



ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ»

Ιατρική Σχολή του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών
Τμήμα Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών
Τμήμα Ιατρικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
Τμήμα Ιατρικής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης
Τμήμα Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Τμήμα Ιατρικής του Πανεπιστημίου Κρήτης
Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)
Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΟΗΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΣΕ ΙΑΤΡΙΚΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗ 18MV

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**Επιβλέποντες
Καραϊσκος Παντελής, Αναπληρωτής Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής,
Ιατρική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αθηνών
Σταματελάτος Ίων, Διευθυντής Ερευνών, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»**

ΑΘΗΝΑ 2018

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

**Καραϊσκος Παντελής, Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική
Σχολή, Πανεπιστήμιο Αθηνών**

Σταματελάτος Ίων, Διευθυντής Ερευνών, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

**Παπαγιάννης Παναγιώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ιατρικής
Φυσικής, Ιατρική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αθηνών**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Καραΐσκο Παντελή και Σταματελάτο Ίωνα για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που προσέφεραν σε όλα τα στάδια εκπόνησης αυτής της εργασίας αλλά και κατά τη διάρκεια του ΔΔΠΜΣ «ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ – ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ». Επίσης ευχαριστώ θερμά τις κυρίες Βασιλοπούλου Θεοδώρα και Σάββα Μαρίλια για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν σε διάφορα σημεία της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ πολύ τον κύριο Σιλτζόβαλη Γεώργιο για την αρμονική συνεργασία μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στους γραμμικούς επιταχυντές υψηλής ενέργειας ($> 10\text{MV}$) τα νετρόνια παράγονται κυρίως μέσω αλληλεπιδράσεων (γ, n) των φωτονίων με πυρήνες υψηλού ατομικού αριθμού υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα δομικά μέρη της κεφαλής όπως ο στόχος, οι κατευθυντήρες και η θωράκιση της. Αυτά τα νετρόνια πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό θωράκισης του χώρου θεραπείας και του λαβυρίνθου καθώς επίσης αυξάνουν την περιφερειακή δόση της κύριας δέσμης θεραπείας του ασθενούς κατά την ακτινοθεραπεία με δέσμες φωτονίων υψηλών ενεργειών.

Στην παρούσα εργασία επικυρώσαμε την υπόθεση ότι μια γενικευμένη γεωμετρία πηγής νετρονίων που αναπαριστά την κεφαλή επιταχυντή μπορεί να προσομοιώνει επαρκώς την πηγή νετρονίων στην αίθουσα ενός θαλάμου θεραπείας. Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα γραμμικό επιταχυντή Elekta Synergy1 18 MV. Οι μετρήσεις της ροής νετρονίων στο ισόκεντρο του επιταχυντή διεξήχθησαν με τη χρησιμοποίηση μεταλλικών ελασμάτων ενεργοποίησης Au, Co, In και Cu (καλυμμένα με Cd ή μη). Η ενεργότητα των ελασμάτων καθορίστηκε χρησιμοποιώντας έναν βαθμονομημένο ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας. Η διαμόρφωση της πηγής νετρονίων και της αίθουσας θεραπείας προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τον κώδικα Monte Carlo MCNP5, αναλύοντας διαφορετικές γεωμετρίες της κεφαλής του επιταχυντή. Το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων λήφθηκε από μια αναλυτική σχέση που προέκυψε από τους Tosi et al 1991.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επέτρεψαν να προσδιοριστούν οι μέσες ενεργές διατομές του φάσματος. Το συμπέρασμα ήταν ότι η βέλτιστη γεωμετρία κεφαλής επιταχυντή συνίστατο από μια σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο ενός σφαιρικού φλοιού αποτελούμενου από βολφράμιο πάχους 10 cm. Η εργασία αυτή συμβάλλει στην ανάπτυξη μιας οικονομικά αποδοτικής γενικής μεθοδολογίας για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού θωρακίσεων των διατάξεων ιατρικών γραμμικών επιταχυντών καθώς και για την προστασία του προσωπικού και των ασθενών κατά την ακτινοθεραπεία με χρήση επιταχυντών υψηλής ενέργειας.

ABSTRACT

High energy linear accelerators ($> 10\text{MV}$) produce neutrons mainly thorough (γ,n) interactions of photons with nuclei of high atomic number materials that constitute the linear accelerator head and beam collimation system, such as target, flattening filter, primary collimators, jaws and head shielding. These neutrons have to be taken into consideration in the shielding design of the treatment room and maze and also increase the out-of-field radiation dose of patients undergoing radiation therapy with high-energy photon beams.

In the present work we validated the hypothesis that a generalized neutron source geometry representing the accelerator head can adequately simulate the neutron source in the therapy treatment room. The experimental study was performed at an Elekta Synergy1 18 MV linear accelerator. Neutron fluence measurements at the isocenter were performed using Au, Co, In and Cu activation foils (bare and Cd covered). The foil activity was determined using a calibrated high purity germanium detector. The neutron source and treatment room configuration were simulated using the Monte Carlo code MCNP5. Different simplified accelerator head geometries were examined. The neutron energy spectrum was taken from an analytical expression derived by Tosi et al 1991. The results of the simulations enabled spectrum averaged cross-sections to be derived. It was concluded that the optimal accelerator head geometry consisted of a point neutron source in the center of a spherical shell composed of tungsten of 10 cm in thickness. This work contributes towards the development of a cost effective generic methodology for optimization of the design of clinical linear accelerators radiation shielding configuration as well as the protection of staff and patients in radiotherapy using high energy accelerators.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
Περιεχόμενα.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	11
1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ.....	11
1.1 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη	11
1.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία	11
1.1.2 Πυρηνικές αντιδράσεις και ενεργειακός διαμερισμός νετρονίων	12
1.2 Ιατρικοί Γραμμικοί Επιταχυντές	13
1.3 Παραγωγή φωτονετρονίων σε θάλαμο θεραπείας	16
1.4 Ακτινοπροστασία και θωράκιση γραμμικού επιταχυντή.....	18
2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ.....	20
2.1 Ανίχνευση νετρονίων	20
2.2 Μέτρηση με ανιχνευτές ενεργοποίησης.....	20
2.3 Φασματοσκοπία ακτίνων γ	22
2.4 Ανιχνευτής γερμανίου	23
2.4.1 Αρχή λειτουργίας.....	23
2.4.2 Χαρακτηριστικά HpGe	24
2.5 Τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo	25
ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	27
3. ΜΕΘΟΔΟΣ.....	27
3.1 Προσομοιώσεις Monte Carlo	27
3.1.1 Ο κώδικας MCNPX.....	27
3.1.2 Το φάσμα και η γεωμετρία της πηγής νετρονίων.....	28
3.1.3 Η γεωμετρία του θαλάμου γραμμικού επιταχυντή	30
3.1.4 Υλικά θωράκισης	31
3.1.5 Οι ενεργές διατομές	32
3.1.6 Εικονικοί Ανιχνευτές.....	32
3.1.7 Επίδραση σκεδαζόμενης ακτινοβολίας	33
3.2 Πειραματική Διαδικασία	34
3.2.1 Ο ιατρικός γραμμικός επιταχυντής Elekta - Synergy1	34
3.2.2 Χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων ενεργοποίησης.....	34

3.2.3 Ακτινοβολήση των δειγμάτων.....	36
3.2.4 Βαθμονόμηση του ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HpGe)	38
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	44
4.1 Υπολογισμός της ροής των νετρονίων του ιατρικού γραμμικού επιταχυντή.....	44
4.2 Υπολογισμός της συνεισφοράς της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας	54
5. ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	74

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ακτινοθεραπεία αποτελεί μία από τις μεθόδους για τη θεραπεία του καρκίνου. Η ακτινοθεραπεία χρησιμοποιεί υψηλές δόσεις ακτινοβολίας για την καταστροφή των καρκινικών κυττάρων και για να εμποδίσει την εξάπλωσή τους. Η ανάπτυξη της ακτινοθεραπείας σχετίζεται όχι μόνο με τις σημαντικές εξελίξεις στην ιατρική και στην βιολογία αλλά και με τις σημαντικές προόδους στην τεχνολογία των υπολογιστών και του αντίστοιχου λογισμικού, στην τεχνολογία διαγνωστικής απεικόνισης και στην ανάπτυξη τεχνικών αυτοματοποιημένης παροχής της ακτινοβολίας. Τέτοιες τεχνικές, όπως η σύμμορφη τρισδιάστατη ακτινοθεραπεία (3D conformal radiotherapy, 3D CRT), η ακτινοθεραπεία με πεδία ακτινοβολίας διαμορφούμενης έντασης (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) πραγματοποιούνται συνήθως με τη χρήση δεσμών ακτίνων-X ενέργειας 6-24 MV που παράγονται σε γραμμικούς επιταχυντές ηλεκτρονίων.

Η λειτουργία των γραμμικών επιταχυντών βασίζεται στην επιτάχυνση δέσμης ηλεκτρονίων, η οποία κατευθύνεται ώστε να χτυπήσει ένα στόχο κατασκευασμένο από υλικό υψηλού ατομικού αριθμού, όπως το βολφράμιο και ο χρυσός, με αποτέλεσμα την παραγωγή Bremsstrahlung στο στόχο. Η θεραπευτική δέσμη, αλλά και η σκεδαζόμενη και διαρρέουσα ακτινοβολία, προέρχεται από τα φωτόνια ή τα ηλεκτρόνια που παράγονται κατά την λειτουργία του επιταχυντή. Ωστόσο, στην περίπτωση γραμμικών επιταχυντών υψηλής τάσης μεγαλύτερης από 10 MV, πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα νετρόνια που παράγονται μέσω των αντιδράσεων τύπου (γ, n) και (e, n) που συμβαίνουν κυρίως στην κεφαλή του γραμμικού και στα υλικά που βρίσκονται στο πεδίο της δέσμης ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα υλικά θωράκισης, διαμόρφωσης πεδίου κλπ. Επομένως, χρησιμοποιώντας επιταχυντικές διατάξεις υψηλής ενέργειας εγείρεται και ένα επιπρόσθετο ζήτημα ακτινοπροστασίας, επειδή εκτός από το πεδίο φωτονίων οι επιταχυντές παράγουν δευτερογενή νετρόνια. Εν γένει, οι γραμμικοί επιταχυντές άνω των 8-10 MV παράγουν νετρόνια ανεξάρτητα αν λειτουργούν με δέσμες ηλεκτρονίων ή ακτίνων-X. Όμως, με δεδομένο ότι η διατομή για την παραγωγή νετρονίων από αντιδράσεις με φωτόνια είναι περίπου 100 έως 200 φορές μεγαλύτερη από την παραγωγή νετρονίων από αντιδράσεις με ηλεκτρόνια, οι μελέτες έχουν εστιαστεί σχεδόν αποκλειστικά στην παραγωγή των φωτονονετρονίων (AAPM, 1986).

Τα νετρόνια που παράγονται στην κεφαλή του επιταχυντή επιβαρύνουν τον ασθενή με μια ανεπιθύμητη δόση ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να προκαλέσει δευτερογενείς καρκίνους. Στα τρέχοντα συστήματα σχεδιασμού θεραπείας, η δόση από νετρόνια δεν συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό. Ωστόσο, έχουν παρουσιαστεί μελέτες στις οποίες γίνεται προσπάθεια για την εκτίμηση της ροής των νετρονίων στους γραμμικούς επιταχυντές υψηλής ενέργειας λόγω της σημασίας της επίδρασης τους στην περιφερειακή δόση

(Carinou, et al., 1999). Επίσης, η ροή των νετρονίων πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό του θαλάμου θεραπείας και ειδικότερα στον λαβύρινθο και τη θύρα του θαλάμου. Η θωράκιση των θαλάμων, όπου εγκαθίστανται και λειτουργούν γραμμικοί επιταχυντές υψηλής ενέργειας διακρίνεται στην πρωτεύουσα, στη δευτερεύουσα θωράκιση από φωτόνια και στη θωράκιση έναντι των νετρονίων και των φωτονίων που παράγονται μέσω πυρηνικών αντιδράσεων ραδιενεργού ενσωμάτωσης νετρονίων στα υλικά του θαλάμου (NCRP 2005). Η πρωτεύουσα θωράκιση που χρησιμοποιείται για την εξασθένηση του πεδίου φωτονίων είναι συνήθως επαρκής για την θωράκιση του πεδίου των νετρονίων. Η κρισιμότητα της θύρας του θαλάμου επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή επιλογή υλικών, λαμβάνοντας υπόψη και την συνεισφορά των νετρονίων, μέσω των πολλαπλών σκεδάσεων στα υλικά του θαλάμου και του λαβυρίνθου, ως σημαντικό ποσοστό στη συνολική ισοδύναμη δόση στην περιοχή της θύρας. Ως εκ τούτου, η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του χώρου, με την δημιουργία του λαβυρίνθου και η επιλογή υλικών κατασκευής της θύρας, θα πρέπει να είναι κατάλληλα μελετημένες τόσο για την εξασθένηση των φωτονίων και των νετρονίων όσο και για την λειτουργικότητά της, δηλαδή να διαθέτει ιδανικό βάρος και χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης. Συνεπώς η ροή νετρονίων που παράγονται στη κεφαλή ενός γραμμικού επιταχυντή πρέπει να προσδιοριστεί με ακρίβεια τόσο για τον προσδιορισμό της περιφερειακής δόσης στην κύρια δέσμη θεραπείας του ασθενούς όσο και στη μελέτη ακτινοπροστασίας του θαλάμου.

