάλυση αυτών των απαιτήσεων και τεχνικών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας στις μετρήσεις ακτινοβολίας.

2.3.1 Μεγέθη, μονάδες και σύμβολα

Αρχικά, για την καλύτερη κατανόηση όσων ακολουθούν, παρατίθεται ένας κατάλογος ορισμών θεμελιωδών μεγεθών που σχετίζονται με τη βαθμονόμηση των οργάνων στα πλαίσια της ακτινοπροστασίας. Οι περισσότεροι από τους ορισμούς αυτούς έχουν ληφθεί από την έκθεση 11 της ICRU [4]:

1. Η πυκνότητα σωματιδίων (Φ) είναι το πηλίκο ΔN προς Δa , όπου ΔN είναι ο αριθμός των σωματιδίων που εισέρχονται σε μια σφαίρα με εμβαδόν διατομής Δa .
2. Ο ρυθμός ροής ή πυκνότητα ροής (ϕ) = $\Delta\Phi/\Delta t$ όπου $\Delta\Phi$ είναι η ροή σωματιδίων σε χρόνο Δt .
3. Η έκθεση (X) = $\Delta Q/\Delta m$, όπου ΔQ είναι το άθροισμα των ηλεκτρικών φορτίων όλων των ιόντων ενός προσήμου που παράγονται στον αέρα, όταν όλα τα ηλεκτρόνια (και ποζιτρόνια εφόσον υπάρχουν) που απελευθερώνονται από φωτόνια σε ένα στοιχείο όγκου του αέρα μάζας Δm σταματούν πλήρως στον αέρα. Η ειδική μονάδα έκθεσης, για την οποία η πλειονότητα των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας- γ έχει σχεδιαστεί για να μετράει, είναι το roentgen (R).

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.1)$$

4. Ρυθμός έκθεσης είναι ίσος με $\Delta X/\Delta t$, όπου ΔX είναι η έκθεση σε χρόνο Δt .
5. Η μέση ενέργεια (W) ανά σχηματιζόμενο ζεύγος ιόντων σε ένα αέριο είναι ίση με E/N , όπου N είναι ο μέσος αριθμός ζευγών ιόντων που σχηματίζονται όταν ένα σωματίδιο αρχικής κινητικής ενέργειας E σταματήσει πλήρως από το αέριο.
6. Η απορροφούμενη δόση (D) = $\Delta E_D/\Delta m$, όπου ΔE_D είναι η ενέργεια που προσδίδεται από την ιοντίζουσα ακτινοβολία στην ύλη ενός στοιχείου όγκου και Δm είναι η μάζα της ύλης στο στοιχείο όγκου. Η ειδική μονάδα της απορροφούμενης δόσης είναι το rad. Στο σύστημα SI η μονάδα είναι το 1Gray (Gy).

$$1 \text{ rad} = 1/100 \text{ J/kg} = 1/100 \text{ Gy} \quad (2.2)$$

7. Ο απορροφούμενος ρυθμός δόσης είναι $\Delta D/\Delta t$, όπου ΔD είναι η ενέργεια που απορροφάται σε χρόνο Δt .
8. Η ισοδύναμη δόση (ΔE) σε rems ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης D , του συντελεστή ποιότητας (QF), του συντελεστή κατανομής της απορροφούμενης δόσης (DF) και άλλων απαραίτητων τροποποιητικών συντελεστών

$$\Delta E = D \cdot (QF) \cdot (DF) \quad (2.3)$$

9. Η ειδική σταθερά των ακτίνων γάμμα (Γ) ενός ραδιονουκλιδίου που εκπέμπει γ -ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση: $(I^2 \cdot (\Delta X/\Delta t))/A$, όπου $\Delta X/\Delta t$ είναι ο ρυθμός έκθεσης σε απόσταση I από το ραδιονουκλίδιο (θεωρείται σημειακή πηγή) το οποίο έχει ενεργότητα A . Η ειδική σταθερά Γ έχει μονάδες $\text{R} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Ci}^{-1}$
10. Η διαφορά δυναμικού σε kilovolts μιας γεννήτριας ακτίνων- X εκφράζεται από το μέγεθος kV_{cp} .
11. Ο συντελεστής ποιότητας QF συνήθως ορίζεται ως συνάρτηση του LET⁵.
12. Το πάχος ενός υλικού που είναι απαραίτητο για να προκληθεί μείωση κατά 50% του αρχικού ρυθμού έκθεσης ορίζεται ως HVT (Half Value Thickness).
13. Η αποτελεσματική ενέργεια (effective energy) μιας δέσμης ακτίνων- X με συγκεκριμένο HVT ορίζεται ως η ενέργεια μιας μονοενεργειακής δέσμης που έχει το ίδιο HVT.
14. Η ενεργότητα (A) μιας ποσότητας ραδιενεργού ισοτόπου εκφράζεται ως ο λόγος $\Delta N/\Delta t$ του πλήθους των ραδιενεργών διασπάσεων ΔN σε χρόνο Δt .

⁵ Linear Energy Transfer

2.3.2 Σκοπός της βαθμονόμησης

Οι κύριοι στόχοι της βαθμονόμησης ενός οργάνου είναι οι ακόλουθοι [5]:

- Να εξασφαλιστεί ότι ένα όργανο λειτουργεί σωστά,
- Να προσδιοριστεί ο συντελεστής βαθμονόμησης του οργάνου, ώστε να διασφαλίζεται η λειτουργία του με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια,
- Να μελετηθεί η ενεργειακή απόκριση του οργάνου, η γωνιακή απόκριση, η γραμμικότητα της απόκρισής του και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία και την ακρίβειά του,
- Να παρέχει καθοδήγηση στους χρήστες των οργάνων σχετικά με τα όργανα που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις τους και να τους ενημερώνει για τυχόν σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που είναι σημαντικό να γνωρίζουν και να λαμβάνουν υπόψιν τους κατά τη χρήση του οργάνου.

2.3.3 Διακρίβωση σε εφαρμογές ακτινοπροστασίας

Η βαθμονόμηση ενός οργάνου γίνεται κατά κανόνα από τον κατασκευαστή του οργάνου. Όμως, με το χρόνο τη χρήση και ενδεχομένως άλλους παράγοντες μπορεί να αλλοιωθεί η λειτουργία του οργάνου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει κατά τακτά χρονικά διαστήματα να επαναλαμβάνεται η διαδικασία της βαθμονόμησης του οργάνου, μία διαδικασία που ονομάζεται διακρίβωση. Η παρούσα ΔΕ εστιάζει στη διακρίβωση οργάνων στο πεδίο της ακτινοπροστασίας και συγκεκριμένα στη διακρίβωση οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας χώρου.

Η διακρίβωση δοσιμέτρων και φορητών οργάνων μέτρησης και ανίχνευσης γ- και X- ακτινοβολίας γίνεται στα παρακάτω δοσιμετρικά μεγέθη [2]:

- Air Kerma, (Gy), Ρυθμός Air Kerma σε ($\text{Gy}\cdot\text{hr}^{-1}$).
- Περιβαλλοντική Ισοδύναμη Δόση $H^*(10)$ σε (Sv) ή Ρυθμό Περιβαλλοντικής Ισοδύναμης $H^*(10)$ ($\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$).

Η ανηγμένη αβεβαιότητα διακρίβωσης για τα φορητά όργανα μέτρησης υπολογίζεται σε 3,3% για μετρήσεις Air Kerma και 5,2% για μετρήσεις $H^*(10)$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($k=2$).

Οι Πηγές Ακτινοβόλησης που ήταν διαθέσιμες για το σκοπό αυτό ήταν:

- Πηγή ^{137}Cs (STS - OB6) ενεργότητας 740 GBq με ημερομηνία αναφοράς 02/1999),
- Πανοραμικός Ακτινοβολητής (STS - OB34) που διαθέτει 3 πηγές ^{60}Co (3,7, 25.9 & 37MBq) & 4 πηγές ^{137}Cs (7,4, 74, 740, 7400 MBq) με ημερομηνία αναφοράς 02/1999, και
- Μονάδα παραγωγής ακτίνων-X PANTAK (υψηλή τάση έως 225 kVp, άνοδος W, Υψηλής Συχνότητας) [1] .

Με την λυχνία ακτίνων-X PANTAK έχουν δημιουργηθεί μία σειρά από ποιότητες ακτινοβολιών στενού φάσματος (ISO Narrow κατά ISO 4037:2019), όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1.

Για τις μετρήσεις που γίνονται, ως υπο-πρότυπος θάλαμος ιονισμού χρησιμοποιείται ο PTW 32001 LS01, σφαιρικού τύπου, όγκου 1l, και το ηλεκτρόμετρο PTW UNIDOS. Η ιχνηλασιμότητα του θαλάμου είναι στο PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Γερμανία).

Για κάθε κλίμακα του οργάνου που δαικριβώνεται επιλέγονται τρία σημεία ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος της κλίμακας. Παρέχονται οι συντελεστές βαθμονόμησης και οι καμπύλες βαθμονόμησης ανά κλίμακα. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχεται η μαθηματική σχέση που ανάγει την ένδειξη του

οργάνου σε $H^*(10)$ ή K_{air} ανά κλίμακα. Η διακρίβωση γίνεται στην ενέργεια του ^{137}Cs (ISO 4037). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της ενεργειακής εξάρτησης (στο στην περιοχή 40–1250 keV) καθώς και της γωνιακής εξάρτησης (στο εύρος 0 – 360°) του οργάνου [1].

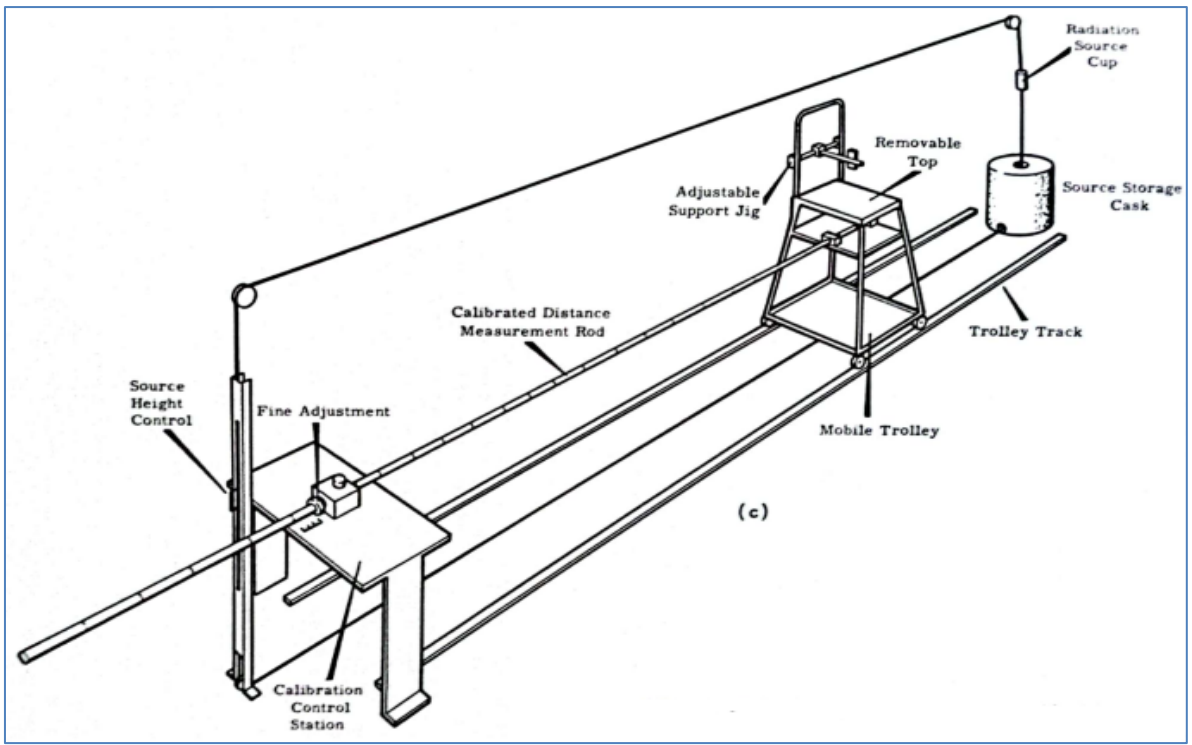
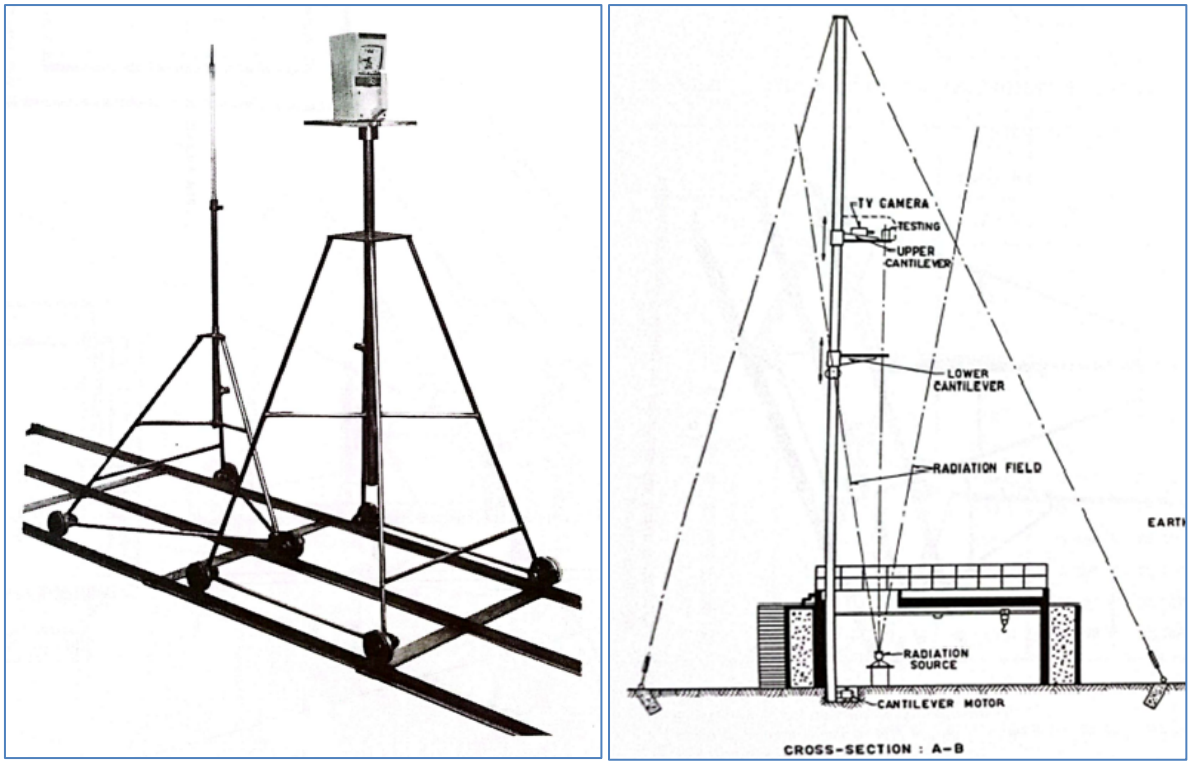
Πίνακας 2.1: Ποιότητες ακτινοβολιών στενού φάσματος, ISO Narrow, της μηχανής PANTAK [2]

Ποιότητα ακτινοβολίας	Υψηλή Τάση	HVL
N-30	30 kV	1,14 mm Al
N-40	41 kV	0,08 mm Cu
N-60	60 kV	0,24 mm Cu
N-80	80 kV	0,58 mm Cu
N-100	100 kV	1,11 mm Cu
N-120	120 kV	1,71 mm Cu
N-150	145 kV	2,36 mm Cu

2.3.4 Ακτινοβολία γάμμα

Οι πηγές ακτινοβολίας άνω των 300 keV είναι η καλύτερη μορφή πηγής ακτινοβολίας για βαθμονόμηση. Η ιδανική πηγή θα πρέπει να εκπέμπει φωτόνια μίας μόνο ενέργειας και να έχει επαρκώς μεγάλο χρόνο ημιζωής. Κατά την προμήθεια της πηγής θα πρέπει να συνοδεύεται από πιστοποιητικό στο οποίο να αναγράφεται η ενεργότητα της σε ορισμένη ημερομηνία αναφοράς, οι υπάρχουσες ενδεχομένως προσμίξεις και ο ρυθμός δόσης σε ορισμένη απόσταση από την πηγή. Εάν η ειδική σταθερά των ακτίνων γάμμα (Γ) πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ρυθμού έκθεσης σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή, τότε οι διαστάσεις της πηγής πρέπει να είναι μικρές. Η πηγή θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιείται υπό παρόμοιες συνθήκες με εκείνες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της σταθεράς (Γ) - αποστάσεις 30 έως 100 cm για μικρούς ανιχνευτές και ισχύ του νόμου αντιστρόφου τετραγώνου. Αυτή η τελευταία απαίτηση μπορεί να ικανοποιηθεί ελαχιστοποιώντας τη σκέδαση από τους τοίχους ή από το έδαφος [4]. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες βάσεις και διατάξεις στήριξης της πηγής, αλλά και του προς βαθμονόμηση οργάνου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, αρχικά ελέγχεται η γραμμικότητα ενός οργάνου με μικρές διαστάσεις ανιχνευτή και μικρή ενεργειακή εξάρτηση. Με χρήση ραδιενεργών πηγών του ίδιου ισότοπου αλλά διαφορετικής ενεργότητας μελετάται η γραμμικότητα των ενδείξεων του οργάνου διατηρώντας την απόσταση πηγής-οργάνου σταθερή. Εάν το όργανο έχει γραμμική απόκριση με τον ρυθμό δόσης, οι ενδείξεις του θα είναι ανάλογες με την ενεργότητα της πηγής. Στην συνέχεια επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις χρησιμοποιώντας μία μόνο πηγή και μεταβάλλοντας την απόσταση του οργάνου από την πηγή. Εφόσον ισχύει ο νόμος αντιστρόφου τετραγώνου, η ένδειξη του οργάνου μετά τη διόρθωση της μη γραμμικότητας θα πρέπει να είναι ανάλογη με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης. Σημειώνονται οι αποστάσεις στις οποίες επαληθεύεται ο νόμος, θεσπίζοντας έτσι τα εύρος αποστάσεων στις οποίες μπορούν να πραγματοποιούνται οι βαθμονομήσεις των οργάνων.



Εικόνα 2.3: Βάσεις βαθμονόμησης και εξοπλισμός για συνήθη βαθμονόμηση γάμμα. (α) Φωτογραφία βάσης [4]

Στον Πίνακα 2.2 παρατίθεται κατάλογος πηγών ακτινοβολίας-γ που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους βαθμονομήσεις.

Πίνακας 2.2: Πηγές ακτίνων γάμμα κατάλληλες για βαθμονόμηση [4]

Ισότοπο	Effective energy (keV)	Χρόνος υποδιπλασιασμού	Σταθερά Γ σε (R·m ²)/(Ci·h)
¹²⁵ I	35	59.2 d	0.070
²⁴¹ Am	60	458 yr	0.0129
⁵⁷ Co	122	269 d	0.097
^{114m} In	192	50 d	0.042
²⁰³ Hg	279	47.1 d	0.119
¹⁹² Ir	300-600	74.3 d	0.44
¹⁹⁸ Au	412	2.7 d	0.231
¹³⁷ Cs	662	29.9 yr	0.323
⁶⁰ Co	1250	5.23 yr	1.30
²²⁶ Ra	180-2200	1608 yr	0.825 *
²⁴ Na	1380 και 2800	15 h	1.83

*με φίλτρο Pt πάχους 0.5mm, σε ισορροπία με τα βραχύβια θυγατρικά του

2.3.5 Δευτερογενή πρότυπα

Ως υποπρότυπα χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι θαλάμων ιονισμού, ο θάλαμος ιονισμού ελεύθερου αέρα (free in air ionization chamber) και ο θάλαμος ιονισμού κοιλότητας (cavity chamber). Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι παρουσιάζουν ενεργειακή απόκριση λιγότερο 10% στο εύρος ενεργειών που χρησιμοποιούνται στις βαθμονομήσεις του πεδίου ακτινοπροστασίας. Για ενέργειες μικρότερες από τα 50 keV πρέπει να χρησιμοποιείται είτε θάλαμος ιονισμού λεπτού τοιχώματος είτε θάλαμος ιονισμού ελεύθερου αέρα. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εφαρμόζονται διορθωτικοί συντελεστές για την πίεση, τη θερμοκρασία και την υγρασία, ώστε να γίνεται αναγωγή του συντελεστή βαθμονόμησης στην πίεση και την θερμοκρασία της βαθμονόμησης του υποπρωτύπου. Ο συντελεστής διόρθωσης πίεσης και θερμοκρασίας στους 20° C και 1 atm υπολογίζεται από την σχέση [4], η οποία εφαρμόστηκε από το ΕΒΟΙΑ:

$$f = 2.576 \cdot \left(\frac{273+t}{p}\right) \times F \quad (2.4)$$

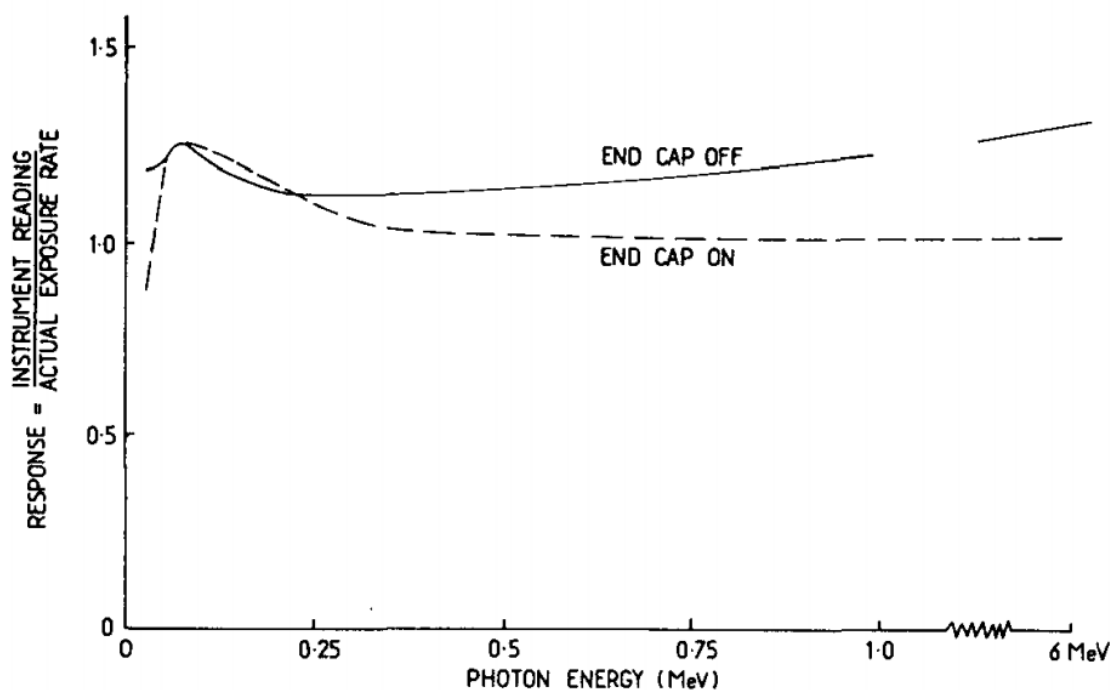
όπου:

f = Ο συντελεστής διόρθωσης πίεσης και θερμοκρασίας

t = Η θερμοκρασία σε °C

p = Η πίεση σε mm Hg

F = Ο συντελεστής διόρθωσης θαλάμου από το Bureau of Standards



Εικόνα 2.4: Τυπική καμπύλη απόκρισης μετρητή ρυθμού έκθεσης θαλάμου ιονισμού [4]

Σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα χαρακτηριστικά των θαλάμων ιονισμού.

2.3.6 Η διαδικασία ελέγχου των οργάνων

Η διαδικασία βαθμονόμησης ενός οργάνου συνίσταται συνοπτικά στα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά επιλέγονται οι συνδυασμοί ραδιενεργού πηγής-απόστασης που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε ο ρυθμός δόσης να αντιστοιχεί στον ρυθμό δόσης του οργάνου που βαθμονομείται.
2. Επιλέγονται τρία σημεία ελέγχου ανά κλίμακα λειτουργίας του οργάνου ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος της κλίμακας.
3. Γίνονται μετρήσεις με τον υποπρότυπο θάλαμο, στα επιλεγμένα σημεία ανά κλίμακα.
4. Μετράται η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα στο χώρο του πειράματος και οι μετρήσεις ανάγονται στην θερμοκρασία και την πίεση αναφοράς.
5. Με χρήση του συντελεστή βαθμονόμησης του υποπρότυπου οργάνου υπολογίζεται ο ρυθμός δόσης.
6. Το υπό βαθμονόμηση όργανο μέτρησης τοποθετείται στην ίδια ακριβώς θέση και καταγράφονται οι ενδείξεις του.
7. Ο συντελεστής βαθμονόμησης για κάθε ένα σημείο μετρησης του οργάνου προκύπτει ως το πηλίκο της μετρούμενης τιμής με τον υποπρότυπο θάλαμο- “πραγματική τιμή”- προς την ένδειξη του υπο βαθμονόμηση οργάνου “μετρούμενη τιμή” [6].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο πεδίο της πυρηνικής τεχνολογίας και της φυσικής των ακτινοβολιών, η βαθιά κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη είναι θεμελιώδης. Η κατανόηση αυτή αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για τις ασφαλείς, αποτελεσματικές και καινοτόμες εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας. Το 3^ο κεφάλαιο αποτελεί μία εκτενή αναφορά στις θεωρητικές βάσεις που στηρίζουν το πείραμα που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Αυτές αφορούν τις θεμελιώδεις αρχές των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ύλη, τα βασικά δοσιμετρικά μεγέθη που συναντάμε στο πεδίο της ακτινοπροστασίας, καθώς και τη λειτουργία των θαλάμων ιονισμού, όργανα μέτρησης ιοντιζουσών ακτινοβολιών που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε εφαρμογές ακτινοπροστασίας. Οι έννοιες αυτές είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή μέτρηση και τον έλεγχο των δόσεων ακτινοβολίας και αποτελούν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται το πείραμα που διεξήχθη στο ΕΒΟΙΑ της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας,.

3.1 Αλληλεπίδραση φωτονίων-ύλης

Σε αυτή την ενότητα ακολουθεί η ανάλυση της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη. Παρόλο που και τα άλλα είδη ακτινοβολίας αλληλεπιδρούν με την ύλη, τα φωτόνια έχουν κυρίαρχη σημασία στον τομέα της ακτινοπροστασίας, στα πλαίσια του οποίου εντάσσεται η παρούσα ΔΕ. Επιπλέον, είναι κρίσιμη και η αναφορά στον νόμο της εκθετικής εξασθένησης και την σχέση έντασης απόστασης, δύο φαινόμενα που συναντώνται και μελετώνται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος στο ΕΒΟΙΑ. Συνεπώς, η συγκεκριμένη ενότητα είναι απαραίτητη για την εισαγωγή και κατανόηση του αντικειμένου που μελετάται στην συνέχεια της εργασίας.

Οι φωτονιακές ακτινοβολίες περιλαμβάνουν τις ακτίνες-Χ και τις ακτίνες-γ. Οι ακτίνες-Χ και οι ακτίνες-γ αποτελούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και διαφέρουν κυρίως ως προς την προέλευσή τους. Οι ακτίνες-Χ προέρχονται από την επιβράδυνση ηλεκτρονίων μεγάλης ταχύτητας στο πεδίο του πυρήνα ή από την αποδιέγερση διεγερμένων ατόμων (χαρακτηριστικές ακτίνες-Χ). Αντίθετα, οι ακτίνες-γ προέρχονται από την αποδιέγερση διεγερμένων πυρήνων ή κατά το φαινόμενο της εξαΰλωσης [7].

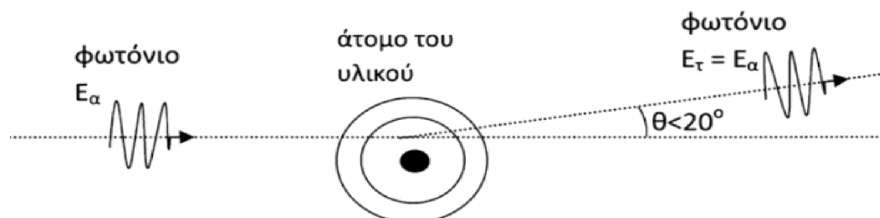
Η αλληλεπίδραση αυτών των φωτονίων με την ύλη εξαρτάται από την ενέργειά τους και το είδος του υλικού που διασχίζουν. Η ενέργεια της ακτινοβολίας μετριέται σε μονάδες keV (κιλο-ηλεκτρονιοβόλτ) ή MeV (μεγα-ηλεκτρονιοβόλτ)⁶. Τα φωτόνια με ενέργειες στην τάξη των keV χρησιμοποιούνται κυρίως στην ακτινοδιαγνωστική, ενώ εκείνα με ενέργειες στην τάξη των MeV χρησιμοποιούνται στην ακτινοθεραπεία.

Οι βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης φωτονίων-ύλης είναι: η ελαστική σκέδαση, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton και η δίδυμη γένεση. Το πώς και το κατά πόσον ένα φωτόνιο θα αλληλεπιδράσει με την ύλη είναι ένα στοχαστικό γεγονός, που εξαρτάται από πιθανότητες. Συνεπώς, ένα φωτόνιο μπορεί να αλληλεπιδράσει με το υλικό ή να μην αλληλεπιδράσει, και αυτό εξαρτάται από την ενέργειά του και το είδος του υλικού (Ατομικός Αριθμός Z) και την πυκνότητά του. Συνεπώς, η αλληλεπίδραση αυτή είναι πολύπλοκη και στοχαστική [8].

⁶ Η σχέση που συνδέει τις μονάδες είναι 1 MeV=1000 keV

3.1.1 Ελαστική σκέδαση

Σε μικρές ενέργειες των φωτονίων, ιδίως όταν αυτές είναι μικρότερες από 20 keV, παρουσιάζεται ένα σημαντικό φαινόμενο γνωστό ως ελαστική σκέδαση. Κατά την ελαστική σκέδαση, το φωτόνιο αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια του ατόμου, αλλά χωρίς να μεταφέρεται ενέργεια σε κάποιο από αυτά. Αυτό συμβαίνει επειδή η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετά χαμηλή, καθιστώντας αδύνατη την πρόκληση ιονισμού του ατόμου. Συνεπώς, η ενέργεια του φωτονίου διατηρείται, αλλά το φωτόνιο αλλάζει ελαφρώς τη διεύθυνσή του. Σε εφαρμογές ακτινολογίας, πυρηνικής ιατρικής και ακτινοθεραπείας, η πιθανότητα τα φωτόνια να αλληλεπιδράσουν με την ύλη μέσω ελαστικής σκέδασης είναι πολύ μικρή, λόγω των ενεργειών που χρησιμοποιούνται [9].



Εικόνα 3.1: Ελαστική Σκέδαση. Το φωτόνιο σκεδάζεται από το άτομο του υλικού αλλάζοντας τη διεύθυνση του κατά μικρή γωνία (έως και 20°) ενώ η τελική του ενέργεια E_τ διατηρείται ίση με την αρχική E_α [9]

3.1.2 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

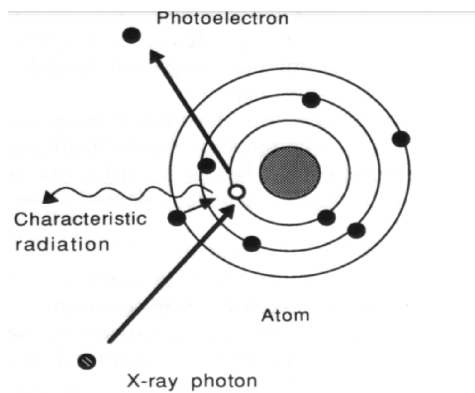
Σε χαμηλές ενέργειες φωτονίων (μικρότερες των 50 keV για νερό ή μαλακό ιστό) συναντάται κατά κύριο λόγο το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο [10]. Πρόκειται για ένα φαινόμενο κατά το οποίο το άτομο απορροφά εξ ολοκλήρου την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξαφανίζεται το φωτόνιο και παράλληλα να εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο, το οποίο ονομάζεται φωτοηλεκτρονιο. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει το φωτόνιο που αλληλεπιδρά με το άτομο να έχει ενέργεια υψηλότερη της ενέργειας σύνδεσης του ηλεκτρονίου που εκπέμπεται. Τότε το ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται με κινητική ενέργεια ίση με αυτή του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου, μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης αυτού. Η ενέργεια σύνδεσης εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του πυρήνα, καθώς και τη στοιβάδα στην οποία ανήκει το ηλεκτρόνιο και είναι στην περιοχή από μερικά eV έως $\sim 120\text{keV}$. Για τυπικές ενέργειες φωτονίων, το αποβαλλόμενο ηλεκτρόνιο συνήθως αποσπάται από την Κ στοιβάδα. Όταν ένα ηλεκτρόνιο χαμηλής στοιβάδας απελευθερώνεται, τη θέση του καλύπτει ένα άλλο ηλεκτρόνιο υψηλότερης στοιβάδας. Η νέα κενή θέση συμπληρώνεται από την επόμενη μετάπτωση εξωτερικού ηλεκτρονίου μικρότερης ενέργειας σύνδεσης και ούτω καθεξής. Αυτές οι ηλεκτρονιακές μεταπτώσεις συνοδεύονται με εκπομπή ενέργειας, η οποία μπορεί να έχει δύο μορφές, (α) μορφή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας-Χ ή (β) μορφή κινητικής ενέργειας εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων Auger. Τα ηλεκτρόνια Auger είναι ηλεκτρόνια που απορροφούν την χαρακτηριστική ακτινοβολία που εκπέμπεται και απελευθερώνονται από το άτομο, διαθέτοντας ενέργεια ίση με αυτή της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας, μειωμένης κατά την ενέργεια σύνδεσης της στοιβάδας που ανήκουν [8]. Στις περισσότερες περιπτώσεις – όχι όμως πάντα – η ακτινοβολία-Χ ή το ηλεκτρόνιο Auger αποδίδει την ενέργειά του τοπικά.

Συνολικά, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ενός φωτοηλεκτρονίου που διαθέτει κινητική ενέργεια τμήματος της ενέργειας του φωτονίου που προσπίπτει στο άτομο, καθώς και μία ή περισσότερες χαρακτηριστικές ακτίνες Χ. Στην περίπτωση όπου υπάρξει διαφυγή ακτίνων-Χ από το μέσο⁷, παρατηρείται το φαινόμενο που ονομάζεται διαφυγή ακτίνων-Χ, κατά το

⁷ Δηλαδή δεν αποδοθεί όλη η ενέργεια του αρχικού φωτονίου τοπικά.

οποίο η αποτιθέμενη ενέργεια στο μέσο είναι μειωμένη κατά την ενέργεια της ακτίνας-X που διέφυγε.

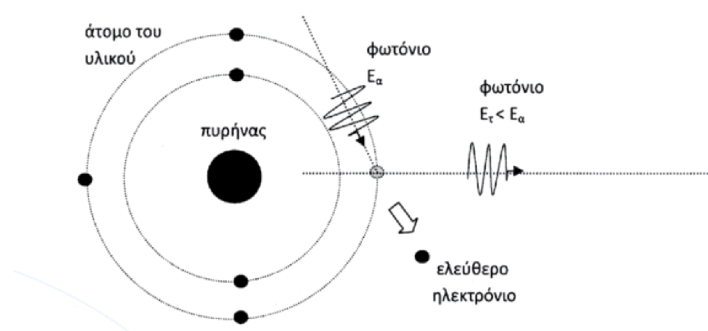
Συνεπώς, κατά την ολοκλήρωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, υπάρχει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και εκπέμπεται χαρακτηριστική ακτινοβολία. Το ελεύθερο ηλεκτρόνιο, έχοντας κινητική ενέργεια, συνεχίζει να αλληλεπιδρά με το υλικό προκαλώντας επιπλέον ιονισμούς. Το άτομο του υλικού πλέον είναι θετικά φορτισμένο, έχοντας χάσει ένα ηλεκτρόνιο [10].



Εικόνα 3.2: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φωτόνιο απορροφάται πλήρως από εσωτερικό ηλεκτρόνιο το οποίο ελευθερώνεται (φωτοηλεκτρονιο). Το κενό που άφησε το φωτοηλεκτρονιο καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνιο εξωτερικής στιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας. [10]

3.1.3 Σκέδαση Compton

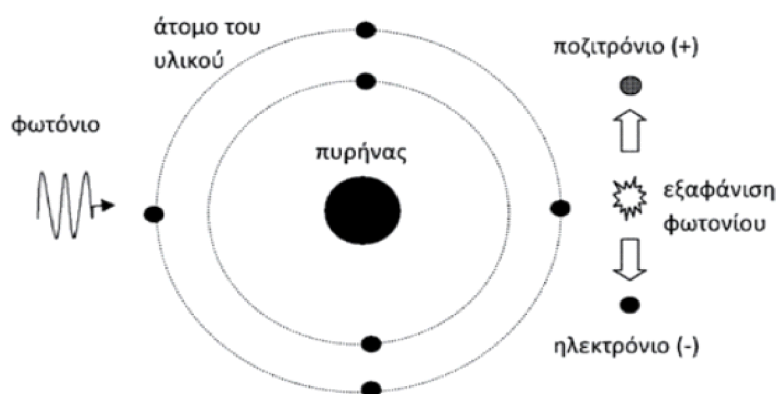
Για ενέργεια φωτονίου σχετικά υψηλή (άνω των 50 keV για νερό ή μαλακό ιστό) η πιθανότερη αλληλεπίδραση είναι το φαινόμενο Compton ή σκέδαση Compton. Κατά το φαινόμενο αυτό, το φωτόνιο έχοντας αρχική ενέργεια E_0 αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου, δίνοντας τμήμα της ενέργειάς του. Το ηλεκτρόνιο αυτό απελευθερώνεται από το άτομο, ενώ το φωτόνιο συνεχίζει με μικρότερη ενέργεια και αλλαγή της διεύθυνσής του (σκέδαση) [9]. Αν η γωνία αλλαγής της διεύθυνσης του είναι περί τις 180° τότε παρατηρείται το φαινόμενο της οπισθοσκέδασης. Κατά την ολοκλήρωση του φαινομένου Compton, υπάρχει ένα σκεδασμένο φωτόνιο ενέργειας μικρότερης της αρχικής και ένα ηλεκτρόνιο με το κινητική ενέργεια το υπόλοιπο ενέργειας του φωτονίου. Το άτομο του υλικού μετά από το φαινόμενο αυτό, χάνει ένα ηλεκτρόνιο, κι επομένως είναι θετικά φορτισμένο. Στην ακτινοδιάγνωση παρατηρείται συχνά το φαινόμενο Compton, λόγω της ενέργειας των φωτονίων που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση των ακτινοδιαγνωστικών εξετάσεων.



Εικόνα 3.3: Φαινόμενο Compton: Το φωτόνιο έχοντας αρχική ενέργεια E_a αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνιο της τελευταίας στιβάδας δίνοντας του μέρος της ενέργειάς του. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και ελευθερώνεται. Το φωτόνιο συνεχίζει με ενέργεια E_c μικρότερη της αρχικής του E_a και με αλλαγή της διεύθυνσης του. Μετά τη διαδικασία αυτή το άτομο είναι ιονισμένο αφού έχασε 1 ηλεκτρονίο. [7]

3.1.4 Δίδυμη Γένεση

Για ενέργεια φωτονίου μεγαλύτερη των 1022 keV, είναι δυνατό να παρατηρείται το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης, το οποίο λαμβάνει χώρα μεταξύ του φωτονίου και του πυρήνα του ατόμου. Αυτό γίνεται διότι απαιτείται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο συναντάται κοντά στον πυρήνα του ατόμου, λόγω των πρωτονίων του. Κατά τη δίδυμη γένεση, όταν το φωτόνιο αλληλεπιδρά με το άτομο, παρατηρείται η εξαφάνιση του φωτονίου. Ταυτόχρονα, εμφανίζεται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο, καθώς ένα τμήμα της ενέργειας του φωτονίου (1022 keV) μετατρέπεται σε μάζα, αυτή του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου. Το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο συνεχίζουν να κινούνται με κινητική ενέργεια ίση με το υπόλοιπο της ενέργειας του αρχικού φωτονίου και αποδίδουν στη την ενέργειά τους στο υλικό, μέσω διεγέρσεων και ιονισμών. Καθώς το ποζιτρόνιο δεν είναι σταθερό σωματίδιο, στο τέλος της τροχιάς του, όπου η κινητική του ενέργεια έχει μειωθεί σημαντικά συγκριτικά με τη θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων στο μέσο, το ποζιτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο του υλικού, και εξαφανίζονται, με ταυτόχρονη εμφάνιση δύο φωτονίων, τα οποία εκπέμπονται αντιδιαμετρικά και έχουν ενέργεια 511 keV το καθένα. Η ενέργεια και των δύο αυτών φωτονίων ισούται με την ενέργεια εξαύλωσης των δύο σωματιδίων (ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου) [8]. Σε αυτή τη περίπτωση επομένως, η μάζα του ποζιτρονίου και του ηλεκτρονίου, εν τέλει μετατρέπεται σε ενέργεια, αυτή των δύο φωτονίων. Ο χρόνος που συμβαίνουν οι παραπάνω αλληλεπιδράσεις είναι εξαιρετικά μικρός. Το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης, συναντώνται σε εφαρμογές ακτινοθεραπείας. Επισημαίνεται ότι στο φαινόμενο της εξαύλωσης βασίζεται και η μία κλασσική τεχνική της διάγνωσης της Πυρηνικής Ιατρικής, η Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων (PET).



Εικόνα 3.4: Δίδυμη γένεση. Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του ατόμου και εξαφανίζεται. Στη θέση του εμφανίζονται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο τα οποία κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. [9]

3.1.5 Πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αλληλεπίδραση είναι ένα τυχαίο γεγονός, για το οποίο γνωρίζουμε τη συνολική πιθανότητα να συμβεί ανά μονάδα μήκους διαδρομής, καθώς και τις επιμέρους πιθανότητες για κάθε είδος αλληλεπίδρασης από όσα αναλύθηκαν προηγουμένως. Όταν πρόκειται για την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με την ύλη, μπορεί να συμβεί με οποιοδήποτε από τους τέσσερις μηχανισμούς, αλλά μόνο μία φορά και με έναν από τους τέσσερις. Δεν ισχύει το ίδιο για μία δέσμη ακτινοβολίας που περιλαμβάνει πολλά φωτόνια, οπότε η αλληλεπίδρασή της με την ύλη, μπορεί να περιλαμβάνει όλους τους μηχανισμούς. Το μέγεθος που εκφράζει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης φωτονίου-ύλης ανά μονάδα μήκους διαδρομής του σε αυτήν, ονομάζεται ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, και συμβολίζεται με το γράμμα μ , οποίος προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών εξασθένησης για κάθε μηχανισμό αλληλεπίδρασης.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης εξαρτάται από την ενέργεια της ακτινοβολίας, αλλά και την πυκνότητα και τον ατομικό αριθμό του υλικού. Σε χαμηλές ενέργειες φωτονίων, κάτω των 300 keV, και για υλικά υψηλής πυκνότητας και υψηλού ατομικού αριθμού, η πιθανότερη αλληλεπίδραση είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σε μέσες και υψηλής ενέργειας και για υψηλή πυκνότητα υλικού, αλλά ανεξαρτήτως του ατομικού αριθμού, ο πιθανότερος μηχανισμός που συναντάται είναι η σκέδαση Compton. Για το όριο των 1,022MeV, και υλικά υψηλής πυκνότητας και υψηλού ατομικού αριθμού, είναι δυνατός ο μηχανισμός της δίδυμης γένεσης, ενώ για ενέργειες ανώτερες των 100MeV αποτελεί τον αποκλειστικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης [10].

3.1.6 Νόμος της εκθετικής εξασθένησης δέσμης φωτονίων

Για μια παράλληλη δέσμη φωτονίων έντασης I_0 , (φωτόνια·cm²·s⁻¹) που εισέρχεται κάθετα σε μία πλάκα πάχους x , ορισμένα φωτόνια θα αλληλεπιδράσουν με το υλικό, θα σκεδαστούν ή θα απορροφηθούν στο υλικό της πλάκας, ενώ άλλα θα διαπεράσουν την πλάκα χωρίς να αλληλεπιδράσουν [10].

Η μεταβολή ΔI της έντασης της ακτινοβολίας όταν η δέσμη διέρχεται από πάχος Δx πλάκας (πλήθος φωτονίων που αλληλεπιδρούν με την πλάκα και εγκαταλείπουν τη δέσμη) υπολογίζεται από τη σχέση:

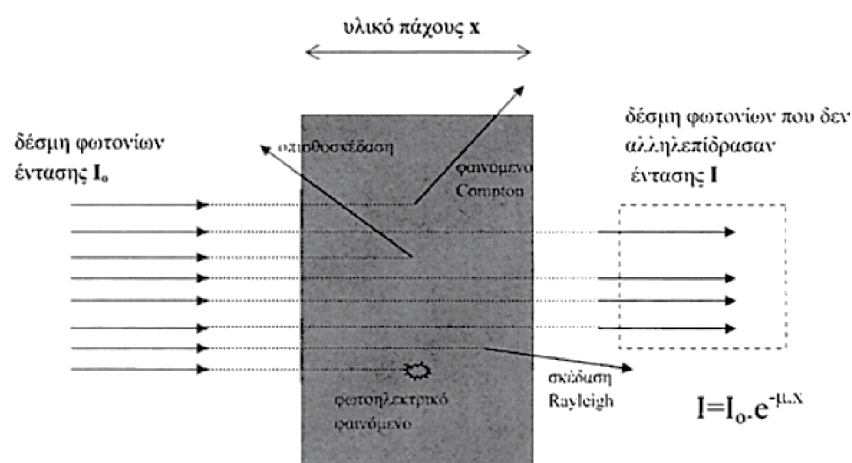
$$\Delta I = I_0 - I = -\mu \cdot I_0 \cdot \Delta x \quad (3.1)$$

Όπου μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πλάκας, που εκφράζει την πιθανότητα ανά μονάδα μήκους διαδρομής της αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου με το υλικό της πλάκας. Ο συντελεστής μ εξαρτάται από το υλικό και την πυκνότητα του και μονάδες του είναι (cm⁻¹).

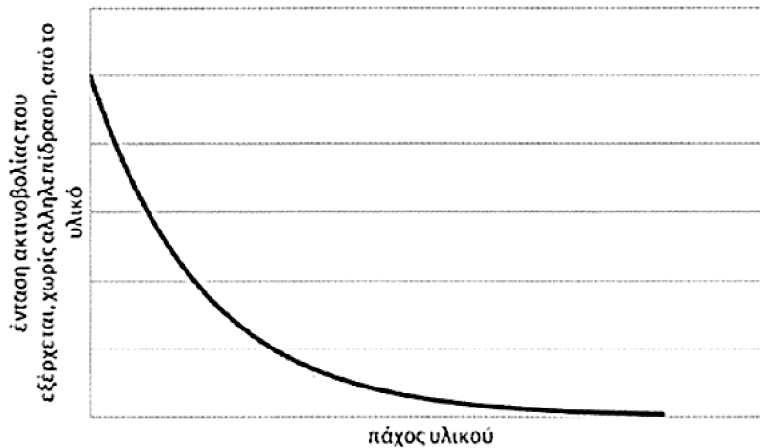
Η σχέση που δίνει την ένταση της δέσμης φωτονίων I , που εξέρχεται χωρίς από την πλάκα χωρίς να αλληλεπιδράσει με αυτήν είναι:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (3.3)$$

Αυτή η σχέση αποτελεί τον εκθετικό νόμο της εξασθένησης.



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση του νόμου της εκθετικής εξασθένησης. Μια δέσμη φωτονίων αρχικής έντασης I_0 εισέρχεται σε υλικό πάχους x . Ο γραμμικός συντελεστής για την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό είναι μ . Η ένταση της δέσμης των φωτονίων που δεν αλληλεπιδράσει είναι I και δίνεται από τον εκθετικό νόμο της εξασθένησης. [10]



Εικόνα 3.4: Η ένταση της ακτινοβολίας που εξέρχεται από ένα υλικό, χωρίς να αλληλεπιδράσει με αυτό, μειώνεται εκθετικά, καθώς το πάχος του υλικού αυξάνεται. [10]

3.1.7 Πάχος υποδιπλασιασμού

Η ποιότητα μιας δέσμης φωτονίων, η ικανότητά του δηλαδή να διαπερνά μέσα από την ύλη, εκφράζεται από το πάχος ενός υλικού που είναι ικανό να μειώσει την ένταση I της δέσμης στο μισό της αρχικής της τιμής. Αυτό το πάχος ονομάζεται πάχος υποδιπλασιασμού HVL (Half Value Layer - HVL), και αποτελεί το πάχος ορισμένου υλικού, που χρειάζεται για την μείωση της έντασης μιας δέσμης φωτονίων στο ήμισυ της αρχικής. Το πάχος υποδιπλασιασμού HVL ενός υλικού εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων, όπως και ο συντελεστής μ . Το πάχος υποδιπλασιασμού συνδέεται με το μ με τη σχέση $HVL=0.693 \cdot I/\mu$.

Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές του HVL για μόλυβδο και μπετόν και ορισμένες ενέργειες φωτονίων.

Πίνακας 3.1: Πάχος υποδιπλασιασμού [9]

Πάχος υποδιπλασιασμού		
Ενέργεια φωτονίων	Μόλυβδος (Pb)	Μπετόν
50 keV	0,06 mm	4,3 mm
70 keV	0,17 mm	8,4 mm
100 keV	0,27 mm	16 mm
125 keV	0,28 mm	20 mm

Αξίζει να σημειωθεί, ότι αφού ένα πάχος υποδιπλασιασμού εξασθενεί την ένταση της ακτινοβολίας κατά το ήμισυ, 2 πάχη υποδιπλασιασμού θα την ελαττώσουν 4 φορές, και ούτω καθεξής. Συνεπώς, n πάχη υποδιπλασιασμού μειώνουν την ένταση μιας δέσμης 2^n φορές.

3.1.8 Σχέση έντασης ακτινοβολίας και απόστασης

Σύμφωνα με το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου για την ακτινοβολία το μέγεθος της έκθεσης κάποιου στην ακτινοβολία μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή της ακτινοβολίας. Πρόκειται για έναν γεωμετρικό νόμο που ουσιαστικά περιγράφει ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή, παρατηρείται ραγδαία μείωση της έντασης της ακτινοβολίας και το αντίστροφο, δηλαδή όσο μειώνεται η απόσταση από την πηγή, παρατηρείται ραγδαία αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τον νόμο αυτό, εάν μία πηγή ακτινοβολίας απέχει από το

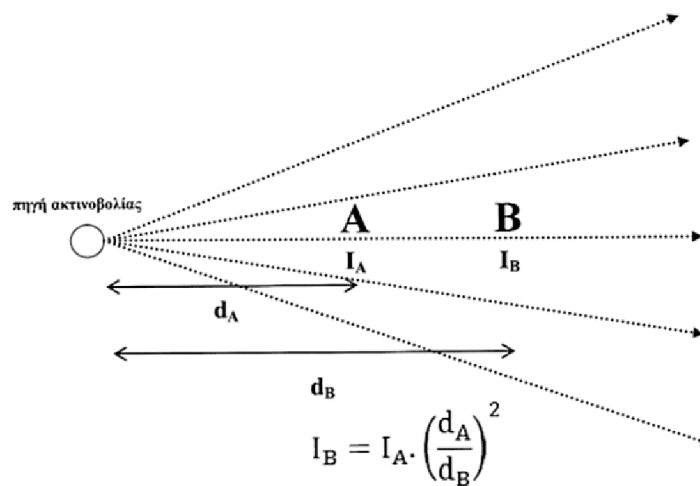
σημείο A απόσταση d_A και από το σημείο B απόσταση d_B , τότε η ένταση I_A της ακτινοβολίας στο σημείο A και η ένταση της I_B ακτινοβολίας στο σημείο B συνδέονται με τη σχέση (Εικόνα 3.7):

$$I_B = I_A \cdot \left(\frac{d_A}{d_B}\right)^2 \quad (3.4)$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου $d_b=2d_a$:

$$I_b = I_a \cdot \left(\frac{d_a}{2d_a}\right)^2 = I_a \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{I_a}{4} \quad (3.5)$$

διπλασιάζοντας την απόσταση, η ένταση μειώνεται κατά 4 φορές. Στον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου βασίζεται ένας από τους πιο σημαντικούς κανόνες της ακτινοπροστασίας, σύμφωνα με τον οποίο απαιτείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση από την πηγή ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.5: Νόμος του αντίστροφου τετραγώνου της απόστασης. Αν σε ένα σημείο A που απέχει απόσταση d_A από την πηγή της ακτινοβολίας η ένταση είναι I_A τότε η ένταση I_B σε ένα σημείο B που απέχει απόσταση d_B μειώνεται σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση. [9]

3.2 Βασικά δοσιμετρικά μεγέθη

Στα πλαίσια αυτής της ενότητας, κρίνεται απαραίτητο να γίνει μία σύντομη αναφορά σε ορισμένα από τα πιο σημαντικά δοσιμετρικά μεγέθη στο πλαίσιο της Ακτινοπροστασίας. Αυτά είναι: το Kerma, η απορροφούμενη δόση, η ισοδύναμη δόση καθώς και η ενεργός δόση.

3.2.1 ΚΕΡΜΑ

Το KERMA (K) αναφέρεται στο ακρωνύμιο kinetic energy released per unit mass, που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απελευθερώνεται ανά μονάδα μάζας κατά τη διάδοση ιονιζουσών ακτινοβολιών. Αυτό το μέγεθος είναι σημαντικό διότι υπογραμμίζει τη διαδικασία με την οποία τόσο τα φωτόνια όσο και τα νετρόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους στην ύλη. Η διαδικασία αυτή είναι ότι πρώτα τα μη φορτισμένα σωματίδια, φωτόνια και νετρόνια, μεταφέρουν ενέργεια σε φορτισμένα σωματίδια, υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας, κι έπειτα τα φορτισμένα σωματίδια μεταφέρουν την ενέργεια στο υλικό.

Το KERMA αποτελεί το άθροισμα των αρχικών κινητικών ενεργειών (dE_{tr}) όλων των φορτισμένων σωματιδίων που απελευθερώνονται κατά την αλληλεπίδραση των μη φορτισμένων σωματιδίων ιοντίζουσας ακτινοβολίας με το υλικό μάζας dm . Οι μονάδες για το μέγεθος KERMA είναι (J/kg) ή Gray (Gy).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στο άθροισμα των αρχικών κινητικών ενεργειών περιλαμβάνεται και η ενέργεια που επανεκπέμπεται σαν φωτόνιο πεδήσεως. Εν τω μεταξύ, τυχόν ηλεκτρόνια που παρήχθησαν εκτός του υλικού δεν προσμετρώνται ακόμη και αν διέρχονται εντός του υλικού. Σε περίπτωση που το υλικό είναι αέρας, το KERMA ονομάζεται KERMA αέρα ή K_{air} και χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η έκθεση.

3.2.2 Απορροφούμενη δόση

Η απορροφούμενη δόση ορίζεται ως:

$$D = \frac{E}{m} \quad (3.6)$$

Όπου E είναι η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται από το υλικό λόγω της ακτινοβολίας και m η μάζα του. Συνεπώς, η απορροφούμενη δόση ως μέγεθος περιγράφει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ανά μονάδα μάζας. Μονάδα μέτρησης είναι το Gray (Gy), όπου $1\text{Gy} = 1 \text{ joule/kg}$.

3.2.3 Ισοδύναμη δόση

Η ισοδύναμη δόση ως μέγεθος εισήχθη για να εκφράσει την απορροφούμενη δόση σε έναν ιστό ή όργανο T , σταθμισμένη για το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας. Η ανάγκη αυτού του μεγέθους προκύπτει από το γεγονός ότι η ποιότητα της ακτινοβολίας επηρεάζει το αποτέλεσμα της ίδιας δόσης ακτινοβολίας, σε βιολογικό υλικό. Ορίζεται ως:

$$H_T = D \cdot W_R \quad (3.7)$$

Όπου D η απορροφούμενη δόση στον ιστό ή στο όργανο και W_R ο παράγοντας ποιότητας της ακτινοβολίας.

Μονάδα μέτρησης είναι της ισοδύναμης δόσης είναι το Sievert (Sv) – συνήθως χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια του, διότι ως μονάδα είναι αρκετά μεγάλη. Στον Πίνακα 3.2 δίνονται οι τιμές του παράγοντα ποιότητας W_R .

Πίνακας 3.2: Συντελεστές στάθμισης της ακτινοβολίας WR για τον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης HT . (ICRP103) [10]

Είδος ακτινοβολίας	Συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας W_R
Φωτόνια (χ και γ) όλων των ενεργειών	1
Ηλεκτρόνια	1
Πρωτόνια	2-5
Σωματία α , θραύσματα σχάσης, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια	5-20 ανάλογα την ενέργεια

3.2.4 Ενεργός δόση

Η ενεργός δόση αποτελεί ένα βασικό δοσιμετρικό μέγεθος, που ορίζεται ως το άθροισμα:

$$E_{ff} = \Sigma(W_T \cdot H_T) \quad (3.8)$$

Όπου H_T η ισοδύναμη δόση σε ένα ιστό ή ένα όργανο T , και W_T ο παράγοντας βαρύτητας (ή συντελεστής στάθμισης) του οργάνου ή του ιστού T αντίστοιχα. Το μέγεθος αυτό λαμβάνει υπόψη τη συνολική επιβάρυνση της υγείας από την ακτινοβολία ενός ή περισσότερων οργάνων ή ιστών. Μονάδα ισοδύναμης δόσης είναι το Sv και αναφέρεται στην δόση σε όλο το σώμα. Στον Πίνακα 3.3 δίνονται οι τιμές του παράγοντα βαρύτητας για διάφορους ιστούς.

Πίνακας 3.3: Συντελεστές στάθμισης των εκτιθέμενου ιστού W_T για τον υπολογισμό της ενεργού δόσης E_{eff} (ICRP 103). [9]

Ιστός	Συντελεστής W_T
Μυελός των οστών, κόλον, πνεύμονες, στομάχι, μαστός, επινεφρίδια, εξωθωρακική περιοχή, χοληδόχος, καρδιά, νεφροί, λεμφικοί αδένες, μύες, επιθήλιο στόματος, πάγκρεας, προστάτης, λεπτό έντερο, σπλήνας, θύμος αδένας, μήτρα / τράχηλος	0,12
Γονάδες	0,08
Ουροδόχος κύστη, οισοφάγος, ήπαρ, θυρεοειδής	0,04
Επιφάνεια οστών, εγκέφαλος, σιελογόνοι αδένες, δέρμα	0,01

Η βασική διαφορά μεταξύ ισοδύναμης και ενεργού δόσης, είναι ότι η πρώτη λαμβάνει υπόψη το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας, ενώ η δεύτερη λαμβάνει υπόψη, αφενός μεν το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας αλλά επιπλέον και το είδος του ιστού ή του οργάνου που ακτινοβολείται.

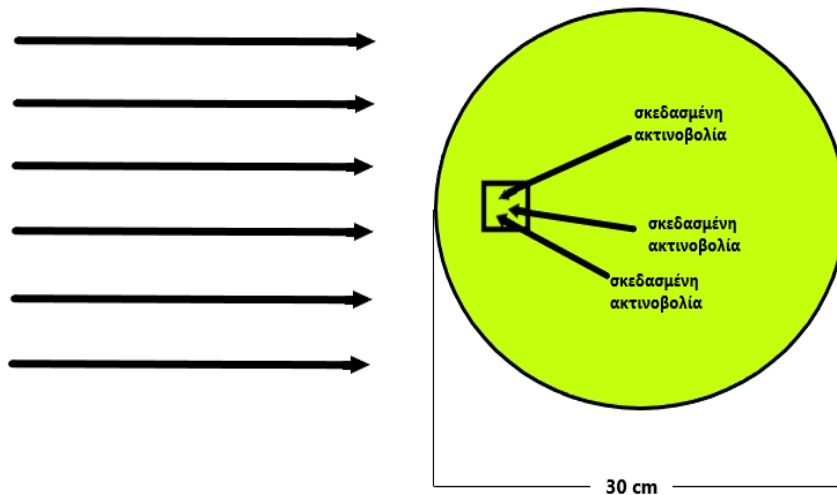
3.2.5 Περιβαλλοντικό ισοδύναμο δόσης $H^*(10)$

Η ενεργός δόση και η ισοδύναμη δόση αντιπροσωπεύουν χρήσιμα εργαλεία, ειδικά όταν η έκθεση σε ακτινοβολία είναι καλά καταγεγραμμένη και πλήρως γνωστή. Αυτό συμβαίνει όταν τα είδη της ακτινοβολίας και η ακριβής θέση του ατόμου που υφίσταται έκθεση είναι σαφώς καθορισμένα. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου η έκθεση του ατόμου δεν είναι απολύτως σαφής, ειδικά όταν δεν είναι καταγεγραμμένη η φύση της ακτινοβολίας και η ακριβής θέση του ατόμου που υφίσταται έκθεση, η χρησιμότητα αυτών των μετρήσεων μειώνεται. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να εισαχθούν λειτουργικά μεγέθη δοσιμετρίας, ειδικά όταν αξιολογείται η επίπτωση της έκθεσης.

Για αυτό το λόγο, η Διεθνής Επιτροπή για τις Μονάδες και τις Μετρήσεις της Ακτινοβολίας (ICRU) έχει καθορίσει λειτουργικά μεγέθη δοσιμετρίας που είναι καίρια για την αξιολόγηση της έκθεσης. Το λειτουργικό μέγεθος δοσιμετρίας που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ισοδύναμης δόσης από την έκθεση του ανθρώπου σε γ-ακτινοβολία από το περιβάλλον, είναι το περιβαλλοντικό ισοδύναμο δόσης $H^*(10)$ από γ-ακτινοβολία.

Το περιβαλλοντικό ισοδύναμο δόσης $H^*(10)$ καθορίζεται ως η τιμή της ισοδύναμης δόσης σε ένα σημείο, το οποίο βρίσκεται σε βάθος 1cm από την επιφάνεια της σφαίρας ICRU. Η σφαίρα ICRU είναι μία σφαίρα με διάμετρο 30cm κατασκευασμένη από υλικό που προσομοιώνει τον ανθρώπινο ιστό και είναι τοποθετημένη σε ένα πεδίο ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Σε πολλές περιπτώσεις, η σφαίρα αυτή προσομοιάζει επαρκώς το ανθρώπινο σώμα όσον αφορά τον διασκορπισμό και την εξασθένηση των πεδίων ακτινοβολίας που βρίσκονται υπό εξέταση. Για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού ισοδύναμου δόσης από γ-ακτινοβολία στο υπό εξέταση σημείο μέσα στη σφαίρα ICRU, λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο η ακτινοβολία που φτάνει

απευθείας στο σημείο, αλλά και η ακτινοβολία που φτάνει στο σημείο από σκεδάσεις που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό της σφαίρας ICRU [11].



Εικόνα 3.6: Σφαίρα ICRU και πεδίο ακτινοβολίας [11]

3.3 Τύποι ανιχνευτών ιοντιζουσών ακτινοβολιών

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύντομη αναφορά στους τύπους ανιχνευτών ιοντιζουσών ακτινοβολιών, και κυρίως στους θαλάμους ιονισμού ανοιχτού τύπου στους οποίους εντάσσεται και ο θάλαμος ιονισμού PTW UNIDOS type 32002, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη της παρούσας ΔΕ.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανιχνευτών ιοντιζουσών ακτινοβολιών, με τους πιο συνηθισμένους να είναι οι ανιχνευτές σπινθηρισμού, οι ανιχνευτές ημιαγωγοί και οι ανιχνευτές με αέριο (οι οποίοι περιλαμβάνουν τους θαλάμους ιονισμού, τους αναλογικούς ανιχνευτές και τους ανιχνευτές Geiger-Muller).

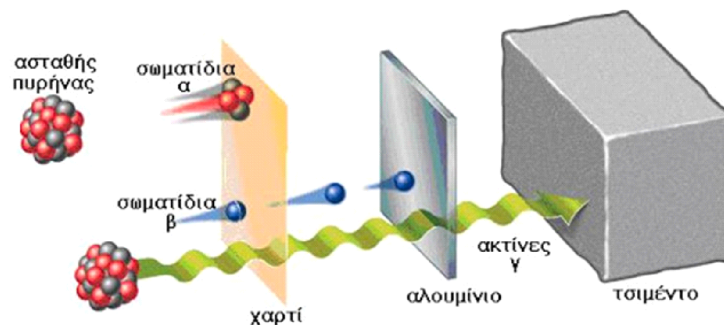
3.3.1 Ανιχνευτές με αέριο

Στους ανιχνευτές αερίου, το αέριο αποτελεί το υλικό με το οποίο αλληλεπιδρούν οι ακτινοβολίες που επιθυμείται να ανιχνευτούν. Ο θάλαμος των ανιχνευτών αερίου, έχει πληρωθεί με κατάλληλο αέριο και περιέχει δύο ηλεκτρόδια. Το υλικό κατασκευής του θαλάμου είναι μεταλλικό ή συνθετικό υλικό και το πάχος των τοιχωμάτων του μπορεί να είναι διαφόρων διαστάσεων. Στην περίπτωση μεταλλικού θαλάμου, το σώμα του θαλάμου παίζει το ρόλο του ενός ηλεκτροδίου. Η αλληλεπίδραση των σωματιδίων ή φωτονίων με το αέριο εντός του θαλάμου έχει ως αποτέλεσμα τον ιονισμό του αερίου και ακολουθεί η συλλογή των ιόντων από τα αντίστοιχα αρνητικά ή θετικά ηλεκτρόδια, αναλόγως το φορτίο τους [12]. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με το αέριο του ανιχνευτή εξαρτάται από τη φύση και την ενέργεια του σωματιδίου ή του φωτονίου. Για τα φωτόνια, η ικανότητα αλληλεπίδρασης εκφράζεται μέσω του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ . Τα υλικά που έχουν υψηλότερη ικανότητα ανίχνευσης φωτονίων χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές του μ . Τα αέρια, κυρίως λόγω της πυκνότητάς τους έχουν χαμηλές τιμές του μ και παρουσιάζουν χαμηλή ικανότητα ανίχνευσης φωτονίων. Το πλήθος των φορτίων που συλλέγονται σε κάθε ηλεκτρόδιο εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού και μπορεί να είναι μεγαλύτερος, ίσος ή μικρότερος από τον αριθμό των φορτίων που παράγονται [10].

3.3.2 Τα είδη ακτινοβολίας που ανιχνεύονται

Οι ανιχνευτές αερίου είναι σε θέση να ανιχνεύουν όλα τα είδη ακτινοβολίας, α , β και γ . Ωστόσο είναι καταλληλότεροι για ανίχνευση και μέτρηση ακτινοβολίας β και γ , καθώς τα ηλεκτρόνια, τα ποζιτρόνια και τα φωτόνια μπορούν να διαπεράσουν τα τοιχώματα του ανιχνευτή – εφόσον το πάχος αυτού το επιτρέπει [13]. Ειδικότερα, για το κάθε είδος ακτινοβολίας:

- **Η ακτινοβολία α** (πυρήνας Ηλίου) είναι ένα βαρύ σωματίδιο μεγάλης ενέργειας, το οποίο αλληλεπιδρά με το τοίχωμα του ανιχνευτή, με αποτέλεσμα να μην φτάνει στο εσωτερικό του όπου βρίσκεται το αέριο, και συνεπώς να μην μπορεί να προκαλέσει ιονισμούς και να ανιχνευθεί. Μόνο σε περιπτώσεις πολύ λεπτού τοιχώματος του ανιχνευτή ($<1\mu\text{m}$), είναι δυνατό να εισέλθει το σωματίδιο στον ανιχνευτή και να ανιχνευθεί.
- **Η ακτινοβολία β (ποζιτρόνια και ηλεκτρόνια)** μπορεί να ανιχνευθεί και να μετρηθεί από έναν ανιχνευτή αερίου, καθώς, αν και αλληλεπιδρά με τοίχωμα του ανιχνευτή, καταφέρνει στις περισσότερες περιπτώσεις να εισέλθει στον ανιχνευτή και να προκαλέσει ιονισμούς στο αέριο. Λόγω της αλληλεπίδρασης και με το τοίχωμα του ανιχνευτή, ποσοστό της ακτινοβολίας δεν αλληλεπιδρά ποτέ με το αέριο, καθώς αλληλεπιδρά πλήρως με το τοίχωμα αυτού. Σε περιπτώσεις κατάλληλα λεπτών τοιχωμάτων, το ποσοστό της ακτινοβολίας- β που δεν αλληλεπιδρά με το αέριο είναι σχετικά μικρό.
- **Η ακτινοβολία γ και X (φωτόνια)** διαπερνά εν γένει το τοίχωμα του ανιχνευτή και αλληλεπιδρά με το αέριο. Ανάλογα με τον όγκο του θαλάμου του ανιχνευτή και την ενέργεια των φωτονίων, είναι πιθανόν ένα ποσοστό της ακτινοβολίας- γ να διαπεράσει και το αέριο χωρίς να αλληλεπιδράσει με αυτό. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα σε υψηλότερες ενέργειες φωτονίων και μικρότερους όγκους θαλάμου.



Εικόνα 3.7: Δεισδυτικότητα ακτινοβολιών α , β και γ . [13]

3.3.3 Ο ρόλος της διαφοράς δυναμικού του ανιχνευτή

Καθώς το σήμα που παράγεται μέσα στον ανιχνευτή είναι αποτέλεσμα της συλλογής των ιόντων εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον ανιχνευτή, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στον ρόλο της διαφοράς του δυναμικού στους ανιχνευτές αερίου, για την ανίχνευση και μέτρηση της ακτινοβολίας. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο ή φωτόνιο αλληλεπιδράσει με το αέριο του θαλάμου, δημιουργούνται N ζευγάρια ιόντων. Τότε, η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού καθορίζει το πλήθος των φορτίων P που φτάνουν και συλλέγονται σε κάθε ηλεκτρόδιο. Το πλήθος P μπορεί να είναι μικρότερο, ίσο ή και μεγαλύτερο από τον αριθμό N [14], όπως εξηγείται στη συνέχεια.

- Για μικρές διαφορές δυναμικού, από $0-V_s$, ισχύει $P < N$, και παρατηρείται ανταγωνισμός δύο μηχανισμών: της επανασύνδεσης ετερόσημων ιόντων και της συλλογής των φορτίων από τα ηλεκτρόδια. Όσο αυξάνεται η διαφορά δυναμικού, αυξάνεται και η ταχύτητα κίνησης των ιόντων, ενώ μειώνεται η πιθανότητα επανασυνδέσεων και η τιμή P πλησιάζει την τιμή N .
- Για μεγαλύτερες διαφορές δυναμικού στην περιοχή ($V_s - V_p$) είναι γενικά $P = N$. Σε αυτή την περιοχή, δεν παρατηρείται το φαινόμενο των επανασυνδέσεων μεταξύ αντίθετα κινούμενων ετερόσημων ιόντων, λόγω της ταχύτητας αυτών. Έτσι για μονοσθενή ιόντα (φορτίου e), το συλλεγόμενο φορτίο από κάθε ηλεκτρόδιο είναι:

$$Q = N \cdot e \quad (3.9)$$

- Για ακόμα μεγαλύτερες διαφορές δυναμικού στην περιοχή ($V_p - V_g$) είναι $P > N$. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από τους αρχικούς ιονισμούς δημιουργούνται δευτερογενείς ιονισμοί και κατά συνέπεια πολλαπλασιασμός των αρχικών πρωτογενών ιόντων κατά M , όπου $M > 1$ και $M = M(V) \approx k \cdot V$. Ο συντελεστής αναλογίας k εξαρτάται από το είδος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για μονοσθενή παραγόμενα ιόντα (φορτίου e), το συλλεγόμενο φορτίο από κάθε ηλεκτρόδιο είναι :

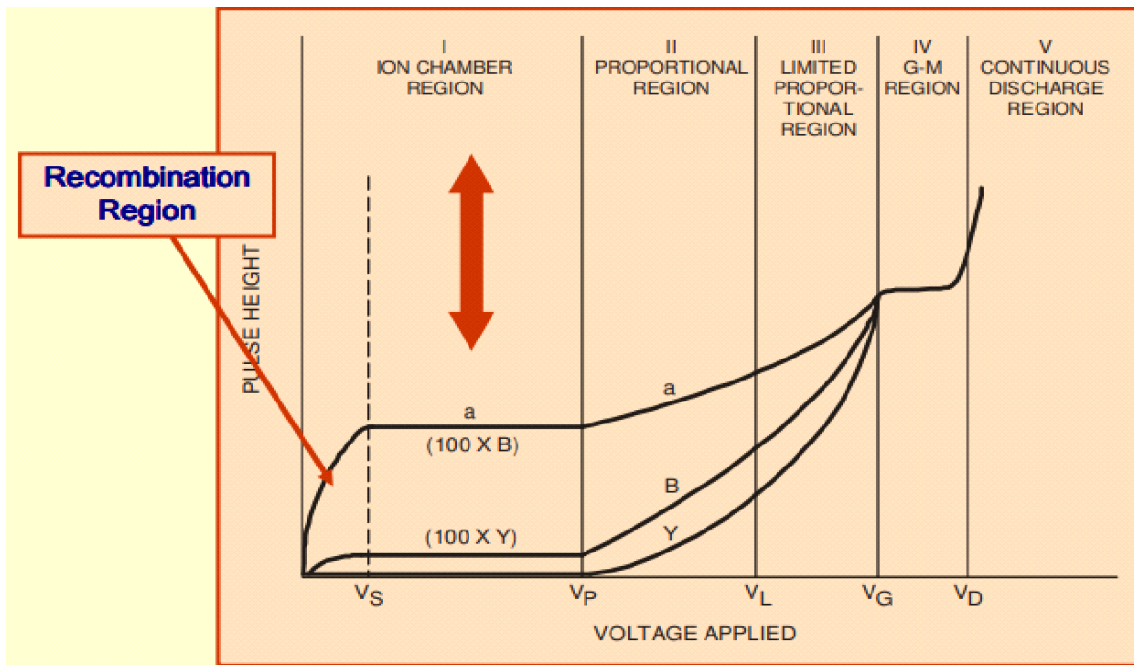
$$Q = M \cdot N \cdot e \quad (3.10)$$

Όσον αφορά στο ύψος των παλμών (σημάτων):

- Στην περιοχή τάσεων V_s έως V_g , η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθορίζει το ύψος του παλμού τάσης που λαμβάνεται ανά αλληλεπίδραση. Καθώς τα σωματίδια- α συνήθως έχουν ενέργεια περί τα 5 MeV, τα σωματίδια- β έχουν πιθανότερη ενέργεια περί το 0.5 MeV και τα φωτόνια συνήθως από 100 – 200 έως 2000 keV, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να διακριθεί το είδος της ακτινοβολίας ($-\alpha$, $-\beta$ ή $-\gamma$) που αλληλεπιδρά με το αέριο του ανιχνευτή, μέσω του ύψους του παλμού τάσης που λαμβάνουμε.
- Στην περιοχή τάσεων V_g-V_d , δηλαδή για μεγαλύτερες διαφορές δυναμικού στην περιοχή ισχύει $P > N$. Σε αυτή την περιοχή διαφοράς δυναμικού, η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων από τους αρχικούς ιονισμούς, είναι τέτοια που μπορεί να προκαλέσει δευτερογενείς και τριτογενείς ιονισμούς, και κατά συνέπεια πολλαπλασιασμό των αρχικών πρωτογενών μέχρι εκκένωσης. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια και γενικά η φύση της ακτινοβολίας που προσπίπτει, δεν καθορίζει το ύψος του παλμού τάσης που λαμβάνεται ανά αλληλεπίδραση. Μόνο η γεωμετρία του θαλάμου ανιχνεύσεως, το είδος και η πίεση του αερίου και η συγκρότηση του σχετικού εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος, καθορίζουν το ύψος του παλμού τάσης.
- Σε περιοχή τάσεων μεγαλύτερης διαφοράς δυναμικού από V_d $P \gg N$. Εδώ παρατηρείται το φαινόμενο της αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης, και το σήμα εξόδου δεν έχει πλέον σχέση με την ενέργεια που αποθέτει η ακτινοβολία στον θάλαμο.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση που προηγήθηκε, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, διακρίνονται οι παρακάτω τύποι ανιχνευτών αερίου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.10:

- I. Θάλαμος ιονισμού
- II. Αναλογικός ανιχνευτής
- III. Ανιχνευτής Geiger-Müller



Εικόνα 3.8: Περιοχές Λειτουργίας Ανιχνευτών Αερίου. [14]

Στους ανιχνευτές αερίου – ανεξαρτήτως τύπου – το εξωτερικό κύκλωμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μετράει ρεύμα, δηλαδή πλήθος φορτίων στην μονάδα του χρόνου. Γι' αυτό το λόγο είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της έντασης ενός πεδίου ακτινοβολιών ή για τη σύγκριση πεδίων ακτινοβολίας ίδιου τύπου. Στην περιοχή τάσεων όπου $P=N$ και ο ρυθμός παραγωγής ιόντων δεν εξαρτάται από τη θέση αλληλεπίδρασης μέσα στον ανιχνευτή ισχύει:

$$i = e \cdot N_0 \cdot V_e \quad (3.11)$$

όπου N_0 το πλήθος των ζευγών μονοσθενών ιόντων που παράγονται ανά μονάδα όγκου και χρόνου και V_e ο όγκος του ευαίσθητου χώρου του θαλάμου.

3.3.4 Θάλαμο Ιονισμού

Ο θάλαμος ιονισμού είναι ένας τύπος ανιχνευτή αερίου που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τη μέτρηση πολλών τύπων ιονίζουσας ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των ακτίνων-Χ, ακτίνων-γ και των σωματιδίων βήτα. Πρόκειται για τον απλούστερο ανιχνευτή αερίου για τον οποίο ισχύει $P=N$. Αποτελείται από έναν θάλαμο γεμάτο με αέριο που διαθέτει δύο ηλεκτρόδια, γνωστά ως άνοδος και κάθοδος, στα οποία εφαρμόζεται η διαφορά δυναμικού για τη διατήρηση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον ανιχνευτή. Το αέριο σε ένα θάλαμο ιονισμού συνήθως είναι ατμοσφαιρικός αέρας. Άλλα συνήθη αέρια είναι το Αργόν, το Μεθάνιο, το Διοξείδιο του Άνθρακα, ή ορισμένοι συνδυασμοί τους.

Καθώς η ακτινοβολία διέρχεται από το αέριο, τα άτομα του αερίου ιονίζονται και παράγουν ιόντα και ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται από τα ηλεκτρόδια. Τα ιόντα αυτά μετακινούνται προς τα ηλεκτρόδια αντίθετης πολικότητας προκαλώντας ρεύμα ιονισμού το οποίο μετράται από κύκλωμα ηλεκτρομέτρου. Το ρεύμα ιονισμού είναι μέτρο της συνολικής δόσης λόγω της ακτινοβολίας ιονισμού που εισέρχεται στον θάλαμο. Κάθε ιόν που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και του αερίου, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό φορτίο, έτσι ώστε το συσσωρευμένο φορτίο να είναι ανάλογο του αριθμού των ζευγών ιόντων που δημιουργούνται, άρα και της δόσης λόγω της ακτινοβολίας.

Στους θαλάμους ιονισμού η τάση που εφαρμόζεται στον ανιχνευτή εξασφαλίζει ότι τα ιόντα αποκτούν ταχύτητες που αποτρέπουν το φαινόμενο της επανασύνδεσης των ετερόσημων ιόντων. Η τάση αυτή είναι μερικών δεκάδων έως μερικών εκατοντάδων Volt. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συλλογή όλων των παραγόμενων φορτίων στον ανιχνευτή. Το σήμα που παράγεται στην έξοδο του ανιχνευτή είναι ανάλογο με τον αριθμό των παραγόμενων φορέων και συνεπώς την ενέργεια που αποθέτουν στον ανιχνευτή τα σωματίδια ή τα φωτόνια, κάτι που σημαίνει ότι ο ανιχνευτής μπορεί να ανιχνεύει διαφορετικές ενέργειες ή διαφορετικό τύπο σωματιδίων. Αυτό καθιστά το σήμα εξόδου στο θάλαμο ιονισμού συνεχές ρεύμα, σε αντίθεση με τον ανιχνευτή Geiger-Müller που παράγει παλμική έξοδο.

Ένας θάλαμος ιονισμού με ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να είναι ανοιχτός (να επικοινωνεί δηλαδή με το περιβάλλον) ή κλειστός. Στους ανοιχτούς θαλάμους ιονισμού είναι δυνατό να μετρηθεί και η συγκέντρωση α-ραδιενεργών αερίων, εισάγοντάς τα μέσα στον θάλαμο και καταγράφοντας το πλήθος των ιόντων που παράγονται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων-α και του ατμοσφαιρικού αέρα του θαλάμου. Οι ανοιχτοί θάλαμοι ωστόσο, είναι ευάλωτοι στην υγρασία και άλλους ρύπους του ατμοσφαιρικού αέρα, γεγονός που επηρεάζει την επίδοσή του.

Στους κλειστούς θαλάμους ιονισμού, ο κλειστός αέρας μπορεί να βρίσκεται υπό πίεση έως 6atm, προκειμένου να αυξάνει η πυκνότητά του και η απόδοσή του, μέσω της αύξησης της μάζας του αερίου με το οποίο αλληλεπιδρά η ακτινοβολία. Στους κλειστούς θαλάμους η πίεση του αερίου αλλάζει ανάλογα με την ατμοσφαιρική πίεση του χώρου στον οποίο λειτουργούν και γι' αυτό το λόγο συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή πίνακες με τους κατάλληλους διορθωτικούς συντελεστές για τον υπολογισμό του σωστού συντελεστή απόδοσης.

Το βασικότερο πρόβλημα στην κατασκευή των θαλάμων ιονισμού είναι η μόνωση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Με βάση τη γεωμετρία του θαλάμου, διακρίνονται οι εξής τύποι θαλάμων ιονισμού:

- i. Θάλαμος με παράλληλα ηλεκτρόδια– πλάκες
- ii. Κυλινδρικός θάλαμος
- iii. Σφαιρικός θάλαμος
- iv. Θάλαμος με παράλληλα ηλεκτρόδια – πλάκες και πλέγμα

Ενώ με βάση τον τρόπο μέτρησης της ακτινοβολίας διακρίνονται οι εξής τύποι θαλάμων ιονισμού:

- i. τύπου ρεύματος
- ii. τύπου παλμών

Όσον αφορά στον όγκο τους, υπάρχει μεγάλη ποικιλία ανιχνευτών για διάφορες εφαρμογές. Σε μεγάλη ροή φωτονίων ή σωματιδίων, πχ ραδιοθεραπεία, προτιμώνται ανιχνευτές μικρού όγκου, ενώ σε μικρή ροή φωτονίων ή σωματιδίων, πχ περιβάλλον, προτιμώνται ανιχνευτές μεγάλου όγκου. Εν γένει, οι θάλαμοι ιονισμού έχουν καλή απόκριση στην ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών, γεγονός που τους καθιστά χρήσιμους σε διάφορους τομείς, όπως ερευνητικά εργαστήρια, ραδιογραφία, βιομηχανίες πυρηνικής ενέργειας, ακτινοπροστασία και περιβαλλοντική επιτήρηση [14].

3.3.4.1 Θάλαμοι ιονισμού στην βαθμονόμηση δέσμης φωτονίων και ηλεκτρονίων

Οι θάλαμοι ιονισμού είναι βασικό όργανο το οποίο χρησιμοποιείται κατά τη βαθμονόμηση μίας δέσμης φωτονίων ή ηλεκτρονίων. Η δοσιμετρία ακτινοβολίας αναφέρεται στον προσδιορισμό μέσω της μέτρησης ή/και υπολογισμού της απορροφούμενης δόσης ή κάποιου άλλου φυσικού μεγέθους, όπως το air kerma, η ροή ή η ισοδύναμη δόση σε δεδομένο σημείο του μέσου. Η βασική διαδικασία βαθμονόμησης για δέσμες φωτονίων και ηλεκτρονίων πραγματοποιείται με:

- i. Δοσίμετρα ακτινοβολίας
- ii. Ειδικές τεχνικές δοσιμετρίας

Κατά τη βαθμονόμηση ο θάλαμος ιονισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως απόλυτο ή σχετικό δοσίμετρο. Ο ευαίσθητος όγκος του ανιχνευτή γεμίζει συνήθως με αέρα περιβάλλοντος και η μετρούμενη ποσότητα που σχετίζεται με τη δόση είναι το φορτίο που παράγεται λόγω της ακτινοβολίας στον ευαίσθητο όγκο του θαλάμου, ενώ η μετρούμενη ποσότητα που σχετίζεται με το ρυθμό δόσης είναι το ρεύμα.

Ο ευαίσθητος όγκος αέρα ή η ευαίσθητη μάζα αέρα στον θάλαμο ιονισμού προσδιορίζεται άμεσα με μέτρηση (ο θάλαμος γίνεται απόλυτο δοσίμετρο υπό ειδικές συνθήκες), ή έμμεσα μέσω βαθμονόμησης της απόκρισης του θαλάμου σε γνωστό πεδίο ακτινοβολίας (ο θάλαμος χρησιμοποιείται τότε ως σχετικό δοσίμετρο) [15].