Για την εκτίμηση της ροής των νετρονίων που παράγονται στη κεφαλή ενός γραμμικού επιταχυντή απαιτείται η λεπτομερής προσομοίωση της γεωμετρίας της κεφαλής, συμπεριλαμβανομένων του στόχου, φίλτρων, διαμορφωτών και περιοριστών της δέσμης, μετρητικών διατάξεων και της θωράκισης της κεφαλής, των υλικών από τα οποία αποτελούνται και των πυρηνικών διατομών των στοιχείων. Επίσης, απαιτείται η γνώση της έντασης και της ενέργειας της δέσμης των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στον στόχο. Ο θεωρητικός υπολογισμός της ροής νετρονίων σε μια τόσο πολύπλοκη διάταξη μπορεί να γίνει μόνο με την χρήση υπολογιστικών τεχνικών Monte Carlo και επομένως έχει υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Για τον λόγο αυτό, προτάθηκαν διάφορες γενικευμένες και σχετικά απλές γεωμετρίες κεφαλής που ωστόσο επιτρέπουν την εκτίμηση της ροής των νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και τον λαβύρινθο με ικανοποιητική ακρίβεια (Πίνακας 1). Ωστόσο, παρά τη μεγάλη χρησιμότητα της εφαρμογής των τεχνικών αυτών, στην επιστημονική βιβλιογραφία δεν έχει παρουσιαστεί μελέτη συστηματικής σύγκρισης τους όσον αφορά στην εκτίμηση της ροής των νετρονίων που παράγονται σε έναν ιατρικό γραμμικό επιταχυντή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.

Γενικευμένες γεωμετρίες για τη περιγραφή της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή, όσον αφορά στην παραγωγή νετρονίων.

α/α	Γεωμετρία	Αναφορά
1	ισοτροπική σφαιρική πηγή ακτίνας 10cm βολφραμίου	(Carinou, et al., 1999)
2	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από βολφράμιο εξωτερικής ακτίνας 20 cm και εσωτερικής ακτίνας 10 cm	(Vega-Carrillo et al, 2011)
3	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από χαλκό εξωτερικής ακτίνας 20 cm και εσωτερικής ακτίνας 10 cm	(Agosteo, et al., 1992)
4	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από μόλυβδο εξωτερικής ακτίνας 25 cm και εσωτερικής ακτίνας 10 cm	(Agosteo, et al., 1995)

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της ροής νετρονίων που παράγονται από την κεφαλή γραμμικού επιταχυντή 18MV. Η προσομοίωση της γεωμετρίας της κεφαλής και του θαλάμου έγινε με τον κώδικα Monte Carlo MCNP5. Οι μετρήσεις ροής νετρονίων πραγματοποιήθηκαν με την χρήση ανιχνευτών ενεργοποίησης (activation detectors).

Ο σκοπός της εργασίας είναι:

- (i) να προσδιορισθούν οι ενεργές διατομές για τα μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης (activation foils) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων για τα ενεργειακά φάσματα νετρονίων που προκύπτουν από τις γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής που παραθέτονται στον Πίνακα 1.
- (ii) να προσδιορισθεί η ροή νετρονίων στο ισόκεντρο και να συγκριθούν τα αποτελέσματα από τις διαφορετικές γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής.
- (iii) να ελεγχθεί η υπόθεση ότι η χρήση μιας γενικευμένης και απλής γεωμετρίας της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματική εκτίμηση της ροής νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας.

Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να γενικευτούν και σε γραμμικούς επιταχυντές διαφόρων τύπων, κατασκευαστών και άλλων ενεργειών. Επομένως, η παρούσα εργασία συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση της σχεδίασης της θωράκισης κλινικών γραμμικών επιταχυντών και στην αποτελεσματικότερη ακτινοπροστασία του προσωπικού και των ασθενών σε τμήματα ακτινοθεραπείας.

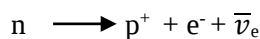
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

1.1 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη

1.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Τα νετρόνια είναι σωματίδια ηλεκτρικά ουδέτερα με μάζα ηρεμίας λίγο μεγαλύτερη αυτής των πρωτονίων ($1,6749 \times 10^{-27} \text{kg}$). Σε ελεύθερη κατάσταση το νετρόνιο είναι ασταθές και υφίσταται β- διάσπαση με χρόνο ημιζωής $11.7 \pm 0.3 \text{min}$ (Kossakowski, et al., 1989).



Λόγω της απουσίας φορτίου τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη κυρίως με μικρής εμβέλειας πυρηνικές δυνάμεις.

Η ακτινοβόληση διαφόρων υλικών με νετρόνια έχει σαν συνέπεια την πρόκληση πυρηνικών αντιδράσεων στους πυρήνες των νουκλιδίων που αποτελούν το υλικό. Ο αριθμός των πυρηνικών αντιδράσεων ανά μονάδα χρόνου υπολογίζεται από την σχέση :

$$\frac{dN}{dt} = \Phi \cdot N_t \cdot \sigma \quad (1)$$

όπου:

N = ο αριθμός αντιδράσεων στο ακτινοβολούμενο υλικό

Φ = η ροή των νετρονίων ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

N_t = ο αριθμός των ατόμων του στόχου (πυρήνες/ cm^3)

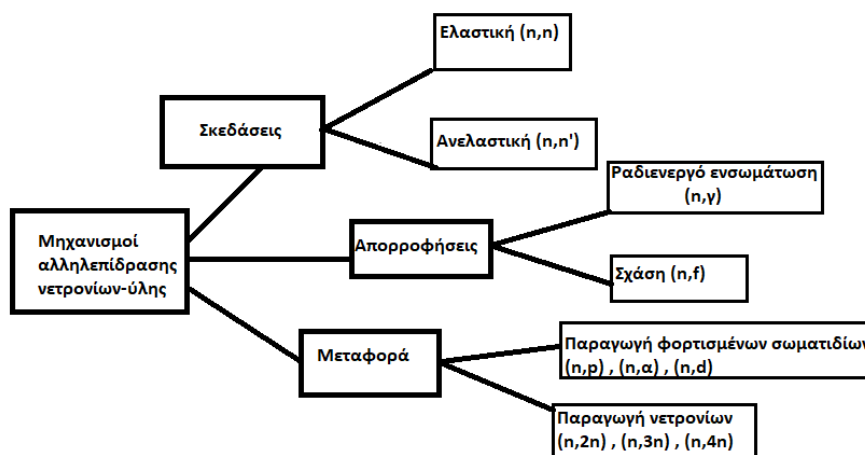
σ = η ενεργός διατομή της αντίδρασης (cm^2)

Η ενεργός διατομή είναι το μέτρο της πιθανότητας να συμβεί μια αλληλεπίδραση μεταξύ νετρονίου και ύλης, και μετριέται σε b (barn) ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Η διατομή εξαρτάται από το τύπο των πυρήνων του υλικού και την ενέργεια των νετρονίων.

Γενικώς, η ενεργός διατομή των νετρονίων, σ , είναι μικρή και τα νετρόνια μπορούν να διανύουν μεγάλες αποστάσεις (αρκετά cm) χωρίς αλληλεπίδραση μέσα στην ύλη.

1.1.2 Πυρηνικές αντιδράσεις και ενεργειακός διαμερισμός νετρονίων

Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω δύο βασικών μηχανισμών (Σχήμα 1). Ο πρώτος είναι η σκέδαση, που περιλαμβάνει την ελαστική και ανελαστική σκέδαση και ο δεύτερος είναι η απορρόφηση-μεταφορά που περιλαμβάνει την ραδιενεργό ενσωμάτωση, τις πυρηνικές αντιδράσεις τύπου (n,p) , (n,α) , (n,d) , $(n,2n)$, $(n,3n)$ καθώς και τις πυρηνικές σχάσεις.



Σχήμα 1 Μηχανισμοί Αλληλεπίδρασης νετρονίων-ύλης

Αν θεωρήσουμε όλες τις δυνατές αλληλεπιδράσεις των νετρονίων (σχάση σ_f , απορρόφηση σ_a , ελαστική-ανελαστική σκέδαση σ_{el} , σ_{in} κλπ.), τότε η ολική ενεργός διατομή θα εκφράζεται από το παρακάτω άθροισμα:

$$\sigma_{Tot} = \sum_i \sigma_i = \sigma_{el} + \sigma_{in} + \sigma_f + \sigma_a + \dots \quad (2)$$

Αξίζει να αναφέρουμε πως η ελαστική σκέδαση αποτελεί το βασικό μηχανισμό επιβράδυνσης ταχέων νετρονίων σε ελαφρά υλικά και τον κυριότερο μηχανισμό μεταφοράς ενέργειας κατά την αλληλεπίδραση νετρονίων με βιολογικούς ιστούς. Καθώς το νετρόνιο κινείται μέσα στην ύλη χάνει διαδοχικά την ενέργεια του με αλληλάλληλες συγκρούσεις με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του και μετά από ικανό αριθμό συγκρούσεων να γίνει θερμικό, δηλαδή η ενέργεια του να εξισωθεί με την ενέργεια:

$$E = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (3)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία (K)

Τόσο τα θερμικά όσο και τα επιθερμικά και ταχέα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν αντιδράσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας-γ. Επομένως η μέτρηση της ακτινοβολίας-γ που εκπέμπεται σαν αποτέλεσμα πυρηνικών αντιδράσεων των νετρονίων με γνωστούς πυρήνες «στόχους» επιτρέπει τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων αν η μάζα και σύσταση του στόχου, η διατομή της πυρηνικής αντίδρασης και τα χαρακτηριστικά της ραδιενεργού διάσπασης (ενέργεια εκπομπής ακτινοβολίας-γ, χρόνος ημιζωής) είναι γνωστά.

1.2 Ιατρικοί Γραμμικοί Επιταχυντές

Η αρχή λειτουργίας του γραμμικού επιταχυντή βασίζεται στην γραμμική επιτάχυνση φορτισμένων σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες (Σχήμα 2). Το αποτέλεσμα είναι μια εξωτερική δέσμη που κατευθύνεται σε συγκεκριμένη θέση στο όγκο-στόχο. Πιο αναλυτικά, ένα θερμαινόμενο νήμα μέσω θερμιονικής εκπομπής λειτουργεί ως πηγή ηλεκτρονίων (electron gun). Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται σε ευθεία γραμμή μέσα σε έναν κυματοδηγό, όπου αλληλεπιδρούν με ένα κατάλληλο συγχρονισμένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο απ' όπου και παίρνουν την ενέργειά τους. Το πεδίο αυτό δημιουργείται από μια διάταξη magnetron ή klystron (Σχήμα 3). Στη συνέχεια η δέσμη ηλεκτρονίων κατευθύνεται μέσω μαγνητών πάνω σε ένα στόχο (target) κατασκευασμένο συνήθως από κράμα βολφραμίου. Εκεί τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσω του φαινομένου της πέδησης.

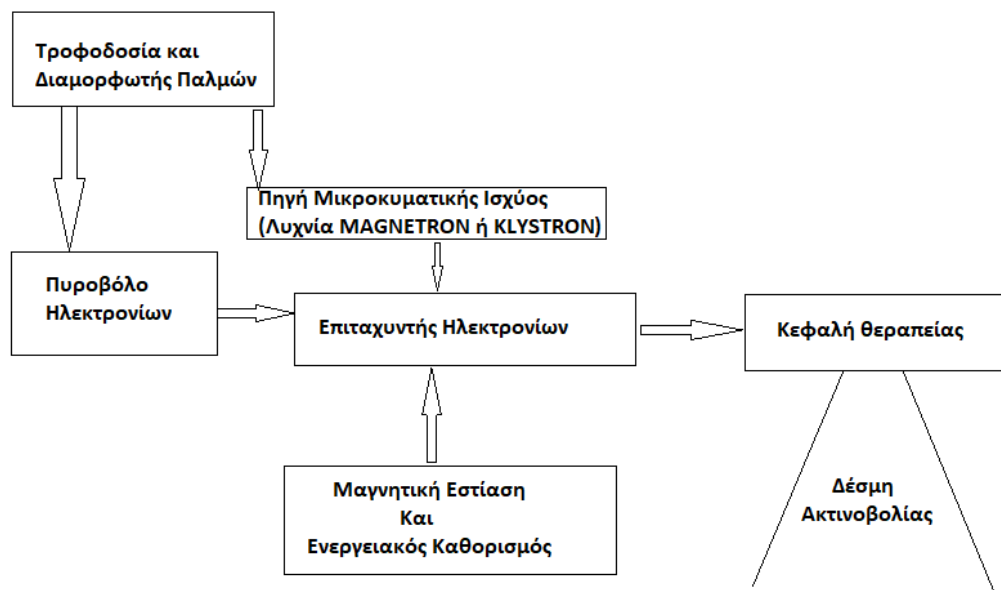
Επειδή η δέσμη έχει μεγαλύτερη ένταση στο κέντρο της, παρεμβάλλεται ένα ειδικό φίλτρο (flattening filter) που την εξασθενεί περισσότερο στο κέντρο απ' ότι στην περιφέρειά της, ώστε το πεδίο να γίνει ομοιόμορφο. Υπάρχουν όμως και γραμμικοί επιταχυντές που αξιοποιούν αυτή την ανομοιογένεια και λειτουργούν χωρίς τέτοια φίλτρα (flattening filter free).



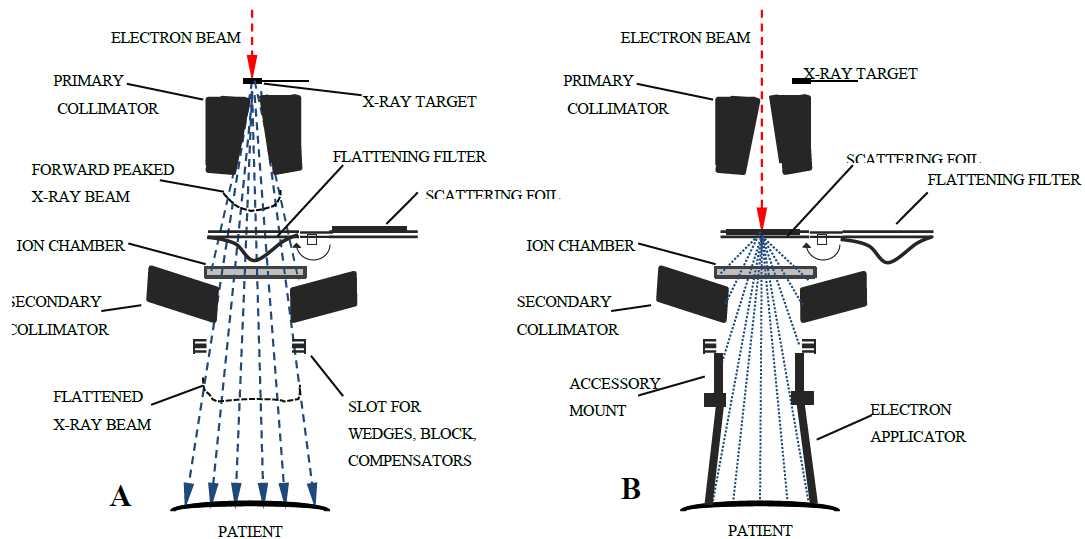
Σχήμα 2: Ιατρικός γραμμικός επιταχυντής (πηγή: Siemens Primus)

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4, διάφορα υλικά στοιχεία παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής και του ασθενούς, τα οποία χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν και κατευθύνουν την δέσμη.

Η «συμμόρφωση» της δέσμης φωτονίων γίνεται με κατάλληλες διατάξεις, τα «σαγόνια» (jaws) και φύλλα μολύβδου (multileaf) του κατευθυντήρα (collimator). Η δόση της δέσμης ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια συστήματος ειδικών ανιχνευτών ακτινοβολίας, των θαλάμων ιονισμού.

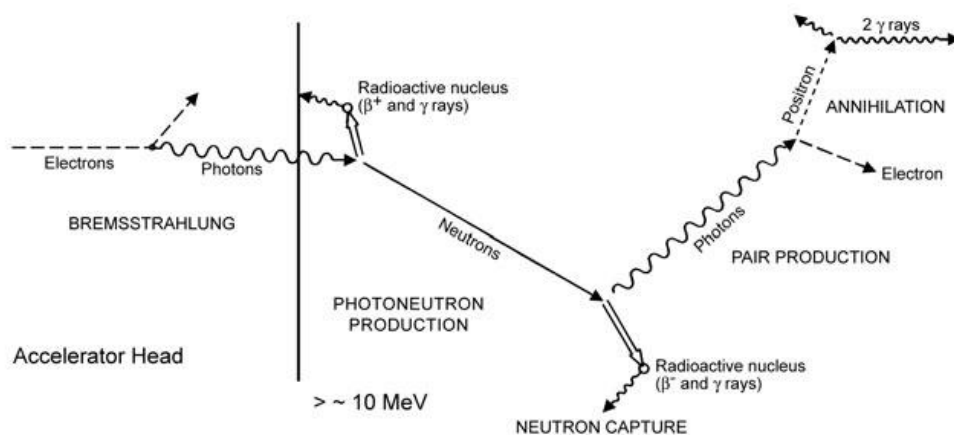


Σχήμα 3: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας γραμμικού επιταχυντή.



Σχήμα 4: Κύρια μέρη της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή. A: Photon mode B: Electron mode (NCRP, 1984)

Τα φωτονετρόνια παράγονται ύστερα από αντίδραση κυρίως με τα υψηλού ατομικού αριθμού (Z) υλικά της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή, όπως ο στόχος, οι κατευθυντήρες, τα MLC, το φίλτρο επιπέδωσης, τα «jaws» αλλά και γενικότερα υλικά της θωράκισης της κεφαλής (Pb, Fe). Η «ιστορία» των αλληλεπιδράσεων από την παραγωγή, μεταφορά και απορρόφηση των νετρονίων στην κεφαλή ενός γραμμικού επιταχυντή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Το υλικό των κύριων συστατικών της κεφαλής του ιατρικού γραμμικού επιταχυντή όπως θα αναλύσουμε στην συνέχεια, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή νετρονίων.

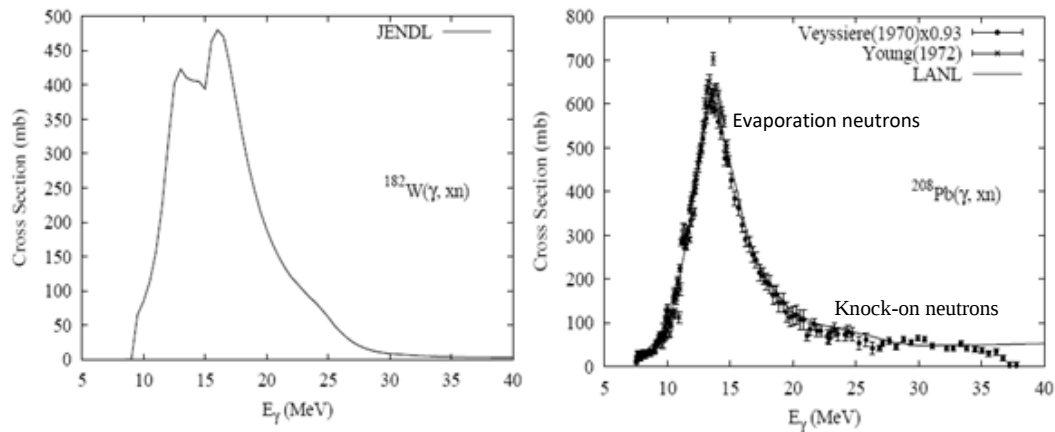


Σχήμα 5: «Ιστορικό» αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης που οδηγούν σε παραγωγή, μεταφορά και απορρόφηση νετρονίων σε γραμμικό επιταχυντή ενέργειας > 10 MeV

1.3 Παραγωγή φωτονετρονίων

Τα φωτόνια συγκρούονται με έναν πυρήνα, η ενέργειά των οποίων κατανέμεται μεταξύ των νουκλεονίων του, και τελικά μέσω ταλαντωτικών κινήσεων (γιγάντιος πυρηνικός συντονισμός) ένα νετρόνιο κοντά στην επιφάνεια του πυρήνα αποκτά ικανή ενέργεια για να αποσπασθεί από τον πυρήνα (evaporation neutron). Αυτά τα νετρόνια εκπέμπονται ισοτροπικά, ακολουθώντας την ενεργειακή κατανομή Maxwell. Μια άλλη αντίδραση που εμφανίζεται και συμβάλλει επίσης στην παραγωγή νετρονίων είναι όταν το φωτόνιο μεταφέρει όλη του την ενέργεια σε ένα μόνο νετρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα. Αυτά τα νετρόνια εκπέμπονται ως επί το πλείστον προς την κατεύθυνση των εισερχόμενων φωτονίων, είναι γνωστά ως νετρόνια άμεσης απόσπασης (knock-on neutrons) και αποτελούν το 10% περίπου των συνολικών (γ, n) αντιδράσεων, διαθέτοντας όμως αρκετά μεγαλύτερη ενέργεια από τα evaporation neutrons.

Οι διατομές παραγωγής φωτονετρονίων από φωτόνια (Bremsstrahlung) που προσπίπτουν στα υλικά της κεφαλής του επιταχυντή και του στόχου, τα οποία κατά κύριο λόγο είναι ο μόλυβδος (Pb) και το βολφράμιο (W) αντίστοιχα, αυξάνονται συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων και παρουσιάζουν μέγιστο σε τιμή ενέργειας των φωτονίων ίση με 13.6 και 17 MeV αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 (IAEA, 2000)



Σχήμα 6: Διατομή συναρτήσει της ενέργειας για το βολφράμιο ^{182}W και τον μόλυβδο ^{208}Pb

Σημειώνεται ότι ο μόλυβδος χρησιμοποιείται σαν υλικό θωράκισης της κεφαλής, ενώ το βολφράμιο χρησιμοποιείται σαν υλικό του στόχου του επιταχυντή. Φωτονετρόνια επίσης παράγονται λόγω αλληλεπιδράσεων φωτονίων με τα υλικά της θωράκισης του θαλάμου, όπως για παράδειγμα στα φύλλα μολύβδου που σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται για τη θωράκιση της πρωτογενούς δέσμης. Ωστόσο, η ροή φωτονίων εκτός της κεφαλής είναι πολλές τάξεις χαμηλότερη από αυτή που συναντάται εσωτερικά στην κεφαλή του επιταχυντή και επομένως αντίστοιχα μειωμένη είναι και η παραγωγή των νετρονίων.

Επιπροσθέτως το σώμα του ασθενούς (C, O, N, S, Mg), συμβάλει στην παραγωγή φωτονετρονίων (Hall, et al., 1995). Όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία διαθέτουν ενεργειακό κατώφλι για την παραγωγή φωτονετρονίων όπως καταγράφεται στον Πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.

Ενέργεια κατωφλίου για αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων τύπου (γ,n) για διάφορα ισότοπα

Ισότοπο	Ενέργεια κατωφλίου (γ,n) αντιδράσεων
¹² C	18.27
¹⁴ N	10.55
¹⁶ O	15.66
³² S	15.04
²⁴ Mg	16.53
²⁷ Al	13.06
⁵⁶ Fe	11.20
¹⁸⁴ W	7.41
¹⁹⁷ Au	8.07
²⁰⁸ Pb	7.37

Στους γραμμικούς επιταχυντές υψηλής ενέργειας η μέτρηση της ροής και της αντίστοιχης δόσης των νετρονίων είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο λόγο φωτονίων προς νετρόνια και την έλλειψη γνώσης των ενεργειών του φάσματος των νετρονίων. Η ενεργειακή κατανομή του φάσματος των νετρονίων που παράγονται στο στόχο γραμμικού επιταχυντή περιγράφεται από τη σχέση (4) (Tosi, et al 1991):

$$n(E) = \alpha \cdot \frac{E}{T^2} \cdot e^{-E/T} + \beta \cdot \frac{\ln|\frac{E_{max}}{E+S_n}|}{\int_0^{E_{max}-S_n} \ln|\frac{E_{max}}{E+S_n}| dE} \quad (4)$$

όπου

α : το ποσοστό των evaporation neutrons ,

T: πυρηνική θερμοκρασία του στόχου

β : το ποσοστό των knock-on neutrons,

E_{max} : μέγιστη ενέργεια των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων,

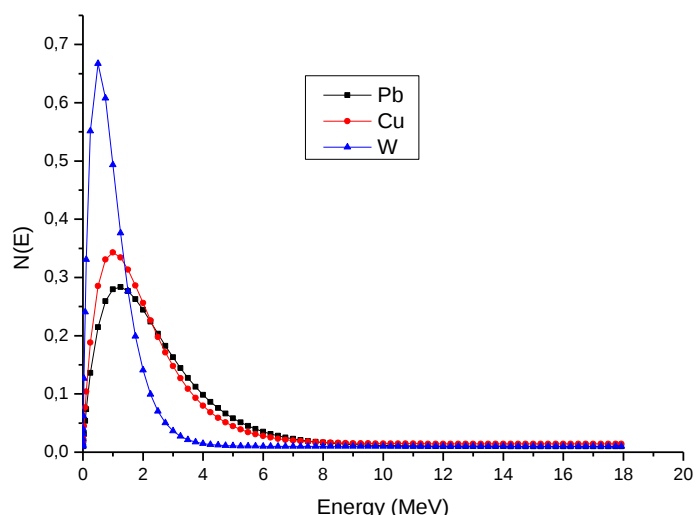
S_n : ενέργεια απόσπασης των νετρονίων από τον πυρήνα του στόχου.

Έχει δειχθεί ότι (Agosteo, et al., 1994) : $\alpha = 0.8929$, $\beta = 0.1071$ και

- Για στόχο W: $S_n=7.34$ MeV και $T = 0.5$ MeV
- Για στόχο Pb: $S_n= 7.42$ MeV και $T= 1.2$ MeV
- Για στόχο Cu: $S_n= 10.56$ MeV και $T= 1.0$ MeV

Αξίζει να σημειωθεί πως η περιγραφή του φάσματος των νετρονίων μέσω της σχέσης (4) παρουσιάζει δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, ως στόχος μπορεί να ληφθεί υπόψη ένα

υλικό, πράγμα που αποτελεί σημαντική απλούστευση από την πραγματική σύσταση του στόχου και των άλλων στοιχείων που αποτελούν την κεφαλή ενός γραμμικού επιταχυντή και δεύτερον, έχειδειχθεί ότι η σχέση (4) υποεκτιμά τη ροή των νετρονίων στην θερμική και επιθερμική περιοχή (Vega-Carrillo, et al., 2011). Το φάσμα του Tosi για γραμμικό επιταχυντή ενέργειας 18MV παρατίθενται στο Σχήμα 7. Η μέγιστη ενέργεια είναι τα 18MeV, ενώ η πιθανότερη ενέργεια υπολογίζεται στα 0.67 MeV, 1.00 MeV και 1.25 MeV για στόχους W, Cu και Pb αντίστοιχα.



Σχήμα 7: Γράφημα του φάσματος νετρονίων σύμφωνα με την εξίσωση του Tosi για γραμμικό επιταχυντή ενέργειας 18MV

1.4 Ακτινοπροστασία και θωράκιση γραμμικού επιταχυντή

Τα νετρόνια που παράγονται στο θάλαμο θεραπείας του γραμμικού επιταχυντή απαιτούν σύνθετη θωράκιση με χρήση συνδυασμού υλικών, η οποία εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων. Σε όλες τις περιπτώσεις, η αλληλεπίδραση των νετρονίων με τα υλικά της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή, των τοιχωμάτων του θαλάμου, τον ασθενή αλλά και της κλίνης έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ακτινοβολίας γ , η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της θωράκισης του θαλάμου.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος θωράκισης των τοίχων του θαλάμου είναι η χρήση σκυροδέματος (concrete). Επίσης, καθώς το πάχος υποδεκαπλασιασμού (Tenth Value Layer, TVL) για ακτίνες γ είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των νετρονίων στην περίπτωση του σκυροδέματος και ανεξαρτήτως ενέργειας συμπεραίνουμε πως θωρακίζοντας για ακτίνες γ , επιτυγχάνεται επαρκής θωράκιση και για τα νετρόνια. Από την άλλη, η θύρα του θαλάμου είναι συνήθως το πιο αδύναμο κομμάτι της θωράκισης και για να μην αποτελεί την «αχίλλειο πτέρνα» της θωράκισης, θα πρέπει να μελετηθεί επαρκώς. Η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του χώρου, με την δημιουργία του λαβυρίνθου και η χρησιμοποίηση κατάλληλου υλικού

κατασκευής της θύρας, θα πρέπει να είναι μελετημένα τόσο για την εξασθένηση των φωτονίων και των νετρονίων όσο και για την λειτουργικότητά της, δηλαδή να διαθέτει ιδανικό βάρος και χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης.