3.3.4.2 Μεγέθη επιρροής του αήματος θαλάμων ιονισμού

Για κάθε θάλαμο ιονισμού, οι συνθήκες αναφοράς περιγράφονται από ένα σύνολο μεγεθών επιρροής για τα οποία ο συντελεστής βαθμονόμησης θαλάμου ισχύει χωρίς περαιτέρω διορθώσεις. Ως ποσότητες επιρροής ορίζονται οι ποσότητες που δεν είναι αντικείμενο μιας μέτρησης, αλλά επηρεάζουν την τιμή της μετρούμενης ποσότητας. Εάν ο θάλαμος χρησιμοποιείται σε συνθήκες που διαφέρουν από τις συνθήκες αναφοράς, τότε το μετρούμενο σήμα πρέπει να διορθωθεί για τα μεγέθη επιρροής [15]. Παραδείγματα μεγεθών επιρροής στο θάλαμο ιονισμού σε μετρήσεις δοσιμετρίας είναι:

- Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος
- Πίεση του αέρα του περιβάλλοντος
- Υγρασία αέρα περιβάλλοντος
- Τάση θαλάμου
- Πολικότητα θαλάμου
- Ρεύματα διαρροής θαλάμου
- Επιδράσεις στελέχους θαλάμου

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μία σύντομη παρουσίαση της επίδρασης που έχουν στη μέτρησης ορισμένα από τα μεγέθη επιρροής.

3.3.4.3 Επίδραση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας του αέρα

Το σήμα που παράγεται από έναν θάλαμο ιονισμού εξαρτάται από τον ενεργό ευαίσθητο όγκο του θαλάμου και το αέριο (συνήθως αέρας) που χρησιμοποιείται στο θάλαμο. Στην πραγματικότητα, είναι η μάζα του αέρα που περιέχεται στον ευαίσθητο όγκο του θαλάμου αυτό που καθορίζει το σήμα του θαλάμου.

Κατά τη βαθμονόμηση ενός θαλάμου ιονισμού, το φορτίο που μετράει ο θάλαμος εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα, την πίεση και την υγρασία, και επομένως ο συντελεστής βαθμονόμησης του θαλάμου πρέπει να δίνεται για τις δηλωμένες τιμές αναφοράς αυτών των παραμέτρων.

Στα περισσότερα πρότυπα εργαστήρια το σήμα του θαλάμου διορθώνεται σε κανονικές συνθήκες $T_n = 20^\circ\text{C}$ (22°C στη Βόρεια Αμερική) και $P_n = 101,325 \text{ kPa}$, ενώ καμία διόρθωση δεν εφαρμόζεται για την υγρασία του αέρα (που θεωρείται ότι είναι περίπου 50%). Ο στόχος αυτών των διορθώσεων είναι η μετατροπή του μετρούμενου σήματος στις συνθήκες αναφοράς που χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση του θαλάμου στο πρότυπο εργαστήριο.

3.3.4.3 Επίδραση της πολικότητας θαλάμου

Υπό πανομοιότυπες συνθήκες ακτινοβολίας η χρήση δυναμικού αντίθετης πολικότητας σε ένα θάλαμο ιονισμού μπορεί να αποδώσει διαφορετικές ενδείξεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επίδραση της πολικότητας. Όταν ένας θάλαμος χρησιμοποιείται σε μια δέσμη που παράγει ένα μετρήσιμο φαινόμενο πολικότητας, η πραγματική ένδειξη θεωρείται ότι είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των μετρήσεων που λαμβάνονται στις δύο πολικότητες.

Είναι γνωστοί δύο τύποι φαινομένων πολικότητας (α) εξαρτώμενη από την τάση του ανιχνευτή και (β) ανεξάρτητη. Βασικά χαρακτηριστικά των φαινομένων πολικότητας [15]:

- Είναι αμελητέα για δέσμες φωτονίων υψηλής ενέργειας (MeV) σε βάθη πέρα από το βάθος της μέγιστης δόσης.
- Είναι αξιόλογη σε δέσμες ηλεκτρονίων σε όλα τα βάθη καθώς και για φωτόνια χαμηλών ενεργειών.

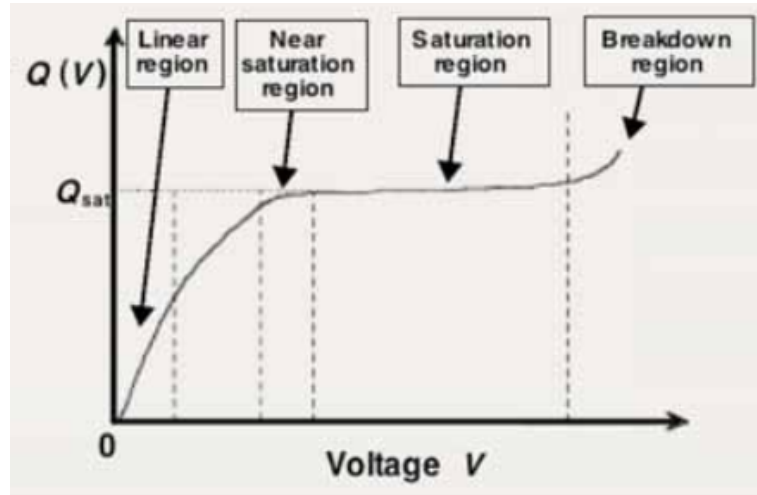
Τα φαινόμενα πολικότητας που εξαρτώνται από την τάση προκαλούνται από παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του προστατευτικού και του συλλεκτικού ηλεκτροδίου, παραμόρφωση του φορτίου χώρου των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου που ορίζουν τον ευαίσθητο όγκο αερίου ή διαφορά στην κινητικότητα των θετικών και αρνητικών ιόντων που προκαλεί διαφορές στην κατανομή του φορτίου χώρου γύρω από το κεντρικό ηλεκτρόδιο. Αντιθέτως, τα φαινόμενα πολικότητας που είναι ανεξάρτητα από την τάση προκαλούνται από ρεύματα επαγόμενα από την ακτινοβολία που αναφέρονται ως ρεύματα Compton.

3.3.4.4 Επίδραση της τάσης θαλάμου – Φαινόμενο επανασύνδεσης

Τα φορτία που παράγονται σε έναν θάλαμο ιονισμού από ακτινοβολία μπορεί να διαφέρουν από τα φορτία που πραγματικά συλλέγονται στο ηλεκτρόδιο μέτρησης. Αυτές οι αποκλίσεις (απώλεια φορτίου που προκαλείται από το φορτίο επανασύνδεσης ή περίσσειου φορτίου λόγω φορτίου πολλαπλασιασμού και ηλεκτρικής διάσπασης) εμφανίζονται ως αποτέλεσμα των περιορισμών που επιβάλλονται από τη φυσική της μεταφοράς ιόντων στον ευαίσθητο όγκο του θαλάμου, αλλά και λόγω του μηχανικού και ηλεκτρικού σχεδιασμού του θαλάμου ιονισμού.

Ένα διάγραμμα της απόκρισης του θαλάμου (ρεύμα I ή φορτίο Q) έναντι της εφαρμοζόμενης τάσης V ονομάζεται καμπύλη κορεσμού. Η καμπύλη κορεσμού:

- Αυξάνεται γραμμικά σε χαμηλές τάσεις (γραμμική περιοχή)
- Φτάνει στον κορεσμό σε σχετικά υψηλές τάσεις (περιοχή κορεσμού)
- Διασπάται σε πολύ υψηλές τάσεις (περιοχή διάσπασης)



Εικόνα 3.9: Απόκριση θαλάμου έναντι της εφαρμοζόμενης τάσης. [15]

Οι λόγοι $\frac{Q(V)}{Q_{sat}}$ και $\frac{I(V)}{I_{sat}}$ ονομάζονται απόδοση συλλογής f του θαλάμου ιονισμού στην εφαρμοζόμενη τάση V , όπου Q_{sat} και I_{sat} είναι οι τιμές κορεσμού των $Q(V)$ και $I(V)$ αντίστοιχα. Στον κορεσμό, όλα τα φορτία που παράγονται από την ακτινοβολία συλλέγονται και παράγουν απευθείας τα Q_{sat} και I_{sat} για χρήση σε πρωτόκολλα δοσιμετρίας. Στη δοσιμετρία ακτινοβολίας, οι θάλαμοι ιονισμού συνήθως χρησιμοποιούνται σε:

- Περιοχή κοντά του κορεσμού όπου $f > 0.98$
- Περιοχή κορεσμού όπου $f \approx 1$

Όταν ο θάλαμος χρησιμοποιείται κάτω από τον κορεσμό, κάποια από τα φορτία που παράγονται από την ακτινοβολία επαναδύζονται με συνέπεια να εξουδετερώνονται και να χάνεται το σήμα. Η απώλεια φορτίου συμβαίνει μέσω τριών διαφορετικών μηχανισμών:

1. Αρχική επανασύνδεση: αντίθετα φορτία από τις ίδιες τροχιές συγκρούονται και εξουδετερώνονται.
2. Γενική επανασύνδεση: αντίθετα φορτία από διαφορετικές τροχιές συγκρούονται και εξουδετερώνονται. Αυτός είναι μακράν ο επικρατέστερος τρόπος απώλειας φορτίου σε θάλαμο ιονισμού και οι άλλοι δύο γενικά αγνοούνται.
3. Απώλεια διάχυσης ιόντων: τα φορτία διαχέονται ενάντια στο ηλεκτρικό πεδίο.

3.3.4.5 Ρεύματα διαρροής θαλάμου

Τα ρεύματα διαρροής αντιπροσωπεύουν μη-δοσιμετρικό σήμα σε ένα θάλαμο ιονισμού. Οι επιδράσεις τους στα δοσιμετρικά ρεύματα που προκαλούνται από την πραγματική ακτινοβολία ελαχιστοποιούνται με ηλεκτρόδια προστασίας, τριαξονικά καλώδια χαμηλού θορύβου και εξελιγμένα ηλεκτρόμετρα.

Σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα θαλάμου ιονισμού, η διαρροή ρεύματος είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από το μετρούμενο δοσιμετρικό σήμα και συνεπώς είναι αμελητέα ή μπορούν να καταστέλλεται από το πραγματικό δοσιμετρικό σήμα. Τα ρεύματα διαρροής χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [15]:

1. Τα εγγενή ρεύματα διαρροής που προκύπτουν από ρεύματα διαρροής της επιφάνειας και του όγκου που ρέουν μεταξύ της πόλωσης και των ηλεκτροδίων μέτρησης του θαλάμου ιονισμού.
2. Τα επαγόμενα από ακτινοβολία ρεύματα διαρροής που προκύπτουν ως συνέπεια της ακτινοβολίας των μονωτήρων και των εξαρτημάτων του θαλάμου, των καλωδίων και των ηλεκτρονικών του εξοπλισμού μέτρησης.
3. Τα προκαλούμενα ψευδή ρεύματα καλωδίων από μηχανική καταπόνηση και τριβή που προκύπτουν από την κάμψη και την συστρόφη των καλωδίων.

3.3.4.6 Επιδράσεις του στελέχους (stem) του θαλάμου

Η ακτινοβόληση του στελέχους του θαλάμου ιονισμού έχει ως αποτέλεσμα ένα συγκεκριμένο τύπο ρεύματος διαρροής που αναφέρεται ως φαινόμενο στελέχους. Εντοπίζονται δύο μηχανισμοί αυτού του φαινομένου [15]:

- Η σκέδαση του στελέχους, η οποία προκύπτει από την επίδραση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο στέλεχος που φτάνει στον όγκο του θαλάμου.
- Η διαρροή στελέχους, που προκύπτει ως συνέπεια της άμεσης ακτινοβόλησης αυτού του όγκου του θαλάμου καθώς και των μονωτήρων και των καλωδίων του.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται διάφοροι τύποι θαλάμων ιονισμού.



Εικόνα 3.10: Θάλαμος Ιονισμού Model 450P πεπιεσμένος. [14]



Εικόνα 3.11: Θάλαμος Ιονισμού Eberline [14]



Εικόνα 3.12: Θάλαμος Ιονισμού Eberline Model R02 [14]



Εικόνα 3.13: Θάλαμος Ιονισμού Model 450 ασυμπέριστος [14]



Εικόνα 3.14: Θάλαμος Ιονισμού Model 450 ασυμπέριστο [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η διαδικασία βαθμονόμησης στο ΕΒΟΙΑ

4.1 Περιγραφή πειράματος

Οι βαθμονομήσεις στο πεδίο της ακτινοπροστασίας γίνονται στο ΕΒΟΙΑ με χρήση της πηγής ^{137}Cs STS-OB6, ενεργότητας 740GBq, με ημερομηνία αναφοράς 02/99. Τα όργανα που βαθμονομούνται τοποθετούνται σε τρόλεϋ σε ύψος ευθυγραμμισμένο με το κεντρο της πηγής και η ακριβής τοποθέτησή τους γίνεται με χρήση laser. Για την κάλυψη του εύρους ρυθμών περιβαλλοντικής δόσης όλων των οργάνων, υπάρχουν 6 μολύβδινοι απορροφητές (φίλτρα) διαφορετικού πάχους οι οποίοι μειώνουν τον ρυθμό δόσης κατάλληλα.

Στο πλαίσιο της ΔΕ, για τη μέτρηση του ρυθμού K_{air} χρησιμοποιήθηκε ο υποπρότυπος θάλαμος του ΕΒΟΙΑ, δηλαδή ο σφαιρικός θάλαμος ιονισμού PTW UNIDOS, μοντέλο 32002. Το κέντρο του θαλάμου τοποθετήθηκε σε απόσταση 2 μέτρων από την πηγή. Ο θάλαμος συνδέεται με ηλεκτρόμετρο PTW UNIDOS μέσω του οποίου έγινε και η καταγραφή της μέτρησης σε nC/min. Αρχικά, οι μετρήσεις έγιναν χωρίς τη χρήση κάποιου απορροφητή, ενώ στη συνέχεια επαναλήφθηκαν με τους 6 απορροφητές. Ο θάλαμος είναι βαθμονομημένος στο πρότυπο εργαστήριο PTB.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 7 κύκλοι μετρήσεων, με 6 επαναλήψεις σε κάθε κύκλο. Πριν την έναρξη κάθε κύκλου, γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας και της πίεσης στο χώρο του πειράματος, καθώς και μετρήσεις της ακτινοβολίας υποβάθρου.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται αναλυτική περιγραφή των οργάνων της πειραματικής διάταξης και της διαδικασίας του πειράματος.

4.1.1 Η πηγή ^{137}Cs του ΕΒΟΙΑ

Η ραδιενεργός πηγή ^{137}Cs του ΕΒΟΙΑ εκπέμπει ακτινοβολία-γ ενέργειας 662 keV. Η πηγή ^{137}Cs αποτελεί πηγή αναφοράς στις βαθμονομήσεις ακτινοπροστασίας ακριβώς επειδή είναι μονοενεργειακή. Η ενεργότητα της πηγής ^{137}Cs είναι 740 GBq με ημερομηνία αναφοράς τον Φεβρουάριο 1999. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο χρόνος ημιζωής του ^{137}Cs είναι 30,3 έτη, η ενεργότητα της πηγής όταν πραγματοποιήθηκε το πείραμα ήταν 429 GBq.



Εικόνα 4.1: Πηγή Cs-137 STS-OB6 (740GBq- Φεβρουάριος 1999)

4.1.2 Θωράκιση πηγής και κυκλικός κατευθυντήρας δέσμης

Η πηγή ^{137}Cs στην θέση ασφαλείας βρίσκεται μέσα σε μολύβδινη θωράκιση επαρκούς πάχους, ενώ κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης η διαμόρφωση του πεδίου ακτινοβολίας γίνεται με χρήση κυκλικού κατευθυντήρα κατάλληλης διαμέτρου. Είναι κρίσιμο να γίνει αναφορά στα στοιχεία αυτά και την χρησιμότητά τους:

Θωράκιση από μόλυβδο: Η θωράκιση από μόλυβδο που διαθέτει η πηγή ^{137}Cs , αποτελείται από τρία τμήματα. Δύο τετραγωνικές πλάκες στο μπροστινό και στο πίσω μέρος της, και έναν κύλινδρο ενδιάμεσα. Οι τετραγωνικές πλάκες έχουν ίδιες διαστάσεις, 29 cm πλάτος και ύψος και πάχος 0,5 cm. Ο κύλινδρος ενδιάμεσα έχει διαστάσεις 26 cm διάμετρο, 39 cm βάθος και 0,5 cm πάχος. Όλα τα τμήματα της θωράκισης είναι φτιαγμένα από υλικό μολύβδου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2. Ο μόλυβδος είναι ένα αποτελεσματικό υλικό για την εξασθένιση (απορρόφηση) των ακτίνων γάμμα λόγω της υψηλής πυκνότητας και του ατομικού του αριθμού. Αυτή η θωράκιση συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας της ακτινοβολίας που διαφεύγει προς άλλες κατευθύνσεις εκτός της προβλεπόμενης κατεύθυνσης μέτρησης.



Εικόνα 4.2: Θωράκιση πηγής Cs-137 STS-OB6.

Κυκλικός κατευθυντήρας: Ο κυκλικός κατευθυντήρας από μόλυβδο, βρίσκεται 27,2 cm μπροστά από την πηγή, με το κέντρο του ευθυγραμμισμένο μαζί της, και έχει διαστάσεις 4,135 cm εσωτερική ακτίνα, και 4,435 cm εξωτερική ακτίνα (πάχος 0,3 cm). Το κέντρο του κύκλου αυτού βρίσκεται στην ευθεία εκπομπής της πηγής, και σχηματίζει άνοιγμα γωνίας $14,64^\circ$. Πρόκειται για μια συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να περιορίζει την κατεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο γωνιακό εύρος. Στην προκειμένη περίπτωση, εφόσον ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση εκπομπής της πηγής ^{137}Cs , εξασφαλίζει ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται κυρίως εντός ενός στενού γωνιακού ανοίγματος $14,64^\circ$. Αυτή η διάταξη βοηθά στην εστίαση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.3: Κατευθυντήρας Πηγής Cs-137 STS-OB6.

Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι σημαντικό να ακολουθούνται αυστηρά οι κατάλληλες διαδικασίες χειρισμού και οι οδηγίες ασφαλείας κατά την χρήση των ραδιενεργών πηγών, ώστε να διασφαλίζεται η ακτινοπροστασία εργαζομένων και κοινού.

4.1.3 Θάλαμος ιονισμού PTW UNIDOS type 32002

Ο υποπρότυπος θάλαμος ιονισμού του ΕΒΟΙΑ, είναι ο σφαιρικός θάλαμος PTW UNIDOS -32002 όγκου 1 λίτρου. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή [16] είναι όργανο υψηλής ακριβείας και παρουσιάζει ικανοποιητική επαναληψιμότητα, μικρή ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση και σταθερότητα απόκρισης σε βάθος χρόνου.

Για την επίτευξη σταθερής ενεργειακής απόκρισης, ο θάλαμος έχει σχεδιαστεί με λεπτά τοιχώματα. Αυτά τα λεπτά τοιχώματα επιτρέπουν τη βέλτιστη ανίχνευση και μέτρηση της ακτινοβολίας σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών επιπέδων, με αποτέλεσμα συνεπείς και αξιόπιστες μετρήσεις.

Η σφαιρική κατασκευή του θαλάμου εξασφαλίζει ότι παρουσιάζει σχεδόν ομοιόμορφη απόκριση στην ακτινοβολία από όλες τις κατευθύνσεις. Ο σχεδιασμός του τον κάνει ιδανικό για μέτρηση πεδίων ακτινοβολίας χαμηλού ρυθμού δόσης, όπως αυτά που συναντάμε στην ακτινοπροστασία. Αυτό επιτυγχάνεται με το λεπτό στρώμα αλουμινίου στην εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος, το οποίο παρέχει αυξημένη φωτοηλεκτρική απόδοση για την αντιστάθμιση της απορρόφησης των μαλακών ακτίνων Χ. Η εξωτερική διάμετρος του θαλάμου είναι 140 mm.

Ο θάλαμος είναι ανοιχτού τύπου και γι' αυτό απαιτείται διόρθωση των ενδείξεων του θαλάμου για την πίεση και την θερμοκρασία και αναγωγή τους σε θερμοκρασία 20° και πίεση 1 atm (σχέση 2.4).



Εικόνα 4.4: Θάλαμος Ιονισμού PTW UNIDOS type 32002. [17]

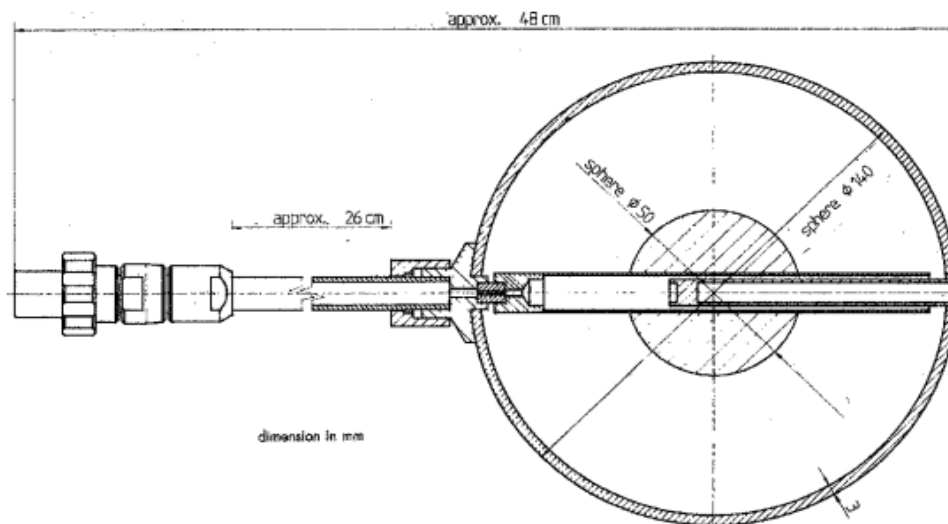
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του θαλάμου PTW UNIDOS [18]

Όγκος:	1.000 cc
Ευαισθησία:	0,33 nC/mR
Υλικό τοιχώματος:	Delrin (POM CH2O)
Πάχος τοιχώματος:	3 mm
Πυκνότητα τοιχώματος:	470 mg/cm ²
Εσωτερική διάμετρος θαλάμου:	140 mm
Υλικό ηλεκτροδίων:	Πολυστυρένιο, με επικάλυψη γραφίτη
Διάμετρος ηλεκτροδίου (σφαιρικό):	50 mm
Ρεύμα διαρροής:	<10 fA
Μέγιστη πόλωση:	400 V
Χρόνος διέλευσης ιόντων:	300 V: 53 ms 400 V: 40 ms
Μέγιστος ρυθμός για απόδοση συλλογής ιόντων 99,5%:	Συνεχές, 300 V: 12 R/h Συνεχές, 400 V: 20 R/h Παλμικό, 300 V: 50 uR/παλμός Παλμικό, 400 V: 100 uR/παλμό
Μήκος στελέχους:	26 cm
Connector:	PTW M-System, BNT or TNC triax connectors

Πίνακας 4.2: Περιοχή λειτουργίας του θαλάμου PTW UNIDOS [18]

	Measuring range UNIDOS	Measuring Range Chamber Type 32002
Dose:	Low High	30nGy ... 7.3μGy 1.70μGy ... 730 μGy
Dose Rate:	Low Medium High	12.0 μGy/h ... 24 mGy/h 600 μGy/h ... 1.20 Gy/h 60 mGy/h ... 120 Gy/h

Ακολουθεί σκαρίφημα με τις διαστάσεις του θαλάμου:



Chamber dimensions for chamber type 32002

Εικόνα 4.5: Σκαρίφημα του θαλάμου ιονισμού PTW UNIDOS type 32002 [19]

Ο θάλαμος PTW UNIDOS type 32002 στο ΕΒΟΙΑ χρησιμοποιείται για την μέτρηση του K_{air} από το οποίο προκύπτουν τα υπόλοιπα δοσιμετρικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στο πεδίο της ακτινοπροστασίας, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 4037-1-2-3-4.

4.1.4 Ηλεκτρόμετρο PTW UNIDOS

Κατά την εκτέλεση του πειράματος στο ΕΒΟΙΑ, ο θάλαμος ιονισμού ήταν συνδεδεμένος μέσω ειδικού καλωδίου, με το ηλεκτρόμετρο PTW Universal dosemeter UNIDOS E, φαίνεται στην εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Ηλεκτρόμετρο PTW-UNIDOS E.

Το ηλεκτρόμετρο PTW-Universal dosemeter UNIDOS E διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [20]:

- Μικροεπεξεργαστή πεδίου κατηγορίας Universal-dosemeter για μετρήσεις δόσης και ρυθμού δόσης στην ακτινοθεραπεία και την ακτινοδιάγνωση.
- Προβολή σε δοσιμετρικές ή ηλεκτρικές μονάδες της μέτρησης της δόσης/φορτίου και του ρυθμού δόσης/ρεύματος.
- Δυνατότητα σύνδεσης με θαλάμους ιονισμού και στερεούς ανιχνευτές.
- Δυνατότητα αποθήκευσης έως και 35 ανιχνευτών.
- Λειτουργία δικτύου ή μπαταρίας (5 ώρες).
- Προστασία με κωδικό πρόσβασης για δεδομένα ραδιολογικής βαθμονόμησης.
- Υψηλή τάση ρυθμιζόμενη σε διαστήματα 50 V από 0 έως ± 400 V.
- 3 ευρείες δυναμικές περιοχές μέτρησης.
- Οθόνη μέτρησης μεγάλου μεγέθους και εύκολη καθοδήγηση του χειριστή.
- Τροφοδοσία ευρείας κλίμακας για (100 - 240) AC τάσης δικτύου.
- Υψηλής ευαισθησίας ενισχυτή εισόδου.
- Κλειστό ενισχυτή με ξηραντήρα.

Επιπλέον, το ηλεκτρόμετρο αυτό δίνει τη δυνατότητα επιλογής του χρόνου της μέτρησης. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος ολοκλήρωσης, interval time, και ρυθμίζεται στο μενού SETUP [20]. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε χρόνος ολοκλήρωσης 60 sec. Επίσης επιλέχθηκε λειτουργία καταγραφής φορτίου σε C και τα υποπολλάπλασια του.

4.1.5 Βαρόμετρο και Θερμόμετρο

Πριν από την έναρξη κάθε κύκλου μετρήσεων, γίνεται καταγραφή της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου και της πίεσης σε Pascal, χρησιμοποιώντας το αναλογικό θερμόμετρο και το αναλογικό βαρόμετρο αντίστοιχα, που βρίσκονται μόνιμα τοποθετημένα στην αίθουσα του εργαστηρίου. Η καταγραφή της θερμοκρασίας και της πίεσης πριν από κάθε κύκλο μετρήσεων, διασφαλίζει την ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τόσο το θερμόμετρο όσο και το ηλεκτρόμετρο είναι βαθμονομημένα και οι μετρήσεις τους διορθώνονται κάθε φορά με τον αντίστοιχο συντελεστή βαθμονόμησης.



Εικόνα 4.7: Βαρόμετρο EBOIA



Εικόνα 4.8: Θερμόμετρο EBOIA

4.1.6 Οι μολύβδινοι απορροφητές (φίλτρα) A1-A6.

Στο ΕΒΟΙΑ για τις βαθμονομήσεις χρησιμοποιείται η πηγή ^{137}Cs που έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.1.1. Για την ρύθμιση του ρυθμού δόσης, ανάλογα με το εύρος λειτουργίας κάθε οργάνου, χρησιμοποιούνται:

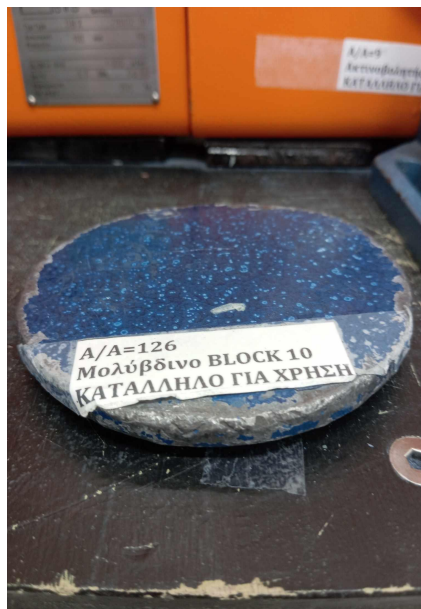
α) διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή (1.0-5.0 m) για τις οποίες έχει επαληθευτεί ο νόμος αντιστρόφου τετραγώνου.

β) Χρήση μολύβδινων απορροφητών κατασκευασμένων στο ΕΒΟΙΑ, οι οποίοι τοποθετούνται κατάλληλα ώστε να εφάπτονται στον κυκλικό κατευθυντήρα της πηγής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικοί μολύβδινοι απορροφητές, A1, A2, A3, A4, A5 και A6. Κάθε απορροφητής έχει διαφορετικό πάχος, ώστε όσο αυξάνεται το πάχος (A1 προς το μεγαλύτερο A6) να μειώνεται ο ρυθμός δόσης σε συγκεκριμένη απόσταση.

Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται και στην φωτογραφία κάθε απορροφητής μολύβδου, διαθέτει δύο τμήματα, ένα με κυκλικό σχήμα διαμέτρου ίσου με το εξωτερικό τμήμα του κατευθυντήρα της πηγής και ένα κυκλικό τμήμα με διάμετρο ίση με το εσωτερική διάμετρο του κατευθυντήρα της πηγής.

Αναλυτικά οι διάμετροι και τα πάχη των κυκλικών τμημάτων για τους έξι απορροφητές είναι:

- **Απορροφητής A1:** Ονομασία A/A126. Οι διαστάσεις του είναι 0,5cm πάχος στο πρόσθιο τμήμα και 0,5cm πάχος στο οπίσθιο τμήμα, με ακτίνα πρόσθιου τμήματος 5cm και οπίσθιου τμήματος 4.135cm



Εικόνα 4.9: Απορροφητής A1

- **Απορροφητής A2** : Ονομασία A/A125, με 1cm πάχος πρόσθιου και 1cm του οπίσθιου τμήματος, ακτίνα πρόσθιου τμήματος 5cm και οπίσθιου τμήματος 4.135cm



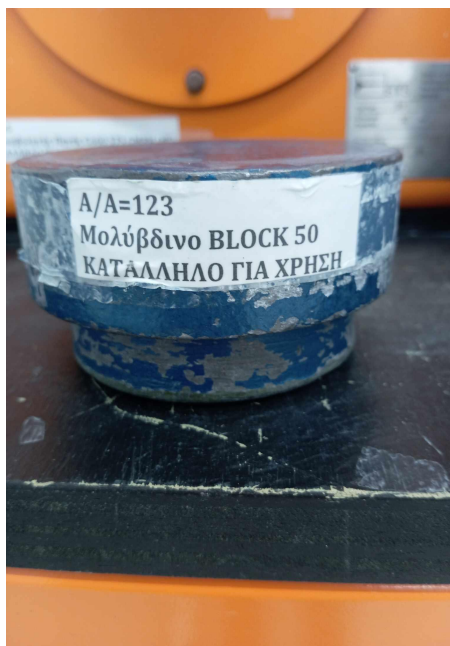
Εικόνα 4.10: Απορροφητής A2

- **Απορροφητής A3** : Ονομασία A/A124, με 1,5cm πάχος πρόσθιου και 1,5 cm του οπίσθιου τμήματος, ακτίνα πρόσθιου τμήματος 5cm και οπίσθιου τμήματος 4.135cm.



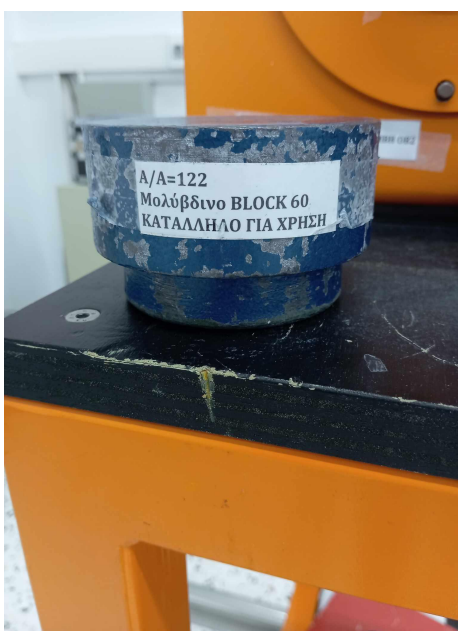
Εικόνα 4.11: Απορροφητής A3

- **Απορροφητής A4** : Ονομασία A/A123, με 3cm πάχος πρόσθιου και 2cm του οπίσθιου τμήματος, ακτίνα πρόσθιου τμήματος 5cm και οπίσθιου τμήματος 4.135cm.



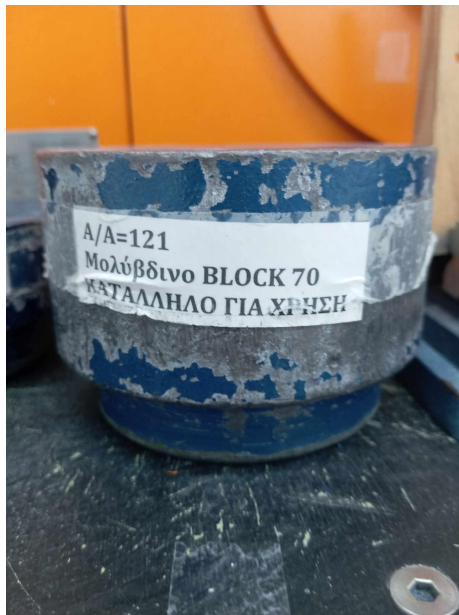
Εικόνα 4.12: Απορροφητής A4

- **Απορροφητής A5** : Ονομασία: A/A122, με 4cm πάχος πρόσθιου και 2cm του οπίσθιου τμήματος, ακτίνα πρόσθιου τμήματος 5cm και οπίσθιου τμήματος 4.135cm.



Εικόνα 4.13: Απορροφητής A5

- **Απορροφητής Α6** : Ονομασία Α/Α121, με 5cm πάχος πρόσθιου και 2cm του οπίσθιου τμήματος, ακτίνα πρόσθιου τμήματος 5cm και οπίσθιου τμήματος 4.



Εικόνα 4.14: Απορροφητής Α6

Σε όλους τους μολύβδινους απορροφητές που χρησιμοποιήθηκαν, οι διάμετροι του μπροστινού κυκλικού τμήματος και του πίσω κυκλικού μέρους είναι ίδιες. Αυτό συμβαίνει διότι το πίσω μέρος τους είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να εφαρμόζει απόλυτα εντός της εσωτερικής κυκλικής επιφάνειας του κατευθυντή, με σκοπό να "κλείνει" ολοκληρωτικά το άνοιγμα της πηγής ενώ το μπροστινό μέρος να καλύπτει την εξωτερική διάμετρο του κατευθυντήρα. Για τα μεγαλύτερα πάχη εξασθενητών χρησιμοποιείται ξύλινη βάση για την στήριξη των εξασθενητών.



Εικόνα 4.15: Όλοι οι μολύβδινοί απορροφητές που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

Οι εξασθενητές καθώς μειώνουν τον ρυθμό δόσης μέσω της εξασθένησης της δέσμης ακτινοβολίας, μεταβάλλουν ελαφρώς το φάσμα εκπομπής Cs-137. Η μεταβολή στο φάσμα εκπομπής μπορεί να αυξήσει την αβεβαιότητα τόσο στον προσδιορισμό της “πραγματικής τιμής” που μετράται με τον υποπρότυπο θάλαμο αναφοράς, όσο και την αβεβαιότητα της “μετρούμενης τιμής” από το όργανο το οποίο βαθμονομείται. Ταυτόχρονα, η χρήση διαφορετικών συνδυασμών εξασθενητών ανάλογα με το εύρος λειτουργίας του κάθε οργάνου και τα επιλεγμένα σημεία βαθμονόμησης κάνει τον προσδιορισμό της συνολικής αβεβαιότητας πιο δύσκολη.

Η διερεύνηση της τροποποίησης του φάσματος της ακτινοβολίας μέσω μοντέλων προσομοίωσης θα διευκολύνει την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας και θα συμβάλει στην αύξηση της ακρίβειας βαθμονόμησης.



Εικόνα 4.16: Πρόσψη διάταξης με χρήση απορροφητή μολύβδου



Εικόνα 4.17: Κάτοψη διάταξης με χρήση απορροφητή μολύβδου

4.1.7 Αίθουσα ακτινοβολήσης του ΕΒΟΙΑ

Το πείραμα εκτελέστηκε στην κεντρική αίθουσα του ΕΒΟΙΑ, η οποία είναι σχεδιασμένη και εξοπλισμένη κατάλληλα για την διεξαγωγή πειραμάτων ακτινοβολήσης για τις ανάγκες του εργαστηρίου. Ο σχεδιασμός της αίθουσας έγινε με τρόπο που ικανοποιεί τους κανόνες ακτινοπροστασίας εργαζομένων και κοινού σύμφωνα με την ισχύοντες κανονισμούς ακτινοπροστασίας [3].



Εικόνα 4.18: Αίθουσα Εργαστηρίου ΕΒΟΙΑ [1]

Ο χώρος αυτός χαρακτηρίζεται από τα εξής:

1. **Ασφάλεια Εισόδου:** Η είσοδος στον πειραματικό χώρο είναι προσεκτικά σχεδιασμένη για τη διασφάλιση της προστασίας και της ασφάλειας των εργαζομένων. Ένδειξη με κόκκινο φως επισημαίνει την κατάσταση όταν στην αίθουσα πραγματοποιούνται ακτινοβολήσεις, ενώ με πράσινο φως υποδεικνύει την δυνατότητα εισόδου στην αίθουσα.
2. **Μόνιμα εγκατεστημένος ανιχνευτής ακτινοβολίας χώρου:** Στην αίθουσα ακτινοβολήσεων υπάρχει μόνιμα εγκατεστημένος μετρητής ακτινοβολίας χώρου που καταγράφει συνεχώς τα επίπεδα ακτινοβολίας στο εσωτερικό της αίθουσας. Ταυτόχρονα, οι μετρήσεις προβάλλονται σε οθόνη που βρίσκεται εκτός της αίθουσας. Όταν τα επίπεδα ακτινοβολίας υπερβαίνουν τα επίπεδα ειδοποίησης ενεργοποιείται ηχητικό και οπτικό σήμα.
3. **Παρακολούθηση με Κάμερες:** Για λόγους ασφαλείας, υπάρχουν εγκατεστημένες κάμερες εντός της αίθουσας για την εποπτεία τόσο του πειραματικού χώρου όσο και την παρακολούθηση των ενδείξεων των οργάνων που βαθμονομούνται.
4. **Θωράκιση αίθουσας:** Οι τοίχοι της αίθουσας ακτινοβολήσης είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα κατάλληλου πάχους ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις των κανονισμών ακτινοπροστασίας.
5. **Γεωμετρία του Χώρου:** Ο πειραματικός χώρος έχει σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, με διαστάσεις 12,203 m μήκος, 6,268 m πλάτος και 2,783 m ύψος, που επιτρέπει την ασφαλή λειτουργία του πειραματικού εξοπλισμού.

6. **Δοκοί σκυροδέματος στο ταβάνι:** Στους τοίχους και την οροφή του χώρου υπάρχουν διαμορφώσεις από μπετόν (κολώνες και δοκοί) οι διαστάσεις των οποίων έχουν μετρηθεί λεπτομερώς. Αυτές οι διαμορφώσεις αποτελούν καίριο παράγοντα, καθώς επηρεάζουν τα επίπεδα πρωτογενούς και σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.
7. **Θέση πηγής:** Η πηγή είναι τοποθετημένη σε απόσταση 1 m από το πάτωμα του εργαστηρίου, 1,675 m μπροστά από τον οπίσθιο τοίχο, και 2,284 m αριστερά από τον δεξιό τοίχο της αίθουσας.
8. **Τοποθέτηση θαλάμου ιονισμού στην αίθουσα:** Ο θάλαμος ιονισμού τοποθετείται σε σταθερή απόσταση 2 m από την πηγή, σε ειδικό τρόλευ που επιτρέπει την μετακίνηση του σε τρεις άξονες. Το γεωμετρικό του κέντρο είναι ευθυγραμμισμένο με το κέντρο της πηγής με την βοήθεια επιτοιχίων laser.
9. Επιπλέον ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις ακτινοπροστασίας και ασφάλειας [3]:
 - Χώρος αποκλειστικής χρήσης.
 - Ύπαρξη θωρακισμένης περιοχής από την οποία γίνεται ο χειρισμός όλων των ακτινοβολητών.
 - Αυτόματα συστήματα διακοπής λειτουργίας ακτινοβολητών τοποθετημένα στην πόρτα.
 - Χειροκίνητοι διακόπτες για την άμεση διακοπή της ακτινοβολίας, τοποθετημένα στο χειριστήριο, και εντός της αίθουσας ακτινοβολίας.
 - Κατάλληλη σήμανση του χώρου ως “ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ” και ελεγχόμενη πρόσβαση στο ΕΒΟΙΑ.
 - Παρακολούθηση της δόσης των εργαζομένων με χρήση ατομικών δοσιμέτρων θερμοφωταύγειας και δοσιμέτρων άμεσης ανάγνωσης.
 - Ύπαρξη συστημάτων φυσικής προστασίας από κακόβουλες ενέργειες.

4.2 Αναλυτική Περιγραφή πειράματος

4.2.1 Πειραματική Διαδικασία

Το πείραμα στο ΕΒΟΙΑ εκτελέστηκε την χρονική περίοδο 1-30 Ιουνίου του 2022. Η εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας απαιτεί μεγάλη προσοχή στην μεθοδολογία και την ακρίβεια κάθε βήματος, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η σωστή καταγραφή των δεδομένων. Η διαδικασία μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα τέσσερα βασικά στάδια:

1. **Στήσιμο της διάταξης:** Αρχικά, πραγματοποιείται το στήσιμο της πειραματικής διάταξης. Το κέντρο του θαλάμου ιονισμού (PTW UNIDOS TYPE 32002) τοποθετείται σε απόσταση δύο μέτρων από την πηγή ^{137}Cs , ευθυγραμμισμένος με το κέντρο της πηγής. Ο θάλαμος συνδέεται μέσω ειδικού καλωδίου με το ηλεκτρόμετρο, που βρίσκεται έξω από την αίθουσα ακτινοβολίας και στην οθόνη του οποίου καταγράφονται οι μετρήσεις του θαλάμου. Στην αίθουσα τοποθετούνται το θερμόμετρο και το βαρόμετρο. Μετά την κατάλληλη τοποθέτηση της διάταξης, και κυρίως του θαλάμου ιονισμού, απαιτείται ένα χρονικό διάστημα, από 24 έως 48 ώρες, το σύστημα να μείνει σταθερό πριν από την έναρξη του πειράματος και των μετρήσεων. Αυτό συμβαίνει μόνο μία φορά, πριν την έναρξη του πειράματος, και όχι μεταξύ των διαφορετικών κύκλων μετρήσεων. Η διαδικασία αυτή σχετίζεται με τη σταθεροποίηση του συστήματος και είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε πειράματα που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα στις μετρήσεις.