Τα νετρόνια όπως αναφέρθηκε, μετά την παραγωγή τους, αλληλεπιδρούν με τα υλικά της κεφαλής, τον ασθενή, την κλίνη, το δάπεδο, την οροφή και τα τοιχώματα του θαλάμου θεραπείας. Ο κύριος μηχανισμός επιβράδυνσης των νετρονίων είναι μέσω ελαστικών σκεδάσεων με τα ελαφρύτερα υλικά του θαλάμου, όπως για παράδειγμα με το υδρογόνο στο σκυρόδεμα. Σαν αποτέλεσμα διαδοχικών σκεδάσεων, νετρόνια οδεύουν κατά μήκος του λαβυρίνθου προς την πόρτα του θαλάμου. Επομένως είναι σημαντικός ο υπολογισμός της ισοδύναμης δόσης από νετρόνια τα οποία μπορεί να αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής ισοδύναμης δόσης, ιδιαιτέρως στην πόρτα του θαλάμου θεραπείας με στόχο την εξακρίβωση της επάρκειας της θωράκισης.

Με βάση την παραπάνω ανάγκη για τη μελέτη της ισοδύναμης δόσης από νετρόνια στη θύρα σε θαλάμους θεραπείας γραμμικών επιταχυντών υψηλών ενεργειών αναπτύχθηκαν αναλυτικές μέθοδοι με βάση δεδομένα από πειραματικές μετρήσεις ή ακόμα μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo. Μερικές από αυτές είναι η μέθοδος Kersey (1979), που περιγράφει την εξασθένηση των νετρονίων κατά μήκος του λαβυρίνθου του θαλάμου θεραπείας με βάσει το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου και ενός παράγοντα με εκθέτη την απόσταση, η μέθοδος Nakamura (1986) και η μέθοδος IPEM (1997), η οποία αποτελεί και μια διόρθωση της μεθόδου Kersey.

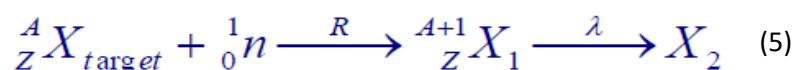
2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

2.1 Ανίχνευση νετρονίων

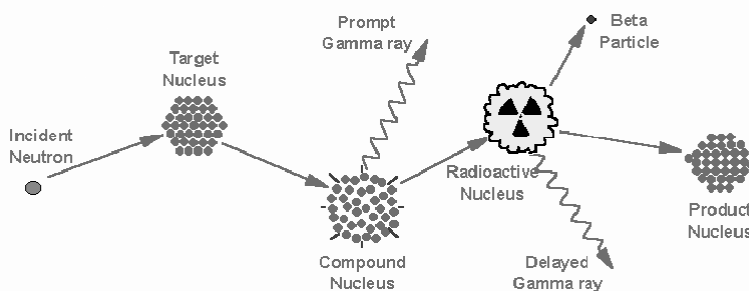
Για την ανίχνευση νετρονίων χρησιμοποιούνται παθητικοί ανιχνευτές όπως μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης (activation foils), δοσίμετρα θερμοφωταύγειας, ανιχνευτές ανάλυσης ιχνών ή ενεργητικοί ανιχνευτές όπως αναλογικοί ανιχνευτές αερίου (BF_3 ή He) και σπινθηριστές τύπου LiI ή πλαστικοί σπινθηριστές. Στην περίπτωση της μέτρησης της ροής των νετρονίων σε θάλαμο ιατρικού γραμμικού επιταχυντή συνήθως χρησιμοποιούνται παθητικοί ανιχνευτές λόγω του υψηλού πεδίου φωτονίων και του υψηλού ρυθμού και της παλμικής φύσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που έχει σαν αποτέλεσμα τον κορεσμό της απόκρισης των ανιχνευτών αερίου όπως για παράδειγμα των αναλογικών ανιχνευτών.

2.2 Μέτρηση με ανιχνευτές ενεργοποίησης

Η μέτρηση των νετρονίων μέσα στο θάλαμο θεραπείας γραμμικού επιταχυντή μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση μεταλλικών ελασμάτων ενεργοποίησης (activation foils). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη νετρονική ενεργοποίηση, η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:



Η μέθοδος της ενεργοποίησης (Neutron Activation Analysis-NAA) είναι μια πυρηνική μέθοδος έμμεσης μελέτης του θυγατρικού πυρήνα που παράγεται μέσω μιας πυρηνικής αντίδρασης. Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητο ο παραγόμενος θυγατρικός πυρήνας να είναι ασταθής ή να βρίσκεται σε κάποια διεγερμένη στάθμη μετά το πέρας της ακτινοβολήσης έτσι ώστε να εκπέμψει ακτινοβολία γ , ενώ παράλληλα θα πρέπει να έχει και κατάλληλο για πραγματοποίηση μετρήσεων χρόνο ημίσειας ζωής (Stamatelatos, et al., 2016).



Σχήμα 8: Αναπαράσταση σύλληψης νετρονίου από πυρήνα-στόχο

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, το νετρόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα-στόχο με μια μη-ελαστική σκέδαση, με αποτέλεσμα τη σύλληψή του από τον πυρήνα και το σχηματισμό ενός «σύνθετου», διεγερμένου πυρήνα. Η ενέργεια διεγέρσεως του «σύνθετου» πυρήνα οφείλεται στην ενέργεια συνδέσεως του νετρονίου με τον πυρήνα. Ο παραγόμενος από τη νετρονική σύλληψη, «σύνθετος» διεγερμένος πυρήνας σε χρονικό διάστημα της τάξης των 10^{-12} s αποδιεγείρεται προς μια σταθερότερη κατάσταση. Η αποδιέγερσή αυτή συνοδεύεται από εκπομπή μίας ή περισσότερων «άμεσων» ακτίνων-γ (prompt gamma rays), χαρακτηριστικών του πυρήνα (Βασιλοπούλου, 2012). Σε πολλές περιπτώσεις, η κατάσταση προς την οποία αποδιεγείρεται ο «σύνθετος» πυρήνας έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ραδιενεργού πυρήνα, ο οποίος με τη σειρά του αποδιεγείρεται (διασπάται) εκπέμποντας μία ή περισσότερες «καθυστερημένες» ακτίνες-γ (delayed gamma rays), επίσης χαρακτηριστικές του πυρήνα. Η εκπομπή αυτών των ακτίνων-γ (οι οποίες ονομάζονται «καθυστερημένες» σε αντιδιαστολή με τις «άμεσες» που προκύπτουν από την πρώτη αποδιέγερση) γίνεται με ρυθμό και με χρόνο ημιζωής που είναι χαρακτηριστικός του ραδιενεργού πυρήνα. Ανάλογα με το στοιχείο, οι χρόνοι ημιζωής ποικίλλουν από κλάσματα του δευτερολέπτου έως αρκετά χρόνια (D'Amico, et al., 2015).

Επομένως, μελετώντας τον αριθμό των αποδιεγέρσεων μέσω της μέτρησης των εκπεμπόμενων ακτίνων γ, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τον αριθμό των πυρήνων που παράχθηκαν μέσω της αντίδρασης. Ο αριθμός των πυρήνων που παράγονται ανά δευτερόλεπτο και ανά πυρήνα του στόχου ονομάζεται ρυθμός ενεργοποίησης της αντίδρασης (reaction rate). Σε περιπτώσεις όπου η ενεργός διατομή των αντιδράσεων έχει μελετηθεί και υπάρχουν δεδομένα στις διεθνείς βιβλιοθήκες πυρηνικών διατομών, οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντιδράσεις αναφοράς για τον προσδιορισμό της ροής της δέσμης νετρονίων και κατά συνέπεια για τον υπολογισμό ρυθμών

ενεργοποίησης και ενεργών διατομών αντιδράσεων για τις οποίες δεν υπάρχουν αντίστοιχα δεδομένα.

Για να πραγματοποιηθεί ο χαρακτηρισμός της δέσμης νετρονίων είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ρυθμού ενεργοποίησης των επιλεγμένων αντιδράσεων, ο οποίος γενικότερα δίνεται από τη σχέση:

$$RR = \int_{E_{n(th)i}}^{E_{n(max)}} \sigma_i(E) \cdot \Phi_i(E) dE \quad (6)$$

οπού $\sigma(E)$ η ενεργός διατομή, $\Phi(E)$ η ροή νετρονίων και E_{th} η ενέργεια κατωφλίου.

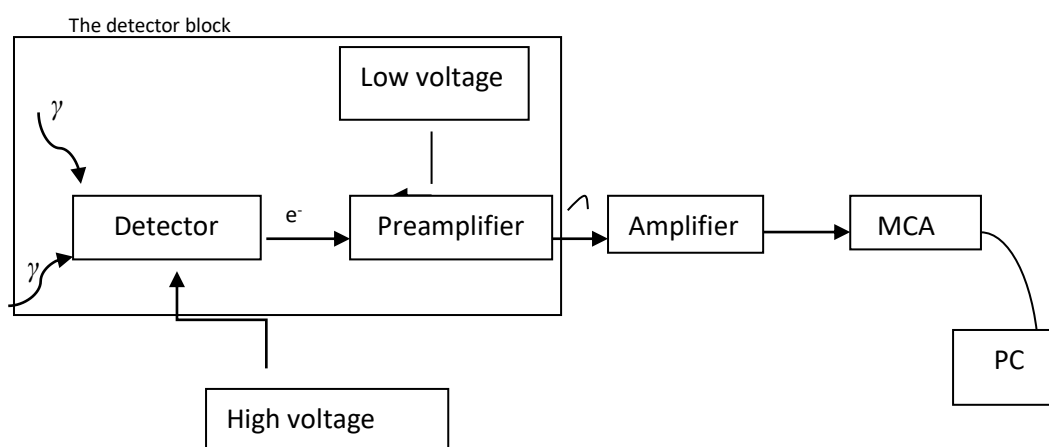
Δύο σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης είναι η καθοριστικής σημασίας «αναισθησία» τους στην ακτινοβολία φωτονίων, καθώς και το σχετικά χαμηλό κόστος τους σε συνδυασμό με το για πρακτικούς λόγους μικρό τους μέγεθος. Δεδομένου ότι η ενεργότητα υπολογίζεται μέσω της ανίχνευσης των φωτονίων από τις πυρηνικές διασπάσεις του πυρήνα που παράγεται από την πυρηνική αντίδραση των νετρονίων με το νουκλίδιο στόχος, τα μεταλλικά ελάσματα πρέπει να μετρηθούν σε διάταξη ανιχνευτή γερμανίου (π.χ. HpGe), εκτός του θαλάμου θεραπείας.

2.3 Φασματοσκοπία ακτίνων γ

Η φασματοσκοπία γ βασίζεται στην ανίχνευση γ-ακτινοβολίας, από την ενέργεια της οποίας ταυτοποιείται το αντίστοιχο ισότοπο. Εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η ενεργεία της ακτινοβολίας γ που εκπέμπεται χαρακτηρίζει την πυρηνική διάσπαση του συγκεκριμένου ραδιοϊσοτόπου.

Η ανίχνευση της ακτινοβολίας γ βασίζεται στην αλληλεπίδραση της με την ύλη. Μέσω των φαινομένων αλληλεπίδρασης που λαμβάνουν χώρα, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton και δίδυμη γένεση, η ακτινοβολία μεταφέρει ενέργεια στα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού ανίχνευσης. Η ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται μέσα στις ανιχνευτικές διατάξεις σε παλμό, από το μέγεθος του οποίου προσδιορίζεται η αρχική ενέργεια που αποτέθηκε από την ακτινοβολία γ στο υλικό του ανιχνευτή. Ο παλμός αυτός, που δημιουργήθηκε από μία αλληλεπίδραση, καταγράφεται στο φάσμα ως ένα γεγονός (count).

Φάσμα μιας πηγής ορίζεται η καταγραφή του ποσοστού των φωτονίων που καταγράφονται από την ανιχνευτική διάταξη σαν συνάρτηση της ενέργειάς τους. Η πραγματική εικόνα ενός φάσματος γ-ακτινοβολίας είναι σύνθετη, και για την ανάλυση απαιτείται γνώση όλων των φαινομένων που συμβαίνουν μέσα στο υλικό του ανιχνευτή αλλά και στα υλικά που τον περιβάλλουν. Μια διάταξη φασματοσκοπίας αποτελείται από έναν ανιχνευτή, από το ηλεκτρονικό κύκλωμα προενίσχυσης, διαμόρφωσης, ενίσχυσης και ψηφιοποίησης των παλμών καθώς και έναν υπολογιστή για την αποθήκευση, απεικόνιση και επεξεργασία των δεδομένων (Σχήμα 9).



Σχήμα 9: Διαγραμματική απεικόνιση βασικού συστήματος φασματοσκοπίας

Από τον ανιχνευτή παράγεται ηλεκτρονικό σήμα το οποίο διαμορφώνεται και ενισχύεται από τον συνδυασμό των ηλεκτρονικών στοιχείων του προενισχυτή και ενισχυτή. Το παραγόμενο σήμα, μέσω του διευκρινιστή ύψους παλμών μετατρέπεται σε λογικό (Analog to digital converter). Το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και αποθηκεύεται ο αριθμός των γεγονότων σαν συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων (φάσμα).

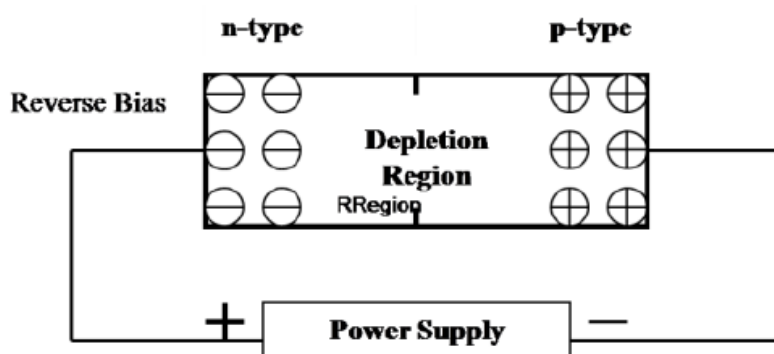
Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων στα προς μέτρηση δείγματα κυρίως χρησιμοποιούνται οι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe). Τα συστήματα αυτά, με χρήση κρυστάλλων γερμανίου HPGe εξασφαλίζουν πολύ καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα.

2.4 Ανιχνευτής γερμανίου

2.4.1 Αρχή λειτουργίας

Ο ανιχνευτής Ge ανήκει στην κατηγορία των ημιαγωγών ανιχνευτών και εισήχθη το 1962 (Tavendale, et al., 1963). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην άμεση συλλογή φορτίων

που παράγονται κατά τον ιονισμό του ημιαγώγιμου υλικού. Ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής παράγεται κατά μέσο όρο, για κάθε 3eV απορροφούμενα από την ακτινοβολία. Αυτά τα ζεύγη ολισθαίνουν υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου προς την άνοδο και κάθοδο αντίστοιχα, όπου παράγεται ο παλμός. Εν γένει ένας κρύσταλλος Ge περιέχει προσμίξεις, οι οποίες μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου, εν τούτοις οδηγούν στην αύξηση του θορύβου. Ανάλογα με την πρόσμιξη, οι ανιχνευτές διακρίνονται σε τύπου n (προσμίξεις δοτών- φορείς πλειονότητας ηλεκτρονίων) και τύπου p(προσμίξεις δεκτών-φορείς πλειονότητας οπών). Η λύση είναι η δημιουργία μιας επαφής p-n στο ένα ηλεκτρόδιο και η πόλωση της, ώστε το ρεύμα να μην περνά στην περίπτωση που δεν έχουμε ιοντίζουσα ακτινοβολία (Reverse Biasing). Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η λεγόμενη περιοχή απογύμνωσης (Depletion Region), στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς, προσεγγίζοντας έναν καθαρό ημιαγωγό (Knoll).



Σχήμα 10: Η δημιουργία της περιοχής απογύμνωσης στον ημιαγωγό Γερμανίου. Με την εφαρμογή αρνητικής πόλωσης οι φορείς φορτίου απομακρύνονται από την σύζευξη, δημιουργώντας την περιοχή απογύμνωσης η οποία συμπεριφέρεται ως θάλαμος ιονισμού στερεάς κατάστασης.

2.4.2 Χαρακτηριστικά HpGe

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- Υψηλός ατομικός αριθμός (Si, Ge)
- Μικρή συγκέντρωση προσμίξεων (μεγάλος πάχος περιοχής απογύμνωσης)
- Μικρή απαιτούμενη ενέργεια ιοντίζουσας ακτινοβολίας για την δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής
- Υψηλή αγωγιμότητα
- Υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα

Με τον όρο ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή εννοείται η ελάχιστη διαφορά ενέργειας που πρέπει να έχουν δύο κορυφές για να διακριθούν. Μέτρο της διακριτικής ικανότητας θεωρείται το πλήρες εύρος στο μισό του ύψους της κορυφής (Full Width at Half Maximum, FWHM). Πιο συγκεκριμένα στη φωτοκορυφή ορίζεται η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του συστήματος σαν το πλήρες εύρος στο ήμισυ του ύψους της φωτοκορυφής διαιρεμένου με την ενέργεια E_0 στην οποία αντιστοιχεί, επί 100.

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \cdot 100 \quad (7)$$

Τυπικές τιμές διακριτικότητας ενέργειας 1.8 ως 2.0 keV για την κορυφή στα 1332 keV του ^{60}Co .

Η απόδοση του ανιχνευτή, εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να καταγράφει κάθε φωτόνιο που προσπίπτει σε αυτό. Η απόδοση ενός ανιχνευτή μπορεί να οριστεί ποικιλοτρόπως, ανάλογα με το που εστιάζεται η εφαρμογή του. Στη γ-φασματοσκοπία χρησιμοποιείται κυρίως η απόλυτη απόδοση της φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency), η οποία είναι συνάρτηση της ενέργειας, και δίνεται από το πηλίκο του ολοκληρώματος (συνόλου) των καθαρών γεγονότων της φωτοκορυφής (Net counts), προς την ενεργότητα της πηγής, A (Bq/kg), πολλαπλασιασμένη επί το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων αυτής της ενέργειας, I_γ .

2.5 Τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo βασίζεται στην επανάληψη τυχαίων δειγμάτων για την επίλυση ενός προβλήματος. Ουσιαστικά χρησιμοποιείται μια διαδικασία ανάλογη της ρίψης ενός ζαριού στα τυχερά παιχνίδια του καζίνο, από όπου προέκυψε και το όνομα «Monte Carlo». Το πλεονέκτημα της υπολογιστικής αυτής μεθόδου είναι η δυνατότητα εφαρμογής της σε προβλήματα πολύπλοκης γεωμετρίας, τα οποία δεν μπορούν να προσομοιωθούν από κώδικες που χρησιμοποιούν θεωρητικές αναλυτικές μεθόδους. Αυτό οφείλεται στο ότι η προσομοίωση Monte Carlo εξάγει αποτελέσματα παρατηρώντας κάθε σωματίδιο του συστήματος ξεχωριστά και καταγράφοντας γεγονότα από την μέση συμπεριφορά των σωματιδίων. Ο αριθμός των δοκιμών που χρειάζονται για να περιγραφεί με ακρίβεια το ζητούμενο φαινόμενο είναι συνήθως πολύ μεγάλος, καθώς η διαδικασία δειγματοληψίας βασίζεται, όπως αναφέρθηκε, στην επιλογή τυχαίων αριθμών. Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης σωματιδίων και ύλης καθένα από τα σωματίδια παρακολουθείται από τη στιγμή της εκπομπής του από την πηγή μέχρι την στιγμή που θα απορροφηθεί όλη ενέργειά

του από την ύλη. Αυτή η διαδικασία παρακολούθησης αποτελεί μία ιστορία για τον κώδικα το αποτέλεσμα της οποίας καταγράφεται.

Η πυκνότητα πιθανότητας υπολογίζεται από τα δεδομένα μεταφοράς των σωματιδίων στην ύλη χρησιμοποιώντας τους τυχαίους αριθμούς που παράγονται. Καταγράφεται το αποτέλεσμα κάθε βήματος κατά τη διάρκεια ζωής του εξομοιούμενου σωματιδίου και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση συμπεριφορά των σωματιδίων σε ένα φυσικό σύστημα, χρησιμοποιώντας το κεντρικό οριακό θεώρημα από την μέση συμπεριφορά των εξομοιούμενων σωματιδίων.

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3. ΜΕΘΟΔΟΣ

3.1 Προσομοιώσεις Monte Carlo

3.1.1 Ο κώδικας MCNP

Στην παρούσα εργασία η υλοποίηση της προσομοίωσης έγινε μέσω του κώδικα MCNP, έκδοση 5. Ο κώδικας MCNP (*Monte Carlo N-Particles*) δημιουργήθηκε και εξελίχθηκε στα πλαίσια του Εθνικού Εργαστηρίου του Los Alamos, New Mexico (Los Alamos National Laboratory) και αναγνωρίζεται παγκοσμίως ως ένας από τους πλέον αξιόπιστους κώδικες ανάλυσης της μεταφοράς σωματιδίων με τη χρήση της τεχνικής Monte Carlo. Στην παρούσα εργασία η υλοποίηση της προσομοίωσης έγινε μέσω του κώδικα MCNP, έκδοση 5.

Πρόκειται για έναν κώδικα γενικής χρήσης, καθορισμένης γεωμετρίας, συνεχούς ενέργειας Monte Carlo κώδικα μεταφοράς, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για νετρόνια, φωτόνια ηλεκτρόνια ή συνδυασμό τους, συμπεριλαμβάνοντας την δυνατότητα υπολογισμού ιδιοτιμών για κρίσιμα συστήματα (X-5 Monte Carlo Team, 2005). Ο κώδικας αυτός χειρίζεται μια αυθαίρετη, τρισδιάστατη δομή υλικών σε γεωμετρικά κελιά οριζόμενα από πρωτεύουσες και δευτερεύουσες επιφάνειες καθώς και τέταρτου βαθμού ελλειπτικούς τόρους. Επίσης, χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα αρχεία ενεργών διατομών. Για τα νετρόνια, συνυπολογίζονται όλες οι αντιδράσεις που περιέχονται σε συγκεκριμένες εκτιμήσεις ενεργών διατομών (όπως π.χ. ο ENDF/B-VI). Τα θερμικά νετρόνια περιγράφονται τόσο από μοντέλα ελεύθερων αερίων όσο και από μοντέλα $S(\alpha, \beta)$. Ως σημαντικές παράμετροι που καθιστούν τον MCNP κώδικα ιδιαιτέρως εύχρηστο σε πολλαπλές εφαρμογές αναφέρονται σχετικά με την πηγή: η γενική ισχύς, η δυνατότητα προσομοίωσης πηγής κρισιμότητας και η δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων επιφανειακών πηγών, σχετικά με τους ανιχνευτές: η γεωμετρία και η πολλαπλότητα αποτελεσμάτων, σχετικά με τη μείωση στατιστικού σφάλματος: η πληθώρα τεχνικών και τέλος, η ευρεία συλλογή αρχείων (βιβλιοθήκες) ενεργών διατομών συνεχούς ενέργειας (Forster, et al., 2005).

Πιο αναλυτικά, ο κώδικας MCNP χρησιμοποιεί ένα αρχείο «εισαγωγής» (input file) που δίνεται από τον χρήστη με τις απαραίτητες πληροφορίες για την έναρξη της προσομοίωσης. Οι πληροφορίες αυτές είναι η περιγραφή της γεωμετρίας του προβλήματος και των υλικών που χρησιμοποιούνται, η εκτίμηση των ενεργών διατομών, οι ιδιότητες και η θέση της πηγής

των σωματιδίων (νετρόνια, φωτόνια, ηλεκτρόνια), ο τύπος των εικονικών ανιχνευτών, ο αριθμός των ιστοριών και ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης, ώστε μετά το πέρας ενός εξ αυτών το πρόγραμμα να τερματίζει.

Μετά το πέρας της διαδικασίας ο χρήστης λαμβάνει ένα αρχείο εξόδου (output file) στο οποίο αναγράφονται όλα τα στοιχεία της χρησιμοποιούμενης γεωμετρίας και της πηγής των σωματιδίων, μαζί με τις ενεργές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα από τους εικονικούς ανιχνευτές και τη στατιστική επεξεργασία αυτών των αποτελεσμάτων. Οι τιμές που καταγράφηκαν από τους εικονικούς ανιχνευτές συνοδεύονται από το σχετικό σφάλμα το οποίο αντιστοιχεί σε μία τυπική απόκλιση.

Για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία των τιμών αυτών, γίνονται στατιστικοί έλεγχοι για κάθε εικονικό ανιχνευτή που όρισε ο χρήστης. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εκτελέσει το πρόβλημα ορίζοντας περισσότερες ιστορίες στο αρχείο εισόδου αν τα αποτελέσματα των ανιχνευτών δεν είναι στατιστικά αποδεκτά.

Συμπερασματικά στις παραγράφους που ακολουθούν, θα αναλυθεί η διαδικασία εφαρμογής του κώδικα MCNP5 και θα προσδιοριστούν οι ακόλουθες βασικές παράμετροι:

1. Η γεωμετρία του προβλήματος
2. Τα υλικά του προβλήματος
3. Η ενεργός διατομή (cross section)
4. Το είδος και η γεωμετρία της πηγής
5. Το είδος των ανιχνευτών- Επιλογή των ελασμάτων ενεργοποίησης
6. Ο εικονικός ανιχνευτής (tally)
7. Η τεχνική για την μείωση του στατιστικού σφάλματος (variance reduction technique)

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας (γεωμετρία θαλάμου θεραπείας, πηγής και εικονικών ανιχνευτών, υλικά θωράκισης και ενεργές διατομές) παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

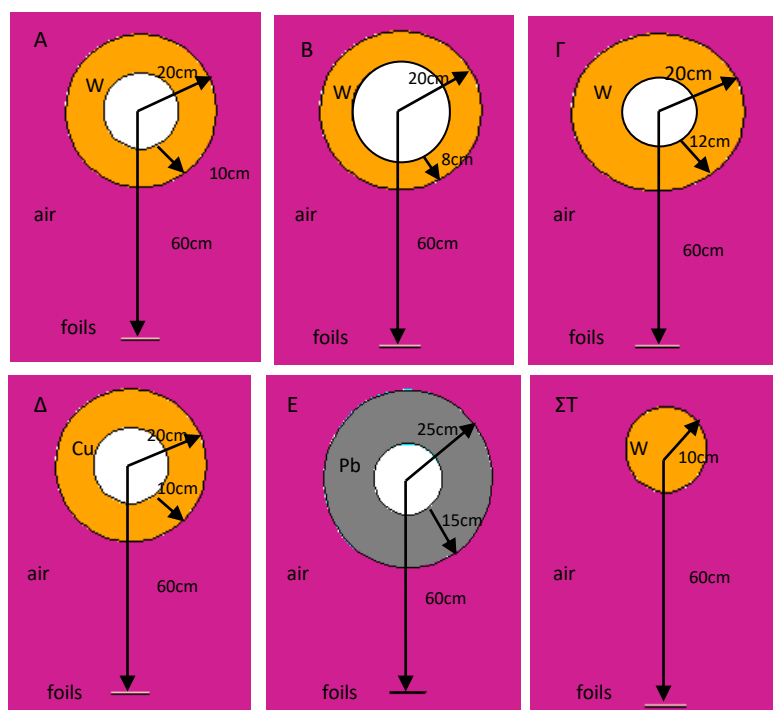
3.1.2 Το φάσμα και η γεωμετρία της πηγής νετρονίων

Για την εργασία αυτή εξετάστηκαν οι ακόλουθες γενικευμένες γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή (Πίνακας 3):

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.