2. **Εφαρμογή Απορροφητών Μολύβδου:** Στους κύκλους μετρήσεων με τη χρήση απορροφητών μολυβδου, δηλαδή σε όλους τους κύκλους εκτός του πρώτου, το επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση του μολύβδινου απορροφητή στον κατευθυντή. Η σταθεροποίηση του γίνεται με τη χρήση μιας ειδικής ξύλινης διάταξης, η οποία σφίγγει τον απορροφητή και το κρατάει σταθερό μπροστά από τον κατευθυντή.
3. **Καταγραφή παραμέτρων περιβάλλοντος και μέτρηση υποστρώματος (background):** Με την ολοκλήρωση του στησίματος της διάταξης, πριν από την έναρξη κάθε κύκλου μετρήσεων, καταγράφονται προσεκτικά η θερμοκρασία και η πίεση του περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας το αναλογικό θερμόμετρο και το αναλογικό βαρόμετρο του ΕΒΟΙΑ αντίστοιχα. Στη συνέχεια, ακολουθεί η μέτρηση της ακτινοβολίας υποβάθρου, όπου η μέτρηση έχει χρονική διάρκεια ενός λεπτού, και το αποτέλεσμα καταγράφεται στην οθόνη του ηλεκτρομέτρου σε $\mu\text{C}/\text{min}$.
4. **Εκτέλεση Μετρήσεων:** Κάθε κύκλος μετρήσεων περιλαμβάνει έξι μετρήσεις, με την κάθε μέτρηση να διαρκεί ένα λεπτό. Η δόση της ακτινοβολίας καταγράφεται από την οθόνη του ηλεκτρομέτρου σε μονάδες νανοκουλομπ στο λεπτό nC/min . Κάθε μέτρηση επαναλαμβάνεται με για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Μετά την ολοκλήρωση των 6 μετρήσεων για κάθε κύκλο, ακολουθούνται από την αρχή όλα τα βήματα με τη σειρά που είναι αριθμημένα. Ο πρώτος κύκλος μετρήσεων είναι χωρίς τη χρήση μπλοκ μολυβδου, ενώ ο δεύτερος με τη χρήση του A1, ο τρίτος με τη χρήση του A2, ο τέταρτος με του A3, ο πέμπτος με του A4, ο έκτος με του A5 και ο έβδομος με του A6.



Εικόνα 4.19: Συσκευή ελέγχου λειτουργίας της Πηγής.

4.2.2 Πειραματικές μετρήσεις

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν και για τους επτά κύκλους του πειράματος, όπου έγιναν έξι μετρήσεις για κάθε κύκλο, είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα πειράματος στο ΕΒΟΙΑ

Απορροφητές	Πίεση (Pa)	Θερμοκρασία (°C)	Υπόστρωμα (pCb)	1 ($\frac{nC}{min}$)	2 ($\frac{nC}{min}$)	3 ($\frac{nC}{min}$)	4 ($\frac{nC}{min}$)	5 ($\frac{nC}{min}$)	6 ($\frac{nC}{min}$)	M.T. ($\frac{nC}{min}$)	S.D.
Χωρίς	98450	23,8	0,16	4,299	4,299	4,300	4,301	4,300	4,298	4,30E+00	1,05E-03
A1	98450	23,8	0,22	1,145	1,144	1,144	1,145	1,145	1,144	1,14E+00	5,48E-04
A2	98450	23,7	0,22	0,4059	0,406	0,4058	0,4055	0,4057	0,406	4,06E-01	1,94E-04
A3	98480	23,6	0,15	0,126	0,126	0,1261	0,1261	0,1262	0,1261	1,26E-01	7,53E-05
A4	98470	23,5	0,16	0,0142	0,01418	0,0142	0,01414	0,01424	0,01424	1,42E-02	3,79E-05
A5	98470	23,5	0,16	0,00559	0,00558	0,00556	0,0056	0,00554	0,00563	5,58E-03	3,14E-05
A6	98470	23,65	0,16	0,00245	0,00247	0,00246	0,00246	0,00241	0,00243	2,45E-03	2,25E-05

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των 7 κύκλων μετρήσεων είναι:

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	<i>Μέση τιμή</i> $\frac{nC}{min}$
ΧΩΡΙΣ	4,30E+00
A1	1,14E+00
A2	4,06E-01
A3	1,26E-01
A4	1,42E-02
A5	5,58E-03
A6	2,45E-03

Όπως αναμενόταν, η χρήση απορροφητών μολύβδου με διαφορετικά πάχη επηρεάζει τον ρυθμό δόσης. Συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους μολύβδου επιφέρει μείωση του ρυθμού δόσης σε σχέση με το πρώτο πείραμα, χωρίς την χρήση απορροφητή μολύβδου. Συγκεκριμένα, στο δεύτερο πείραμα με τον απορροφητή μολύβδου πάχους 1 cm υπολογίζεται μείωση του ρυθμού δόσης κατά 73,48%. Στο τρίτο πείραμα, με απορροφητή μολύβδου πάχους 2 cm ο ρυθμός δόσης μειώνεται κατά 90,56%, στο τέταρτο με απορροφητή πάχους 3 cm κατά 97,07%, στο πέμπτο με απορροφητή πάχους 5 cm κατά 99,67%, στο έκτο με απορροφητή πάχους 6 cm κατά 99,87%, ενώ τέλος στο έβδομο πείραμα με χρήση απορροφητή μολύβδου πάχους 7cm ο ρυθμός δόσης του αρχικού πειράματος μειώνεται κατά 99,94%.

4.2.3 Αφαίρεση του υποστρώματος από τις μετρήσεις

Για την σωστή επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων που προκύπτουν, είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη το υπόστρωμα που καταγράφεται πριν την έναρξη κάθε πειραματικού κύκλου. Για να συμβεί αυτό, είναι κρίσιμο να γίνει αφαίρεση του υποστρώματος από τις μετρήσεις. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα σύνολο από "καθαρές" μετρήσεις που αντιπροσωπεύουν την ακτινοβολία που προέρχεται από την πηγή του πειράματος και το πάχος των απορροφητών μολυβδου.

Η διαδικασία αφαίρεσης του υποστρώματος, η οποία είναι σε μονάδες μέτρησης nC/min, η οποία εκτιμάται από μέτρηση του υποστρώματος διάρκειας ενός λεπτού, δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα με αφαίρεση ακτινοβολίας υποβάθρου

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	<i>Μέση τιμή $\frac{nC}{min}$</i>
ΧΩΡΙΣ	4,30E+00
A1	1,14E+00
A2	4,06E-01
A3	1,26E-01
A4	1,40E-02
A5	5,42E-03
A6	2,29E-03

Με την αφαίρεση του υποστρώματος από τις μέσες τιμές, παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά συγκριτικά με τις μέσες τιμές χωρίς την αφαίρεση.

4.2.4 Συντελεστής βαθμονόμησης από ΕΒΟΙΑ

Για τη μετατροπή των αριθμητικών αποτελεσμάτων από $\frac{nC}{min}$ σε δόση ανά φωτόνιο $\frac{Gy}{photon}$ έγινε αρχικά χρήση του συντελεστή βαθμονόμησης (calibration factor) του υποπρότυπου θαλάμου ιονισμού. Η βαθμονόμηση του υποπρότυπο θαλάμου έγινε στο πρότυπο εργαστήριο PTB και εκφράζεται σε μονάδες $\frac{Gy}{Cb}$. (Πιστοποιητικό βαθμονόμησης ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β). Ο συντελεστής βαθμονόμησης μετατρέπει το μετρούμενο ρεύμα ($\frac{nC}{min}$) σε ρυθμό περιβατολογικής δόσης $\frac{\mu Gy}{min}$.

Η τιμή αυτού του συντελεστή βαθμονόμησης είναι **25,68 $\frac{\mu Gy}{nC}$** .

4.2.5 Μετατροπή μονάδων από $\frac{nC}{min}$ σε $\frac{Gy}{photon}$

Χρησιμοποιώντας τις προδιαγραφές της πηγής, μπορούμε να υπολογίσουμε τον ακριβή αριθμό φωτονίων που εκπέμπει η πηγή ^{137}Cs του ΕΒΟΙΑ, την ημέρα του πειράματος. Γνωρίζοντας την ενεργότητα A_0 της πηγής την ημερομηνία αναφοράς (Φεβρουάριος 1999) η οποία είναι $7,4E+11$ Bq (διασπάσεις/δευτερόλεπτο), μπορούμε να υπολογίσουμε την ενεργότητα της πηγής την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος (Ιούνιος 2022), με την εφαρμογή του τύπου:

$$A = 7,4E+11 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot decay}{T_{1/2}}} \quad (4.1)$$

- **A:** Η ενεργότητα την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος
- **decay:** Το χρονικό διάστημα μεταξύ της ημερομηνίας αναφοράς της πηγής ^{137}Cs και της ημερομηνίας διεξαγωγής του πειράματος 02/1999-06/2022. Decay= 8521 d.
- **$T_{1/2}$** = ο χρόνος ημιζωής της πηγής ^{137}Cs , 10818 ημέρες
- **yield**= το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή. Η τιμή του προκύπτει από το διάγραμμα διασπάσεων του ^{137}Cs είναι 0,8499.

Η ενεργότητα της πηγής τον Ιούνιο του 2022, υπολογίστηκε ίση με $4,29E+11$ Bq.

Για να γίνει ο υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$A \cdot yield = 3,64E+11 \frac{\text{φωτόνια}}{\text{sec}} \quad (4.2)$$

Το πλήθος των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή μέσα στη στερεά γωνία $14,64^\circ$, που αντιστοιχεί στο άνοιγμα του collimator της πηγής προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ρυθμό εκπομπής φωτονίων επί τον παράγοντα $14,64/360$. Τελικά υπολογίστηκε ότι μέσα στη στερεά γωνία εκπέμπονται $14.815.837.959$ φωτόνια/s.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μετατροπής ρυθμού εκπομπής φωτονίων σε ρυθμό απορροφώμενης δόσης (Gy/photon) έγιναν οι παρακάτω υπολογισμοί:

Αρχικά, πολλαπλασιάστηκαν όλες οι μετρήσεις που έγιναν σε nC/min με τον συντελεστή βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται από το ΕΒΟΙΑ για την μετατροπή $\mu Gy/nC$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταγράφονται στον Πίνακα 4.6:

Πίνακας 4.6: Μετρήσεις σε $\mu\text{Gy}/\text{min}$ για κάθε απορροφητή

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	Μέση τιμή $\frac{\mu\text{Gy}}{\text{min}}$
ΧΩΡΙΣ	1,10E+02
A1	2,94E+01
A2	1,04E+01
A3	3,23E+00
A4	3,61E-01
A5	1,39E-01
A6	5,87E-02

Και με αλλαγή της κλίμακας του χρόνου προκύπτει ο Πίνακας 4.7:

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα μετρήσεων σε $\mu\text{Gy}/\text{s}$ για κάθε απορροφητή

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	Μέση τιμή $\frac{\mu\text{Gy}}{\text{sec}}$
ΧΩΡΙΣ	1,84E+00
A1	4,90E-01
A2	1,74E-01
A3	5,39E-02
A4	6,01E-03
A5	2,32E-03
A6	9,79E-04

Διαιρώντας τις παραπάνω μετρήσεις με το ρυθμό εκπομπής φωτονίων από την πηγή προκύπτει ο συντελεστής μετατροπής $\mu\text{Gy}/\text{photon}$ για κάθε απορροφητή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Συντελεστές μετατροπής $\mu\text{Gy}/\text{photon}$ για κάθε απορροφητή

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	Μέση τιμή $\frac{\mu\text{Gy}}{\text{photon}}$	Μέση τιμή $\frac{\text{Gy}}{\text{photon}}$
ΧΩΡΙΣ	5,05E-12	5,05E-18
A1	1,34E-12	1,34E-18
A2	4,77E-13	4,77E-19

A3	1,48E-13	1,48E-19
A4	1,65E-14	1,65E-20
A5	6,37E-15	6,37E-21
A6	2,69E-15	2,69E-21

4.2.6 Αποτελέσματα πειράματος

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει η συσχέτιση μεταξύ του πάχους των μολύβδινων απορροφητών και του ρυθμού δόσης λόγω της ακτινοβολίας, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.9 και στα γραφήματα που παρουσιάζονται στο γράφημα της Εικόνας 4.20.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα Πειράματος ΕΒΟΙΑ

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	Πάχος σε cm	Μέση τιμή $\frac{Gy}{photon}$
ΧΩΡΙΣ	0	5,05E-18
A1	1	1,34E-18
A2	2	4,77E-19
A3	3	1,48E-19
A4	5	1,65E-20
A5	6	6,37E-21
A6	7	2,69E-21

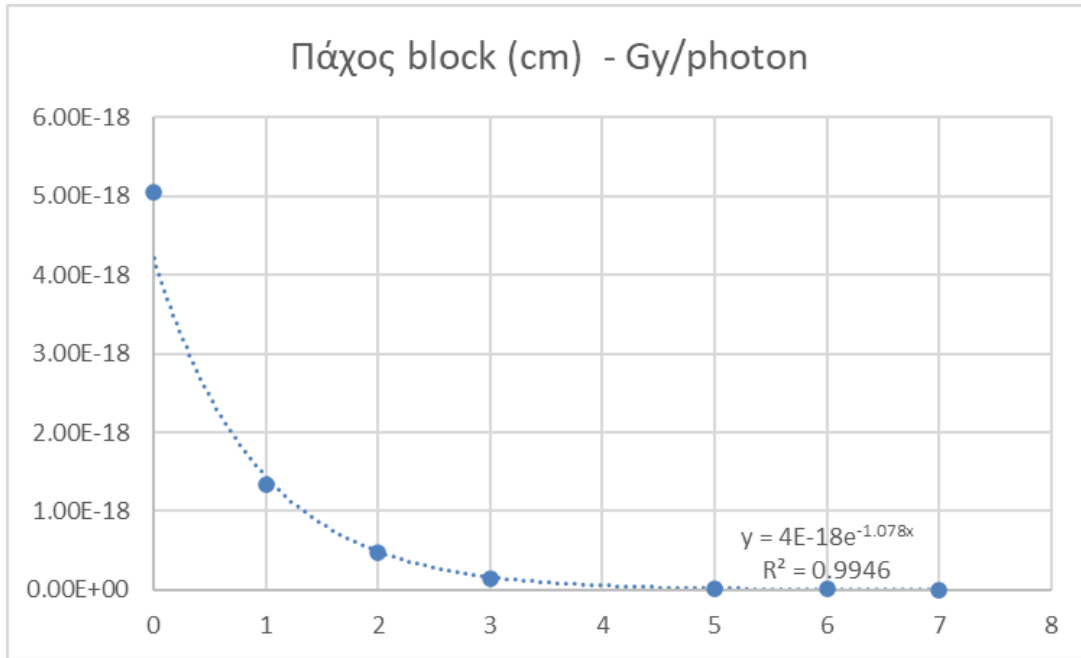
Στο γράφημα αυτό τα πειραματικά σημεία έχουν προσαρμοσθεί στην εκθετική συνάρτηση αναδρομής:

$$y = 4E-18 \cdot e^{-1,078x} \quad (4.3)$$

καθώς η εξασθένηση της ακτινοβολίας μέσα από την ύλη ακολουθεί τον εκθετικό νόμο. Η προσαρμογή αυτή των πειραματικών σημείων κρίνεται επαρκώς ικανοποιητική, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης είναι αρκετά υψηλός ($R^2=0,9946$). Πάντως, πρέπει να διευκρινισθεί ότι ο εκθετικός νόμος της εξασθένησης φωτονίων:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (4.4)$$

ισχύει για παράλληλη δέσμη φωτονίων μέσα από ένα υλικό. Για την περίπτωση του ρυθμού δόσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι κατά το πείραμα η ακτινοβολία δεν συνιστά παράλληλη δέσμη, αλλά δέσμη μέσα σε μία στερεά γωνία. Επιπλέον, και πιο σημαντικό, η δόση που καταμετράται δεν οφείλεται μόνον στα φωτόνια της αρχικής ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή, αλλά και σε φωτόνια μειωμένης ενέργειας, λόγω σκεδάσεων μέσα στους απορροφητές, στον αέρα και στα υλικά που βρίσκονται στο περιβάλλον που διεξάγεται το πείραμα κυρίως τους τείχους το δάπεδο και την οροφή του δωματίου. Κατά συνέπεια δεν αναμένεται από φυσικής απόψεως να ακολουθείται αυστηρά ο εκθετικός νόμος μείωσης της δόσης με το πάχος του απορροφητή.



Εικόνα 4.20: Γράφημα αποτελεσμάτων του ΕΒΟΙΑ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE

5.1 Εισαγωγή

Το τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, περιλαμβάνει μια εισαγωγή στον κώδικα προσομοίωσης Monte-Carlo PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ακτινοβόλησης στο ΕΒΟΙΑ. Ουσιαστικά, ο κώδικας PENELOPE αποτελεί μια πολύ ισχυρή εργαλειοθήκη προσομοίωσης που χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση διαδικασιών που εμπλέκουν την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη και ειδικότερα την αλληλεπίδραση με την ύλη των φωτονίων των ηλεκτρονίων και των ποζιτρονίων. Με την μέθοδο Monte Carlo, μπορούν να προσομοιωθούν τα περίπλοκα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη, αναπαριστώντας την πραγματικότητα με βάση την τυχαιότητα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του κώδικα PENELOPE, εστιάζοντας στα κύρια στοιχεία του κώδικα και τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων που έγιναν. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα διάφορα είδη εικονικών ανιχνευτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε προσομοίωσης.

5.2 Η προσομοίωση Monte Carlo

Τη δεκαετία του 1940, επιστήμονες που εργάζονταν στο πρόγραμμα πυρηνικών όπλων στο Los Alamos εισήγαγαν τον όρο "Monte Carlo" για να περιγράψουν μια κατηγορία αριθμητικών μεθόδων που βασίζονται στη χρήση τυχαίων αριθμών. Σήμερα, οι μέθοδοι Monte Carlo εφαρμόζονται ευρέως για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων στη φυσική και τα μαθηματικά, ιδίως όταν εμπλέκονται πολλαπλές ανεξάρτητες μεταβλητές και οι πιο συμβατικές αριθμητικές μέθοδοι θα αδυνατούσαν να αντιμετωπίσουν ή θα απαιτούσαν πολύ μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια πολύ μεγάλη ποσά μνήμης και υπολογιστικού χρόνου. Στην προσομοίωση Monte Carlo της διάδοσης της ακτινοβολίας, η διαδρομή ενός σωματιδίου αντιμετωπίζεται ως μια τυχαία ακολουθία ελεύθερων τροχιών που καταλήγουν σε ένα γεγονός αλληλεπίδρασης, μετά το οποίο το σωματίδιο αλλάζει κατεύθυνση κίνησης, χάνει ενέργεια και παράγει δευτερεύοντα σωματίδια. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι το σωματίδιο να χάσει όλη την ενέργεια του και να απορροφηθεί, ή μέχρι να εξέλθει των ορίων του συστήματος. Κατά το τέλος της ιστορίας του σωματιδίου, καταγράφονται τα διάφορα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοσή του (π.χ. γωνία εισόδου ή εξόδου από ορισμένη επιφάνεια, ενέργεια που απέθεσε σε συγκεκριμένο σημείο στο χώρο κ.ο.κ.). Στη συνέχεια ακολουθεί η παραγωγή της επόμενης τυχαίας ιστορίας. Η αποτελεσματική διαδικασία προσομοίωσης μιας ιστορίας ενός σωματιδίου στηρίζεται στους φυσικούς νόμους, εστιάζοντας ιδίως στα μοντέλα αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με την ύλη. Η αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης έγκειται στην παραγωγή πολύ μεγάλου πλήθους ιστοριών και στην εκτίμηση διαφόρων μεγεθών από τα αποτελέσματα του πλήθους των ιστοριών. Όπως προαναφέρθηκε, για τα φωτόνια οι κύριες αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν:

- Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- Τη δίδυμη παραγωγή
- Το φαινόμενο Compton
- Τη μη ελαστική σκέδαση

Εφόσον κατά τις αλληλεπιδράσεις παράγονται δευτερογενή σωματίδια - συνήθως ηλεκτρόνια και χαρακτηριστικές ακτίνες-Χ - πρέπει να επισημανθεί ότι η προσομοίωση και αυτών είναι απαραίτητη για την επιτυχή ολοκλήρωση μίας ιστορίας. Αν και η πληροφορία που παρέχεται από μια ιστορία είναι ανεπαρκής για την ανάλυση του προβλήματος, η επανάληψη της προσομοίωσης - δηλαδή η δημιουργία μεγάλου αριθμού ιστοριών - μπορεί να παράγει ακριβή αποτελέσματα που να επιβεβαιώνονται από πειραματικά δεδομένα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοδεύονται από αβεβαιότητες, οι οποίες μπορούν να μειωθούν με μόνο με αύξηση του πλήθους των ιστοριών που προσομοιώνονται, με το ανάλογο υπολογιστικό κόστος. Σε ορισμένες περιπτώσεις πάντως υπάρχει δυνατότητα να λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση της διασποράς.

5.3 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE 2011

Στο πέρασμα του χρόνου, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι κώδικες που ασχολούνται με την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων και φωτονίων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο Monte Carlo. Ανάμεσά τους, αναφέρονται οι: ETRAN (Berger M.J. και Seltzer S.M., 1988), ITS3 (Halbleib J.A. κ.α., 1992), EGS4 (Nelson W.R. κ.α., 1985), EGSnrc (Kawrakow I. και Rogers D.W.O., 2000), GEANT3 (Brun R. κ.α., 1986) και MCNP4B (Briesmeister J.F., 1997). Ένας αντίστοιχος κώδικας είναι και ο PENELOPE, ο οποίος αναπτύχθηκε από τους F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau στο πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης το 1996. Η έκδοση του κώδικα που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, είναι του 2011 [21].

Ο κώδικας PENELOPE προσομοιώνει τη διάδοση ηλεκτρονίων-φωτονίων σε υλικά συστήματα που αποτελούνται από έναν αριθμό ομογενών περιοχών (σωμάτων) οι οποίες ορίζονται από διαχωριστικές επιφάνειες. Το όνομα είναι ακρωνύμιο που σημαίνει PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons. Αρχικά, αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της μεταφοράς και απώλειας ενέργειας (PENetration και του Energy Loss) των ποζιτρονίων και των ηλεκτρονίων στην ύλη – τα φωτόνια εισήχθησαν αργότερα. Τα μοντέλα αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιεί ο κώδικας και οι σχετικές βάσεις δεδομένων επιτρέπουν την προσομοίωση της μεταφοράς ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων και φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή από 50 eV έως 1 GeV.

Ο κώδικας PENELOPE δομείται από ένα σύνολο υπορουτινών, ενώ για την επιτυχή υλοποίηση των προσομοιώσεων απαιτείται η συγγραφή ενός κυρίως προγράμματος, που συνήθως χαρακτηρίζεται ως κώδικας χρήστη (user-code). Αυτό το κυρίως πρόγραμμα παρακολουθεί την πορεία του σωματιδίου και καταγράφει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Μαζί με τον κώδικα διανέμονται τρία προγράμματα χρήστη: το PENSLAB, το PENCYL και το PENMAIN, τα οποία καλύπτουν μεγάλο φάσμα αναγκών για την προσομοίωση σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Τα δύο πρώτα προσαρμόζονται σε συγκεκριμένες γεωμετρίες, ενώ το τρίτο είναι πολύ πιο ευέλικτο και προτείνεται για πιο πολύπλοκες γεωμετρίες. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου προγράμματος εξαρτάται από την συγκεκριμένη ανάγκη και γεωμετρία της προσομοίωσης. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα PENMAIN, το οποίο θα αναλυθεί συνοπτικά στη συνέχεια.

Το πακέτο που περιέχει τον κώδικα PENELOPE περιλαμβάνει πέντε (5) υποκαταλόγους (directories), όπου κάθε υποκατάλογος περιλαμβάνει μια σειρά αρχείων ή ακόμα και περισσότερους υποκαταλόγους. Τα πέντε directories είναι:

1) doc: Περιέχει τέσσερα (4) βοηθητικά αρχεία που αφορούν τον κώδικα και τη λειτουργία του. Αυτά είναι:

- **tutorial.pdf:** Το αρχείο αυτό περιέχει παραδείγματα και οδηγίες για τη σωστή χρήση του κυρίως κώδικα PENELOPE, καθώς και των βοηθητικών προγραμμάτων που παρέχονται. Μέσα από παραδείγματα, αυτό το αρχείο βοηθά τους χρήστες να αντιληφθούν τον τρόπο λειτουργίας του κώδικα.
- **manual.txt, manual.pdf:** Και τα δύο αρχεία περιέχουν τις ίδιες πληροφορίες σχετικά με τη δομή και τις λειτουργίες του κώδικα PENELOPE – μόνη διαφορά είναι στο format του αρχείου. Σε αυτά τα αρχεία παρουσιάζεται μια συνοπτική ανάλυση των λειτουργιών και της δομής του κώδικα PENELOPE.
- **penelope_2011_NEA.pdf:** Το εν λόγω αρχείο, το οποίο αποτελεί έκδοση της NEA-DB⁸ του ΟΟΣΑ αποτελεί το επίσημο εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα PENELOPE στην έκδοση του 2011. Το εγχειρίδιο περιγράφει λεπτομερώς την προσέγγιση της προσομοίωσης Monte Carlo για τη μεταφορά ηλεκτρονίων και φωτονίων και αποτελείται από πολύτιμες πληροφορίες για τους χρήστες που επιθυμούν βαθύτερη κατανόηση του κώδικα.

2) fsource: Περιέχει πέντε (5) αρχεία FORTRAN τα οποία είναι:

- **penelope.f:** Περιέχει τις απαραίτητες υπορουτίνες που αναλαμβάνουν την προσομοίωση της κίνησης των σωματιδίων στον χώρο.
- **penvared.f:** Περιέχει υπορουτίνες που βελτιώνουν τη στατιστική των αποτελεσμάτων μειώνοντας την αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- **pengeom.f:** Σε περίπτωση που απαιτείται η κατασκευή σύνθετων γεωμετριών, περιλαμβάνει τις απαραίτητες υπορουτίνες για αυτό το σκοπό. Η οργανωμένη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων επιφανειών, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνωστό ως τετραγωνική γεωμετρία (quadric geometry).
- **material.f:** Βοηθητικό πρόγραμμα που παράγει τα αρχεία υλικών της γεωμετρίας που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση.
- **timer.f:** Περιέχει τις υπορουτίνες που καταγράφουν τις χρονικές στιγμές και τον αριθμό των ιστοριών που έχουν ολοκληρωθεί σε κάθε στάδιο της προσομοίωσης. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει τον έλεγχο και την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

3) pendbase: Περιέχει αρχεία σε διάφορες μορφές που περιέχουν τις ιδιότητες των υλικών. Τα αρχεία αυτά αξιοποιούνται από τα προγράμματα material.exe και shower.exe

4) mains: Αποτελείται από τρεις (3) υποκαταλόγους: penslab, pencyl και penmain. Κάθε υποκατάλογος περιέχει παραδείγματα για κάθε ένα από τα αντίστοιχα προγράμματα χρήστη και αρχεία εισόδου του απεικονιστικού προγράμματος GNUPLOT, με τα οποία εμφανίζονται γραφικά τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση προσομοίωσης.

⁸ Nuclear Energy Agency Data Base

5) other: Αποτελείται από τέσσερις (4) υποκαταλόγους, οι οποίοι είναι:

- **gview:** Περιέχει δύο προγράμματα, το "gview2d" και το "gview3d." Τα προγράμματα αυτά εμφανίζουν τη γεωμετρία της κατασκευής σε δύο ή τρεις διαστάσεις, αντίστοιχα.
- **shower:** Πρόκειται για πρόγραμμα που αναλαμβάνει την προσομοίωση της κίνησης μικρού πλήθους σωματιδίων εντός μιας πλάκας που κατασκευάζεται από συγκεκριμένο υλικό. Μέσα από αυτό το πρόγραμμα, η πορεία των σωματιδίων παρουσιάζεται γραφικά στην οθόνη του υπολογιστή.
- **tables:** Πρόγραμμα το οποίο εκτελεί υπολογισμούς για τις ιδιότητες διαφόρων υλικών. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών καταγράφονται σε αρχεία που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες αυτών των υλικών.
- **emfields:** Περιλαμβάνει υπορουτίνες που είναι χρήσιμες για την προσομοίωση της μετάβασης ραδιενεργών σωματιδίων μέσα από ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

5.4 Οι εικονικοί ανιχνευτές

Η ενότητα αυτή εξετάζει τη χρήση των εικονικών ανιχνευτών, οι οποίοι αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την επιτυχημένη προσομοίωση. Ουσιαστικά, ένας εικονικός ανιχνευτής αποτελείται από μια σειρά εντολών εντός του κώδικα PENMAIN, οι οποίες εκτελούνται όταν ένα σωματίδιο εισέρχεται στο σώμα που έχει οριστεί από τον χρήστη, μέσω του αρχείου εισόδου, ως ανιχνευτής ή τμήμα ενός ανιχνευτή. Η ενσωμάτωση των εικονικών ανιχνευτών στον κώδικα PENELOPE είναι αναγκαία γιατί παρέχουν στο χρήστη αναλυτικές πληροφορίες που αφορούν τη διαδικασία προσομοίωσης και επιτρέπουν την καταγραφή μεγεθών τα οποία είναι χρήσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και τη σύνδεση τους με το φυσικό πρόβλημα. Στο πλαίσιο του κώδικα PENELOPE, υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες εικονικών ανιχνευτών:

1. **οι ανιχνευτές αλληλεπίδρασης ή διέλευσης (impact detectors):** Αποτελείται από ένα σώμα ή ένα σύνολο σωμάτων, τα οποία ορίζονται από τον χρήστη στο αρχείο εισόδου (.in). Τα σώματα αυτά θα πρέπει να έχουν οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας (.geo) και επομένως να αποτελούν τμήματα της γεωμετρίας της κατασκευής. Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης ή διέλευσης καταγράφει την ενέργεια των σωματιδίων που διέρχονται μέσα από αυτόν, σε ένα αρχείο εξόδου (src-impdet-##.dat). Με το πέρας της προσομοίωσης, δημιουργείται ένα αρχείο στο οποίο καταγράφεται το φάσμα της ενέργειας των σωματιδίων που εισήλθαν στον ανιχνευτή. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να καταγράψει σε ξεχωριστά αρχεία πληροφορίες που αφορούν τη θέση, το είδος, την ενέργεια, την κατεύθυνση, την προέλευση καθώς και τον παράγοντα βαρύτητας όλων των σωματιδίων που εισήλθαν στον ανιχνευτή.
2. **οι ανιχνευτές δόσης (dose enclosure):** Ο ανιχνευτής δόσης καταγράφει την κατανομή της δόσης σε μία ορισμένη περιοχή. Ορίζεται ως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο πλέγμα, που ορίζεται από τον χρήστη στο αρχείο εισόδου (.in) και αποτελείται από ένα ή περισσότερα σώματα, τα οποία δεν ανήκουν στο αρχείο γεωμετρίας (.geo), καθώς δεν αποτελούν τμήμα της κατασκευής. Σε κάθε στοιχείο του ορθογωνικού πλέγματος καταγράφεται η ενέργεια που συνολικά έχει αποθεθεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και εν τέλει η δόση. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης καταγράφεται η κατανομή της δόσης στα στοιχεία του πλέγματος στα αρχεία εξόδου (x-dose.dat, y-dose.dat, z-dose.dat, 3d-dose.dat).

3. **οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (energy deposition detectors):** Ο ανιχνευτής εναποτιθέμενης ενέργειας καταγράφει την αποτιθέμενη ενέργεια των σωματιδίων που εισέρχονται μέσα σε αυτόν. Όπως και ο ανιχνευτής διέλευσης, αποτελείται από ένα σώμα ή ένα σύνολο σωμάτων, τα οποία ορίζονται στο αρχείο εισόδου (.in) και αποτελούν τμήματα της γεωμετρίας στο αρχείο .geo. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο ανιχνευτής εναποτιθέμενης ενέργειας καταγράφει την ενέργεια κάθε σωματιδίου που εναποτίθεται μέσα στον ανιχνευτή. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παράγει αρχείου εξόδου (src-enddet-01.dat), στο οποίο αποθηκεύεται το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων που απορροφήθηκε στον ανιχνευτή.

5.5 Το πρόγραμμα PENMAIN

Πρόκειται για ένα κύριο πρόγραμμα που εκτελεί προσομοιώσεις μεταφοράς ηλεκτρονίων-φωτονίων σε πολυπλοκές γεωμετρίες. Ο χρήστης μπορεί να το χρησιμοποιήσει χωρίς να χρειάζεται να γράψει το κύριο πρόγραμμά του, καθώς η λειτουργία του PENMAIN καθιστά εφικτό τον πλήρη έλεγχο από το αρχείο εισόδου (.in). Αν και είναι αδύνατο να καλυφθούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις με ένα "κλειστό" πρόγραμμα, η ευελιξία του PENMAIN το καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την επίλυση μιας ευρείας κατηγορίας πρακτικών προβλημάτων. Για τους παραπάνω λόγους, στα πλαίσια της ΔΕ, επιλέχθηκε η χρήση του PENMAIN, έναντι των PENCYL και PENSLAB. Τα βασικά αρχεία εισόδου-εξόδου του προγράμματος PENMAIN είναι τα εξής:

- Το αρχείο εισόδου (.in)
- Το αρχείο γεωμετρίας (.geo)
- Τα αρχεία υλικών (.mat)
- Τα αρχεία αποτελεσμάτων (.dat ή .rep)

5.5.1 Το αρχείο εισόδου (.in)

Στο αρχείο εισόδου τύπου .in ο χρήστης μπορεί να ορίσει τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, δηλαδή την ενέργεια και το είδος των σωματιδίων, τα υλικά της γεωμετρίας, τη διάρκεια της προσομοίωσης, το είδος της πηγής, και άλλα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση. Το αρχείο εισόδου είναι τύπου ASCII και δημιουργείται από τον χρήστη σε συγκεκριμένη μορφή, καθώς πρέπει να τηρείται η μορφή και η διάταξή του, ενώ η σειρά των δεδομένων είναι καθορισμένη. Στο σχήμα 5.1 παρατίθεται παράδειγμα αρχείου εισόδου που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ, και στη συνέχεια αναλύεται κάθε εντολή ξεχωριστά.


```

TITLE  EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5   [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0      [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE  0 0 180    [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME  lead.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3   [EABS (1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  pom.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3   [EABS (1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  polystyrene.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3   [EABS (1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  air0.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3   [EABS (1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  graphite.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3   [EABS (1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  neo0.geo   [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC  spc-enddet-00.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY 4           [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME  dump.dat   [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump.dat   [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60          [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10      [Desired number of showers, max=2*31-1]
TIME    5.0e06     [Allotted simulation time, in sec]
END      [Ends the reading of input data]
.....+.....1.....+.....2.....+.....3.....+.....4.....+.....5.....+.....6.....+.....7..

```

Σχήμα 5.1: Αρχείο πηγής (.in) που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις της παρούσας ΔΕ

- **TITLE:** Η πρώτη εντολή αφορά την ονομασία του προγράμματος. Κάθε αρχείο εισόδου πρέπει να ξεκινάει με αυτή την εντολή. Η ονομασία του τίτλου πρέπει να είναι έως 65 χαρακτήρες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται σε ακτινοβολή που γίνεται στο EBOIA με πηγή ^{137}Cs σε απόσταση 2m.

Ακολουθεί μία ενότητα δεδομένων μέσω των οποίων γίνεται ορισμός της πηγής (source definition):

- **SKPAR:** Το είδος του σωματιδίου που μελετάται. Λαμβάνει τιμές 1, 2 ή 3 ανάλογα για ηλεκτρόνια, φωτόνια ή ποζιτρόνια αντίστοιχα.
- **SENERG:** Η ενέργεια της μονοενεργειακής πηγής σε eV.
- **SPOSIT:** Η θέση του κέντρου της πηγής ως προς τους άξονες x, y, z του τρισδιάστατου επιπέδου.
- **SBOX:** Οι διαστάσεις (ως προς x, y, z) ενός ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου ελέγχου, που περιβάλλει πλήρως την πηγή, αφήνοντας ένα μικρό περιθώριο σε όλες τις διαστάσεις.

- **SBODY:** Ο αριθμός του σώματος από το αρχείο γεωμετρίας (.geo) το οποίο ορίζει ο χρήστης ως πηγή. Η εντολή αυτή μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές χρειαστεί, αν έχουν οριστεί περισσότερα του ενός σώματα ως πηγές.
- **SCONE:** Ορίζει την κωνική δέσμη μέσα στην οποία εκπέμπει η πηγή. Η δέσμη ορίζεται από τρεις γωνίες. Την πολική, την αζιμουθιακή και το άνοιγμα γωνίας της πηγής (THETA, PHI, ALPHA).

Στην παρούσα ΔΕ, οι εντολές SBOX και SBODY δεν χρησιμοποιούνται, καθώς χρησιμοποιήθηκε σημειακή πηγή που εκπέμπει σε γεωμετρία 4π.

Δεδομένα υλικών και παράμετροι προσομοίωσης (Material data and simulation parameters)

- **MFNAME:** Το όνομα του αρχείου υλικού (.mat), που δημιουργήθηκε μέσω του material.f.
- **MSIMPA:** Οι παράμετροι προσομοίωσης κάθε υλικού, όπου:
 1. **EABS(1:3):** Οι ενέργειες απορρόφησης φωτονίων, ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων
 2. **C1 και C2:** Οι παράμετροι ελαστικής σκέδασης
 3. **WCC και WCR:** Οι ενέργειες αποκοπής για ανελαστικές κρούσεις και εκπομπές bremsstrahlung.

Δεδομένα γεωμετρίας (Geometry definition file)

- **GEOMFN:** Το όνομα του αρχείου γεωμετρίας (.geo) στο οποίο περιγράφεται η γεωμετρία της διάταξη που θα προσομοιωθεί.

Δεδομένα που αφορούν τους ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας (Energy deposition detectors)

- **ENDETC:** Ορίζει το ενεργειακό παράθυρο και το πλήθος καναλιών του ανιχνευτή (σε αυτή την περίπτωση το ενεργειακό εύρος ορίστηκε να είναι 0 έως 670000 eV, και 200 κανάλια καταγραφής).
- **EDSPC:** Το όνομα του αρχείου εξόδου των αποτελεσμάτων (σε μορφή src-enddet-##.dat).
- **ENDBODY:** Ο αριθμός του σώματος στο αρχείο γεωμετρίας (.geo) που αποτελεί τον ανιχνευτή της διάταξης. Η εντολή αυτή μπορεί να επαναληφθεί, αν έχουν οριστεί περισσότερα του ενός σώματα ως ανιχνευτές της διάταξης.

Ιδιότητες εργασίας (Job properties)

- **RESUME:** Διαβάζει το αρχείο DUMPP, και συνεχίζει την προσομοίωση από το σημείο που είχε σταματήσει. Αυτή η εντολή είναι πολύ χρήσιμη στην περίπτωση που μία προσομοίωση μπορεί να διακοπεί για οποιοδήποτε λόγο.
- **DUMPPTO:** Δημιουργεί και ενημερώνει ένα αρχείο DUMPP με τα στοιχεία της προσομοίωσης, ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- **DUMPP:** Όταν το DUMPPTO ενεργοποιείται, κάθε DUMPP δευτερόλεπτα, γίνεται καταγραφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στα αρχεία εξόδου. Ιδιαίτερα χρήσιμη εντολή για μεγάλες προσομοιώσεις, όπου είναι απαραίτητος ο έλεγχος της προόδου τους πριν τον τερματισμό τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ορισμένο 60s.
- **NSIMSH:** Το πλήθος σωματιδίων που θα προσομοιωθεί. Στην παρούσα ΔΕ, επιλέχθηκε μεγάλο πλήθος ιστοριών (10^9) προκειμένου να επιτευχθεί καλή στατιστική των αποτελεσμάτων.
- **TIME:** Η διάρκεια της προσομοίωσης σε sec. Στα πλαίσια της ΔΕ, επιλέχθηκε μεγάλη χρονική διάρκεια, έτσι ώστε η προσομοίωση να ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί το επιθυμητό πλήθος ιστοριών.
- **END:** Δηλώνει το τέλος διαβάσματος του αρχείου εισόδου (.in).

5.5.2 Το αρχείο γεωμετρίας (.geo)

Μέσω του αρχείου γεωμετρίας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει την διάταξη, εντός της οποίας λαμβάνουν χώρα οι διάφορες αλληλεπιδράσεις των φωτονίων και των σωματιδίων. Στην πράξη, αυτή η διαμόρφωση επιτυγχάνεται με τη χρήση εντολών που αρχικά καθορίζουν επιφάνειες, και στη συνέχεια, μέσω συνδυαστικής διαδικασίας, καθορίζονται τα διάφορα σώματα που αποτελούν τη διάταξη. Για τη διασφάλιση της ακρίβειας της προσομοίωσης και τη διάκριση των εντολών με σαφήνεια, κάθε εντολή προηγείται και ακολουθείται από μια γραμμή που αποτελείται αποκλειστικά από έναν προκαθορισμένο αριθμό μηδενικών. Αμέσως μετά τη διαχωριστική γραμμή, εκτελείται μία από τις παρακάτω εντολές, οι οποίες απαιτούν 8 χαρακτήρες:

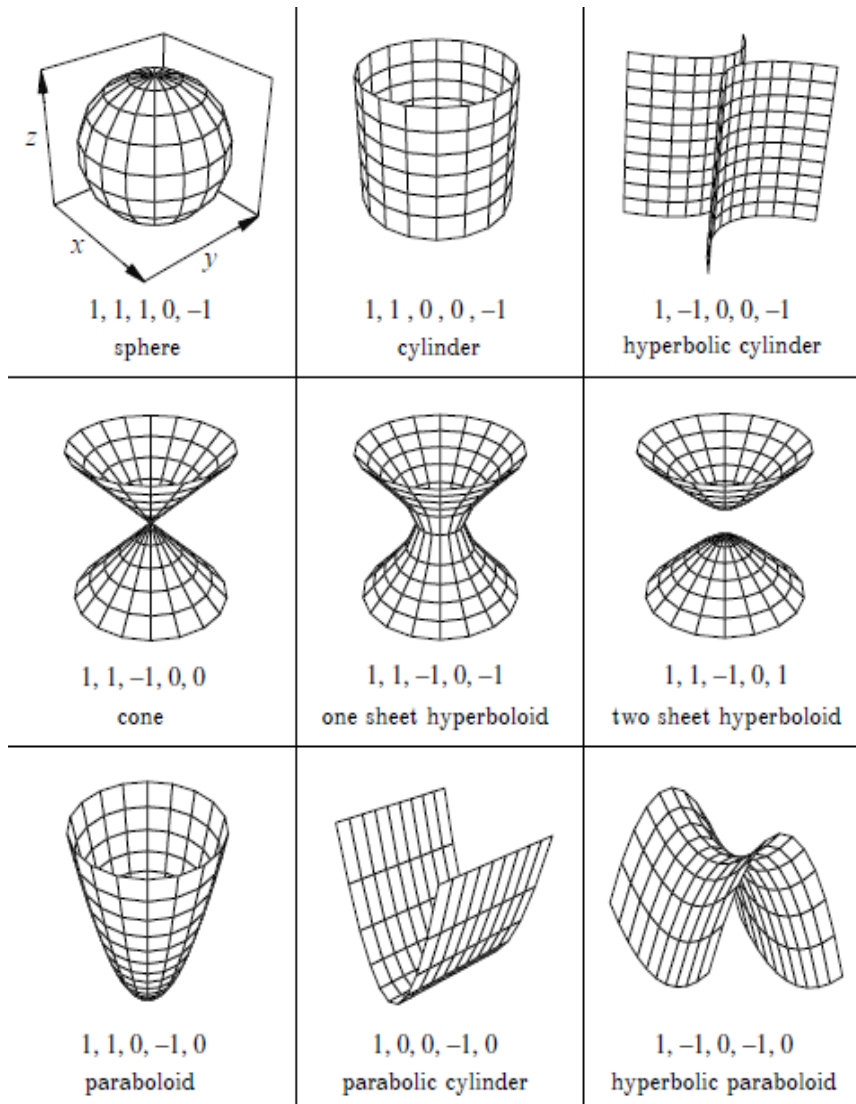
- SURFACE_
- BODY_____
- MODULE____
- END_____
- CLONE_____
- INCLUDE_

Από το παραπάνω σύνολο εντολών που αναφέρθηκε, στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι πρώτες τέσσερις εντολές. Συνήθως, πριν από την εκκίνηση των εντολών, προστίθενται σχόλια που αφορούν τη διάταξη. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητη η καταγραφή σχολίων ανάμεσα σε δύο εντολές, χρησιμοποιείται μια νέα γραμμή που ξεκινά με "C_" και στη συνέχεια περιλαμβάνει το σχόλιο. Αφού χρησιμοποιηθεί μια εκ των προαναφερθέντων εντολών, παρενθέσεις χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τον αριθμό του στοιχείου που περιγράφεται. Οι αριθμητικές τιμές αυτές καλύπτουν ένα εύρος από -999 έως 9999, εκτός από την εντολή BODY που περιορίζεται από 1 έως 249. Αυτό συμβαίνει λόγω του περιορισμού της αναπαράστασης περισσότερων από 250 σωμάτων, κάτι που αποδεικνύεται αδύνατο από τα προγράμματα gview2d (δισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση) και gview3d (τριδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση). Τέλος, οι μονάδες μέτρησης για τις διαστάσεις και τις γωνίες είναι προκαθορισμένες σε εκατοστά και μοίρες αντίστοιχα, με τη δυνατότητα χρήσης ακτινίων όταν είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια, ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση της δομής και της λειτουργίας των παραπάνω εντολών.