Γενικευμένες γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής ιατρικού γραμμικού επιταχυντή

α/α	Γεωμετρία πηγής νετρονίων	Συμβολισμός	Σχηματική αναπαράσταση
1	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από βολφράμιο εξωτερικής ακτίνας 20 cm και εσωτερικής ακτίνας 10 cm	Vega-Carrillo source	11A
2	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από βολφράμιο (πάχους $x=8\text{cm}$) εξωτερικής ακτίνας 20 cm και εσωτερικής ακτίνας 12 cm	Point source $W(x=8\text{cm})$	11B
3	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από βολφράμιο (πάχους $x=12\text{cm}$) εξωτερικής ακτίνας 20 cm και εσωτερικής ακτίνας 8 cm	Point source $W(x=12\text{cm})$	11Γ
4	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από χαλκό (πάχους $x=10\text{cm}$) εξωτερικής ακτίνας 20 cm και εσωτερικής ακτίνας 10 cm	Point source $\text{Cu}(x=10\text{cm})$	11Δ
5	σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού από μόλυβδο (πάχους $x=15\text{cm}$) εξωτερικής ακτίνας 25 cm και εσωτερικής ακτίνας 10 cm	Point source $\text{Pb}(x=15\text{cm})$	11E
6	ισοτροπική σφαιρική πηγή ακτίνας 10cm βολφραμίου	Cell source $W(r=10\text{cm})$	11ΣΤ

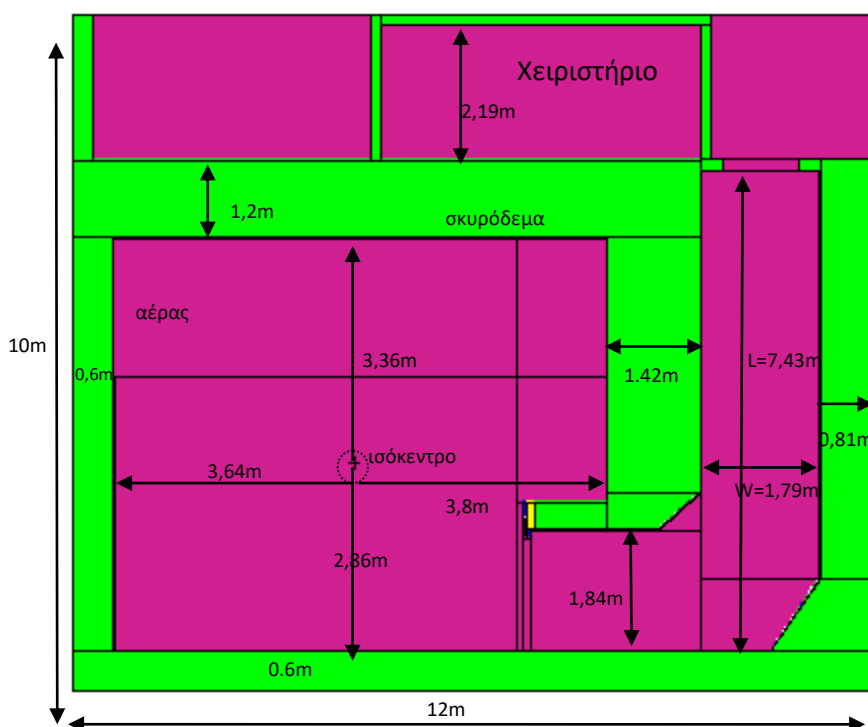


Σχήμα 11: Γεωμετρίες των πηγών νετρονίων που εξετάστηκαν

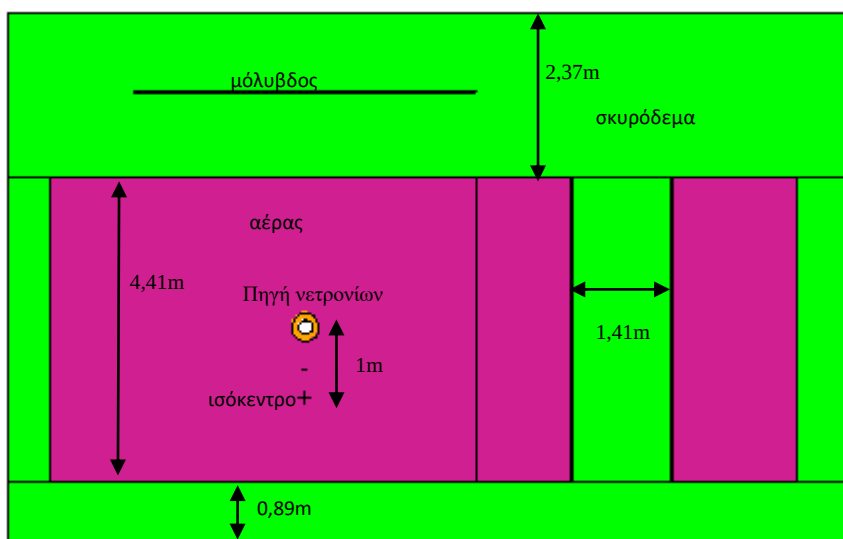
Όλες οι πηγές τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1.0 m πάνω από τη θέση του ισοκέντρου του επιταχυντή και εκπέμπουν νετρόνια με ενεργειακό φάσμα που αντιστοιχεί στο φάσμα νετρονίων που εκπέμπεται από την κεφαλή γραμμικού επιταχυντή 18MV με στόχο βολφραμίου. Για την προσομοίωση του φάσματος των νετρονίων των πηγών χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική σχέση του Tosi (βλ. κεφάλαιο 1.3).

3.1.3 Η γεωμετρία του θαλάμου γραμμικού επιταχυντή

Προσομοιώθηκε η γεωμετρία του θαλάμου θεραπείας ιατρικού γραμμικού επιταχυντή Elekta-Synergy1 18MV του νοσοκομείου Άγιος Σάββας, συνολικών διαστάσεων πλάτους 10 m , μήκους 12 m και ύψους 7.7 m (συμπεριλαμβανομένου του πάχους θωράκισης στο ταβάνι και το πάτωμα) όπως περιγράφεται στα σχήματα 12 και 13. Πιο συγκεκριμένα, ο λαβύρινθος έχει μήκος $L=7.43$ m και πλάτος $W=1.79$ m, ενώ η γλώσσα έχει πλάτος 1.42 m . Η απόσταση του ισοκέντρου από τον τοίχο του λαβυρίνθου είναι 3.8 m, καθώς και από το χειριστήριο είναι 4.56 m. Τέλος, η πηγή που προσομοιάζει την κεφαλή του γραμμικού επιταχυντή, καθώς και τα activation foils που θα αναλυθούν στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν στο 1 m και 40 cm από το ισοκέντρο αντίστοιχα. Η θωράκιση αποτελείται κυρίως από σκυρόδεμα (ordinary concrete) με ενίσχυση από φύλλα σιδήρου και μολύβδου σε κρίσιμα σημεία στους τοίχους όπου προσπίπτει η πρωτεύουσα δέσμη, καθώς και επίστρωση των επιφανειών με ξύλο για την μείωση των σκεδάσεων.



Σχήμα 12: Γεωμετρία του θαλάμου θεραπείας στο επίπεδο xy



Σχήμα 13: Γεωμετρία του θαλάμου θεραπείας στο επίπεδο xz

3.1.4 Υλικά θωράκισης

Τα υλικά θωράκισης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τη κατασκευή των τοίχων, του πατώματος και του ταβανιού του θαλάμου θεραπείας ήταν σκυρόδεμα (ordinary concrete), ξύλο (CelotexTM), μολυβδος και σίδηρος. Στο εσωτερικό του θαλάμου υπάρχει αέρας. Στον Πίνακα 4 καταγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις θωρακίσεις με τις ακριβείς συστάσεις των στοιχείων που τα αποτελούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.

Σύσταση υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη θωράκιση του θαλάμου

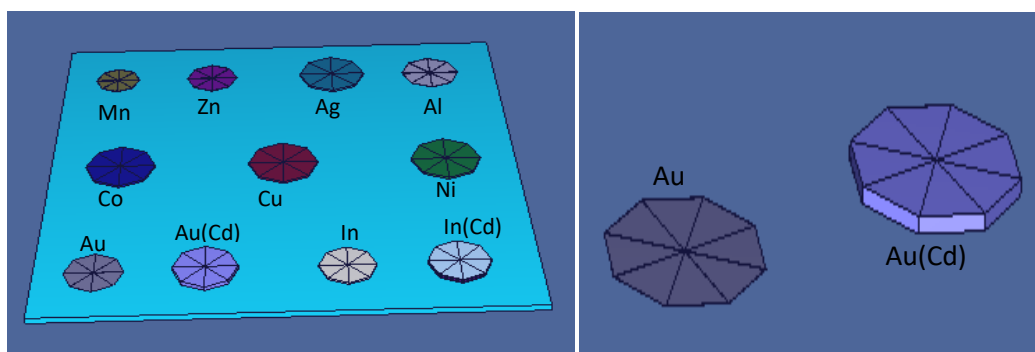
Υλικό Θωράκισης	Πυκνότητα (g/cm ³)	Σύσταση	
		Στοιχείο	w (%)
Σκυρόδεμα (concrete NBS ordinary)	2.35	H	0.0056
		O	0.4956
		Si	0.3135
		Al	0.0456
		Na	0.0171
		Ca	0.0826
		Fe	0.0122
		K	0.0192
		Mg	0.0024
Ξύλο (Celotex-C ₆ H ₁₀ O ₅)	0.25	S	0.0012
		C	0.4444
		H	0.0617
Σίδηρος + (Steel-Carbon)	7.82	O	0.4939
		C	0.005
Μόλυβδος	11.2	Fe	0.995
		Pb	1

3.1.5 Οι ενεργές διατομές

Ο κώδικας MCNP χρησιμοποιεί δεδομένα συνεχών ως προς την ενέργεια ενεργών διατομών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ενεργών διατομών που προέρχονται από τις βιβλιοθήκες Evaluated Nuclear Data File (ENDF/B vi.8) και International Reactor Dosimetry and Fusion File (IRDF v.1.05). Πιο συγκεκριμένα ο κώδικας MCNP5 επιστρατεύτηκε με στόχο τον υπολογισμό της νετρονικής ροής ανά τετραγωνικό εκατοστό και ανά νετρόνιο που εκπέμπεται από την πηγή ($n/cm^2/source\ neutron$) με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης ENDF, ενώ για τον υπολογισμό του ρυθμού αντιδράσεων ανά μονάδα όγκου για κάθε έλασμα ($reaction\ rate/cm^3$) πάρθηκαν δεδομένα ενεργών διατομών της IRDF που αποτελεί μια εξειδικευμένη βιβλιοθήκη για δοσιμετρικούς υπολογισμούς νετρονίων (Capote, et al., 2012).

3.1.6 Εικονικοί Ανιχνευτές

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου f4 (track length estimate tallies) και υπολογίζουν τη ροή νετρονίων (σε μονάδες cm^{-2} ανά νετρόνιο πηγής). Επίσης με τη βοήθεια των παραπάνω ανιχνευτών εκτιμήθηκε ο ρυθμός αντιδράσεων ανά μονάδα όγκου ($reaction\ rate/cm^3$) του υλικού. Ο υπολογισμός έγινε με βάση τον τύπο της πυρηνικής αντίδρασης που πραγματοποιείται καθώς και τον αριθμό των νουκλεονίων ανά μονάδα όγκου του εκάστοτε υλικού (number density) εκφρασμένος σε $atom/barn\cdot cm$. Για την περιγραφή των 11 ανιχνευτών ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία προσομοιώθηκαν αντίστοιχου αριθμού κυλινδρικοί εικονικοί ανιχνευτές, τοποθετημένοι πάνω σε μία πλάκα αλουμινίου ($10cm \times 10cm \times 1.5mm$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.



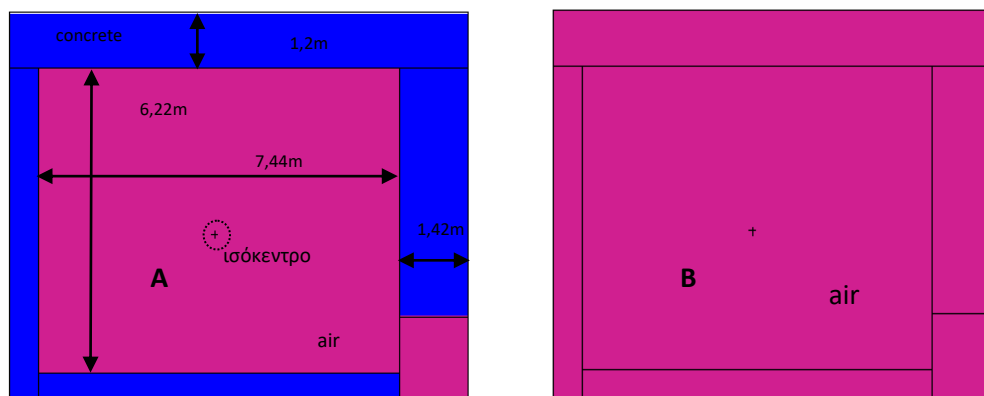
Σχήμα 14: Γεωμετρική διάταξη των εικονικών ανιχνευτών πάνω στην πλάκα αλουμινίου.