5.5.2.1 Ορισμός επιφάνειας (SURFACE)

Στο πλαίσιο της κατασκευής του προγράμματος γεωμετρίας, αρχικά εκτελείται ο ορισμός των επιφανειών, κάτι που αποτελεί και το βασικό βήμα σε ένα αρχείο γεωμετρίας. Αυτό το βήμα επιτελείται με την προσθήκη όλων των επιφανειών που θα αναπαραστήσουν τα διάφορα σώματα της διάταξης κατά την διάρκεια του προγράμματος. Μπορούν να ορισθούν έως και 10,000 επιφάνειες. Κάθε επιφάνεια χαρακτηρίζεται πλήρως από ένα σύνολο παραμέτρων. Αρχικά, ορίζονται οι 5 δείκτες (INDICES), οι οποίοι είναι ακέραιοι αριθμοί δύο ψηφίων (I2, I2, I2, I2, I2) και περιγράφουν τον τύπο της επιφάνειας, όπως αναφέρεται στο Σχήμα 5.2. Μία επιφάνεια δεν ορίζεται αποκλειστικά από τους δείκτες. Επιπλέον παράγοντες όπως οι παράγοντες κλίμακας (X-SCALE, Y-SCALE, Z-SCALE), τα διανύσματα μετατόπισης (X-SHIFT, Y-SHIFT, Z-SHIFT) και οι γωνίες Euler (OMEGA, THETA, PHI) συμβάλλουν στον ακριβή ορισμό της θέσης της επιφάνειας. Οι παράγοντες κλίμακας καθορίζουν τη θέση της επιφάνειας πάνω στους άξονες, ενώ τα διανύσματα μετατόπισης και οι γωνίες Euler προσδιορίζουν την τελική της θέση μετά από μετακίνηση ή περιστροφή, αντίστοιχα. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να καθοριστούν προαιρετικά, και η σειρά τους στο αρχείο γεωμετρίας δεν είναι

υποχρεωτική. Στην περίπτωση που κάποιες από αυτές παραλειφθούν, το πρόγραμμα λαμβάνει τις προκαθορισμένες τιμές (DEFAULT). Στο Σχήμα 5.3 μπορούμε να δούμε ένα τμήμα από το αρχείο γεωμετρίας, στο οποίο περιγράφεται η επιφάνεια ενός κυλίνδρου.



Σχήμα 5.2: Γεωμετρική μορφή επιφανειών σε συνάρτηση με διάφορες τιμές των 5 δεικτών [22]

```
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Cylinder R2
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 4.435000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 4.435000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Σχήμα 5.3: Ορισμός επιφάνειας κυλινδρικού σχήματος που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Εναλλακτικά, μια επιφάνεια μπορεί να οριστεί μέσω των παραμέτρων A_{ij} , όπου σε αυτήν την περίπτωση, η εξίσωση της επιφάνειας λαμβάνει τη μορφή:

$$A_{xx} \cdot x^2 + A_{yy} \cdot y^2 + A_{zz} \cdot z^2 + A_{xy} \cdot x \cdot y + A_{xz} \cdot x \cdot z + A_{yz} \cdot y \cdot z + A_0 = 0 \quad (5.1)$$

Επιπλέον, γίνεται χρήση της λέξης "SURFACE*" για να καθοριστούν σταθερές επιφάνειες που διατηρούν τη θέση τους αναλλοίωτη ακόμα και κατά την περιστροφή ενός σώματος.

5.5.2.2 Ορισμός σώματος (BODY)

Στο πλαίσιο της διαδικασίας της κατασκευής της γεωμετρίας, εξετάζεται το δεύτερο βήμα που περιλαμβάνει τον ορισμό των σωμάτων. Ένα σώμα διαμορφώνεται από τη συνδυαστική εφαρμογή surfaces, modules, και άλλων bodies, που έχουν ήδη οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας. Το υλικό (MATERIAL) αποτελεί βασική παράμετρο για τον καθορισμό ενός σώματος και επιλέγεται με βάση τον αύξοντα αριθμό που του αντιστοιχεί στο αρχείο εισόδου (τύπου .in). Σε περίπτωση που η τιμή ενός υλικού (MATERIAL) είναι μηδέν ή αρνητική, αυτό υποδεικνύει το κενό. Επιπλέον, στον καθορισμό των σωμάτων συμβάλλουν και οι δείκτες πλευράς (SIDE POINTERS). Αυτοί οι δείκτες καθορίζουν την πλευρά των στοιχείων που απαρτίζουν το σώμα, με την τιμή -1 να αντιπροσωπεύει την εσωτερική επιφάνεια και την τιμή 1 να αντιπροσωπεύει την εξωτερική επιφάνεια. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα αρχείο γεωμετρίας μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι 5000 διακριτά σώματα. Στο Σχήμα 5.4 παρατίθεται ένα τμήμα του αρχείου γεωμετρίας που περιγράφει τον ορισμό ενός σώματος – συγκεκριμένα τμήμα της θωράκισης – όπως χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ.

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 10)  Thwrakish brosta anw tmhna
MATERIAL (   1)
SURFACE  ( 17),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  (   4),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  (   2),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 13),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE  ( 14),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 20),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE  ( 19),  SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Σχήμα 5.4: Ορισμός σώματος μολύβδου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της θωράκισης.

5.5.2.3 Ορισμός δομής (MODULE)

Η δημιουργία δομών (MODULES) αποτελεί μια παρόμοια διαδικασία με αυτή των σωμάτων, καθώς μία δομή διαθέτει αντίστοιχες ιδιότητες με αυτές ενός σώματος, δηλαδή ορίζει σώματα και καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο. Ωστόσο, έχουν ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα, αφού οι δομές διαθέτουν την ιδιότητα να καθορίζουν περιοχές εντός άλλων συμπαγών σωμάτων, προσφέροντας τη δυνατότητα ορισμού κενών χώρων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των MODULES είναι η ικανότητα να μετατοπιστούν και να περιστραφούν μαζί με όλα τα στοιχεία που περιέχουν. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την ευελιξία στον σχεδιασμό συστημάτων που αποτελούνται από πολλά ίδια αντικείμενα.

```

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE  ( 13)  Whole system
MATERIAL ( 4)
BODY    ( 1)
BODY    ( 2)
BODY    ( 3)
BODY    ( 4)
BODY    ( 5)
BODY    ( 6)
BODY    ( 7)
BODY    ( 8)
BODY    ( 9)
BODY    (10)
BODY    (11)
BODY    (12)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Σχήμα 5.5: Ορισμός module που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

5.5.2.4 Ορισμός κλώνου (CLONE)

Η διαδικασία του ορισμού κλώνων (CLONE) στον χώρο της γεωμετρικής κατασκευής, ακολουθεί μια σειρά βημάτων που είναι σημαντικά για τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικών δομών. Η διαδικασία προσφέρει επιπλέον δυνατότητες και χρησιμότητα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αντιγραφή και μετακίνηση υπάρχοντος module. Σύμφωνα με τη διαδικασία, για τη δημιουργία ενός κλώνου, πρώτο βήμα είναι να καθορίσουμε ένα module. Αυτό το module στη συνέχεια αντιγράφεται και μεταφέρεται σε νέα θέση. Εδώ, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι πιθανές περιστροφές ή μετακινήσεις για να αποφευχθούν αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των modules. Αυτό το βήμα εξασφαλίζει ότι οι κλώνοι διατηρούν την ίδια γεωμετρική μορφή με το αρχικό module, ενώ μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικές θέσεις του χώρου. Οι κλώνοι έχουν μεγάλη σημασία, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η γεωμετρία είναι συμμετρική. Αυτοί παρέχουν τη δυνατότητα γρηγορότερης κατασκευής περίπλοκων γεωμετριών, καθιστώντας τη διαδικασία πιο αποδοτική και ευέλικτη για τον σχεδιασμό ποικίλων δομών και σεναρίων. Ο ορισμός κλώνων αναδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν υπάρχουσες γεωμετρίες, επιτρέποντας την αποτελεσματική δημιουργία πολύπλοκων δομών με ελάχιστη επανάληψη της εργασίας.

5.5.2.5 Ορισμός ενσωμάτωσης (INCLUDE)

Η χρήση της εντολής INCLUDE στη γεωμετρική κατασκευή επιτρέπει την ενσωμάτωση μιας δομής στο αρχείο γεωμετρίας. Το αντίστοιχο αρχείο που περιέχει τη δομή έχει κατάληξη .ext και εισάγεται στο κυρίως αρχείο, συμβάλλοντας στη δημιουργία πιο σύνθετων δομών. Κατά την χρήση της εντολής INCLUDE, το όνομα του ενσωματωμένου αρχείου πρέπει να περιορίζεται σε δώδεκα χαρακτήρες. Εάν το όνομα είναι μικρότερο, οι εναπομείναντες χαρακτήρες συμπληρώνονται με κενά. Είναι επίσης σημαντικό να υπάρχει συνέπεια στη χρήση ετικετών των στοιχείων, εξασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν διαφορετικές ετικέτες από αυτές που χρησιμοποιούνται στο κυρίως αρχείο. Εάν όμως χρησιμοποιηθεί η εντολή INCLUDE*, τότε οι ετικέτες πρέπει να διαφέρουν. Έτσι, το ενσωματωμένο αρχείο γίνεται μέρος του δευτερεύοντος αρχείου γεωμετρίας. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία νέων δομών (MODULES) και σωμάτων (BODIES) που περιέχουν τα στοιχεία του εισερχόμενου αρχείου, γεγονός που ενισχύει την ευελιξία της γεωμετρικής κατασκευής.

5.5.3 Τα αρχεία υλικών (.mat)

Τα αρχεία υλικού (.mat) παρέχουν τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ή να ορίσει υλικά για τις διάφορες συνιστώσες της διάταξης (σώματα) κατά την προσομοίωση. Περιλαμβάνουν τα απαραίτητα δεδομένα των υλικών, όπως μικροσκοπικές ενεργές διατομές και πίνακες φυσικών ιδιοτήτων. Κάθε αρχείο .mat αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο στοιχείο ή χημική ένωση και επιλέγεται από ορισμένο κατάλογο. Το πρόγραμμα "MATERIAL" χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αυτών των αρχείων. Οι οδηγίες που προέρχονται από την οθόνη, καθοδηγούν τον χρήστη στη δημιουργία αυτών των αρχείων, ενώ η βάση δεδομένων παρέχει πληροφορίες για 280 διαφορετικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση.

5.5.4 Τα αρχεία αποτελεσμάτων (.dat ή .rep)

Μετά το πέρας των προσομοιώσεων, ο κώδικας renmain δημιουργεί μια σειρά από αρχεία αποτελεσμάτων, τα οποία είναι τύπου .dat και .rep και περιέχουν πληροφορίες σε μορφή ASCII. Αυτά τα αρχεία μπορούν να γίνουν αντικείμενο επεξεργασίας με χρήση υπολογιστικών φύλλων όπως το Excel, καθώς και εργαλεία όπως το GNUPLOT ή το MATLAB. Τα κυριότερα αρχεία αποτελεσμάτων που δημιουργεί ο κώδικας renmain είναι:

- Το αρχείο **penmain.dat**: Περιέχει συνοπτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Το αρχείο **penmain-res.dat**: Περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες, όπως τη διάρκεια και την ταχύτητα της προσομοίωσης, τον συνολικό αριθμό των σωματιδίων που οπισθοσκεδάστηκαν, απορρίφθηκαν ή εξήλθαν από τη διάταξη. Επιπλέον, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια που αποτίθεται σε κάθε σώμα.
- Το αρχείο **material.dat**: Παρέχει πληροφορίες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη διάταξη, περιλαμβάνοντας λεπτομέρειες όπως ο ατομικός αριθμός και η πυκνότητα του υλικού, καθώς επίσης και παραμέτρους που έχουν καθοριστεί στο αρχείο εισόδου.
- Το αρχείο **geometry.rep**: Δημιουργείται με την εκτέλεση της υπορουτίνας GEOMIN και περιλαμβάνει τα στοιχεία γεωμετρίας από το αρχείο εισόδου, εμπλουτισμένα με επιπλέον πληροφορίες. Το εν λόγω αρχείο αποτελεί ιδιαίτερα βασικό εργαλείο, καθώς σε περίπτωση ανίχνευσης κάποιου σφάλματος στο αρχείο γεωμετρίας, επιτρέπει τον εντοπισμό του.
- Το αρχείο **dump.dat**: Περιλαμβάνει τις απαραίτητες αριθμητικές πληροφορίες που απαιτούνται για την επανεκκίνηση της προσομοίωσης από το σημείο όπου είχε διακοπεί, σε περίπτωση που απαιτηθεί.
- Το αρχείο **spc-enddet-##.dat**: Περιέχει το ενεργειακό φάσμα που αποτίθεται στον αντίστοιχο ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, συνοδευόμενο από τη στατιστική αβεβαιότητα.

Επιπλέον, υπάρχουν πολλά άλλα αρχεία αποτελεσμάτων όπως τα αρχεία energy-el-down.dat, energy-el-up.dat, energy-ph-down.dat, energy-ph-up.dat, energy-po-down.dat, energy-po-up.dat, polar-angle-el.dat, polar-angle-ph.dat, polar-angle-po.dat, που αφορούν την κατεύθυνση της κίνησης των σωματιδίων και τη γωνιακή τους κατανομή, καθώς και άλλα αρχεία που παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες για την προσομοίωση. Αυτά τα αρχεία παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την ανάλυση, την εκτίμηση και την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που εκτελεί ο κώδικας renmain.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Δοκιμαστικές προσομοιώσεις

6.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, θα παρουσιασθεί εκτενώς η διαδικασία προσέγγισης του προβλήματος και η σειρά των δοκιμαστικών προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν της τελικής προσομοίωσης η οποία οδήγησε στην αντιμετώπιση του προς επίλυση προβλήματος. Σε αυτή την ενότητα γίνεται η περιγραφή των δοκιμαστικών διαδικασιών, με σκοπό την παρουσίαση των διαφόρων προσεγγίσεων που υιοθετήθηκαν κατά την εκάστοτε φάση. Εξετάζονται προσεκτικά οι διαφορετικές απλοποιήσεις που εφαρμόστηκαν, καθώς και η επίδρασή τους στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η παροχή μιας εμπειριστατωμένης εικόνας της εξελισσόμενης διαδικασίας που οδήγησε στη διαμόρφωση της τελικής προσομοίωσης.

Οι προσομοιώσεις έγιναν μέσω του προγράμματος PENELOPE, έκδοση 2011, οι λειτουργίες του οποίου παρουσιάστηκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό το μέρος της παρούσας ΔΕ αφορά στην προσομοίωση της εκτέλεσης του πειράματος που πραγματοποιήθηκε στο ΕΒΟΙΑ, με σκοπό τη σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων. Επομένως, τα πρώτα βήματα για την υλοποίηση της προσομοίωσης, ήταν ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του χώρου που έγινε το πείραμα στο ΕΒΟΙΑ, της πηγής ^{137}Cs , και του θαλάμου ιονισμού RTW UNIDOS type 32002 που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος. Αυτό φυσικά συνέβη με τις απαραίτητες απλοποιήσεις. Στη συνέχεια της παραγράφου ακολουθεί αναφορά στις προσεγγίσεις που έγιναν συνολικά, ξεχωριστά για κάθε αρχείο γεωμετρίας, εισόδου και υλικών, ενώ ακολούθως γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων της προσομοίωσης.

- **Αρχείο γεωμετρίας**

Η αίθουσα του εργαστηρίου σχεδιάστηκε έπειτα από μέτρηση των διαστάσεων του χώρου. Ακολουθώντας πιστά τις διαστάσεις των τοίχων, δοκών κλπ του σκυροδέματος, ο σχεδιασμός ολοκληρώθηκε χωρίς να χρειαστεί κάποια διόρθωση στις διάφορες δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Το ίδιο συνέβη και με τον κατευθυντήρα (collimator) της πηγής, αλλά και τον θάλαμο ιονισμού. Η πηγή ^{137}Cs προσομοιώνεται ως σημειακή πηγή στην αρχή των αξόνων, σημείο (0,0,0).

Οι όποιες τροποποιήσεις και απλοποιήσεις του αρχείου γεωμετρίας που θα περιγραφούν στην πορεία αφορούν κατά κύριο λόγο τον θάλαμο ιονισμού, για τον οποίο δεν υπήρχε ακριβές σχέδιο, ιδιαίτερα όσον αφορά στις επιστρώσεις από γραφίτη στο εσωτερικό του. Επιπλέον, η βασικότερη αρχική απλοποίηση, με βάση την οποία έλαβαν χώρα οι περισσότερες δοκιμαστικές προσομοιώσεις, αφορά το ότι δεν σχεδιάστηκε η θωράκιση της πηγής, αλλά μόνο ο κατευθυντήρας, υπολογίζοντας την γωνία εκπομπής που σχηματίζει με την πηγή. Ωστόσο, στη συνέχεια έγιναν τροποποιήσεις αλλάζοντας και την γωνία εκπομπής των φωτονίων ώστε να διαπιστωθεί το πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα.

Τέλος, στον δεύτερο κύκλο δοκιμαστικών προσομοιώσεων δεν έγινε η προσθήκη της αίθουσας στο αρχείο γεωμετρίας, έτσι ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα της προσομοίωσης.

- **Αρχείο υλικών**

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, είναι ο αέρας στην αίθουσα και εντός του θαλάμου ιονισμού, ο μόλυβδος για τον κατευθυντήρα (και μετέπειτα και την θωράκιση της πηγής), το τσιμέντο για τους τοίχους της αίθουσας, η πολυστερίνη για την εσωτερική σφαίρα του θαλάμου, το πολυοξυμεθυλένιο (POM) για το εξωτερικό περίβλημα του θαλάμου, καθώς και ο γραφίτης για τις επιστρώσεις που διαθέτει ο θάλαμος στην εσωτερική του σφαίρα αλλά και στο εξωτερικό του περίβλημα. Όλα αυτά τα υλικά, επιλέχθηκαν από τον έτοιμο κατάλογο υλικών που διαθέτει το PENELOPE. Στην πορεία ωστόσο, δημιουργήθηκαν νέα αρχεία αέρα για κάθε προσομοίωση, με βάση την πυκνότητα του αέρα κατά την εκτέλεση του πειράματος. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι έγιναν προσομοιώσεις σε κενό και σε αέρα.

- **Αρχείο εισόδου**

Δοκιμές έγιναν και στο αρχείο εισόδου της προσομοίωσης. Δίνοντας πάντα την ίδια ενέργεια για Καίσιο 661,65 keV και επιλογή σωματιδίων φωτόνια (2), οι διαφορές συναντώνται στην γωνία εκπομπής, στην επιλογή ανιχνευτή, καθώς και στις παραμέτρους των υλικών της προσομοίωσης. Η πρώτη προσέγγιση είχε ως ανιχνευτή τον Absorbed dose distribution, που σχηματίζει έναν κύβο γύρω από τον θάλαμο ιονισμού και συλλέγει εκεί το φορτίο. Έγιναν διάφορες προσεγγίσεις στις διαστάσεις του κύβου, καθώς κάποιες προσομοιώσεις έτρεξαν με τον κύβο να περιγράφει εντός του τον θάλαμο, τον θάλαμο να περιγράφει εντός του τον κύβο, αλλά και τον κύβο να περιγράφει εντός του την εσωτερική σφαίρα του θαλάμου. Σε αυτό τον ανιχνευτή δεν χρειάζεται ορισμός σώματος ανιχνευτή, καθώς ως ανιχνευτής ορίζεται ολόκληρος ο κύβος. Παρακάτω θα αναλυθούν τα αποτελέσματα κάθε προσέγγισης. Η δεύτερη και τελική επιλογή ανιχνευτή, ήταν αυτή του Energy deposition detector. Σε αυτή την περίπτωση, οι δοκιμές γίνονται έπειτα από επιλογή του σώματος του ανιχνευτή, που είναι ο αέρας εντός του θαλάμου. Ακολουθεί εκτενής αναφορά σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

6.2 Πρώτος κύκλος προσομοιώσεων - Επιλογή του τύπου Ανιχνευτή

6.2.1 Η εξελικτική πορεία των προσεγγίσεων στον πρώτο κύκλο προσομοιώσεων:

Ο πρώτος κύκλος προσομοιώσεων που συμπύκνωσε εστίασε στην προσομοίωση του ανιχνευτή ακτινοβολίας και την αναζήτηση των εργαλείων της προσομοίωσης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν τελικά στην εκτίμηση του ρυθμού αποτιθέμενης δόσης σε αυτόν. Η εξέλιξη αυτή των προσομοιώσεων αναδεικνύει την προσπάθεια για την καλύτερη προσομοίωση του θαλάμου ιονισμού, αποτυπώνοντας τις διαδοχικές επιλογές και προσαρμογές στη διαδικασία.

Συνοπτικά έγιναν τα εξής βήματα:

1. Επιλογή Υλικού Θαλάμου: Ξεκινώντας με το υλικό του θαλάμου, μέσω της πρόσβασης στο manual του θαλάμου, επιλέχθηκε το POM (πολυοξυμεθυλένιο) για το εξωτερικό περίβλημα και η πολυστερίνη για το εσωτερικό. Ωστόσο, με την πρόοδο των προσομοιώσεων έγινε προσθήκη και επιστρώσεων γραφίτη.

2. Ανάλυση Διαστάσεων και Σχεδιασμός Αρχείου Γεωμετρίας: Ο σχεδιασμός της αίθουσας και του κατευθυντή της πηγής, όπως ήδη αναφέρθηκε, έγινε μία φορά και παραμένει σταθερός για όλες τις προσομοιώσεις. Επιπλέον, έγινε λεπτομερής ανάλυση των διαστάσεων του θαλάμου, σχεδιάζοντας το αρχείο γεωμετρίας. Σε αυτόν τον κύκλο προσομοιώσεων, έγινε προσθήκη της γωνίας εκπομπής στο αρχείο εισόδου, αντί για το σχεδιασμό της θωράκισης και του κατευθυντή δέσμης που σχηματίζει αυτή τη γωνία εκπομπής.
3. Εξέταση παραμέτρων κυβικού ανιχνευτή: Έγινε χρήση του ανιχνευτή dose enclosure με ένα μόνον στοιχείο πλέγματος (δηλαδή ενός κυβικού ανιχνευτή). Η εξέταση των διαφορετικών θέσεων του κυβικού ανιχνευτή σε σχέση με τον πραγματικό θάλαμο του ανιχνευτή οδήγησε σε προσομοιώσεις με τον κύβο στο εξωτερικό, στο εσωτερικό, και σε ενδιάμεσες θέσεις του θαλάμου, προσδιορίζοντας την επίδραση της γεωμετρίας του κύβου στα αποτελέσματα.
4. Εκτέλεση προσομοιώσεων σε κενό και αέρα: Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις εξετάζοντας την επίδραση του κενού και του αέρα στα αποτελέσματα.
5. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων: Η χρήση Στερεάς Γωνίας επιτρέπει συγκρίσιμα αποτελέσματα, εστιάζοντας στη γωνία που σχηματίζει ο κατευθυντής με την πηγή σε σύγκριση με τα πραγματικά πειράματα όπου η πηγή εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις. Θα αναφερθούν οι διάφορες προσεγγίσεις και στο τελικό κομμάτι της σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ προσομοιώσεων και πραγματικού πειράματος.

6.2.2 Ο ανιχνευτής Dose Enclosure

Αρχικά χρειάζεται να γίνει αναφορά στην επιλογή του ανιχνευτή. Πρόκειται για τον εικονικό ανιχνευτή Dose Enclosure, ο οποίος ορίζεται στο αρχείο εισόδου, δίνοντας συντεταγμένες για τη θέση του στο χώρο και δημιουργεί έναν κύβο με διαστάσεις που καθορίζονται από τον χρήστη, όπως και το πλήθος των διαμερίσεων (bins) από τα οποία αποτελείται. Στην παρούσα ΔΕ η επιλογή του πλήθους bins είναι 1, με σκοπό την δημιουργία ενός κύβου που θα δίνει συνολικά την ενέργεια που καταγράφεται εντός του. Ο ανιχνευτής αυτός δίνει αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου Penmain-res.dat, στο οποίο αναγράφονται οι μέσες αποτιθέμενες ενέργειες ανά body του αρχείου geo σε eV. Επίσης, δίνει αποτελέσματα και στο αρχείο εξόδου 3D-dose.dat, σε eV/g που ουσιαστικά είναι μονάδα δόσης.

6.2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσομοίωσης

6.2.3.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου 3D dose

Από το αρχείο εξόδου 3D dose, λαμβάνονται τα αποτελέσματα της δόσης σε eV/g. Πολλαπλασιάζοντας τη δόση αυτή με τον συντελεστή $1.60218 \cdot 10^{-16}$ προκύπτουν τα αποτελέσματα της δόσης σε J/kg που αντιστοιχεί στη μονάδα του 1 Gy. Ακολουθώντας, με διαίρεση με το πλήθος των αριθμό των φωτονίων που προσομοιώθηκαν, προκύπτει ο συντελεστής μετατροπής Gy/photon. Στην περίπτωση που κατά την προσομοίωση έχει επιλεγεί γωνία εκπομπής 4π μπορεί να γίνει η διαίρεση απευθείας. Ωστόσο, στις προσομοιώσεις με γωνία εκπομπής φωτονίων από τις $14,64^\circ$ (γωνία που σχηματίζει η πηγή με το collimator) – αυτό έγινε πριν σχεδιασθεί η θωράκιση της πηγής – είναι να υπολογισθεί το συνολικό πλήθος φωτονίων που εκπέμπονται υπό γωνία 4π. Για να γίνει αυτό, υπολογίζεται αρχικά η γωνία από μοίρες σε radians με τον τύπο:

$$\text{radians}_{14.64} = 14,64 \cdot 0,01745 = 0,2555 \quad (6.1)$$

Στη συνέχεια, η στερεά γωνία των $14,64^\circ$ του κώνου που σχηματίζει η πηγή με το collimator υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{solidangle}_{14.64} = 2 \cdot \pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\text{radians}_{14.64}}{2}\right)\right) = 0,05116 \quad (6.2)$$

Τελικά, το συνολικό πλήθος φωτονίων που αντιστοιχούν σε γωνία 4π υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{photons}_{4\pi} = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\text{photons}_{14.64}}{\text{solidangle}_{14.64}}\right) \quad (6.3)$$

όπου $\text{photons}_{14.64}$ είναι το πλήθος φωτονίων που προσομοιώθηκαν μέσα στη γωνία $14,64^\circ$. Στις περισσότερες προσομοιώσεις του πρώτου κύκλου το πλήθος αυτό ήταν $5 \cdot 10^6$, αλλά αυτό προσαρμόζεται για κάθε προσομοίωση και η σχετική πληροφορία για το ακριβές πλήθος φωτονίων καταγράφεται στο αρχείο εξόδου `renmain-res.dat`. Έτσι, τελικά, διαιρώντας τα αποτελέσματα της δόσης σε Gy με το πλήθος φωτονίων που εκπέμπεται σε γωνία 4π προκύπτει το αποτέλεσμα σε Gy/photon.

Τέλος, επειδή το εμβαδόν του κύβου μέσα στον οποίο εκτιμήθηκε η δόση διαφέρει από αυτό του σφαιρικού θαλάμου του ανιχνευτή, χρειάζεται να γίνει σχετική διόρθωση βάσει των δύο όγκων:

$$E_{\text{κύβου}} = 6 \cdot a^2 \quad (6.4)$$

και

$$E_{\text{σφαίρας}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (6.5)$$

όπου a η ακμή του κύβου, και r η ακτίνα του σφαιρικού θαλάμου, σε εκατοστά.

Έτσι, προκύπτει ο συντελεστής $\frac{E_{\text{κύβου}}}{E_{\text{κύκλου}}} = 1,91$, για την επιλογή των διαστάσεων του ανιχνευτή σε αυτό τον κύκλο προσομοιώσεων, δηλαδή κυβικό dose enclosure με ακμή 14 cm όσο και η διάμετρος του θαλάμου ιονισμού.

Στις περιπτώσεις όπου επιλέγονται διαφορετικές διαστάσεις για τον κυβικό ανιχνευτή, ο συντελεστής προσαρμόζεται αντίστοιχα.

Με χρήση του συντελεστή αυτού είναι πλέον εφικτή η σύγκριση με τα αποτελέσματα του πραγματικού πειράματος στο EBOIA σε όρους Gy/photon.

6.2.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου `renmain_res.dat`

Από το αρχείο εξόδου `renmain_res`, λαμβάνονται αποτελέσματα για κάθε body του αρχείου γεωμετρίας σε eV [22]. Επομένως, για να γίνει η σχετική μετατροπή σε Gy/photon, αρχικά πρέπει να γίνει ο υπολογισμός της μάζας του υλικού σε kg για κάθε body, και στη συνέχεια, ομοίως με προηγουμένως να γίνει υπολογισμός σε Gy/photon για κάθε body του θαλάμου ξεχωριστά.

Δηλαδή ακολουθείται η διαδρομή:

$$eV \rightarrow \frac{eV}{kg} \rightarrow \frac{J}{kg} \rightarrow Gy$$

Στη συνέχεια, εάν έχει επιλεγεί γωνία εκπομπής διαφορετική από 4π στο αρχείο εισόδου, τότε υπολογίζεται το πλήθος των φωτονίων της προσομοίωσης μέσω της στερεάς γωνίας, όπως αναφέρεται προηγουμένως. Διαφορετικά, για γωνία εκπομπής 4π , χρησιμοποιείται απευθείας το πλήθος φωτονίων της προσομοίωσης από το αρχείο εξόδου.

Διαιρώντας με το πλήθος των φωτονίων προκύπτει για κάθε body του θαλάμου (εξωτερικό περίβλημα, εσωτερική σφαίρα και αέρας ενδιάμεσα) η δόση σε $\frac{GY}{\text{photon}}$. Στη συνέχεια – σύμφωνα με

την προσέγγιση αυτή, προστίθενται τα συνολικά Gy/photon για κάθε body του θαλάμου, ώστε να προκύψει η συνολική δόση σε όλο τον θάλαμο, και αυτό συγκρίνεται με τα αποτελέσματα του πραγματικού πειράματος στο EBOIA.

Στην παρούσα ΔΕ, στον πρώτο κύκλο δοκιμαστικών προσομοιώσεων, επιλέχθηκε ο πρώτος τρόπος επεξεργασίας αποτελεσμάτων για τη σύγκριση μεταξύ προσομοιώσεων και πραγματικών πειραμάτων, δηλαδή μέσω των αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου 3D-dose.

6.2.4 Προσομοιώσεις

Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά τα στοιχεία των πρώτων δοκιμαστικών προσομοιώσεων, κατά τις οποίες έγιναν μία σειρά από δοκιμές, που αφορούσαν τα διάφορα χαρακτηριστικά, τόσο του εικονικού ανιχνευτή, όσο και του θαλάμου του πραγματικού ανιχνευτή. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν οι παρακάτω αλλαγές:

1. Αλλαγές στις διαστάσεις του εικονικού ανιχνευτή dose enclosure. Όπως έχει αναφερθεί, ο ανιχνευτής ορίζεται ως κύβος που περιβάλλει τον θάλαμο ιονισμού. Οι διάφορες δοκιμές έγιναν με αλλαγές στις διαστάσεις του κύβου, δηλαδή με εγγεγραμμένο τον θάλαμο στον κύβο, εγγεγραμμένο τον κύβο στον θάλαμο, κύβο πλευράς μεγαλύτερης της διαμέτρου του θαλάμου, μικρότερης της εσωτερικής διαμέτρου, ενδιάμεσα των δύο, και άλλα.
2. Αλλαγή πυκνότητας αέρα. Δοκιμάστηκαν διαφορετικές πυκνότητες αέρα και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα υλικά αέρα ώστε να γίνουν δοκιμές με αυτές τις τιμές.
3. Αλλαγή όγκου του θαλάμου, ώστε να προκύπτει όγκος αέρα εντός του θαλάμου ίσος με 1 λίτρο.
4. Αλλαγές στην γωνία εκπομπής των φωτονίων.
5. Δοκιμές άλλων υλικών σε κάποια σώματα του αρχείου γεωμετρίας, πχ στα σώματα του θαλάμου ιονισμού, και στους τοίχους της αίθουσας του εργαστηρίου.
6. Προσθήκη λεπτού στρώματος αλουμινίου εσωτερικά του περιβλήματος του εξωτερικού τοιχώματος του θαλάμου.
7. Υλικό 0 στο module για τη δημιουργία προσομοίωσης σε εξωτερικό περιβάλλον κενού.
8. Νέο αρχείο geo με το κέντρο του θαλάμου στο (0,0,0) και την πηγή στα -200 cm, ώστε να οριστεί σφαιρικός ανιχνευτής αντί του κύβου. Ωστόσο αυτή η δυνατότητα δεν δίνεται στην έκδοση 2011 της PENELOPE, αλλά στην έκδοση 2018, επομένως δεν υλοποιήθηκε αυτή η ιδέα.

6.2.4.1 Πρώτες δοκιμαστικές προσομοιώσεις αναλυτικά

Στις πρώτες δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το αρχείο γεωμετρίας geo παραμένει σχεδόν ίδιο, δηλαδή με τον θάλαμο ιονισμού, τον κατευθυντή, την αίθουσα του εργαστηρίου, καθώς και την πηγή στο (0,0,0) και το κέντρο του θαλάμου στα 2 μέτρα από την πηγή. Συγκεκριμένα, ο θάλαμος σχεδιάστηκε όπως φαίνεται στο αντίστοιχο σκαρίφημα, και ορίστηκε body που αφορά τον αέρα εντός του θαλάμου, στο αρχείο γεωμετρίας. Σε ότι αφορά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από την βάση δεδομένων για υλικά της PENELOPE 2011, είναι το τσιμέντο για τους τοίχους της αίθουσας, ο μόλυβδος για τον κατευθυντή και οι έξι διαφορετικοί απορροφητές, και ο αέρας εντός της αίθουσας. Για τον θάλαμο ιονισμού επιλέχθηκε για το εξωτερικό περίβλημα υλικό POM (Πολυοξυμεθυλένιο), για την εσωτερική σφαίρα πολυστερίνη, και ορίστηκε σώμα για τον αέρα εντός του θαλάμου με υλικό αέρα. Η επιλογή των υλικών αυτών έγινε σύμφωνα με τα αναγραφόμενα στο εγχειρίδιο του θαλάμου.

Σε αυτό τον κύκλο προσομοιώσεων, στο αρχείο εισόδου επιλέχθηκαν οι τιμές για τις παραμέτρους της προσομοίωσης του πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Παράμετροι προσομοίωσης (για όλα τα υλικά)	EBAS(1)	EBAS(2)	EABS(3)	
	1,00E+03	1,00E+03	1,00E+04	
	C1	C2	WCC	WCR
	0,1	0,1	1,00E+04	1,00E+03

Επιπλέον, έγινε ορισμός της γωνίας εκπομπής που δίνεται στο αρχείο εισόδου στις 14,64°, που προκύπτει από τη γεωμετρία της πηγής και του κατευθυντή.

Σε αυτό τον κύκλο προσομοιώσεων η παράμετρος μελέτης είναι οι διαστάσεις των πλευρών του κύβου του ανιχνευτή (dose enclosure). Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι εξής διαστάσεις πλευρών του ανιχνευτή:

- 14cm, όσο και η διάμετρος του θαλάμου. Επομένως, ο θάλαμος είναι εγγεγραμμένος στον κύβο. Το κέντρο του κύβου ταυτίζεται με αυτό του θαλάμου.
- 98,99 χιλιοστά, έτσι ώστε ο κύβος του ανιχνευτή είναι εγγεγραμμένος στον θάλαμο.
- 14,4 cm, δηλαδή είναι λίγο μεγαλύτερος ο ανιχνευτής από τον θάλαμο εντός του.
- 13,7 cm, δηλαδή είναι λίγο μικρότερος ο ανιχνευτής από τον θάλαμο ιονισμού.
- Πλευρές κύβου ίσες με την διάμετρο της εσωτερικής σφαίρας, δηλαδή 50mm, όπου αυτό σημαίνει ότι η εσωτερική σφαίρα του θαλάμου είναι εγγεγραμμένη στον κύβο.
- 0.5 cm, δηλαδή ο κύβος να βρίσκεται εντός της εσωτερικής σφαίρας του θαλάμου ιονισμού.
- 7 cm, δηλαδή ο ανιχνευτής βρίσκεται εντός του θαλάμου ιονισμού σε ενδιάμεση θέση.
- 10,6 cm.
- 14,6 cm, και αντίστοιχα η ίδια διάσταση δόθηκε και στις πλευρές του κύβου. Επομένως, πάλι ο θάλαμος είναι εγγεγραμμένος στον κύβο.

Σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων, εξετάστηκε η επίδραση της γεωμετρίας του ανιχνευτή dose enclosure στα αποτελέσματα και έγινε σύγκριση με τα αντίστοιχα πραγματικά πειράματα στο ΕΒΟΙΑ. Παρατηρήθηκε ότι σε όλα τα πειράματα, ασχέτως από την θέση του ανιχνευτή σε σχέση με τον θάλαμο ιονισμού, αλλά και το μέγεθος αυτού, η σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων και του πειράματος παρουσίασε εξαιρετικά μεγάλες αποκλίσεις. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε στην ανάγκη τροποποίησης της στρατηγικής επίλυσης του προβλήματος.

Μεταξύ των διαφορετικών διαστάσεων του ανιχνευτή που δοκιμάστηκαν, καλύτερη επιλογή κρίθηκε η πρώτη, δηλαδή αυτή του κύβου ακμής 14 cm. Παρατηρήθηκε ότι με μεγαλύτερες αλλά και μικρότερες πλευρές από τα 14 cm για τον κυβικό ανιχνευτή, αυξάνονται και άλλο οι αποκλίσεις με το πείραμα στο ΕΒΟΙΑ.

Ωστόσο, παρόλο που σε αυτό το στάδιο κρίθηκε απαραίτητη η επιλογή διαφορετικού ανιχνευτή, ακολούθησε και άλλος ένας κύκλος προσομοιώσεων, διατηρώντας σταθερά τις διαστάσεις του κύβου στα 14 cm, δηλαδή με τον ανιχνευτή εγγεγραμμένο στον θάλαμο ιονισμού, και εξετάζοντας αλλαγές σε άλλες παραμέτρους της προσομοίωσης, προκειμένου να διερευνηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από αυτές.

6.2.4.2 Διερεύνηση της ευαισθησίας των παραμέτρων της προσομοίωσης για τυποποιημένη γεωμετρία dose enclosure ακμής 14cm

Στον αρχικό κύκλο προσομοιώσεων, εκτιμήθηκαν διάφορες διαστάσεις για τον κυβικό ανιχνευτή σε σχέση με τον θάλαμο ιονισμού, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Μετά από σειρά πειραματικών δοκιμών, επιλέχθηκε η διάσταση των 14 εκατοστών για τις πλευρές του κυβικού ανιχνευτή ως βέλτιστη επιλογή σε αυτή τη φάση των προσομοιώσεων. Η εν λόγω επιλογή χρησιμεύει ως σταθερό σημείο αναφοράς για τις επόμενες προσομοιώσεις, όπου διατηρούνται σταθερές οι διαστάσεις του ανιχνευτή στα 14 εκατοστά, ενώ δοκιμάζονται αλλαγές σε άλλες παραμέτρους του πειράματος για να παρατηρηθεί ο αντίκτυπός τους στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που ορίζονται στο αρχείο εισόδου, διάταξη και γεωμετρία παραμένουν ίδια με προηγουμένως. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν:

- Υλικό κενό (0) αντί τσιμέντου στους τοίχους της αίθουσας. Αυτό οδηγεί σε μείωση των σκεδάσεων και ταχύτερη προσομοίωση.
- Υλικό κενό αντί αέρα στην αίθουσα. Αυτό επιτρέπει τη μελέτη της εξασθένησης της ακτινοβολίας της πηγής στον αέρα
- Αλλαγή γωνίας εκπομπής των φωτονίων σε 4π. Αυτό επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης της σκέδασης των φωτονίων μέσα στη θωράκιση
- Προσθήκη επίστρωσης πάχους 2 χιλιοστών αλουμινίου εσωτερικά του εξωτερικού περιβλήματος του θαλάμου. Αυτό οδηγεί σε ακριβέστερη προσομοίωση του ανιχνευτή
- Υλικό PMMA για την εσωτερική σφαίρα του θαλάμου. Αυτό οδηγεί σε ακριβέστερη προσομοίωση του ανιχνευτή.
- Υλικό γραφίτη για την εσωτερική σφαίρα του θαλάμου. Αυτό οδηγεί σε ακριβέστερη προσομοίωση του ανιχνευτή.
- Επιλέχθηκαν και δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές πυκνότητες αέρα, $1,000E-03$, $1,156E-03$ και $1,400E-03$ g/cm³.
- Υλικό αέρα και κενού αντί πολυστερίνης στην εσωτερική σφαίρα του θαλάμου.
- Όγκος αέρα εντός του θαλάμου 1 λίτρο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αυτόν τον κύκλο προσομοιώσεων, δημιουργήθηκε νέο αρχείο γεωμετρίας και εισόδου, έτσι ώστε στην αρχή των αξόνων να βρίσκεται το κέντρο του θαλάμου, αντί της πηγής, με σκοπό την χρήση της εντολής που παρέχει ο absorbed dose distribution ανιχνευτής [23]:

```
>>>>>>> Absorbed dose distribution.  
GRIDR 7, 1 [Radius of the dose volume, no. of bins].
```

Σκοπός ήταν να οριστεί σφαιρικός ανιχνευτής που να συμπίπτει με τον θάλαμο ιονισμού, έτσι ώστε να μην χρειάζονται οι διάφορες δοκιμές και προσαρμογές του κύβου στον σφαιρικό θάλαμο. Ωστόσο, αυτή η δυνατότητα αφορά την έκδοση του 2018 της PENELOPE [23], και όχι του 2011 [22] που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο αυτής της ΔΕ και για το λόγο αυτό η προσπάθεια αυτή δεν τελεσφόρησε.