Ο χρόνος και αριθμός ιστοριών των προσομοιώσεων επιλέχθηκε έτσι ώστε το στατιστικό σφάλμα των αποτελεσμάτων να είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερο του 5% , καθώς επίσης όλα τα αποτελέσματα των υπολογισμών να περνούν τις στατιστικές δοκιμές του κώδικα. Σημειώνεται ότι το στατιστικό σφάλμα μειώνεται όσο ο χρόνος και αριθμός των ιστοριών αυξάνονται. Ισχύει άλλωστε ότι το στατιστικό σφάλμα είναι ίσο με $\frac{\sqrt{N}}{N}$, όπου N ο αριθμός ιστοριών. Αναλυτικότερα ο χρόνος τρεξίματος των αρχείων του κώδικα MCNP5 κυμάνθηκε από 1400 λεπτά έως μία εβδομάδα.

3.1.7 Επίδραση σκεδαζόμενης ακτινοβολίας

Μια άλλη παράμετρος που εξετάστηκε με τη βοήθεια της τεχνικής Monte Carlo ήταν η επίδραση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (room scatter effect) στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό εκτελέσαμε δύο τρεξίματα (2 περιπτώσεις) διαφορετικών γεωμετριών για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα foil που αναλύονται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 15).

Έτσι, στην πρώτη περίπτωση κάνοντας μια απλουστευμένη θεώρηση τόσο στη γεωμετρία όσο και στη θωράκιση (μόνο από σκυρόδεμα στους τοίχους, το πάτωμα και το ταβάνι) απομονώσαμε το κεντρικό δωμάτιο του θαλάμου θεραπείας (χωρίς το διάδρομο και χειριστήριο), ενώ αντίστοιχα στην δεύτερη περίπτωση η όλη γεωμετρία ίσων διαστάσεων με πριν, αποτελείτο μόνο από αέρα. Αντίστοιχα, τα μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης τοποθετήθηκαν στα 50cm από την πηγή (ισοτροπική σφαιρική πηγή (cell source) βολφραμίου ακτίνας 10cm).



Σχήμα 15 : Α. Απλουστευμένη γεωμετρία κεντρικού θαλάμου γραμμικού επιταχυντή στο επίπεδο xy Β. Ίσων διαστάσεων γεωμετρία αέρα στο επίπεδο xy

3.2 Πειραματική Διαδικασία

3.2.1 Ο ιατρικός γραμμικός επιταχυντής Elekta - Synergy1

Η διαδικασία της ακτινοβολήσης των δειγμάτων (activation foils) διεξήχθη στο γραμμικό επιταχυντή Elekta – Synergy1 του Νοσοκομείου Άγιος Σάββας της Αθήνας. Ο γραμμικός επιταχυντής Elekta – Synergy1 παράγει μία δέσμη φωτονίων ή ηλεκτρονίων με προεπιλεγμένη ενέργεια εντός καθορισμένου εύρους ενεργειών. Ειδικότερα, για φωτόνια ο επιταχυντής μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλή ή χαμηλή ενέργεια στα 18MV ή 6MV αντίστοιχα. Η ομοιογένεια της έντασης της δέσμης επιτυγχάνεται με ένα φίλτρο επιπέδωσης τοποθετημένο κάτω από το στόχο.

Η δέσμη κατόπιν διαμορφώνεται με τη χρήση πρωτευόντων και δευτερευόντων κατευθυντήρων. Η παρακολούθηση της δέσμης εκτελείται μέσω δοσιμετρικών καναλιών (dosimetry channels) καταγράφοντας την δόση σε MU (monitor units) και το ρυθμό δόσης σε MU/min. Η ομοιογένεια και συμμετρία της δέσμης ελέγχονται μέσω δύο θαλάμων ιονισμού τοποθετημένοι στην πορεία της. Σημειώνεται πως η δέσμη θα τερματιστεί σε περίπτωση αστάθειας του συστήματος. Η έξοδος του επιταχυντή και η ενεργειακή σταθερότητα ήταν καλύτερη από 1%. Τέλος, η ομοιογένεια και συμμετρία του πεδίου ήταν καλύτερη από 1% και 2% αντίστοιχα.

3.2.2 Χαρακτηριστικά μεταλλικών ελασμάτων ενεργοποίησης

Τα ελάσματα ενεργοποίησης (activation foils) επιλέχθηκαν με βάση τα παρακάτω κριτήρια :

- Κατάλληλος χρόνος ημιζωής των προϊόντων των πυρηνικών αντιδράσεων ώστε να είναι πρακτικά δυνατή η μέτρηση των εκπεμπόμενων ακτίνων-γ κατά την φασματοσκοπία.
- Ελαχιστοποίηση των παρεμβολών (interferences), δηλαδή προϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων που έχουν σαν αποτέλεσμα εκπομπή ακτινοβολίας-γ με ενέργεια παραπλήσια στην ενέργεια που μας ενδιαφέρει για την ανάλυση.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των ελασμάτων ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 5. Στην συνέχεια στον Πίνακα 6 καταγράφουμε τα πυρηνικά χαρακτηριστικά των υλικών στοιχείων που ακτινοβολήθηκαν.

Τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν ακτινοβολήθηκαν πάνω στην πλάκα αλουμινίου διαστάσεων ($10 \times 10 \times 0,15 \text{ cm}^3$). Οι διατομές των νουκλιδίων σε συνάρτηση με την ενέργεια

των νετρονίων δίνονται στο Σχήμα 17. Σημειώνεται η διαφορετική απόκριση των ανιχνευτών στις διαφορετικές περιοχές του φάσματος των νετρονίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.

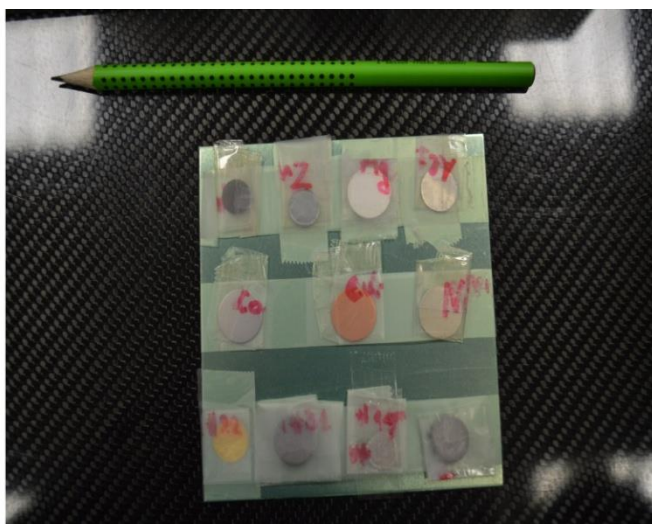
Φυσικά χαρακτηριστικά των ελασμάτων ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν

Foil	Μάζα (gr)	Ακτίνα (cm)	Πάχος (cm)	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Όγκος (cm ³)	Ατομική Πυκνότητα (atom/barn·cm)	Ισότοπο	Ισοτοπική αφθονία
Cu	0.7913	0.745	0.05	8.94	0.0885	0.0848	⁶³ Cu	0.6915
Au	0.0321	0.600	0.0015	19.32	0.0017	0.0591	¹⁹⁷ Au	1
Au(Cd)	0.0345	0.600	0.0015	19.32	0.0018	0.0591	¹⁹⁷ Au	1
In	0.2982	0.575	0.042	7.31	0.0408	0.0382	¹¹⁵ In	0.957
In(Cd)	0.2978	0.575	0.042	7.31	0.0407	0.0382	¹¹⁵ In	0.957
Co	0.7843	0.745	0.05	8.9	0.0881	0.0910	⁵⁹ Co	1
Mn	0.0563	0.500	0.01	7.2	0.0078	0.0789	⁵⁵ Mn	1

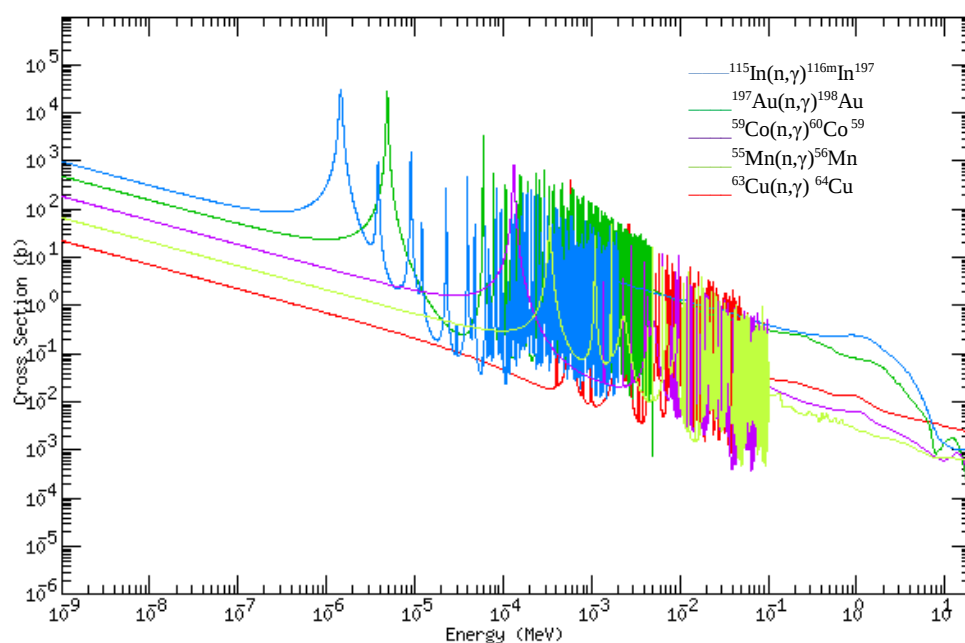
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.

Πυρηνικά χαρακτηριστικά των υλικών στοιχείων που ακτινοβολήθηκαν

Foil	Ενέργεια κατωφλίου (E _{thr}) (MeV)	Αντίδραση	E _γ (keV)	I _γ (%)	T _{1/2}	Παρεμβολή	E _{thr} παρεμβολής (MeV)
Cu	-	⁶³ Cu(n,γ) ⁶⁴ Cu	1345.8	0.48	12.7h	⁶⁵ Cu(γ,n) ⁶⁴ Cu	9.91
	-		511	35.0		⁶⁵ Cu(γ,p) ⁶⁴ Cu	7.45
	2.0	⁶³ Cu(n,a) ⁶⁰ Co	1173.2	99.9	5.27y	-	-
Au	-		1332.5	100			
	-	¹⁹⁷ Au(n,γ) ¹⁹⁸ Au	1087.7	0.23	2.69d	-	-
	-		675.9	1.06			
In	-		411.8	95.5			
	-		416.9	29.2			
	-	¹¹⁵ In(n,γ) ^{116m} In	818.7	11.5	54.15m	-	-
Co	-		1097.3	56.2			
	-		1293.5	84.4			
	-		2112.3	15.5			
Co	-	⁵⁹ Co(n,γ) ⁶⁰ Co	1173.2	99.9	5.27y	-	-
	-		1332.5	100			
	-		846.8	98.9			
Mn	6.1	⁵⁹ Co(n,a) ⁵⁶ Mn	1810.7	27.3	2.58h	-	-
	-		2113.0	14.3			
	-		846.8	98.9			
Mn	-	⁵⁵ Mn(n,γ) ⁵⁶ Mn	1810.7	27.3	2.58h	-	-
	-		2113.0	14.3			
	10.4	⁵⁵ Mn(n,2n) ⁵⁴ Mn	834.8	100	312.5d	⁵⁵ Mn(γ,n) ⁵⁴ Mn	10.23
						⁵⁵ Mn(γ,p) ⁵⁴ Mn	8.07



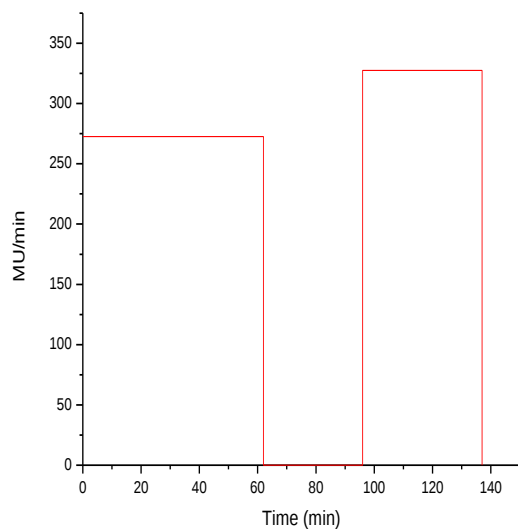
Σχήμα 16: Τα activation foils που χρησιμοποιήθηκαν πάνω στην πλάκα αλουμινίου διαστάσεων (10x10x0,15cm³)



Σχήμα 17 : Διάγραμμα των διατομών των ελασμάτων (Au, In, Co, Mn, Cu) που χρησιμοποιήθηκαν
(Πηγή : <http://atom.kaeri.re.kr>)

3.2.3 Ακτινοβολήση των δειγμάτων

Η διαδικασία της ακτινοβολήσης των μεταλλικών ελασμάτων ενεργοποίησης πραγματοποιήθηκε στις 14/12/2017. Τα ελάσματα τοποθετήθηκαν στα 60 cm από τον στόχο της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή. Η ακτινοβολήση έγινε με κλειστά διαφράγματα, πεδίο 0x0 cm² και σε δύο στάδια. Συγκεκριμένα, ακτινοβολήθηκαν για συνολικά 30000 MU σε κλάσματα των 500 MU, με ενδιάμεση διακοπή για 41 min. Για τον υπολογισμό της ροής θεωρήσαμε ότι δόθηκαν 272 MU/min σε χρόνο 62 min και 327 MU/min σε χρόνο 40 min όπως φαίνεται στο Σχήμα 18. Η ενέργεια του γραμμικού ήταν 18 MV.