Σε αυτό τον κύκλο δοκιμαστικών προσομοιώσεων, η παρατήρηση πολύ μεγάλων αποκλίσεων στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαίωσε ότι ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δεν λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο για την προσομοίωση του συγκεκριμένου πειράματος. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη επιλογής ενός πιο κατάλληλου ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη διάταξη και το πείραμα που μελετάται στην παρούσα ΔΕ.

Η αντικατάσταση του ανιχνευτή με έναν άλλο πιο κατάλληλο βελτίωσε την ακρίβεια και την αξιοπιστία των προσομοιώσεων, εξασφαλίζοντας την επιτυχή ανάλυση των αποτελεσμάτων, όπως θα φανεί στην ενότητα 6.3 που ακολουθεί.

Ως εκ τούτου, κρίθηκε ότι δεν έχει νόημα η αναφορά των αποτελεσμάτων των ανωτέρω προσομοιώσεων με λεπτομέρεια, καθώς η ποιοτική ανάλυση και η ερμηνεία των παρατηρήσεων ήταν αρκετές για την αξιολόγηση της απόδοσης της προσομοίωσης. Ωστόσο, η πρώτη προσέγγιση στις δοκιμαστικές προσομοιώσεις είχε μεγάλη σημασία για την κατανόηση του πειράματος και του τρόπου που πρέπει να προσομοιωθεί ο συγκεκριμένος θάλαμος ιονισμού για την επίτευξη αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων με αυτά του πραγματικού πειράματος. Αυτός είναι και ο λόγος που γίνεται η ποιοτική αναφορά σε αυτές τις δοκιμαστικές προσομοιώσεις, διότι αποτέλεσαν τα πρώτα βήματα και ανέδειξαν σημαντικές οδηγίες για την εξέλιξη των προσομοιώσεων.

6.3 Δεύτερη προσέγγιση - Επιλογή του εικονικού ανιχνευτή Energy Deposition Detector

Με το τέλος των προσομοιώσεων της πρώτης προσέγγισης, ήταν φανερό ότι χρειάζεται να γίνει άλλη επιλογή ανιχνευτή, ώστε να πλησιάσουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα αποτελέσματα των πραγματικών πειραμάτων. Η πιο κατάλληλη επιλογή ανιχνευτή προς την κατεύθυνση αυτή είναι ο ανιχνευτής Energy Deposition.

6.3.1 Ο ανιχνευτής Energy Deposition

Ο ανιχνευτής αυτός επιλέγεται και ορίζεται στο αρχείο εισόδου, δίνοντας το ενεργειακό παράθυρο του ανιχνευτή (περιοχή ενεργειών μέσα στην οποία καταγράφει γεγονότα αλληλεπίδρασης) και το πλήθος ενεργειακών διαμερίσεων του παραθύρου (bins), το όνομα του αρχείου εξόδου (src-enddet-##.dat), και το σώμα που αποτελεί τον ανιχνευτή της προσομοίωσης. Το σώμα αυτό πρέπει να έχει ορισθεί στο αρχείο γεωμετρίας. Δίνεται η δυνατότητα να επιλεχθούν και να οριστούν ως τμήματα του ανιχνευτή μέχρι και 25 διαφορετικά σώματα. Στην παρούσα ΔΕ, ως σώμα του ανιχνευτή επιλέγεται ο αέρας εντός του θαλάμου ιονισμού, καθώς εκεί λαμβάνουν χώρα οι ιονισμοί του αέρα κατά τις αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας και επομένως εκεί πρέπει να αποδίδεται η συνολική δόση που αναμένεται να καταγραφεί. Το ενεργειακό εύρος ορίσθηκε να είναι 0 - 6.7E05 eV, καθώς για την πηγή ^{137}Cs δεν αναμένεται η ανίχνευση φωτονίων υψηλότερης ενέργειας και το πλήθος των ενεργειακών παραθύρων ορίσθηκε σε 200.

Ο ανιχνευτής Energy Deposition δίνει αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου `src-enddet-01.dat` [22]. Το αρχείο αυτό περιέχει τρεις στήλες, με 200 γραμμές η καθεμία, οι οποίες αντιστοιχούν στα 200 bins. Η πρώτη στήλη περιέχει το ενεργειακό όριο του κάθε bin σε eV. Η δεύτερη στήλη περιέχει την πυκνότητα πιθανότητας, ένα φωτόνιο να αποδώσει στο ανιχνευτή ενέργεια μέσα στα όρια του ενεργειακού παραθύρου. Οι μονάδες της δεύτερης στήλης είναι $eV^{-1} \cdot particle^{-1}$. Η τρίτη στήλη δίνει τη στατιστική αβεβαιότητα της πυκνότητας πιθανότητας σε επίπεδο 3σ. Αυτή η τιμή δίνει μια εκτίμηση του εύρους της διακύμανσης των μετρήσεων και υποδεικνύει πόσο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

6.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου `src-enddet-##.dat` και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων από το αρχείο εξόδου, δημιουργείται αρχείο excel στο οποίο αρχικά δημιουργούνται τρεις στήλες που περιέχουν τα δεδομένα των τριών στηλών του αρχείου εξόδου `src-enddet-01.dat`. Στην πρώτη στήλη δηλαδή μπαίνουν οι 200 τιμές ενέργειας σε eV για κάθε bin, στην δεύτερη η πυκνότητα πιθανότητας σε κάθε bin, και στην τρίτη η στατιστική αβεβαιότητα 3σ.

Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ δύο συνεχόμενων τιμών της πρώτης στήλης (σε eV), όπου η διαφορά (bin width) παραμένει σταθερή μεταξύ κάθε ζευγαριού συνεχόμενων τιμών. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζονται κάθε μία τιμή της δεύτερης στήλης με τη διαφορά που υπολογίστηκε, καθώς και με το πλήθος φωτονίων της προσομοίωσης. Η νέα αυτή στήλη περιέχει το πλήθος γεγονότων απόθεσης ενέργειας στον ανιχνευτή. Πολλαπλασιάζοντας κάθε τιμή της στήλης αυτής με την ενέργεια του παραθύρου που αντιστοιχεί και προσθέτοντας όλα αυτά τα γινόμενα προκύπτει η συνολική ενέργεια που κατέγραψε ο ανιχνευτής σε eV.

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό της δόσης είναι ο υπολογισμός της μάζας του αέρα μέσα στον θάλαμο του ανιχνευτή της προσομοίωσης. Για να γίνει ο υπολογισμός αυτός χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί ο όγκος του αέρα εντός του θαλάμου. Υπολογίζοντας για κάθε τμήμα του θαλάμου τον όγκο του, προκύπτει ο όγκος του αέρα εντός του ως εξής:

- Για τον όγκο ολόκληρου του θαλάμου:

$$volume_{whole.chamber} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 1.440 \text{ cm}^3 \quad (6.6)$$

- Για τον όγκο του θαλάμου χωρίς το εξωτερικό περίβλημα (πάχους 3 χιλιοστών) :

$$volume_{without.enclosure} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 1.260 \text{ cm}^3 \quad (6.7)$$

- Για τον όγκο του εξωτερικού περιβλήματος (πάχους 3 χιλιοστών) :

$$volume_{enclosure} = volume_{whole.chamber} - volume_{without.enclosure} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 177 \text{ cm}^3 \quad (6.8)$$

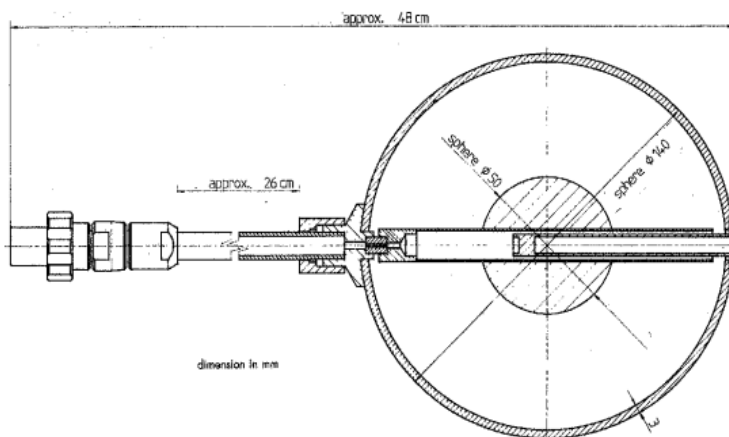
- Για τον όγκο της εσωτερικής σφαίρας:

$$volume_{inside.sphere} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 65,4 \text{ cm}^3 \quad (6.9)$$

- Ο όγκος του κυλίνδρου εντός του θαλάμου ιονισμού για τις πρώτες προσομοιώσεις, όπου επιλέχθηκε ακτίνα κυλίνδρου ίση με 0,8 cm και ύψος κυλίνδρου 14 cm:

$$volume_{cylinder} = \pi \cdot r^2 \cdot h = 28,1 \text{ cm}^3 \quad (6.10)$$

Οι όγκοι αυτοί, προκύπτουν από το σκαρίφημα του θαλάμου:



Chamber dimensions for chamber type 32002

Εικόνα 6.1: Σκαρίφημα θαλάμου ιονισμού PTW UNIDOS type 32002.

Έτσι ο όγκος του αέρα προκύπτει:

$$volume_{air} = volume_{whole.chamber} - volume_{enclosure} - volume_{inside.sphere} - volume_{cylinder} = 989 \text{ cm}^3 \quad (6.11)$$

Από το αρχείο υλικού air.mat του καταλόγου υλικών του PENELOPE, η πυκνότητα του αέρα ισούται με $1,20E-03 \text{ g/cm}^3$, για τις πρώτες προσομοιώσεις αυτού του κύκλου όπου το αρχείο υλικού του αέρα επιλέχθηκε από τον έτοιμο κατάλογο υλικών, η μάζα του αέρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$mass_{air} = volume_{air} \times density_{air} = 1,19 \text{ g} \text{ ή } 1,19 * 10^{-3} \text{ kg}. \quad (6.13)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι με την εξέλιξη των προσομοιώσεων, χρησιμοποιούνται οι πυκνότητες αέρα που μετρήθηκαν κατά την διεξαγωγή των πραγματικών πειραμάτων στο ΕΒΟΙΑ. Επομένως, η τιμή της μάζας του αέρα υπολογίζεται εκ νέου για αυτές τις προσομοιώσεις, κατά τον ίδιο τρόπο. Το ίδιο συμβαίνει και με τον όγκο του αέρα, καθώς στις τελευταίες προσομοιώσεις η διάμετρος του κυλίνδρου εκτιμήθηκε λίγο μικρότερη και κατά συνέπεια αλλάζει και το αποτέλεσμα για τον όγκο του αέρα.

Τέλος, για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειράματα στο ΕΒΟΙΑ, χρειάζεται να γίνει η διαίρεση της συνολικής ενέργειας σε eV, η οποία εκτιμήθηκε με την μάζα του αέρα σε kg, και πολλαπλασιασμός με τον συντελεστή $1,60217663 \cdot 10^{-19}$ ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα σε J/kg δηλαδή Gy. Στην συνέχεια υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση η τιμή Gy/photon, όπως περιγράφεται στην ενότητα **6.2.3.1**.

6.3.3 Υπολογισμός της σχετικής αβεβαιότητας σε επίπεδο 3σ

Η σχετική αβεβαιότητα όπως προκύπτει από την προσομοίωση, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ, υπολογίζεται μέσω των αποτελεσμάτων του αρχείου εξόδου src-enddet-01.dat, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της δεύτερης και της τρίτης στήλης κατά τον ακόλουθο τρόπο [24]:

$$unc_{sim} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (statistical\ uncertainty)_i^2}}{\sum_{i=1}^n (probability\ density)_i} \quad (6.14)$$

όπου:

- unc_{sim} , είναι η σχετική αβεβαιότητα (3σ)
- n , το πλήθος των καναλιών
- *statistical uncertainty*, οι τιμές της τρίτης στήλης του αρχείου εξόδου για την στατιστική αβεβαιότητα (3σ) της πυκνότητας πιθανότητας για κάθε κανάλι,
- *probability density*, οι τιμές της δεύτερης στήλης του αρχείου εξόδου για την πυκνότητα πιθανότητας σε κάθε κανάλι.

6.3.4 Προσομοιώσεις

Στο εγχειρίδιο χρήσεως του θαλάμου [16] αναφέρεται ότι υπάρχει επίστρωση γραφίτη στην εσωτερική σφαίρα του θαλάμου ιονισμού, χωρίς ωστόσο να αναφέρεται το πάχος της. Επιπλέον, στο σκαρίφημα του θαλάμου φαίνεται ότι υπάρχει εσωτερικά αυτού κύλινδρος, οι διαστάσεις και το υλικό του οποίο δεν αναφέρονται. Επιλέχθηκε να σχεδιαστεί ο κύλινδρος στο αρχείο γεωμετρίας, με ύψος ίσο με τη διάμετρο του θαλάμου ιονισμού, όπως «φαίνεται» στο σκαρίφημα, από υλικό πολυστερίνης, καθώς και να προστεθεί η επίστρωση γραφίτη, αλλά και η θωράκιση της πηγής στην πορεία των προσομοιώσεων αυτού του κύκλου.

6.3.4.1 Πρώτη προσομοίωση - Προσθήκη επίστρωσης γραφίτη και κυλίνδρου, σε περιβάλλον αέρα, σε ελεύθερο χώρο

Στις πρώτες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκε επίστρωση γραφίτη στην εσωτερική σφαίρα του θαλάμου, πάχους 5mm, ενώ δόθηκε ακτίνα κυλίνδρου ίση με 0,8 cm και ύψος 14 cm. Επιπλέον, η προσομοίωση έγινε σε ελεύθερο χώρο, δηλαδή αφαιρέθηκαν τα οικοδομικά στοιχεία (τοίχοι, πάτωμα κλπ) από το αρχείο γεωμετρίας, με στόχο την εξοικονόμηση χρόνου και την άμεση παρατήρηση των αποτελεσμάτων που δίνει η κάθε προσέγγιση έως την τελική. Τέλος, δεν προστέθηκε η θωράκιση της πηγής, αλλά όπως και στον πρώτο κύκλο προσομοιώσεων, τέθηκε γωνία εκπομπής 14,64° μοίρες στο αρχείο εισόδου, ενώ παραμένει στο αρχείο γεωμετρίας ο κατευθυντής και η σημειακή πηγή στην αρχή των αξόνων, σημείο (0,0,0). Τα υπόλοιπα υλικά παρέμειναν σταθερά, δηλαδή αέρας εντός του θαλάμου, POM στο εξωτερικό περίβλημα, πολυστερίνη στην εσωτερική σφαίρα και μόλυβδος στους απορροφητές και στον κατευθυντή. Η πρώτη προσέγγιση υλοποιήθηκε για το πρώτο πραγματικό πείραμα, χωρίς απορροφητή μόλυβδου.

Πίνακας 6.2:Αποτελέσματα προσομοίωσης για το πρώτο πείραμα

ΜΠΛΟΚ ΜΟΛΥΒΔΟΥ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/phonon)	ΕΒΟΙΑ (GY/phonon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3σ)
ΧΩΡΙΣ ΜΠΛΟΚ	6,73E-18	5,05E-18	1,33E+00	46%

Σε αυτή την προσομοίωση, το πλήθος φωτονίων που προσομοιώθηκαν ήταν 10^7 ενώ η ταχύτητα της προσομοίωσης ήταν 57,2 showers/sec. Επομένως, παρατηρείται ότι χρειάζεται σημαντικά μεγάλος χρόνος για την ολοκλήρωση των ιστοριών.

6.3.4.2 Δεύτερη προσομοίωση – Προσθήκη υλικού αέρα με πυκνότητα ίδια με αυτή των πειραμάτων στο ΕΒΟΙΑ

Στην προσομοίωση αυτή, όλα παραμένουν ίδια με την πρώτη, με μοναδική τροποποίηση της δημιουργία υλικού αέρα με βάση τα δεδομένα πίεσης και θερμοκρασίας που καταγράφηκαν σε κάθε πραγματικό πείραμα, έτσι ώστε η πυκνότητα του υλικού αέρα να αντιστοιχεί στην πυκνότητα του αέρα που υπήρχε κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος. Έτσι, σχεδιάστηκαν 7 διαφορετικά αρχεία αέρα, ένα για κάθε πείραμα. Οι προσομοιώσεις σε αυτό το στάδιο έγιναν για όλα τα πειράματα στο ΕΒΟΙΑ, ενώ γωνία εκπομπής των φωτονίων επιλέχθηκαν οι $14,64^\circ$ μοίρες.

Οι πυκνότητες που υπολογίστηκαν για καθένα από τα 7 πειράματα είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 6.3: Οι πυκνότητες των επτά πειραμάτων

ΜΠΛΟΚ ΜΟΛΥΒΔΟΥ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΕΡΑ ΣΕ $\frac{g}{cm^3}$
ΧΩΡΙΣ	1.15523640E-03
ΠΡΩΤΟ	1.15523640E-03
ΔΕΥΤΕΡΟ	1.15562557E-03
ΤΡΙΤΟ	1.15636726E-03
ΤΕΤΑΡΤΟ	1.15663961E-03
ΠΕΜΠΤΟ	1.15644469E-03
ΕΚΤΟ	1.15605505E-03

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα των επτά προσομοιώσεων

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (Gy/photon)	ΠΕΙΡΑΜΑ (Gy/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ ΠΕΙΡΑΜΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3σ)
ΧΩΡΙΣ	7,05E-18	5,05E-18	1,40E+00	25%
A1	2,92E-18	1,34E-18	2,18E+00	42%
A2	5,71E-19	4,76E-19	1,20E+00	87%
A3	9,36E-19	1,48E-19	6,32E+00	75%
A4	4,66E-19	1,65E-20	2,82E+01	113%
A5	5,30E-19	6,37E-21	8,32E+01	100%
A6	4,94E-19	2,69E-21	1,84E+02	122%

Πίνακας 6.5: Αριθμός φωτονίων και ταχύτητα προσομοιώσεων

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΠΛΗΘΟΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (showers/sec)
ΧΩΡΙΣ	10 ⁹	59,3
A1	10 ⁸	98,9
A2	6,66*10 ⁷	64,1
A3	5,83*10 ⁷	56,9
A4	5,40*10 ⁷	52,3
A5	5,37*10 ⁷	52,4
A6	5,25*10 ⁷	50

Από την ταχύτητα των προσομοιώσεων, συμπεραίνεται ότι με την αλλαγή των πυκνοτήτων αέρα ο χρόνος ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων παραμένει μεγάλος και η ταχύτητα είναι αντίστοιχη της πρώτης δοκιμαστικής προσομοίωσης, κάτι αναμενόμενο.

6.3.4.3 Τρίτη προσομοίωση - Προσθήκη θωράκισης, προσθήκη επίστρωσης γραφίτη στο εξωτερικό περίβλημα, αλλαγή διαστάσεων κυλίνδρου και επιστρώσεων γραφίτη και γωνία εκπομπής 4π

Στη φάση αυτή εκπόνησης της ΔΕ, έπειτα από τη μελέτη της δημοσίευσης "*Development of a new secondary standard for H*(10)*" [25] των K. Bairlein, B. Behnke, και O. Hure, υπήρξε καλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και κατά συνέπεια του τρόπου που πρέπει να γίνει η προσομοίωση του θαλάμου ιονισμού PTW UNIDOS type 32002. Η έρευνα αυτή αφορά στην ανάπτυξη ενός νέου δευτερεύοντος προτύπου για τη μέτρηση του περιβαλλοντικού ισοδύναμου δόσης H*(10), κρίσιμου παράγοντα στη ραδιολογική προστασία. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι στην έρευνα που παρουσιάζεται στη δημοσίευση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος θάλαμος ιονισμού που χρησιμοποιείται και στα πειράματα στο ΕΒΟΙΑ της παρούσας ΔΕ. Από την μελέτη αυτής της έρευνας, προέκυψε μία πολύ σημαντική επισήμανση όσον αφορά τη δομή του θαλάμου. Πέρα από την εξωτερική επίστρωση γραφίτη της εσωτερικής σφαίρας στο κέντρο του θαλάμου, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει επίστρωση γραφίτη και στο εσωτερικό τμήμα του εξωτερικού περιβλήματος. Οι επιστρώσεις αυτές λειτουργούν ως ηλεκτρόδια, και η προσομοίωση τους αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την βέλτιστη προσομοίωση του θαλάμου. Κατά συνέπεια στην προσομοίωση προστέθηκε επίστρωση γραφίτη και στο εσωτερικό τμήμα του εξωτερικού περιβλήματος του θαλάμου. Αυτή η επίστρωση γραφίτη, καθώς και η επίστρωση που υπάρχει ήδη εξωτερικά της εσωτερικής σφαίρας, έχουν πλέον διάσταση 0,2mm πάχος. Επιπλέον, η ακτίνα του κυλίνδρου έγινε 0,4cm από 0,8cm που είχε αρχικά σχεδιαστεί, με αποτέλεσμα ο όγκος του αέρα εντός του θαλάμου να είναι πλέον 1187 cm³. Τέλος, προστέθηκε ο σχεδιασμός της θωράκισης της πηγής στο αρχείο γεωμετρίας, κι ορίστηκε γωνία εκπομπής των φωτονίων στο αρχείο εισόδου 360°, όπως συμβαίνει και στο πραγματικό πείραμα. Οι προσομοιώσεις έτρεξαν σε αέρα πυκνότητας ίδιας του αντίστοιχου πραγματικού πειράματος. Η προσομοίωση αυτή έγινε χωρίς την ύπαρξη οικοδομικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα των επτά προσομοιώσεων

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	ΕΒΟΙΑ (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3σ)
ΧΩΡΙΣ	5,87E-18	5,05E-18	1,16E+00	25%
A1	2,43E-18	1,34E-18	1,81E+00	42%
A2	4,75E-19	4,76E-19	9,98E-01	87%
A3	7,79E-19	1,48E-19	5,26E+00	75%
A4	3,88E-19	1,65E-20	2,35E+01	113%
A5	4,42E-19	6,37E-21	6,94E+01	100%
A6	4,12E-19	2,69E-21	1,53E+02	122%

Πίνακας 6.7: Αριθμός φωτονίων και ταχύτητα προσομοιώσεων

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΦΩΤΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (showers/sec)
ΧΩΡΙΣ	$7,72 \cdot 10^7$	136
A1	$7,52 \cdot 10^7$	132
A2	$7,57 \cdot 10^7$	133
A3	$7,62 \cdot 10^7$	134
A4	$7,61 \cdot 10^7$	134
A5	$7,57 \cdot 10^7$	133
A6	$7,50 \cdot 10^7$	132

Σε αυτή την τρίτη δοκιμαστική προσομοίωση, φαίνεται ότι με την προσθήκη της δεύτερης επίστρωσης γραφίτη και της θωράκισης, τις αλλαγές στις διαστάσεις του κυλίνδρου και του πάχους των επιστρώσεων γραφίτη, καθώς και η αλλαγή στην γωνία εκπομπής της πηγής, βελτιώθηκε η ταχύτητα των προσομοιώσεων από περίπου 50 showers/sec, σε 130 showers/sec. Η βελτίωση της ταχύτητας πιθανότατα οφείλεται στο πολύ μεγάλο ποσοστό φωτονίων τα οποία εκπέμπονται εκτός της στερεάς γωνίας – ιδίως προς τα πίσω – τα οποία επειδή δεν πραγματοποιούν πολλές αλληλεπιδράσεις ολοκληρώνουν την ιστορία τους πολύ γρήγορα. Ωστόσο, αυτό δεν βελτιώνει τη στατιστική των προσομοιώσεων ενώ παραμένει σημαντικά μεγάλος ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων.

6.3.4.4 Τέταρτη προσομοίωση - Αλλαγές στις παραμέτρους της προσομοίωσης

Σε μία προσπάθεια βελτίωσης της ταχύτητας, έγινε προσομοίωση και για τα επτά πειράματα στο ΕΒΟΙΑ με τα ίδια γεωμετρικά στοιχεία, με μόνη διαφορά ότι αυτή τη φορά άλλαξαν οι παράμετροι της προσομοίωσης στο αρχείο εισόδου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.8, γεγονός που βελτίωσε σημαντικά την ταχύτητα της προσομοίωσης στα 3.61E+03 showers/sec, αλλά και τη σχετική αβεβαιότητα (3σ):

Πίνακας 6.8: Παράμετροι προσομοίωσης για όλα τα υλικά

Παράμετροι προσομοίωσης (για όλα τα υλικά)	EBAS(1)	EBAS(2)	EABS(3)	
	5.00E+04	5.00E+04	5.00E+04	
	C1	C2	WCC	WCR
	0.1	0.1	1.00E+04	1.00E+03

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.9:

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα των επτά προσομοιώσεων

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	ΕΒΟΙΑ (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3σ)
ΧΩΡΙΣ	5,84E-18	5,05E-18	1,16E+00	7%
A1	2,58E-18	1,34E-18	1,92E+00	12%
A2	1,28E-19	4,76E-19	2,69E+00	17%
A3	5,91E-19	1,48E-19	4,00E+00	24%
A4	3,42E-19	1,65E-20	2,08E+01	32%
A5	2,91E-19	6,37E-21	4,57E+01	34%
A6	2,50E-19	2,69E-21	9,31E+01	36%

Πίνακας 6.10: Αριθμός φωτονίων και ταχύτητα προσομοιώσεων

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΦΩΤΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (showers/sec)
ΧΩΡΙΣ	10 ⁹	1.320
A1	10 ⁹	1.310
A2	10 ⁹	1.320
A3	10 ⁹	1.310
A4	10 ⁹	1.290
A5	10 ⁹	1.290
A6	10 ⁹	1.320

Είναι φανερό ότι οι αλλαγές στις παραμέτρους της προσομοίωσης στο αρχείο εισόδου βελτίωσαν και άλλο την ταχύτητα των προσομοιώσεων, από 1.32E+02 showers/sec σε 1.32E+03 showers/sec.

6.3.4.5 Πέμπτη προσομοίωση - Αύξηση του πλήθους ιστοριών της προσομοίωσης

Έχοντας πλέον βελτιώσει την ταχύτητα προσομοίωσης, είχε νόημα και ήταν ρεαλιστικό να αυξηθεί το πλήθος ιστοριών που προσομοιώνονται προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο σημείο αυτό αποφασίσθηκε οι επόμενες προσομοιώσεις να γίνονται μόνον χωρίς τον απορροφητή, προκειμένου να συνεχίσει η διερεύνηση της βελτίωσης της ταχύτητας και ακρίβειας της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό έτρεξαν προσομοιώσεις για το πρώτο πείραμα, κατά τον ίδιο τρόπο με προηγουμένως, με μοναδική διαφορά την αύξηση του αριθμού ιστοριών από 1 δισεκατομμύριο σε 2,4 δισεκατομμύρια, διατηρώντας τον χρόνο σταθερό στα 5000000 δευτερόλεπτα, με στόχο την εξέταση της σχετικής αβεβαιότητας (3σ).

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το πρώτο πείραμα

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	ΕΒΟΙΑ (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3Σ)
ΧΩΡΙΣ ΜΠΛΟΚ	6,08E-18	5,05E-18	1,20E+00	5%

Προσομοιώθηκαν $2,37 \cdot 10^9$ φωτόνια, με ταχύτητα προσομοίωσης 1.350 showers/sec. Επομένως – και όπως είναι φυσικό – η αύξηση του πλήθους ιστοριών της προσομοίωσης δεν επηρέασε την ταχύτητα της προσομοίωσης, εφόσον οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ίδιοι με την τέταρτη δοκιμαστική προσομοίωση. Όσον αφορά στον λόγο μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος, αυτός έμεινε περίπου ο ίδιος 1.2 με μικρή βελτίωση της αβεβαιότητας.

6.3.4.6 Έκτη προσομοίωση - Αλλαγή παραμέτρων της προσομοίωσης για το υλικό μόλυβδος

Σε μία προσπάθεια να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η ταχύτητα τροποποιήθηκαν οι παράμετροι της προσομοίωσης για το υλικό μόλυβι των απορροφητών και της θωράκισης έλαβαν τις τιμές του Πίνακα 6.12. Και πάλι η προσομοίωση έγινε μόνον για το πείραμα χωρίς απορροφητή.

Πίνακας 6.12: Παράμετροι προσομοίωσης για μόλυβδο

Παράμετροι προσομοίωσης (για μόλυβδο)	EBAS(1)	EBAS(2)	EABS(3)	
	5.00E+04	5.00E+04	5.00E+04	
	C1	C2	WCC	WCR
	0.1	0.1	1.00E+05	2.00E+04

Τα αποτελέσματα για το πρώτο, χωρίς απορροφητή, πείραμα είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το πρώτο πείραμα

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	ΕΒΟΙΑ (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ(3Σ)
ΧΩΡΙΣ ΜΠΛΟΚ	6,35E-18	5,05E-18	1,26E+00	7%

Σημαντική διαπίστωση είναι ότι η ταχύτητα της προσομοίωσης αυξήθηκε σημαντικά, με τις επιπλέον αλλαγές στις παραμέτρους της προσομοίωσης στο αρχείο εισόδου, αφού αυτή τη φορά η προσομοίωση έτρεξε με ταχύτητα 24.200 showers/sec, συγκριτικά με την ταχύτητα των 3.610 showers/sec που έτρεχε πριν αυτή την αλλαγή. Το πλήθος ιστοριών αυτής της προσομοίωσης ήταν 10^9 φωτόνια.

6.3.4.7 Έβδομη προσομοίωση - Αύξηση του πλήθους ιστοριών της προσομοίωσης

Από την προηγούμενη προσομοίωση, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα της προσομοίωσης αυξήθηκε σημαντικά, ενώ η σχετική αβεβαιότητα παραμένει ίδια. Επομένως, έτρεξε δοκιμαστική προσομοίωση, πάλι για το πρώτο πείραμα, κατά τον ίδιο τρόπο με προηγουμένως, αλλά με μοναδική διαφορά την αύξηση του πλήθους ιστοριών από 1 δισεκατομμύριο σε 6,4 δισεκατομμύρια, διατηρώντας τον χρόνο σταθερό στα 5000000 δευτερόλεπτα, με στόχο τη βελτίωση της σχετικής αβεβαιότητας (3σ).

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το πρώτο πείραμα

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	ΕΒΟΙΑ (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ(3Σ)
ΧΩΡΙΣ ΜΠΛΟΚ	6,10E-18	5,05E-18	1,21E+00	2%

6.3.4.8 Όγδοη προσομοίωση - Προσθήκη στο αρχείο γεωμετρίας των οικοδομικών στοιχείων

Στην όγδοη και τελευταία αυτής της σειράς προσομοιώσεων προσομοιώθηκαν όλα τα πειράματα (με όλους τους απορροφητές) αφού έγινε ενσωμάτωση όλων των αλλαγών που περιεγράφηκαν προηγουμένως και στο αρχείο γεωμετρίας ενσωματώθηκαν όλα τα οικοδομικά στοιχεία, δηλαδή προσομοιώθηκε η γεωμετρία που ήταν πιο κοντά στην πραγματικότητα. Σε κάθε προσομοίωση το πλήθος ιστοριών ήταν 10^9 . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.15.

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα των επτά προσομοιώσεων

ΜΠΛΟΚ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	ΕΒΟΙΑ (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/ΕΒΟΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3Σ)
ΧΩΡΙΣ	6,80E-18	5,05E-18	1,35E+00	7%
A1	3,14E-18	1,34E-18	2,34E+00	10%
A2	1,61E-18	4,76E-19	3,38E+00	14%
A3	1,03E-18	1,48E-19	6,96E+00	17%
A4	7,58E-19	1,65E-20	4,60E+01	20%
A5	7,61E-19	6,37E-21	1,19E+02	20%
A6	7,87E-19	2,69E-21	2,93E+02	20%

Πίνακας 6.16: Αριθμός φωτονίων και ταχύτητα προσομοιώσεων

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΦΩΤΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (showers/sec)
ΧΩΡΙΣ	10 ⁹	3.040
A1	10 ⁹	3.110
A2	10 ⁹	3.110
A3	10 ⁹	3.130
A4	10 ⁹	3.120
A5	10 ⁹	3.130
A6	10 ⁹	3.130

Όπως παρατηρείται ότι η προσθήκη της αίθουσας στο αρχείο γεωμετρίας, μείωσε την ταχύτητα της προσομοίωσης από 24.200 showers/sec σε περίπου 3.100 showers/sec, κάτι που ήταν αναμενόμενο.

Από τις σειρές αυτές προσομοιώσεων διαπιστώθηκε ότι οι βασικοί παράγοντες που οδηγούν στην αύξηση της ταχύτητας των προσομοιώσεων του πειράματος της παρούσας ΔΕ είναι κατά κύριο λόγο οι παράμετροι προσομοίωσης στο αρχείο εισόδου κατά τον τρόπο που παρουσιάζονται ανωτέρω, αλλά και η γωνία εκπομπής των φωτονίων – μεγαλύτερη γωνία αύξησε την ταχύτητα – για τους λόγους που αναλύθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Αντιθέτως, η προσθήκη αντικειμένων (πχ αίθουσα εργαστηρίου) στο αρχείο γεωμετρίας, φαίνεται να λειτουργεί αντίθετα και να μειώνει την ταχύτητα προσομοίωσης, ενώ παρατηρείται ότι η επιλογή του πλήθους των ιστοριών δεν επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα της προσομοίωσης, αλλά βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την στατιστική αβεβαιότητα κι επομένως την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Αναφορικά με τη σχετική αβεβαιότητα, παρατηρείται ότι ο σημαντικότερος παράγοντας στην βελτίωσή της, είναι αρχικά η αλλαγή στις παραμέτρους της προσομοίωσης στο αρχείο εισόδου, αλλά και η αύξηση του πλήθους ιστοριών, με το μεγαλύτερο πλήθος ιστοριών επιτυγχάνεται καλύτερη σχετική αβεβαιότητα.

Πάντως, από όλες τις προσομοιώσεις διαπιστώνεται ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με την προσομοίωση να υπερεκτιμά τα πειραματικά αποτελέσματα. Η διαφορά αυτή αυξάνει όσο μεγαλώνει το πάχος του απορροφητή που χρησιμοποιείται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Τελικές προσομοιώσεις

7.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αφορά τις τελικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Η επιλογή των τελικών προσομοιώσεων βασίστηκε σε μια σειρά από στάδια δοκιμαστικών προσομοιώσεων που προηγήθηκαν, με στόχο την αποτελεσματική μοντελοποίηση του θαλάμου ιονισμού και συνολικά των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΒΟΙΑ. Το τυπικό αρχείο εισόδου περιέχει τη θέση που τοποθετείται η σημειακή πηγή, την ενέργειά της, τις παραμέτρους προσομοίωσης καθώς και τον εικονικό ανιχνευτή. Το τυπικό αρχείο γεωμετρίας περιλαμβάνει τον θάλαμο ιονισμού, τη θωράκιση της πηγής με τον κατευθυντή, την αίθουσα του εργαστηρίου, καθώς και τους μολύβδινους απορροφητές για τα αντίστοιχα πειράματα. Αυτά τα αρχεία περιέχονται στο Παράρτημα Γ.

7.1.1 Αρχείο εισόδου

Η τελική διαμόρφωση του αρχείου εισόδου προήλθε από τα αποτελέσματα και τις εκτιμήσεις που προέκυψαν από τις δοκιμαστικές προσομοιώσεις. Οι παράμετροι προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 7.1 για τον μόλυβδο και 7.2 για τα υπόλοιπα υλικά, ενώ το πλήθος ιστοριών επιλέχθηκε να είναι στην τάξη μεγέθους 10^{10} .

Πίνακας 7.1: Παράμετροι προσομοίωσης για μόλυβδο

Παράμετροι προσομοίωσης (για μόλυβδο)	EBAS(1)	EBAS(2)	EABS(3)	
	5.00E+04	5.00E+04	5.00E+04	
	C1	C2	WCC	WCR
	0.1	0.1	1.00E+05	2.00E+04

Πίνακας 7.2: Παράμετροι προσομοίωσης για τα υπόλοιπα υλικά

Παράμετροι προσομοίωσης (για τα υπόλοιπα υλικά)	EBAS(1)	EBAS(2)	EABS(3)	
	5.00E+04	5.00E+04	5.00E+04	
	C1	C2	WCC	WCR
	0.1	0.1	1.00E+04	1.00E+03

Όπως φαίνεται στο Παράρτημα Γ η πηγή είναι ενέργειας 661,65 keV – πηγή ^{137}Cs – ισότροπη και τοποθετημένη στο σημείο (0,0,0). Το ενεργειακό παράθυρο του εικονικού ανιχνευτή καθορίζεται από 0 keV έως 670 keV, με 200 ενεργειακές διαμερίσεις (bins). Σώμα του ανιχνευτή επιλέγεται το σώμα 18 που αποτελεί τον αέρα εντός του θαλάμου ιονισμού.

7.1.2 Αρχεία υλικών

Τα τελικά υλικά που επιλέχθηκαν είναι:

- Τσιμέντο: για τους τοίχους της αίθουσας του ΕΒΟΙΑ.
- ΡΟΜ (πολυοξυμεθυλένιο): για το εξωτερικό περίβλημα του θαλάμου ιονισμού.
- Πολυστερίνη: για την εσωτερική σφαίρα του θαλάμου και τον κύλινδρο εντός του.
- Γραφίτης: για την επίστρωση εξωτερικά της εσωτερικής σφαίρας του θαλάμου, αλλά και για την επίστρωση εσωτερικά του εξωτερικού περιβλήματος του θαλάμου.
- Μόλυβδος: για την θωράκιση της πηγής, τον κατευθυντή, και τους έξι μολύβδινους απορροφητές.
- Αέρας: εντός της αίθουσας αλλά και του θαλάμου ιονισμού.

Όλα τα υλικά επιλέχθηκαν από τον έτοιμο κατάλογο υλικών του PENELOPE, με εξαίρεση τον αέρα. Δημιουργήθηκαν 7 διαφορετικά αρχεία αέρα, σύμφωνα με την πυκνότητα αέρα του εκάστοτε πραγματικού πειράματος στο ΕΒΟΙΑ, τα οποία αναφέρονται στην ενότητα **6.3.4.2**.

7.1.3 Αρχείο γεωμετρίας

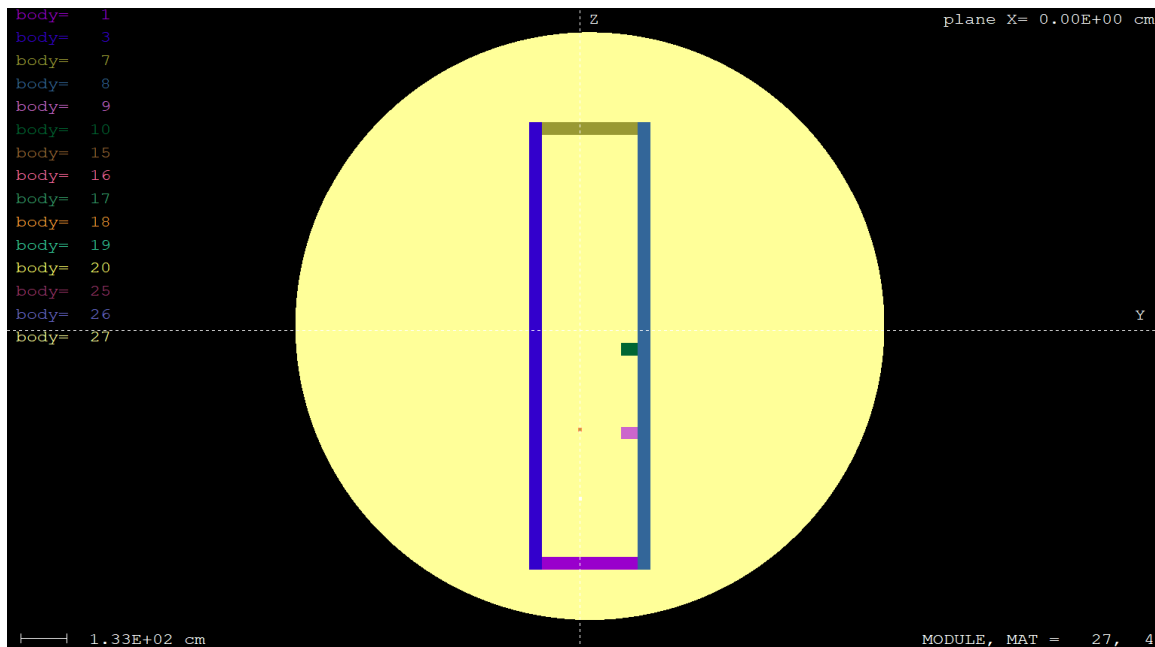
Στο πλαίσιο των τελικών προσομοιώσεων, το αρχείο γεωμετρίας εμπλουτίστηκε με την προσθήκη των οικοδομικών στοιχείων της αίθουσας του εργαστηρίου και της θωράκισης της πηγής. Συγκεκριμένα, με γνώμονα την σημειακή πηγή στο σημείο (0,0,0) σχεδιάστηκαν όλα τα υπόλοιπα τμήματα της γεωμετρίας.

1. Η αίθουσα σχεδιάστηκε πιστά, με 12,203 m μήκος, 6,268 m πλάτος και 2,783 m ύψος, ενώ προστέθηκαν επακριβώς και οι διάφορες κολώνες δοκοί κλπ σκυροδέματος που υπάρχουν στον χώρο, έπειτα από την ακριβή μέτρησή τους. Η πηγή είναι τοποθετημένη 1 m από το έδαφος, 1,675 m μπροστά από τον πίσω τοίχο, και 2,284 m αριστερά από τον δεξιό τοίχο της αίθουσας.
2. Η θωράκιση της πηγής σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις διαστάσεις της. Συγκεκριμένα, αποτελείται από δύο τετραγωνικές πλάκες 29x29 cm, με πάχος 0,5 cm, και το ενδιάμεσο κυλινδρικό τμήμα διαμέτρου 26 cm, βάθους 39 cm, και πάχους 0,5 cm.
3. Ο κυκλικός κατευθυντής της πηγής, σχεδιάστηκε μπροστά από την θωράκιση (σε απόσταση 27,2 cm στην ευθεία της πηγής), με ακτίνα 4,435 cm και πάχος 0,3 cm.
4. Ο θάλαμος ιονισμού σχεδιάστηκε με 140 mm εξωτερική διάμετρο με πάχος του εξωτερικού περιβλήματος ίσο με 3 mm. Η εσωτερική σφαίρα έχει διάμετρο 50 mm, ενώ ο κύλινδρος έχει ύψος 140 mm και διάμετρο 0,4 cm. Οι επιστρώσεις γραφίτη στο εξωτερικό περίβλημα, και στην εσωτερική σφαίρα του θαλάμου αποτελούν τα 0,2 mm από το καθένα. Το κέντρο του θαλάμου τοποθετήθηκε σε απόσταση 2 m από την πηγή, συνευθειακά με αυτήν.
5. Οι μολύβδινοι απορροφητές έχουν και οι έξι ακτίνα πίσω τμήματος που εφάπτεται στον κατευθυντή, ίση με 4,135 cm και ακτίνα του πρόσθιου τμήματος ίση με 5 cm. Ο πρώτος μολύβδινος απορροφητής έχει 0,5 cm πάχος και στα δύο του τμήματα, ο δεύτερος 1 cm, ο τρίτος 1,5 cm, ενώ ο τέταρτος έχει πάχος 3 cm στο πρόσθιο τμήμα και 2 cm στο πίσω, ο

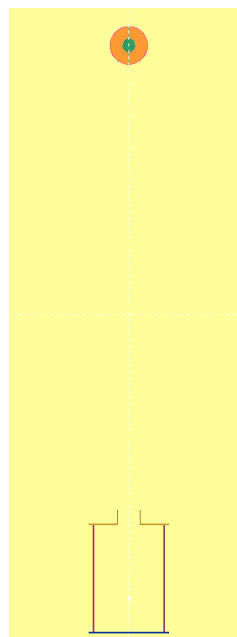
πέμπτος 4 cm πάχος στο πρόσθιο τμήμα και 2 cm στο πίσω, και ο έκτος 5 cm στο μπροστινό και 2 cm στο πίσω τμήμα.

6. Το Με κέντρο το σημείο με συντετεγμένες (0, 28,5, 500) σχεδιάστηκε ένα σφαιρικό module με ακτίνα 8,5 m το οποίο περικλείει όλη την αίθουσα και την πειραματική διάταξη.

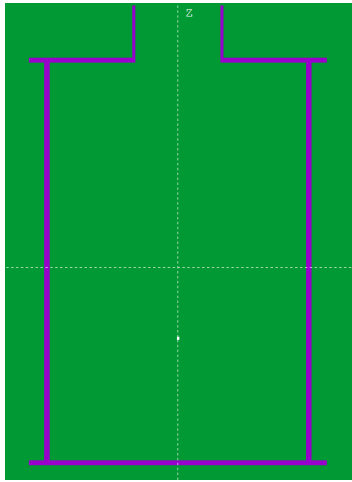
Ακολουθούν οι εικόνες 7.1 έως 7.12 των αρχείων γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν για την τελική προσομοίωση της παρούσας ΔΕ. Οι εικόνες αυτές δημιουργήθηκαν με το πρόγραμμα gview2d.



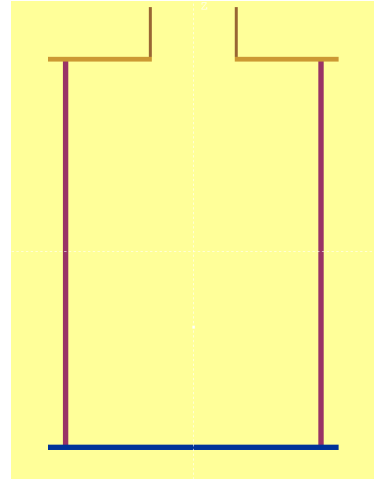
Εικόνα 7.1: Συνολική διάταξη αρχείου γεωμετρίας (gview2d)



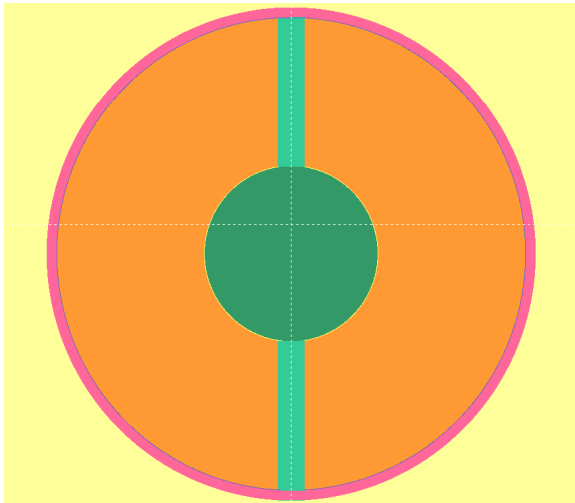
Εικόνα 7.2: Θωράκιση πηγής και θάλαμος ιονισμού zoom (χωρίς απορροφητή)



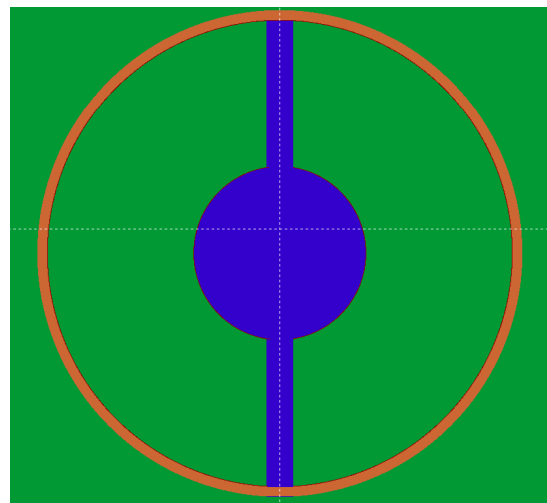
Εικόνα 7.3: Θωράκιση πηγής (υλικά)



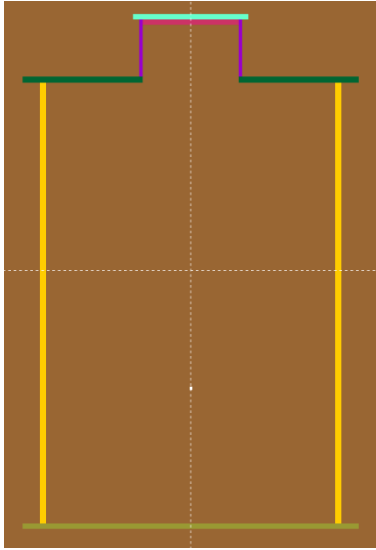
Εικόνα 7.4: Θωράκιση πηγής (bodies)



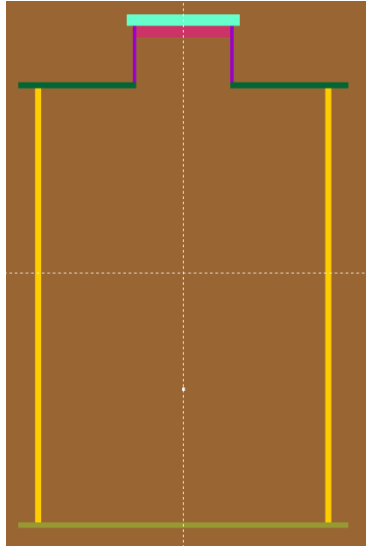
Εικόνα 7.5: Θάλαμος ιονισμού (bodies)



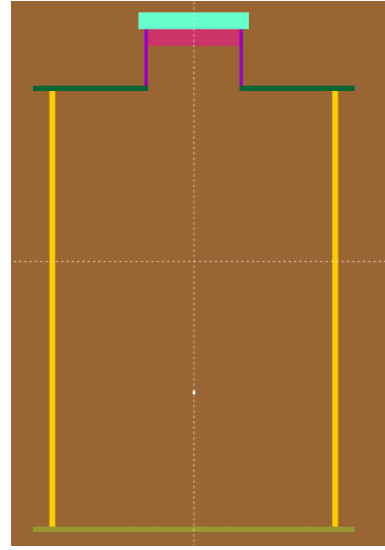
Εικόνα 7.6: Θάλαμος ιονισμού (υλικά)



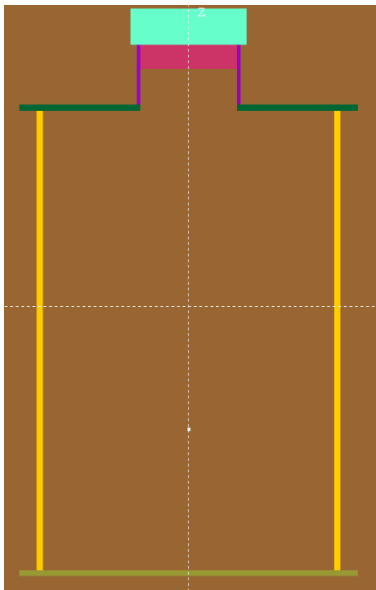
Εικόνα7.7: Απορροφητής A1(bodies)



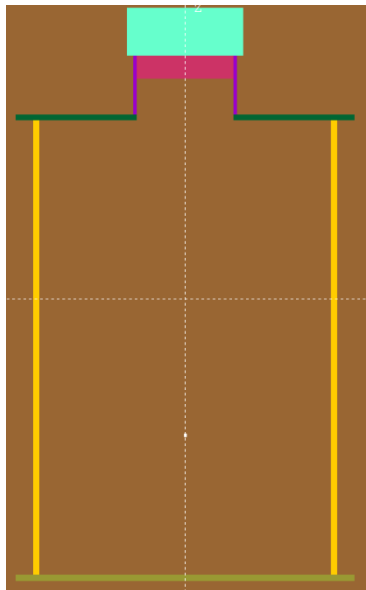
Εικόνα7.8: Απορροφητής A2(bodies)



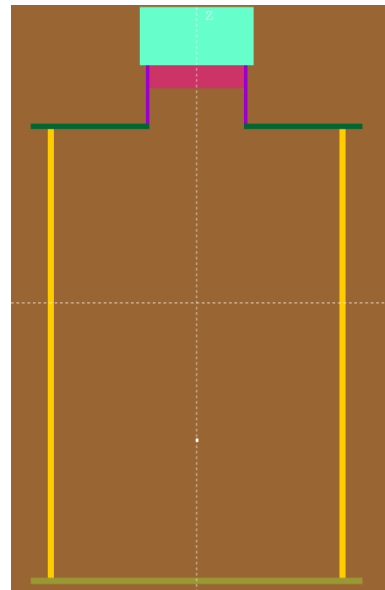
Εικόνα 7.9: Απορροφητής A3(bodies)



Εικόνα7.10: Απορροφητής A4(bodies)



Εικόνα 7.11: Απορροφητής A5(bodies)



Εικόνα7.12: Απορροφητής A6(bodies)

7.2 Αποτελέσματα Τελικών Προσομοιώσεων

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τελικών προσομοιώσεων, για καθένα από τα επτά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΒΟΙΑ, με γραφήματα και πίνακες και γίνεται προσπάθεια ερμηνείας τους, ενώ αναδεικνύονται τα κυριότερα ευρήματα και γίνεται σύγκριση με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Αυτό το κεφάλαιο αποτελεί μια σημαντική φάση της ερευνητικής διαδικασίας της παρούσας ΔΕ, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα στα αποτελέσματα και τις επιδόσεις των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία επεξεργασίας αποτελεσμάτων που περιγράφεται στην ενότητα 6.2 του δεύτερου κύκλου προσομοιώσεων, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για όλα τα πειράματα του ΕΒΟΙΑ

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (Gy/photon)	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3σ)
ΧΩΡΙΣ	6,80E-18	3%
A1	3,01E-18	4%
A2	1,63E-18	5%
A3	1,11E-18	7%
A4	7,98E-19	8%
A5	7,75E-19	8%
A6	7,76E-19	8%

Πίνακας 7.4: Αριθμός φωτονίων και ταχύτητα προσομοιώσεων

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΦΩΤΟΝΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (showers/sec)
ΧΩΡΙΣ	6,14*10 ⁹	3.200
A1	6,43*10 ⁹	3.140
A2	6,52*10 ⁹	3.180
A3	6,46*10 ⁹	3.150
A4	6,52*10 ⁹	3.190

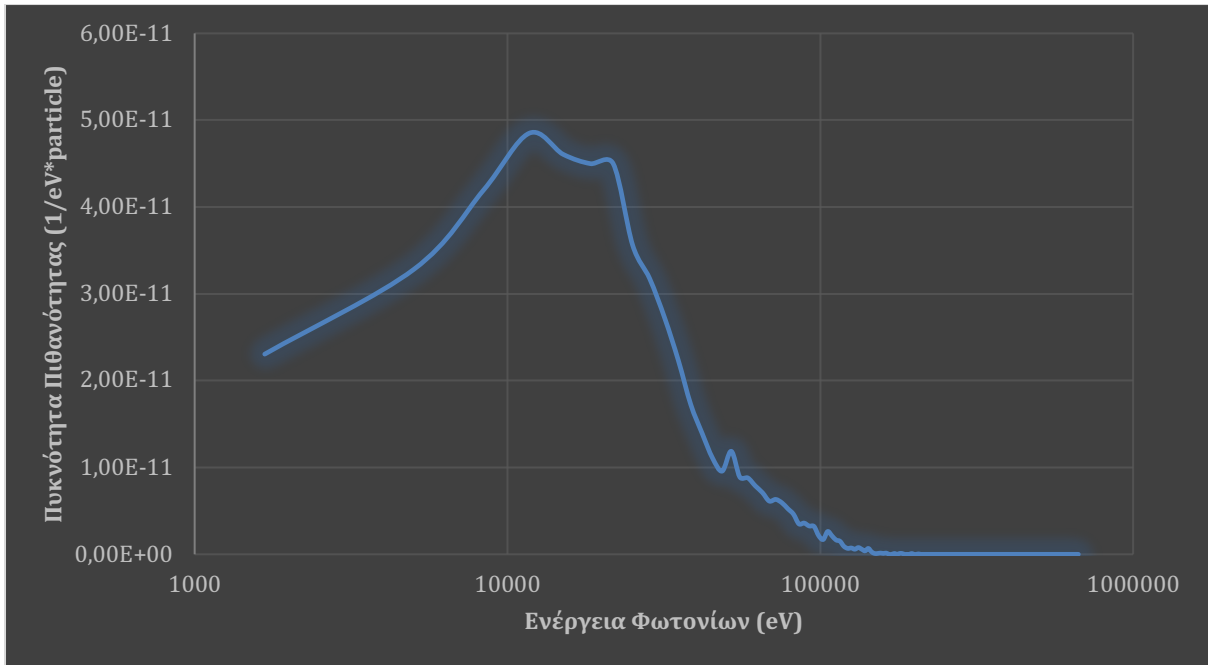
A5	6,49*10 ⁹	3.170
A6	6,49*10 ⁹	3.170

Όπως αναμενόταν, η χρήση απορροφητών μολύβδου με διαφορετικά πάχη επηρεάζει τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης. Η αύξηση του πάχους μολυβδου επιφέρει μείωση του ρυθμού δόσης που εκτιμάται κατά την πρώτη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε χωρίς την χρήση απορροφητή μολύβδου. Συγκεκριμένα, στη δεύτερη προσομοίωση όπου τοποθετούμε απορροφητή μολύβδου πάχους 1 cm υπολογίζεται μείωση του ρυθμού δόσης κατά 55,74%, στην τρίτη προσομοίωση (απορροφητής πάχους 2 cm) ο ρυθμός δόσης μειώνεται κατά 76,03%, στην τέταρτη (απορροφητής πάχους 3 cm) κατά 83,68%, στη πέμπτη (απορροφητής πάχους 4 cm) κατά 88,26%, στην έκτη με (απορροφητής πάχους 5 cm) κατά 88,60%, ενώ τέλος στην έβδομη (απορροφητής πάχους 6 cm) ο ρυθμός δόσης της αρχικής προσομοίωσης μειώνεται κατά 88,59%. Ο ρυθμός δόσης στις τρεις τελευταίες προσομοιώσεις δεν φαίνεται να διαφέρει στατιστικά σημαντικά και αυτό οφείλεται στη μεγάλη αβεβαιότητα στις περιπτώσεις αυτές, λόγω μικρού πλήθους φωτονίων που τελικά αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή. Η ταχύτητα της προσομοίωσης σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων περίπου στα 3.000 showers/sec.

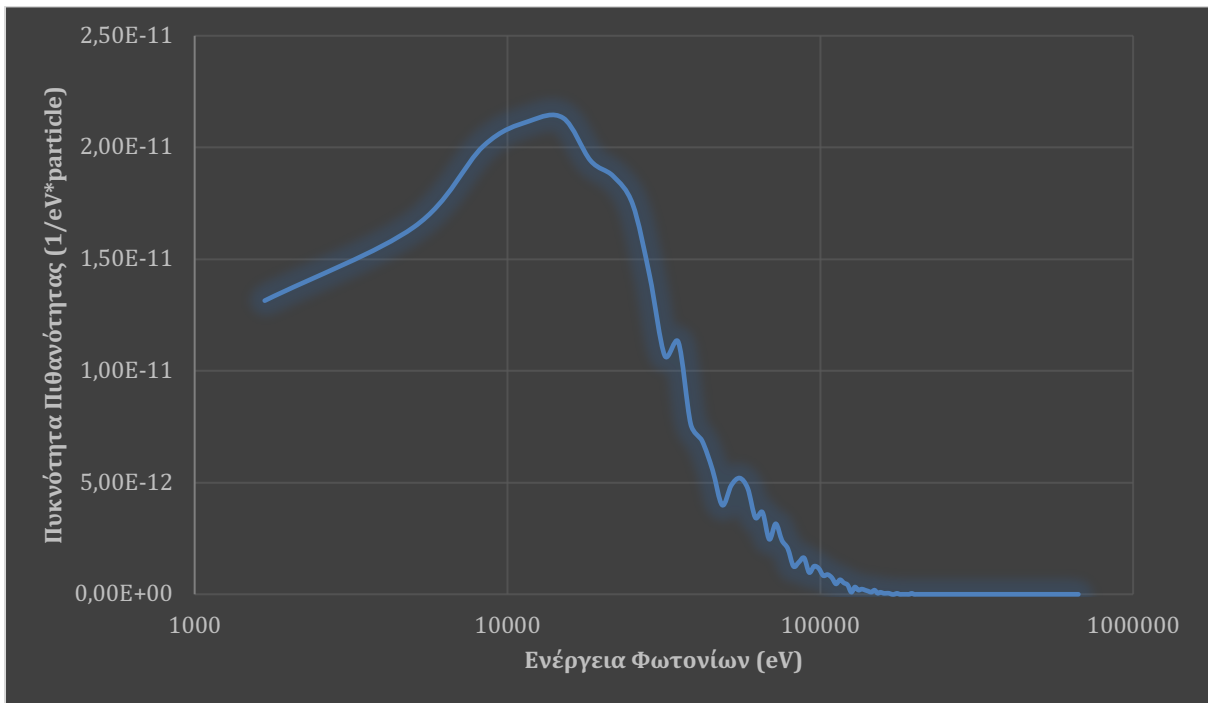
7.2.1 Ενεργειακά φάσματα των τελικών προσομοιώσεων

Όπως αναφέρεται και στο έκτο κεφάλαιο των δοκιμαστικών προσομοιώσεων, η δεύτερη και τελική επιλογή ανιχνευτή, αφορά τον energy deposition detector. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής αποθηκεύει την ενέργεια που αποθέτουν τα φωτόνια που αλληλεπιδρούν με αυτόν, υπό μορφή ενεργειακού φάσματος. Το αρχείο εξόδου του συγκεκριμένου ανιχνευτή περιέχει το φάσμα που προκύπτει από τον ανιχνευτή απόθεσης ενέργειας καθώς και ξεχωριστά για κάθε σωματίδιο, μαζί με τις στατιστικές αβεβαιότητες (3σ). Δηλαδή όταν εισέλθει η ακτινοβολία μέσα στον ανιχνευτή, καταγράφεται η ενέργεια που αποτίθεται μέσα σε αυτόν, και μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της προσομοίωσης, δημιουργείται στο αρχείο εξόδου το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων που απορροφήθηκε μέσα στον ανιχνευτή [26].

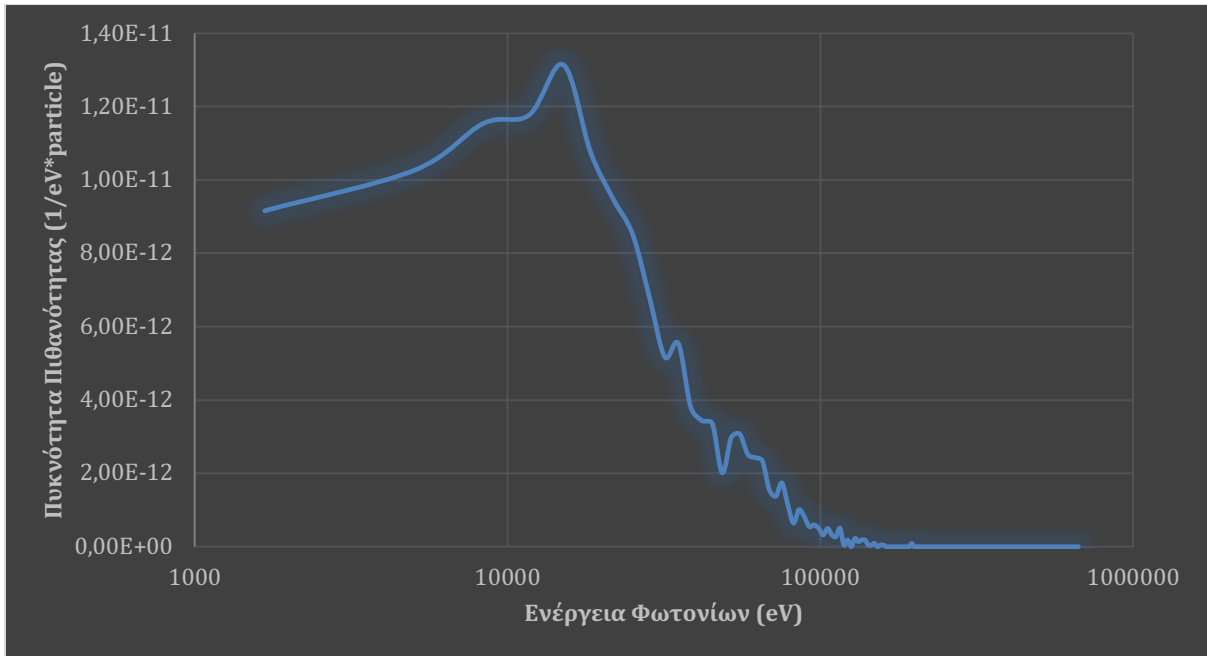
Τα ενεργειακά φάσματα των προσομοιώσεων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της ενέργειας που αποθέτουν τα φωτόνια που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή. Μέσω των φασμάτων αυτών, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την ακρίβεια της προσομοίωσης σε σχέση με το πραγματικό πείραμα. Ο άξονας X αντιπροσωπεύει την ενέργεια των φωτονίων που αποτίθεται σε eV, ενώ ο άξονας Y αντιπροσωπεύει την πυκνότητα πιθανότητας (probability density) σε μονάδες 1/eV*particle. Αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε διπλή λογαριθμική κλίμακα, καθώς κρίθηκε ότι αυτό διευκολύνει την απεικόνιση και ερμηνεία των φασμάτων. Στη συνέχεια στα σχήματα 7.13 έως 7.19 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα ενεργειακά φάσματα για κάθε μία από τις επτά προσομοιώσεις.



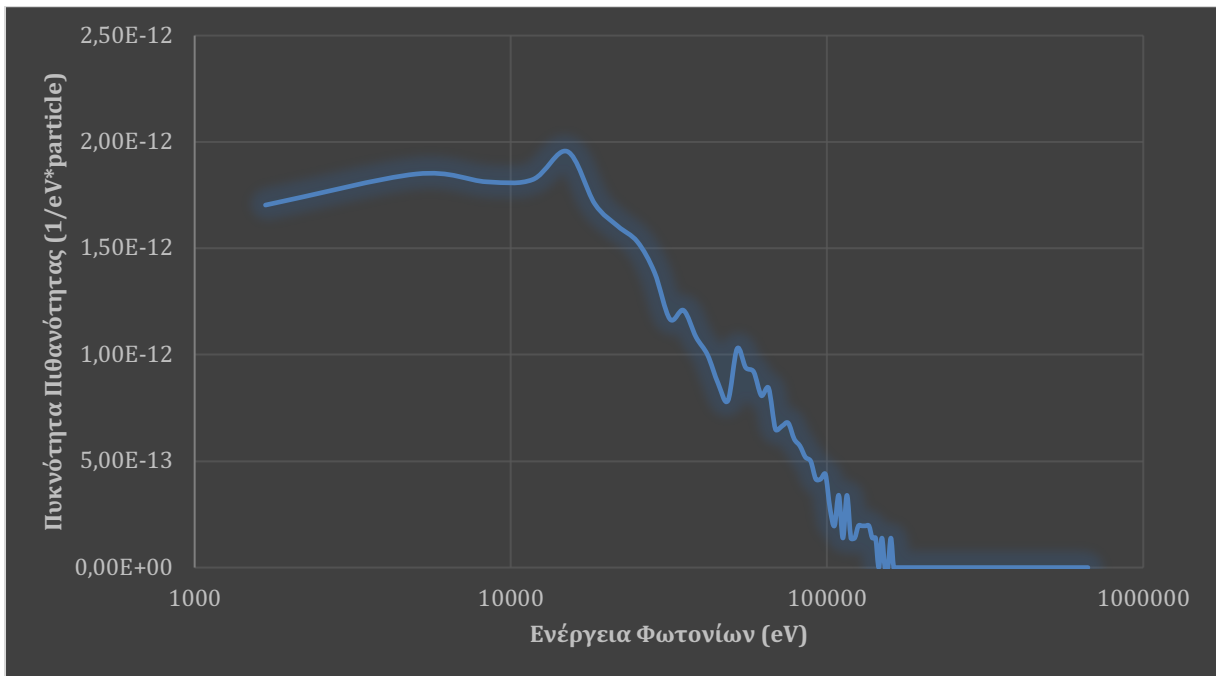
Εικόνα 7.13: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος Χωρίς Απορροφητή



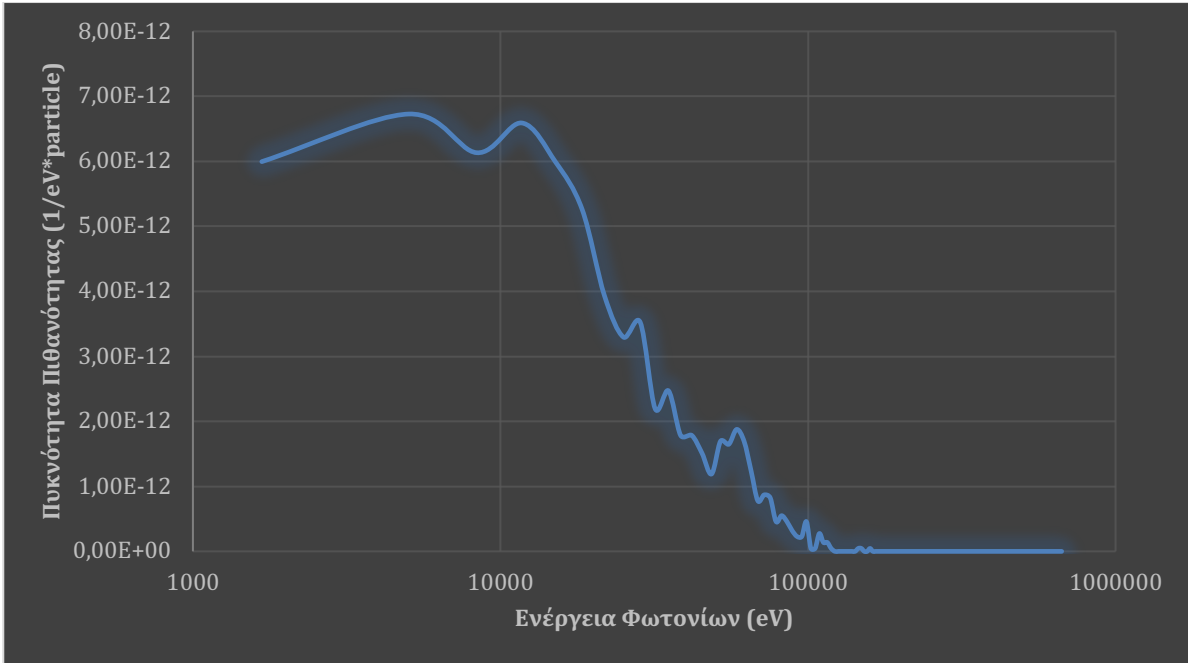
Εικόνα 7.14: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος με Απορροφητή Α1



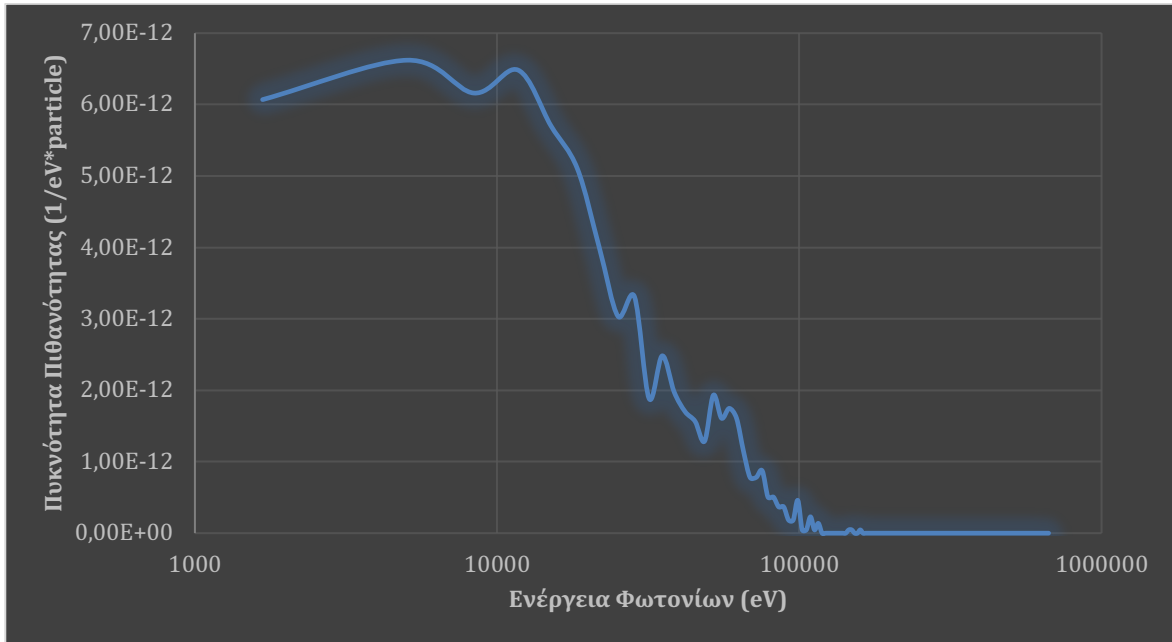
Εικόνα 7.15: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος με Απορροφητή A2



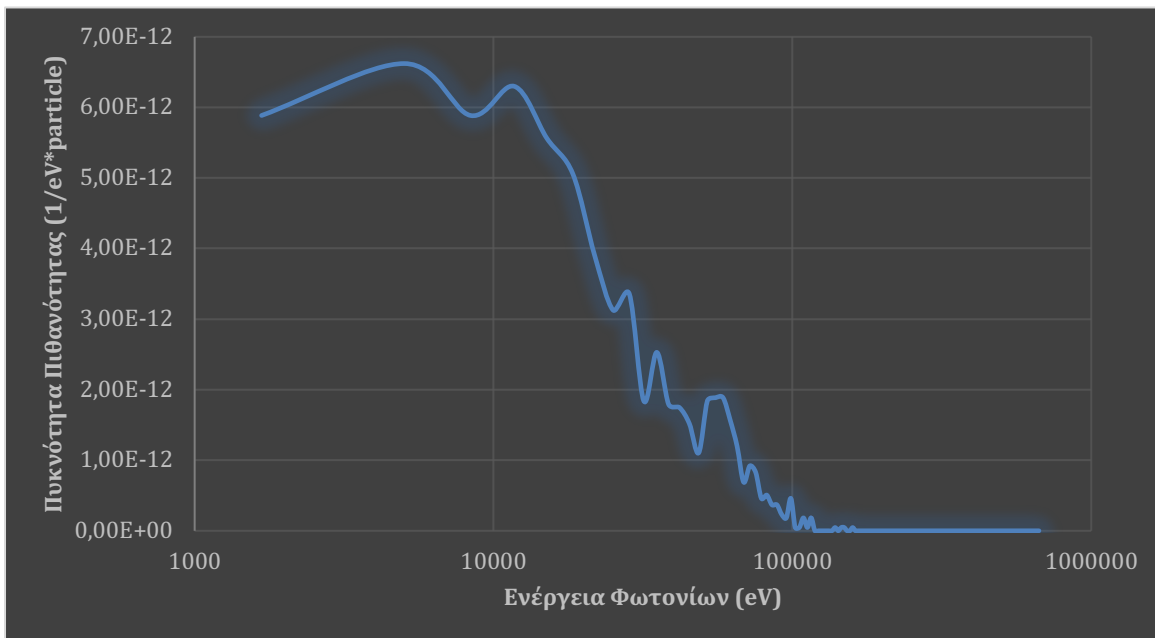
Εικόνα 7.16: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος με Απορροφητή A3



Εικόνα 7.17: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος με Απορροφητή A4



Εικόνα 7.18: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος με Απορροφητή A5



Εικόνα 7.19: Ενεργειακό Φάσμα Πειράματος με Απορροφητή Α6

Στα παραπάνω φάσματα διαπιστώνονται μία σειρά από ομοιότητες και ορισμένες διαφορές. Καταρχήν, λόγω του μεγάλου πλήθους διαμερίσεων (bins), το πλήθος των γεγονότων που καταγράφονται σε ορισμένες διαμερίσεις είναι πολύ μικρό και συνοδεύεται από την αντίστοιχη κακή στατιστική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται στο φάσμα διακυμάνσεις οι οποίες μπορούν να εκληφθούν ως αιχμές και ερμηνευτούν αναλόγως. Αυτό εμφανίζεται κυρίως όταν η πυκνότητα πιθανότητας έχει χαμηλή τιμή, δηλαδή στις υψηλότερες ενέργειες. Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό είναι ότι η μέγιστη ενέργεια που καταγράφεται σε κάθε περίπτωση είναι περί τα 150-200 keV. Δεδομένου ότι ενέργεια των φωτονίων της πηγής είναι 661,65 keV, αυτό υποδεικνύει ότι δεν παρατηρούνται αλληλεπιδράσεις φωτοηλεκτρικού φαινομένου στον ανιχνευτή, κάτι που είναι και αναμενόμενο δεδομένου του χαμηλού Z του υλικού του ανιχνευτή (αέρας).

Κάτι που έχει ενδιαφέρον είναι ότι περί την ενέργεια των 70-80 keV παρατηρείται μία «αιχμή» η οποία επιμένει για όλα τα φάσματα και ενδεχομένως να μην αποτελεί απλή κύμανση του υποστρώματος. Η αιχμή αυτή θα μπορούσε ενδεχομένως να αποδοθεί στις ακτίνες-X του μολύβδου, οι οποίες παράγονται από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τον κατευθυντή δέσμης και τον απορροφητή. Λόγω της χαμηλής ενέργειάς τους, οι ακτίνες-X αυτές θα μπορούσαν ενδεχομένως να πραγματοποιήσουν φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μέσα στον ανιχνευτή και να αποδώσουν ολόκληρη την ενέργεια τους σε αυτόν, αν και ο ανιχνευτής αυτός δεν είναι κατάλληλος για φασματοσκοπία.

Όσον αφορά στη μορφή του φάσματος αποτιθέμενης ενέργειας, διαπιστώνεται μία εξάρτηση από τον απορροφητή. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται απορροφητής εμφανίζεται μία αιχμή της πυκνότητας πιθανότητας περί την ενέργεια των 10-20 keV. Σε χαμηλότερες ενέργειες η πυκνότητα πιθανότητας μειώνεται δραματικά και φτάνει περίπου στο μισό για πολύ χαμηλές ενέργειες. Για υψηλότερες ενέργειες η πυκνότητα πιθανότητας μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί περί την ενέργεια των 150-200 keV. Με την προσθήκη απορροφητή αυξανόμενου πάχους διαπιστώνεται ότι η πυκνότητα πιθανότητας μειώνεται σε κάθε περίπτωση – κάτι αναμενόμενο – αλλά με τρόπο ώστε η «αιχμή» περί την ενέργεια 10-20 keV να εξαφανίζεται όσο αυξάνει το πάχος

του απορροφητή και να προσομοιάζει περισσότερο με ένα plateau. Αυτό προφανώς συσχετίζεται με το γεγονός ότι η χρήση απορροφητή έχει ως αποτέλεσμα το ποσοστό των φωτονίων που φτάνουν στον ανιχνευτή με την αρχική ενέργεια να μειώνεται, ενώ αντίθετα αυξάνει η συνεισφορά των φωτονίων που φτάνουν στον ανιχνευτή με μειωμένη ενέργεια, εξαιτίας προηγούμενης σκέδασης. Τα φωτόνια αυτά μειωμένης ενέργειας αλληλοεπιδρώντας με τον πιθανότατα ανιχνευτή αποθέτουν μικρότερο ποσό ενέργειας.

Οπωσδήποτε η επανάληψη της προσομοίωσης με μεγαλύτερο πλήθος ιστοριών θα εξομαλύνει το φάσμα και ενδεχομένως θα δώσει περισσότερες πληροφορίες.

Από την ανωτέρω ανάλυση και ερμηνεία των επτά διαφορετικών ενεργειακών φασμάτων που προκύπτουν από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις, είναι φανερό ότι προκύπτει η καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα υλικά του πειράματος, μέσω της παρατήρησης των αλλαγών στις κορυφές του φάσματος, καθώς και της μείωσης της πυκνότητας πιθανότητας. Η σύγκριση των φασμάτων, λόγω της προσθήκης απορροφητών διαφορετικού πάχους κάθε φορά, αλλά και του πρώτου φάσματος χωρίς την χρήση απορροφητή μολύβδου, δίνει πληροφορίες για την επίδραση του πάχους του απορροφητή στη διέλευση των φωτονίων.

Μετά την ανάλυση και το σχολιασμό των φασμάτων ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά αποτελέσματα των πειραμάτων.

7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ΕΒΟΙΑ-Προσομοιώσεων

Συγκεντρωτικά, η σύγκριση μεταξύ της πειραματικής τιμής και της τιμής της προσομοίωσης για καθένα από τα επτά πειράματα γίνεται στον Πίνακα 7.5, όπου στην τέταρτη στήλη παρατίθεται ο λόγος προσομοίωση/πείραμα, ο οποίος δείχνει πόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές της προσομοίωσης σε σύγκριση με το πραγματικό πείραμα. Στην περίπτωση του πρώτου πειράματος, χωρίς απορροφητή, η προσομοίωση υπερεκτιμά το πείραμα κατά περίπου 35%. Στην περίπτωση αυτή η δόση λόγω προσομοίωσης είναι σημαντικά υψηλότερη (από στατιστικής άποψης) από την πειραματική τιμή. Ο λόγος αυτός μεγαλώνει από το πρώτο πείραμα μέχρι το έβδομο, γεγονός που δείχνει ότι οι προσομοιώσεις τείνουν να υπερεκτιμούν τις τιμές των από τα αντίστοιχα πειράματα, με τις αποκλίσεις να αυξάνονται καθώς προστίθενται οι απορροφητές μολύβδου, και καθώς αυξάνεται το πάχος αυτών. Μάλιστα, για τα υψηλότερα πάχη η διαφορά των δόσεων είναι εξωπραγματικά υψηλή (λόγος των δόσεων ίσος με 289). Προφανώς οι παραπάνω διαφορές δεν ερμηνεύονται από την αβεβαιότητα των προσομοιώσεων και θα πρέπει να αναζητηθούν αλλού οι λόγοι της διαφοράς και να εξετασθούν με λεπτομέρεια οι παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τα αποτελέσματα του πειράματος όσο και της προσομοίωσης.

Πίνακας 7.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων EBOIA-Προσομοιώσεων

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (GY/photon)	EBOIA (GY/photon)	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ/EBOIA	ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (3σ)
ΧΩΡΙΣ	6,80E-18	5,05E-18	1,35E+00	3%
A1	3,01E-18	1,34E-18	2,24E+00	4%
A2	1,63E-18	4,76E-19	3,43E+00	5%
A3	1,11E-18	1,48E-19	7,49E+00	7%
A4	7,98E-19	1,65E-20	4,84E+01	8%
A5	7,75E-19	6,37E-21	1,22E+02	8%
A6	7,76E-19	2,69E-21	2,89E+02	8%

Οι παράγοντες αυτοί συσχετίζονται τόσο με τη διαδικασία της προσομοίωσης όσο και με το πείραμα στο EBOIA. Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των αποκλίσεων.

7.3.1 Παράγοντες που προκύπτουν στη διαδικασία της προσομοίωσης

Όπως φαίνεται και στο Κεφάλαιο 6 των δοκιμαστικών προσομοιώσεων, η ακριβής προσομοίωση του θαλάμου ιονισμού RTW UNIDOS type 32002 αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας και των υλικών των επιμέρους στοιχείων του, καθώς και της λειτουργίας του. Η ακριβής γεωμετρία του κυλίνδρου στο εσωτερικό του θαλάμου, καθώς και το πάχος των δύο επιστρώσεων γραφίτη που διαθέτει εξωτερικά της εσωτερικής σφαιράς και εσωτερικά του εξωτερικού περιβλήματος, δεν ήταν πλήρως γνωστά στο αναλυτικό εγχειρίδιο του θαλάμου [16]. Επομένως, η επιλογή των διαστάσεων αυτών βασίστηκε στην έρευνα των K. Bairlein, B. Behnke, και O. Hure, "DEVELOPMENT OF A NEW SECONDARY STANDARD FOR H*(10)" [25], όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι η ακριβής αναπαράσταση της λειτουργίας του θαλάμου ιονισμού συνάντησε προβλήματα, έγκειται και στο γεγονός ότι στην πραγματικότητα ο ακριβής προσδιορισμός της απόκρισης των θαλάμων ιονισμού αποτελεί, εδώ και αρκετές δεκαετίες, μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών showers. Η κύρια δυσκολία προέρχεται από τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων για τον χειρισμό της μεταφοράς ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων. Ειδικά για τον κώδικα PENELOPE ενώ χρησιμοποιεί λεπτομερείς αλγορίθμους για την προσομοίωση των φωτονίων, χρησιμοποιεί προσεγγιστικούς αλγορίθμους για την προσομοίωση των ηλεκτρονίων. Η ακριβής περιγραφή της μεταφοράς αυτών των σωματιδίων είναι απαραίτητη για την αναπαραγωγή της απόκρισης του θαλάμου ιονισμού, δεδομένου ότι είναι τελικά υπεύθυνα για την εναπόθεση ενέργειας στην κοιλότητα του θαλάμου [27]. Επομένως, ενδέχεται μέρος των αποκλίσεων που προκύπτουν να οφείλονται στους ανωτέρω λόγους.

Ακόμη, σε σχετική βιβλιογραφία προσομοιώσεων που χρησιμοποιείται ο ίδιος θάλαμος ιονισμού, συναντάται η μέθοδος της επιλογής επιπλέον επιστρώσεων, διαφορετικών υλικών κάθε φορά, με σκοπό την προσέγγιση της λειτουργίας του πραγματικού θαλάμου στην προσομοίωση. Για παράδειγμα, στην έρευνα αναφέρεται ανωτέρω [25], επιλέχθηκε η προσθήκη επιστρώσεων από υλικό Makrolon και αλουμίνιο με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόκρισης σε ενέργειες κάτω των 50

keV. Στην παρούσα ΔΕ, ωστόσο, ακολουθήθηκε η πιστή αναπαράσταση του πραγματικού πειράματος στον επιτρεπόμενο βαθμό. Ο βασικότερος λόγος που οδήγησε σε αυτή την επιλογή είναι ο χρόνος που απαιτούσε η ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, ο οποίος ήταν το λιγότερο δύο μήνες. Συγκεκριμένα, οι τελικές προσομοιώσεις ολοκλήρωσαν σχεδόν 6,5 δισεκατομμύρια ιστορίες με ταχύτητα $3.0E+03$ showers/sec, και ολοκληρώθηκαν σε περίπου 58 ημέρες η καθεμία. Η ταχύτητα αυτή των τελικών προσομοιώσεων είναι από τις βέλτιστες που επιτεύχθηκαν στην παρούσα ΔΕ. Το γεγονός ότι η ολοκλήρωση των προσομοιώσεων απαιτούσε τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα, σημαίνει πως ήταν περιορισμένες και οι δυνατότητες πειραματισμού με πιο περίπλοκες διατάξεις, καθώς και η περαιτέρω εξέταση της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων στα αποτελέσματα. Οι περιορισμοί αυτοί επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και οφείλονται σε μειωμένη υπολογιστική ισχύ για τέτοιου τύπου προσομοιώσεις [28].

7.3.2 Παράγοντες που οφείλονται στο πραγματικό πείραμα

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, και συγκεκριμένα στις ενότητες **3.3.4.2-3.3.4.5** για τους θαλάμους ιονισμού, κατά τη δοσιμετρία με χρήση θαλάμων ιονισμού προκύπτουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το σήμα που τελικά καταγράφει ο ανιχνευτής. Γι' αυτό και είναι απαραίτητη η χρήση διορθωτικών συντελεστών που οδηγούν στο ακριβές σήμα. Ένας βασικός λόγος των αποκλίσεων που συναντάται στην παρούσα ΔΕ εκτιμάται πως οφείλεται στο μειωμένο σήμα που καταγράφει ο θάλαμος ιονισμού κατά την εκτέλεση των πειραμάτων στο ΕΒΟΙΑ. Ενώ δηλαδή η προσομοίωση εκτιμά την ενέργεια που αποτίθεται στον ανιχνευτή, η οποία θα έπρεπε να αντιστοιχεί στη δόση που μετράει ο ανιχνευτής, αυτό δεν συμβαίνει γιατί η ενέργεια που μετράει ο ανιχνευτής ουσιαστικά προκύπτει από το σύνολο των ιόντων που συλλέγονται από αυτών. Η οποιαδήποτε απώλεια ή διαφοροποίηση στη διαδικασία συλλογής του ιόντων επηρεάζει άμεσα τη δόση που καταγράφεται στον ανιχνευτή. Έχει σημασία να τονισθεί ότι τέτοιο πρόβλημα δεν φαίνεται να υπάρχει κατά την προσομοίωση ανιχνευτών γερμανίου καθώς στην περίπτωση αυτή το πεδίο μέσα στον ανιχνευτή είναι πολύ υψηλό και πρακτικά συλλέγονται όλα τα ζεύγη φορέων που παράγονται (οπές και ηλεκτρόνια). Όπως φαίνεται στη συνέχεια, για έναν ανιχνευτή αερίου υπάρχουν διάφορα φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν τη συλλογή ιόντων μέσα στον ανιχνευτή κατά τη διάρκεια του πειράματος [15]:

- Φαινόμενο επανασύνδεσης ιόντων: Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ένα ποσοστό των ιόντων που παράγονται μέσα στον ανιχνευτή ενδέχεται να επανασυνδεθεί, μειώνοντας έτσι το τελικά καταγεγραμμένο σήμα του θαλάμου. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται ως αποτέλεσμα των περιορισμών που επιβάλλονται από τη φυσική της μεταφοράς ιόντων στον ευαίσθητο όγκο του θαλάμου, αλλά και λόγω του μηχανικού και ηλεκτρικού σχεδιασμού του θαλάμου ιονισμού.
- Φαινόμενο πολικότητας: Η πολικότητα που εφαρμόζεται στον θάλαμο ιονισμού μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του ανιχνευτή, καθώς η χρήση δυναμικού αντίθετης πολικότητας σε ένα θάλαμο ιονισμού μπορεί να αποδώσει διαφορετικές ενδείξεις. Όταν παρατηρείται φαινόμενο πολικότητας, η πραγματική ένδειξη θεωρείται ότι είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των μετρήσεων που λαμβάνονται για τις δύο πολικότητες.
- Ρεύματα διαρροής θαλάμου ιονισμού: Ο θάλαμος ιονισμού μπορεί να παρουσιάσει ρεύματα διαρροής που μειώνουν επίσης το καταγεγραμμένο σήμα. Συνήθως τα ρεύματα αυτά είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από το μετρούμενο δοσιμετρικό σήμα και συνεπώς είναι αμελητέα ή μπορούν να καταστέλλονται από το πραγματικό δοσιμετρικό σήμα.

- Επιδράσεις του στελέχους (stem) του θαλάμου: Το στέλεχος του θαλάμου μπορεί να επηρεάσει το σήμα μέσω της σκέδασης και της διαρροής.
- Επιδράσεις της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας του αέρα: Το φορτίο που μετράει ο θάλαμος ιονισμού εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα, την πίεση και την υγρασία. Επομένως, είναι απαραίτητη η μετατροπή του μετρούμενου σήματος στις συνθήκες αναφοράς που χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση του θαλάμου στο πρότυπο εργαστήριο. Ωστόσο, η διόρθωση αυτή εφαρμόστηκε κατά τις μετρήσεις στο ΕΒΟΙΑ.

Όλα τα ανωτέρω φαινόμενα εξηγούνται εκτενώς στις ενότητες **3.3.4.2-3.3.4.5**. Το μειωμένο σήμα που ενδέχεται να λαμβάνει ο θάλαμος ιονισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος στο ΕΒΟΙΑ είναι πιο πιθανό να οφείλεται στο φαινόμενο της επανασύνδεσης των ιόντων. Το μειωμένο σήμα δικαιολογεί το γεγονός ότι και για τα επτά πειράματα παίρνουμε μεγαλύτερο σήμα στις προσομοιώσεις, όπου τα φαινόμενα αυτά δεν λαμβάνουν χώρα και δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα στο σήμα που καταγράφεται. Επομένως, είναι λογικό η δόση που καταγράφεται στο ΕΒΟΙΑ να είναι μειωμένη συγκριτικά με την αντίστοιχη δόση των προσομοιώσεων.

7.4 Συνολικά Συμπεράσματα και Σύνοψη Κεφαλαίου

Συνοψίζοντας, τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για καθένα από τα επτά πειράματα, είναι προφανές ότι οι προσομοιωμένες τιμές είναι μεγαλύτερες, έως πολύ μεγαλύτερες των πειραματικών και η απόκλιση μεταξύ τους αυξάνεται από το πρώτο έως το έβδομο πείραμα. Αυτές οι διαφορές αποδίδονται σε διάφορους παράγοντες που έχουν να κάνουν με τον τρόπο που προσομοιώθηκε το πείραμα, αλλά και έχουν να κάνουν με εγγενείς αδυναμίες της διαδικασίας προσομοίωσης του συγκεκριμένου ανιχνευτή που προσομοιώθηκε. Το γεγονός ότι οι διαφορές μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης μεγαλώνουν υπερβολικά όσο αυξάνει το πάχος του απορροφητή θα μπορούσε – ενδεχομένως – να ερμηνευθεί από την εικόνα που παρουσιάζουν τα σχετικά φάσματα. Καθώς αυξάνει το πάχος του απορροφητή, φαίνεται ότι η ενέργεια αποτίθεται κυρίως σε μικρά κλάσματα καθώς μεγαλώνει η συνεισφορά της χαμηλής ενεργειακής περιοχής του φάσματος. Στην περίπτωση αυτή, ενδεχομένως η απώλεια ιόντων λόγω επανασύνδεσης να είναι πιο σημαντική με συνέπεια τη μεγάλη διαφορά από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στην προσομοίωση, παράγοντες όπως η αύξηση της σχετικής αβεβαιότητας, η δυσκολία στην ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας και της λειτουργίας του θαλάμου ιονισμού, καθώς και οι περιορισμοί στον περαιτέρω πειραματισμό, παίζουν καθοριστικό ρόλο. Στο πραγματικό πείραμα, τα φαινόμενα επανασύνδεσης ιόντων, πολικότητας, ρευμάτων διαρροής, επιδράσεων του στελέχους και των περιβαλλοντικών συνθηκών, επηρεάζουν το σήμα που καταγράφει ο θάλαμος ιονισμού.

Συμπερασματικά, οι αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και προσομοιωμένων τιμών αναδεικνύουν την πολυπλοκότητα της ακριβούς προσομοίωσης πειραμάτων αντίστοιχων της παρούσας ΔΕ και υπογραμμίζουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και βελτιώσεις στη μεθοδολογία των προσομοιώσεων. Ιδέες και προτάσεις για μελλοντική έρευνα θα παρουσιαστούν στο επόμενο και τελευταίο Κεφάλαιο 8.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Επίλογος

Αντικείμενο της παρούσας ΔΕ ήταν η πειραματική μελέτη της δέσμης ακτινοβολίας από πηγή Cs-137 που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ) της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), για σκοπούς βαθμονόμησης οργάνων ακτινοπροστασίας, και στη συνέχεια η αναπαραγωγή και η ανάλυση της διαδικασίας βαθμονόμησης με χρήση τεχνικών Monte Carlo. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας (έκδοση 2011). Με αυτό τον τρόπο, εξετάστηκε η δυνατότητα αναπαραγωγής πεδίων βαθμονόμησης του ΕΒΟΙΑ και μελετήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβειά τους και την αναπαράστασή τους μέσω προσομοιώσεων.

Αρχικά, εκτελέστηκε το πείραμα στο ΕΒΟΙΑ, με την χρήση της πηγής Cs-137 του εργαστηρίου και τον ανιχνευτή (θάλαμο ιονισμού) PTW UNIDOS type 32002, όγκου ενός λίτρου. Το πρώτο πείραμα έγινε χωρίς τη χρήση απορροφητή μολύβδου, ενώ τα υπόλοιπα έξι με την προσθήκη απορροφητών μολύβδου με διαφορετικά πάχη. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε, ενώ επίσης παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα του πειράματος που πραγματοποιήθηκε στο ΕΒΟΙΑ.

Στη συνέχεια, για την αναπαράσταση του πειράματος μέσω προσομοιώσεων, ακολούθησε μία σειρά από δοκιμαστικές προσομοιώσεις, οι οποίες βοήθησαν στην τελική διαμόρφωση των προσομοιώσεων, ενώ ανέδειξαν τη δυσκολία και τις βελτιώσεις που είναι απαραίτητες για την προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αυτή η διαδικασία οδήγησε στην επιλογή του εικονικού ανιχνευτή Energy Deposition, και στην επιλογή του αέρα εντός του θαλάμου ιονισμού ως σώμα του ανιχνευτή των προσομοιώσεων. Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μεγάλο πλήθος ιστοριών, με στόχο την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης σχετικής αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, έγιναν δοκιμές και στις παραμέτρους εισόδου των προσομοιώσεων με σκοπό την βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων. Κατά τις προσομοιώσεις δοκιμάστηκαν δύο τύποι σεναρίων, όσον αφορά στη γωνία εκπομπής της δέσμης: εκπομπή σε κωνική δέσμη που καθορίζεται από τον κατευθυντή δέσμης της πηγής και εκπομπή σε γεωμετρία 4π, όπου ουσιαστικά η στερεά γωνία διαμορφώνεται με την αλληλεπίδραση των φωτονίων στον κατευθυντή δέσμης. Η δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης είναι μεν ρεαλιστική, αλλά για να επιτευχθεί η ίδια στατιστική στα αποτελέσματα πρέπει να προσομοιωθούν πολλαπλάσιο πλήθος ιστοριών.

Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε για την μετατροπή των αποτελεσμάτων, τόσο του πειράματος στο ΕΒΟΙΑ όσο και των προσομοιώσεων, σε κοινές μονάδες μέτρησης, Gy/photon, έτσι ώστε να είναι εφικτή η μεταξύ τους σύγκριση. Για τις προσομοιώσεις όπου δεν προστέθηκε η θωράκιση της πηγής, δόθηκε γωνία εκπομπής ίση με αυτή που σχηματίζει ο κατευθυντής της πηγής με την πηγή, και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων προσαρμόστηκε σε αυτή τη συνθήκη. Στις τελικές προσομοιώσεις, ωστόσο, προσομοιώθηκαν όλα τα στοιχεία του πειράματος στο ΕΒΟΙΑ, κι επομένως ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που αφορά γωνία εκπομπής 4π, όπως και της πηγής Cs-137 του ΕΒΟΙΑ.

Τα αποτελέσματα των τελικών προσομοιώσεων, παρουσιάστηκαν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 7, όπου και έγινε η σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραμάτων, ενώ έγινε προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και αναλύθηκαν οι πιθανοί λόγοι που συμβάλλουν στις παρατηρούμενες αποκλίσεις. Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι οι προσομοιωμένες τιμές είναι υψηλότερες από τις πειραματικές, και η απόκλιση μεταξύ τους αυξάνεται το πάχος του απορροφητή. Η απόκλιση αυτή ερμηνεύτηκε ως αποτέλεσμα παραγόντων όπως η αβεβαιότητα στην προσομοίωση, η δυσκολία στην αναπαράσταση του θαλάμου ιονισμού στην προσομοίωση, καθώς και κυρίως η επίδραση του φαινομένου της επανασύνδεσης των ιόντων μέσα στον ανιχνευτή κ.α.

Βάσει των συμπερασμάτων της παρούσας ΔΕ, αναδεικνύεται η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη και προσομοίωση της πειραματικής διάταξης με στόχο τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος, ειδικά σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται αντίστοιχοι θάλαμοι ιονισμού με τον PTW UNIDOS type 32002. Πιθανές βελτιώσεις και ιδέες για μελλοντική έρευνα που προτείνονται είναι οι ακόλουθες:

- **Βελτιστοποίηση Αναπαράστασης Λειτουργίας του θαλάμου ιονισμού:** Με στόχο την μείωση των αποκλίσεων σε μελλοντικές έρευνες, αρχικά προτείνεται η βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων με τη χρήση ακριβέστερων γεωμετρικών αναπαραστάσεων και υλικών. Η χρήση επιπλέον επιστρώσεων και διαφορετικών υλικών ενδέχεται να συμβάλει στη βελτίωση της ακρίβειας αντίστοιχων προσομοιώσεων, όπως φαίνεται στην σχετική βιβλιογραφία. Σημαντική είναι και η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αρχείου εισόδου, με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης αναπαράστασης της λειτουργίας των θαλάμων ιονισμού στις προσομοιώσεις.
- **Διορθωτικοί Παράγοντες στα Πειράματα:** Η εφαρμογή διορθωτικών παραγόντων που να λαμβάνουν υπόψη τα φαινόμενα επανασύνδεσης ιόντων και πολικότητας, τα ρεύματα διαρροής, καθώς και τις επιδράσεις του στελέχους των θαλάμων ιονισμού αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών, μπορεί να μειώσει τις αποκλίσεις στη σύγκριση με τις προσομοιώσεις.
- **Επιτάχυνση Προσομοιώσεων:** Η διερεύνηση μεθόδων για την επιτάχυνση των προσομοιώσεων θα μπορούσε να επιτρέψει τη διεξαγωγή περισσότερων και πιο πολύπλοκων προσομοιώσεων σε μικρότερο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας την εξέταση περισσότερων διαφορετικών παραμέτρων και πιο περίπλοκων διατάξεων, και κατά συνέπεια τη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Η επιτάχυνση των προσομοιώσεων θα μπορούσε να βελτιώσει και την σχετική αβεβαιότητα, μέσω προσομοιώσεων με μεγαλύτερο πλήθος ιστοριών από αυτόν που ολοκληρώθηκε στις προσομοιώσεις της παρούσας ΔΕ, καθώς η αύξηση του αριθμού ιστοριών έχει άμεση επίδραση στην βελτίωση της σχετικής αβεβαιότητας, όπως αποδείχθηκε με την εξέλιξη των προσομοιώσεων.
- **Χρήση άλλων εικονικών ανιχνευτών:** Η χρήση του εικονικού ανιχνευτή Impact Detector (ανιχνευτής διέλευσης) που διαθέτει ο κώδικας PENELOPE θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να καταγραφεί και να μελετηθεί το φάσμα της ακτινοβολίας που φτάνει στον ανιχνευτή. Εν συνεχεία θα μπορούσε ενδεχομένως να μελετηθεί με προσομοίωση τι συμβαίνει στις διάφορες συνιστώσες του ανιχνευτή.
- **Πειραματική Επαλήθευση:** Περισσότερες πειραματικές επαληθεύσεις τόσο των εργαστηριακών πειραμάτων όσο και των προσομοιώσεων, μπορούν να προσφέρουν καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα και να συμβάλλουν στη βελτίωση των μεταξύ τους αποκλίσεων. Για παράδειγμα, περισσότερες

επαληθεύσεις των προσομοιώσεων με χρήση διαφορετικών ανιχνευτών ή και προγραμμάτων προσομοίωσης, θα μπορούσε να βοηθήσει στην βαθύτερη κατανόηση των προσομοιώσεων και των διορθώσεων που χρειάζεται να γίνουν. Το ίδιο θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στα αντίστοιχα εργαστηριακά πειράματα, δηλαδή περισσότερες πειραματικές επαληθεύσεις αλλά και επαναλήψεις των πειραμάτων με διαφορετικούς ανιχνευτές. Ειδικότερα, όσον αφορά στη χρήση διαφορετικών ανιχνευτών που δεν εμφανίζουν θέματα επανασύνδεσης ιόντων όπως φορητοί ανιχνευτές γερμανίου, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πειραματικά και να προσομοιωθούν για να φανεί ποια είναι η αιτία της μεγάλης απόκλισης που παρατηρείται στην παρούσα ΔΕ

Βιβλιογραφία

1. ΕΕΑΕ. (2023). Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. <https://eeae.gr/>
2. ΕΕΑΕ. (2005). Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών.[Εκπαιδευτικό Υλικό].
3. IAEA/WHO SSDL network. (2018). SSDL NETWORK CHARTER. IAEA/WHO SSDL Network - International Atomic Energy Agency. https://ssdl.iaea.org/Content/SSDL_Charter_2nd_Edition.pdf
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. (1971). Handbook on Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. International Nuclear Information System (INIS). https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/082/34082908.pdf
5. International Atomic Energy Agency. (2000). Calibration of radiation protection monitoring instruments. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P074_scr.pdf
6. International Atomic Energy Agency. (2015). Assessment of Occupational Exposure Due To External Radiation Sources Calibration and Test of Radiation Protection Instruments.
7. Λεωνίδου Δ. (2014). Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών και ύλης δοσιμετρία - θωράκιση. Ζωγράφου [GR] : Εκδόσεις Συμείων / Καλαμαρά Έλλη.
8. Σπανίδης Α. Θ. (2021). Σχεδίαση Και Κατασκευή Θωράκισης Φορητού Ανιχνευτή ΒΕGe με την Μέθοδο Προσομοίωσης MONTE-CARLO [Διπλωματική Εργασία]. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
9. ΕΕΑΕ. (2012). Ακτινοπροστασία στη Βιομηχανική Ραδιογραφία [Εκπαιδευτικό Υλικό].
10. Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής Ιατρική Σχολή Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών & ΕΕΑΕ. (2011). Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για Χειριστές Μηχανημάτων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών [ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ].
11. ΟΜΗΡΟΥ Μ. (2019). Μελέτη απόκρισης θαλάμων ιοντισμού electret στη γ – ακτινοβολία και εφαρμογή σε μετρήσεις στο εσωτερικό κτιρίων [Διπλωματική Εργασία]. ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΑΠΘ.
12. Πέτσα Χ. (2015). Δοσιμετρία Προσωπικού Εργαστηρίου Ραδιοϊσοτόπων και Πυρηνικής Ιατρικής από Εσωτερική Ακτινοβολία [Διπλωματική Εργασία]. Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Κύπρου.
13. Σόφτα Β. (2021). Αρχές Φυσικής και Ακτινοπροστασίας [Διαφάνειες Μαθήματος]. ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
14. Αναγνωστάκης Μ. Ι. & Πετρόπουλος Ν. Π. (2023). Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα [Διαφάνειες Μαθήματος Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα και Αναλύσεις].
15. Andreo, P., Seuntjens, J.P. S., & Podgorsak, E.B. (2005). Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. IAEA. https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1196_web.pdf
16. PTW The Dosimetry Company. (2022). Detectors for Ionizing Radiation Including Codes of Practice.
17. PTW Spherical Ionization Chambers. (n.d.). TeamBest. http://www.teambest.com/CNMC_docs/protect/CNMC_PTW_Spherical.pdf
18. PTW Dosimetry. (n.d.). Spherical Chamber 1 Liter 32002 | PTW. PTW Dosimetry. <https://www.ptwdosimetry.com/en/products-metrology/spherical-chamber-1-liter-32002>
19. CNMC. (n.d.). PTW Spherical Ionization Chambers Model N32002 1 Liter Volume [Product Sheet].
20. PTW The Dosimetry Company. (2014). User Manual UNIDOS E PTW - Universal dosimeter [User Manual].
21. Baró J. J. J.-V. (1994). An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter. Elsevier B.V.

22. Salvat F. (2011). PENELOPE-A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency.
23. Workshop Proceedings Barcelona. (2019). PENELOPE-2018: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. NUCLEAR ENERGY AGENCY Organisation for Economic Co-operation and Development.
24. Χιώνης Δ. Α. (2011). Υπολογισμός Συντελεστών Διόρθωσης του Φαινομένου Πραγματικής Σύμπτωσης με Χρήση Τεχνικών Προσομοίωσης MONTE-CARLO [Διπλωματική Εργασία]. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
25. Bairlein K. Behnke B. & Hupe O. (2020). Development Of a New Secondary Standard For H*(10). Oxford University Press.
26. Κεφαλλωνίτη Β. Ν. (2018). Μελέτη της Απόκρισης γ-κάμερας με Τεχνικές Προσομοίωσης MONTE-CARLO [Διπλωματική Εργασία]. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
27. Sempau J. & Andreo P. (2011). Accurate simulation of ionisation chamber response with the Monte Carlo code PENELOPE. American Institute of Physics.
28. Nenoι M. (Ed.). (2015). Evolution of Ionizing Radiation Research. IntechOpen.
29. Salvat F. & Fernández-Varea J. M. (2009). Overview of physical interaction models for photon and electron transport used in Monte Carlo codes. BIPM and IOP Publishing Ltd.
30. Sempau J. & Andreo P. (2006). Configuration of the electron transport algorithm of PENELOPE to simulate ion chambers. Physics in Medicine & Biology.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΠΗΓΗΣ

08-APR-1999 11:38

STS GmbH BS

+49 5307 92022 3.02



Greek Atomic Energy Commission
P.O.Box 60092
15310 Agia Paraskevi

Athens, Greece

Despatch to:
Greek Atomic Energy Commission
P.O.Box 60092
15310 Agia Paraskevi
Athens, Greece

April 08, 1999

Client-No: 20600
VAT-No: DE114816663

PACKING LIST NO: 23855

L/C Number: 029-10292-029

We deliver:

Qty	Article	Activity
1 pce	Co60 source, built in	3,7GBq
1 pce	OB2 Irradiation Container as described in our offer no. 1.737	
1 pce	Cs137 source, built in	740,0GBq
1 pce	OB6 Irradiation Container as described in our offer no. 1.737 A	

COUNTRY OF ORIGIN:
Germany

PACKAGING : 1 case each

MEASUREMENTS : 67 x 64 x 80cm each
Weight GROSS : 255 kg each
Weight NET : 215 kg each

MARKING : Greek Atomic Energy Commission, 153 10 Agia Paraskevi,
PO 600 92, ATHENS, GREECE
L/C-No., Contract No., Packaging, Case No.

STS GmbH

Hambühren Straße 2 · 38110 Braunschweig · Tel. 05307/92022-3 (Fax: 222)

Typ-A-examination

Manufacturer Certification

Art.-No. : OB6
Construction : drawing-No.: 13.4753.0c

External container

Measurements : 273 x 410 mm (Ø x L)
Payload volume : 13 x 24 mm (Ø x L)
Protection value : 110 mm Pb; 99,9 %
Weight : 205 kg

Planned radioactive transport volume
Cs-137 gamma source 740 GBq

Material thickness of the external container (DIN-EN 10025)

Outer casing : 6 mm
Bottom plate : 6 mm
Lid : 6 mm
Manufacturer : STS GmbH
Harxbütteler Straße 2
38110 Braunschweig

Examinations carried out:

1. Impact test : Height of fall 1,2 m on knock-on plate diagonal on shutter and
(building specimen) Ground edge.



- 2. Penetration test : steel billet Ø 32 mm with a hemispherical end, weight 6 kg
(building specimen) dropping height 1 m vertically on lid, wall and bottom plate
 - 3. Stacking test : with 1260 kg for 24 hours
(building specimen)
 - 4. Waterspraytest : has not been carried out,
because the metallic surface ensures that rainwater will not be
absorbed by the package.
 - 5. Leakage test : has not been carried out,
as the package has only been constructed sealed substances.
- Result : the typ-A-package has passed all tests successfully and meets the
required standards of the European regulations for the international
transport of dangerous goods on the road with respect to the
transport of enclosed radioactive materials as well as enclosed
materials in special form up to activity limits as in table XX,
part VI, annex A.6 of the ADR.

Braunschweig,

STS GmbH

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut



Kalibrierschein
Calibration Certificate

Gegenstand: Ionisationskammer
Object: Ionization chamber

Hersteller: PTW-Freiburg
Manufacturer: Physikalisch-Technische Werkstätten
Dr. Pychlau GmbH
Lörracher Str. 7
79115 Freiburg im Breisgau

Typ: W32002
Type:

Kennnummer: 0069
Serial No.:

Auftraggeber: GREEK ATOMIC ENERGY COMMISSION
Customer: SSDL-Ionizing Radiation Calibration Laboratory
Patriarxou Grigoriou & Neapoleos
15341 Agia Parskevi, Attiki
Greece

Anzahl der Seiten: 6
Number of pages:

Geschäftszeichen: PTB-6.3-4094018
Reference No.:

Kalibrierzeichen: 60207 PTB 19
Calibration mark:

Ort der Kalibrierung: PTB Braunschweig
Location of calibration:

Datum der Kalibrierung: 06.03.2019 – 07.03.2019
Date of calibration:

Im Auftrag Braunschweig, 22.03.2019 **Im Auftrag**
On behalf of PTB *On behalf of PTB*

H. Zutz **Siegel** *C. Fu*
Dr. Hayo Zutz *Seal* **Christian Fuhs**

391 008 0



Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die kalibrierten Gegenstände.
Calibration Certificates without signature and seal are not valid. This Calibration Certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt. The presented results relate only to the items calibrated.

1 General Information

1.1 Scope of the calibration

Calibration of the device under test for the measurand ambient dose equivalent rate at a depth of 10 mm, $\dot{H}^*(10)$, according to ISO 4037 [1-4] und ISO 29661 [5].

1.2 Specifications for the determination of the calibration factor N_H and the correction factors $k(Q, \alpha)$

1.2.1 Kind of radiation

Gamma and X-ray radiation according to ISO 4037-1 [1].

1.2.2 Adjustment and operation conditions of the device under test

- Reference point of the device: centre of the chamber volume. The reference point was on the central axis of the radiation field. The red mark was oriented towards the radiation source.
- Diameter of the radiation field in the plane of the reference point: see column „Nominal diameter of the radiation field“ in the table in 2.2.2.
- Distance between the reference point of the device under test and the radiation source: see column „Nominal distance:“ in the table in 2.2.2.
- Angle between the reference direction of the device under test and the direction of the radiation incidence: see column „ α “ in the table in 2.2.2.
- Dose rate during the calibration: see column „Dose rate“ in the table in 2.2.2.
- Potential of the high voltage electrode: +300 V,
Potential of the measuring electrode: ≈ 0 V.
- The leakage current and the environmental radiation were considered.
- For the radiation qualities S-Cs und S-Co a 3 mm PMMA build-up plate was used according to ISO 4037-3 [3].

1.2.3 Climatic conditions during the calibration

Air temperature	T :	21 °C
Air pressure	p :	between 982 hPa and 991 hPa
Relative humidity	rH :	between 34 % and 37 %

1.2.4 Climatic reference conditions

Air temperature	T_0 :	20 °C
Air pressure	p_0 :	1013 hPa
Relative humidity	rH_0 :	65 %

1.3 Note

The results contained in this certificate use the key data given in ICRU 90 [6].

2 Results of the calibration

2.1 Conventional quantity value of the measurand

The conventional quantity value of the measurand, $H^*(10)$, for the radiation quality Q is determined from the air kerma free-in-air, K_a , by multiplication with the conversion coefficient for the radiation quality Q, $h_K^*(10; Q)$, see [3].

$$H^*(10) = K_a \cdot h_K^*(10; Q)$$

The determination of the values of K_a and $h_K^*(10; Q)$ is traceable to measurements with the German National Primary Standard of Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

2.2 Calibration factor and correction factors

2.2.1 General

The calibration factor is the ratio of the conventional quantity value and the indicated value M of the device under test, taking into account the indicated value M_0 of the device under test without additional radiation:

$$N_H = \frac{H^*(10)}{k(Q, \alpha) \cdot (\overline{M} - \overline{M}_0) \cdot k_\rho}$$

N_H : Calibration factor for the ambient dose equivalent at a depth of 10 mm, $H^*(10)$, for climatic reference conditions.

$k(Q, \alpha)$: Correction factor for the radiation quality Q and the angle of incidence α .

k_ρ : Correction factor for the air density ρ in the chamber volume, $k_\rho = \frac{T+273.15}{T_0+273.15} \cdot \frac{p_0}{p}$.

α : Angle between the reference direction of the device and the radiation incidence direction.

\overline{M} : Mean value of the device under test, from at least 6 single values with additional external radiation.

\overline{M}_0 : Mean value of the device under test, from at least 4 single values without additional external radiation.

Q: Radiation quality see 1.2.1.

As a result of the calibration of the device under test the value of the ambient dose equivalent at a depth of 10 mm, $H^*(10)$, for the radiation quality Q is given by:

$$H^*(10) = N_H \cdot k(Q, \alpha) \cdot (\overline{M} - \overline{M}_0) \cdot k_\rho$$

2.2.2 Result of the calibration

Calibration factor for S-Cs (at 30 mSv/h): $N_H = 3.107 \cdot 10^4$ Sv/C

Radiation quality		Conditions for the calibration					
Q	Nominal mean photon energy keV	α	$k(Q, \alpha)$	U_H	Dose rate $\dot{H}^*(10)$ mSv/h	Nominal diameter of the radiation field (97 % Isodose) cm	Nominal distance: source – device under test cm
Measuring station „400kV-Röntgenanlage“							
N-30	25	0°	0.756	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
N-60	48	0°	1.254	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
N-80	65	0°	1.384	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
N-100	83	0°	1.366	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
N-120	100	0°	1.316	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
N-150	118	0°	1.256	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
N-200	165	0°	1.169	4 %	6.0 ± 4 %	40	250
W-80	57	0°	1.314	4 %	6.1 ± 4 %	40	250
Measuring station „Gammabestrahlungsanlage“							
S-Cs*	662	0°	1.000	3 %	30 ± 3 %	74	451
S-Co*	1250	0°	0.943	3 %	30 ± 3 %	84	438

* measured with build-up plate

U_H : Relative expanded uncertainty of measurement of the product ($N_H \cdot k(Q, \alpha)$). The uncertainty stated is the expanded measurement uncertainty obtained by multiplying the standard measurement uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with the „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“. The value of the measurand then normally lies, with a probability of 95 %, within the attributed coverage interval [7, 8].

3 References

- [1] International Organization for Standardization: ISO 4037-1: 2019 *Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods*
- [2] International Organization for Standardization: ISO 4037-2: 2019 *Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV*
- [3] International Organization for Standardization: ISO 4037-3: 2019 *Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence*
- [4] International Organization for Standardization: ISO 4037-4: 2019 *Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radiation fields*
- [5] International Organization for Standardization: ISO 29661: 2012 *Reference radiation fields for radiation protection – Definitions and fundamental concepts (ISO 29661: 2012, including Amd 1:2015); German version EN ISO 29661:2017*
- [6] International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report No. 90 *Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications. Journal of the ICRU Volume 14, No 1 (2014). Published October 2016.*
- [7] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. (JCGM 100:2008) published in the name of BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC and OIML. GUM 1995 with minor corrections*
- [8] European cooperation of Accreditation, EA. *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Publication EA-4/02, September 2013*

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).

Diese Aussage und das CIPM-MRA-Logo beziehen sich nur auf die Messergebnisse in diesem Kalibrierschein.



The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

The CIPM MRA Logo and this statement attest only to the measurement component of the certificate.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
DEUTSCHLAND

Abbestraße 2-12
10587 Berlin
DEUTSCHLAND

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ .IN ΚΑΙ .GEO ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PENELOPE

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα αρχεία .in και .geo που χρησιμοποιήθηκαν για τις τελικές προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 7).

- **αρχείο .in πρώτου πειράματος, χωρίς απορροφητή**

```
TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE 0 0 180 [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA 5.0e5 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air0.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia0.geo [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC spc-enddet-00.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY 18 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10 [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME 5.0e06 [Allotted simulation time, in sec]
END [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..
```

- αρχείο .in δεύτερου πειράματος, απορροφητής A1

```

TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE 0 0 180 [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air1.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia1.geo [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC spc-enddet-01.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY 18 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10 [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME 5.0e06 [Allotted simulation time, in sec]
END [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..

```

- αρχείο .in τρίτου πειράματος, απορροφητής A2

```

TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5  [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0    [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE  0 0 180  [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA  5.0e5 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air2.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3  [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia2.geo          [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC  0 6.7e5 200        [Energy window and number of bins]
EDSPC  spc-enddet-02.dat   [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY  18                 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME  dump.dat          [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump.dat          [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60                [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH  1.0e10            [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME    5.0e06            [Allotted simulation time, in sec]
END                                           [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..

```

- αρχείο .in τέταρτου πειράματος, απορροφητής A3

```

TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5   [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0     [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE  0 0 180    [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air3.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia3.geo [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC  0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC  spc-enddet-03.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY  18          [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME  dump.dat    [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump.dat    [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60          [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10       [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME    5.0e06      [Allotted simulation time, in sec]
END      [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..

```

- αρχείο .in πέμπτου πειράματος, απορροφητής A4

```

TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE 0 0 180 [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA 5.0e5 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air4.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia4.geo [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC spc-enddet-04.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY 18 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10 [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME 5.0e06 [Allotted simulation time, in sec]
END [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..

```

- αρχείο .in έκτου πειράματος, απορροφητής A5

```

TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 0 [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE 0 0 180 [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA 5.0e5 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air4.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA 5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia5.geo [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC spc-enddet-05.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY 18 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10 [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME 5.0e06 [Allotted simulation time, in sec]
END [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..

```

- αρχείο .in έβδομου πειράματος, απορροφητής A6

```

TITLE EVOIA Cs-137, 2m
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.6165E5   [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT  0 0 0     [Source position: X0,Y0,Z0 in cm]
SCONE  0 0 180   [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME lead.mat
MSIMPA  5.0e5 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e5 2e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME pom.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME polystyrene.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME air4.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME graphite.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME cement.mat
MSIMPA  5.0e4 5.0e4 5.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN evoia6.geo [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC  0 6.7e5 200 [Energy window and number of bins]
EDSPC  spc-ennet-06.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY  18          [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME  dump.dat    [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump.dat    [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60          [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.0e10       [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME    5.0e06      [Allotted simulation time, in sec]
END     [Ends the reading of input data]
...+. ...1...+. ...2...+. ...3...+. ...4...+. ...5...+. ...6...+. ...7..

```


MATERIAL(6)
 SURFACE (16), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (18), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (7), SIDE POINTER=(+1)
 00
 BODY (8) TAVANI
 MATERIAL(6)
 SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (16), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (4), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (19), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (13), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (20), SIDE POINTER=(-1)
 00
 BODY (9) PRWTH PROEXOXH TAVANIQU
 MATERIAL(6)
 SURFACE (23), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (22), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (7), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (24), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (17), SIDE POINTER=(+1)
 00
 BODY (10) DEUTERH PROEXOXH TAVANIQU
 MATERIAL(6)
 SURFACE (21), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (14), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (7), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (24), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (17), SIDE POINTER=(+1)
 00
 BODY (11) DEXIOS TOIXOS XWRIS PROEXOXES
 MATERIAL(6)
 SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (16), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (6), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
 00
 BODY (12) MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
 MATERIAL(6)
 SURFACE (22), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (14), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
 SURFACE (24), SIDE POINTER=(+1)
 SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)

SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (13) H PROEXOIH DIPLA APO TH MEGALH PROEXOIH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL(6)
SURFACE (25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (26), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (14) H PROEXOIH ANAMESA PROEXOIH TOU PISW TOIXOU KAI
MATERIAL(6)
SURFACE (8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (27), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (17), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (15) Cylinder Collimator.
MATERIAL(1)
SURFACE (28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (16) Detector Sphere Outside.
MATERIAL(2)
SURFACE (50), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (34), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (17) Detector Sphere Inside.
MATERIAL(3)
SURFACE (32), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (18) Detector Air Inside.
MATERIAL(4)
SURFACE (33), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (36), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (35), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (19) Cylinder Inside Chamber.
MATERIAL(3)
SURFACE (35), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (38), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (37), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (20) Detector Graphete on Sphere Inside.
MATERIAL(5)
SURFACE (36), SIDE POINTER=(-1)


```

SURFACE ( 32), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 21) Thwrakish pishw tetragwino tmhna
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 44), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 47), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 22) Thwrakish brosta aristero tmhna
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 43), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 23) Thwrakish brosta dexi tmhna
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 43), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 24) Thwrakish brosta anw tmhna
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 43), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 45), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 25) Thwrakish kulindriko tmhna
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 44), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 43), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 48), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 26) Detector Graphete on Outside Sphere
MATERIAL( 5)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 33), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

MODULE (27) Whole system

MATERIAL(4)

BODY (1)

BODY (2)

BODY (3)

BODY (4)

BODY (5)

BODY (6)

BODY (7)

BODY (8)

BODY (9)

BODY (10)

BODY (11)

BODY (12)

BODY (13)

BODY (14)

BODY (15)

BODY (16)

BODY (17)

BODY (18)

BODY (19)

BODY (20)

BODY (21)

BODY (22)

BODY (23)

BODY (24)

BODY (25)

BODY (26)

SURFACE (51), SIDE POINTER=(-1)

000

END 000


```

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 53) Plane Z=32.2
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.220000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 54) Plane Z=31.7
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.170000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 55) universe
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 8.500000000000000E+02, 0)
Y-SCALE=( 8.500000000000000E+02, 0)
Z-SCALE=( 8.500000000000000E+02, 0)
Y-SHIFT=( 2.850000000000000E+01, 0)
Z-SHIFT=( 5.000000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1) TOIXOS PISW APO PHGH
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2) PROEXOXH PANW STON TOIXO PISW APO PHGH
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3) PATWMA
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4) ARISTEROS TOIXOS 1 MEROS
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)

```



```

SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 5) ARISTEROS TOIXOS 2 MEROS KENO ME APO PANW MONO LWRIDA TOIXOU
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6) ARISTEROS TOIXOS 3 MEROS
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7) TOIXOS APENADI APO PHGH
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 18), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 8) TAVANI
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 9) PRWTH PROEXOXH TAVANIOU
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 10) DEUTERH PROEXOXH TAVANIOU
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 21), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)

```



```

SURFACE ( 53) Plane Z=32.2
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.22000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 54) Plane Z=31.2
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 3.12000000000000E+01, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 55) universe
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 8.50000000000000E+02, 0)
Y-SCALE=( 8.50000000000000E+02, 0)
Z-SCALE=( 8.50000000000000E+02, 0)
Y-SHIFT=( 2.85000000000000E+01, 0)
Z-SHIFT=( 5.00000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1) TOIXOS PISW APO PHGH
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2) PROEXOXH PANW STON TOIXO PISW APO PHGH
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3) PATWMA
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4) ARISTEROS TOIXOS 1 MEROS
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)

```


SURFACE (24), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (17), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (11) DEXIOS TOIXOS XWRIS PROEXOXES
MATERIAL(6)
SURFACE (3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (12) MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL(6)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (24), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (13) H PROEXOXH DIPLA APO TH MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL(6)
SURFACE (25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (26), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (5), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (14) H PROEXOXH ANAMESA PROEXOXH TOU PISW TOIXOU KAI
MATERIAL(6)
SURFACE (8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (27), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (17), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (15) Cylinder Collimator.
MATERIAL(1)
SURFACE (28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (31), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (16) Detector Sphere Outside.
MATERIAL(2)
SURFACE (50), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (34), SIDE POINTER=(-1)

SURFACE (43), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (30), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (39), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (40), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (46), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (45), SIDE POINTER=(-1)
00
BODY (25) Thwrakish kulindriko tmhna
MATERIAL(1)
SURFACE (44), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (43), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (49), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (48), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (26) Detector Graphete on Outside Sphere
MATERIAL(5)
SURFACE (50), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (33), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (27) Filtro Mprostino Meros
MATERIAL(1)
SURFACE (51), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (52), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (53), SIDE POINTER=(+1)
00
BODY (28) Filtro Pisu Meros_Entos Collimator
MATERIAL(1)
SURFACE (28), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (54), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (53), SIDE POINTER=(-1)
00
MODULE (29) Whole system
MATERIAL(4)
BODY (1)
BODY (2)
BODY (3)
BODY (4)
BODY (5)
BODY (6)
BODY (7)
BODY (8)
BODY (9)
BODY (10)
BODY (11)
BODY (12)
BODY (13)
BODY (14)
BODY (15)
BODY (16)
BODY (17)


```

SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 11) DEXIOS TOIXOS XWRIS PROEXOXES
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 12) MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 13) H PROEXOXH DIPLA APO TH MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 26), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 14) H PROEXOXH ANAMESA PROEXOXH TOU PISW TOIXOU KAI
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 27), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 15) Cylinder Collimator.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 16) Detector Sphere Outside.
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```



```
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 11) DEXIOS TOIXOS XWRIS PROEXOXES
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 12) MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 13) H PROEXOXH DIPLA APO TH MEGALH PROEXOXH PANW STON DE3I TOIXO
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 26), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 14) H PROEXOXH ANAMESA PROEXOXH TOU PISW TOIXOU KAI
MATERIAL( 6)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 27), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 15) Cylinder Collimator.
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 16) Detector Sphere Outside.
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 50), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 34), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 17) Detector Sphere Inside.
```