Σχήμα 18: Διαγραμματική απεικόνιση του σεναρίου ακτινοβολήσης του εξετάστηκε συναρτήσει των MU/min που δόθηκαν και του χρόνου ακτινοβολήσης

Στη συνέχεια τα activation foil , μεταφέρθηκαν στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος και μετρήθηκαν στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου τύπου GEM80 που φαίνεται στο σχήμα 19.



Σχήμα 19: Μέτρηση ενός foil χρυσού στον ανιχνευτή HpGe τύπου GEM80

Για τον υπολογισμό της ροής των νετρονίων όπως καταγράφηκε από τα activation foils χρησιμοποιήθηκε η σχέση :

$$\Phi[\text{n/cm}^2\cdot\text{s}] = \frac{1}{\sigma_{eff}} \cdot \frac{C \cdot \lambda}{\varepsilon \cdot I_{\gamma} \cdot G_{\gamma} \cdot f_{tcc}} \cdot \frac{1}{\left[(1 - e^{-\lambda t_{irr1}}) \cdot e^{-\lambda(t_{d1} + t_{irr2} + t_{d2})} + (1 - e^{-\lambda t_{irr2}}) \cdot e^{-\lambda t_{d2}} \right] \cdot e^{-(1 - \lambda t_c)}}} \quad (8)$$

Όπου:

ε : η απόδοση ανίχνευσης φωτοκορυφής των ακτίνων-γ

C : το εμβαδό της αντίστοιχης φωτοκορυφής του φάσματος (net counts)
I_γ : ο αριθμός των εκπεμπόμενων ακτίνων-γ ανά διάσπαση (γ-ray abundance /yield)
f_{icc} : ο συντελεστής διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence)
G_γ : ο παράγοντας αυτό-απορρόφησης φωτονίων
λ : σταθερά διάσπασης / αποδιέγερσης [s⁻¹]
t_c : χρόνος μέτρησης (counting time)
t_{irr1}: 1^ο χρόνος ακτινοβολήσης (3720 s)
t_{irr1}: 2^ο χρόνος ακτινοβολήσης (2400 s)
t_{d1} : χρόνος αποδιέγερσης (decay time) μεταξύ της πρώτης και δεύτερης ακτινοβολήσης (t_{d1}=2040 s)
t_{d2} : χρόνος μεταξύ του τέλους της ακτινοβολήσης και αρχής της μέτρησης
σ_{eff} : effective cross section
 η οποία ορίζεται ως εξής :

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} \sigma(E) \cdot \Phi(E) dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} \varphi(E) dE} \quad (9)$$

και υπολογίζεται με τη βοήθεια του κώδικα MCNP5 στον όγκο του foil για τη συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση.

3.2.4 Βαθμονόμηση του ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HpGe)

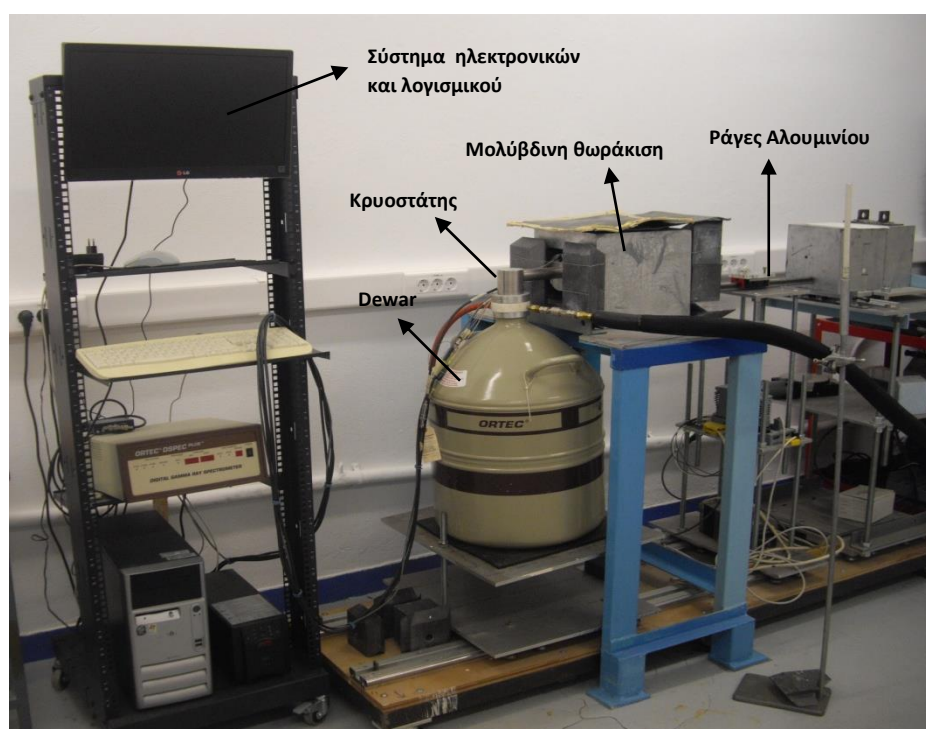
Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία, απεικονίζεται στο Σχήμα 19 και περιλαμβάνει έναν ομοαξονικό ημιαγωγό ανιχνευτή Γερμανίου τύπου p υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium - HPGe), ένα δειγματοφορέα κατάλληλο για την τοποθέτηση δειγμάτων πάνω σε ράγες αλουμινίου, οι οποίες επιτρέπουν την οριζόντια κίνηση του δείγματος και τη μεταβολή της σχετικής απόστασης του με τον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από μολύβδινη θωράκιση πάχους 5 cm (Σχήμα 20).

Ο ανιχνευτής Γερμανίου που βαθμονομήθηκε είναι τύπου GEM 80, κατασκευασμένος από την εταιρεία EG&GORTEC. Η ονομαστική διάμετρος του κρυστάλλου Γερμανίου είναι 81.5 mm και το μήκος του 57.5 mm. Η σχετική απόδοση του ανιχνευτή, όπως αυτή προσδιορίζεται σε σχέση με την απόδοση ανίχνευσης ακτίνων-γ ενός ανιχνευτή ιωδιούχου νατρίου (NaI (Tl)) μεγέθους 3'x 3', είναι ίση με 85 %. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, η οποία ορίζεται ως το εύρος μιας κορυφής αναφοράς στο ήμισυ του ύψους της (Full Width at Half Maximum-FWHM), είναι ίση με 1.66 keV για την φωτοκορυφή 1333 keV του ⁶⁰Co ενώ ο λόγος φωτοκορυφής προς Compton (peak to Compton ratio) είναι ίσος με 89:1. Για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του κρυστάλλου και να εξασφαλιστεί παράλληλα η σταθερή λειτουργία του συστήματος στην κατάλληλη θερμοκρασία, ο ανιχνευτής συνδέεται με ειδικά κατασκευασμένο δοχείο παροχής υγρού αζώτου (Dewar).

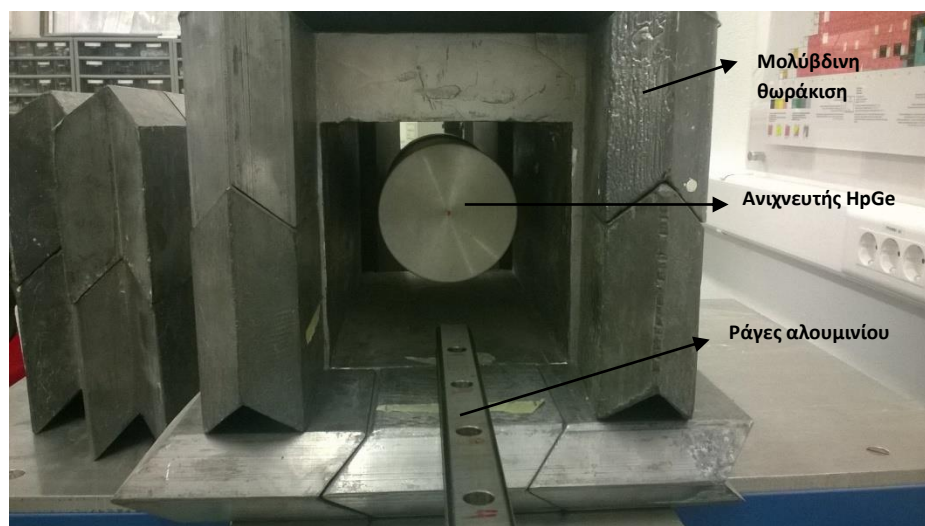
Η ανιχνευτική διάταξη συμπληρώνεται με ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ηλεκτρονικών και λογισμικού, που περιλαμβάνει ηλεκτρονική διάταξη ενίσχυσης και ψηφιοποίησης του σήματος του ανιχνευτή, αναλογικό προ-φίλτρο (profilter), αναλυτή ύψους παλμών (multi-channel analyzer) καθώς και μια ηλεκτρονική μονάδα διόρθωσης των απωλειών λόγω νεκρού χρόνου (loss free counting mode). Η συλλογή και ανάλυση του φάσματος των ακτίνων-γ πραγματοποιείται με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού γ-φασματοσκοπίας (Gamma Vision). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 7).

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.

Χαρακτηριστικά ανιχνευτικής διάταξης	
Ανιχνευτής	Γερμάνιο-HpGe
Τύπος	GEM 80
Σχετική απόδοση	85%
FWHM	1.66keV
Peak to Compton ratio	89:1
Μήκος Κρυστάλλου	57.5mm
Διάμετρος Κρυστάλλου	81.5mm



Σχήμα 20: Διάταξης γ-φασματοσκοπίας



Σχήμα 21: Ανιχνευτής ΗρGe (τύπου GEM 80)

Η βαθμονόμηση (ενέργειας και απόδοσης), πραγματοποιήθηκε με χρήση πρότυπων ραδιενεργών πηγών από δύο διαφορετικά σετ. Τα χαρακτηριστικά των πηγών δίδονται στον Πίνακα 8.

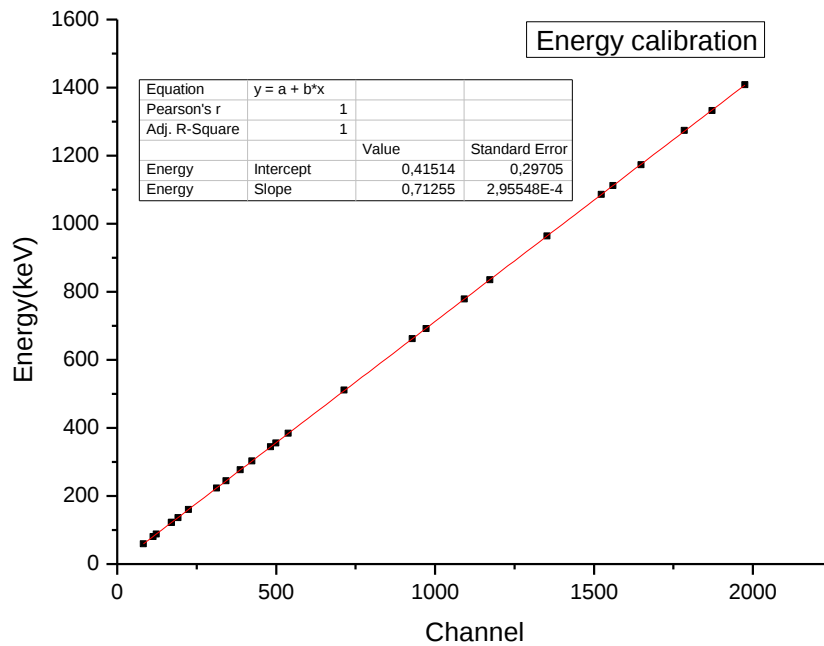
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.

Ενεργότητες πρότυπων ραδιενεργών πηγών (10/2017)

Ραδιοϊσότοπο	Ενεργότητα (kBq)	
	A σετ Πηγών	B σετ Πηγών
^{133}Ba ($T_{1/2}=10,58\text{y}$)	31.3 ± 0.94	91.54 ± 3.22
^{57}Co ($T_{1/2}=0,745\text{y}$)	4.54 ± 0.14	-
^{109}Cd ($T_{1/2}=1.267\text{y}$)	10.44 ± 0.32	-
^{137}Cs ($T_{1/2}=30.17\text{y}$)	36.18 ± 1.08	250.45 ± 5.58
^{54}Mn ($T_{1/2}=0.855\text{y}$)	5.83 ± 0.18	-
^{60}Co ($T_{1/2}=5.272\text{y}$)	24.7 ± 0.77	21.31 ± 0.85
^{152}Eu ($T_{1/2}=13.515\text{y}$)	3.55 ± 0.13	-
^{22}Na ($T_{1/2}=2.605\text{y}$)	2.035 ± 0.63	1.1 ± 0.04
^{241}Am ($T_{1/2}=432.7\text{y}$)	-	338.85 ± 11.68

Ενεργειακή Βαθμονόμηση

Οι πρότυπες ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργειακή βαθμονόμηση καλύπτουν ενεργειακό φάσμα από (59.5-1408.0)keV. Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα, υπάρχει γραμμική σχέση εξάρτησης της ενέργειας συναρτήσει των καναλιών του ανιχνευτή (Σχήμα 22).



Σχήμα 22: Ενεργειακή βαθμονόμηση HpGe

Βαθμονόμηση απόδοσης

Η απόδοση της φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency-FEPE) καθορίζει το ποσοστό των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας εκπεμπόμενων από μία πηγή, το οποίο συνεισφέρει στην δημιουργία φωτοκορυφής στο φάσμα. Η απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\text{CPS}}{\text{gammas/s}} \quad (10)$$

όπου :

$$\text{CPS} = \frac{\text{NET}}{\text{Live Time}} \quad (11)$$

NET : ο καθαρός αριθμός κρούσεων της φωτοκορυφής

Live Time (s) : ο χρόνος μέτρησης του ανιχνευτή.

$$\text{gammas / s} = I_{\gamma} (\text{Yield}) \cdot A$$

I_{γ} : ο αριθμός των εκπεμπόμενων ακτίνων-γ ανά διάσπαση (γ-ray abundance /yield)

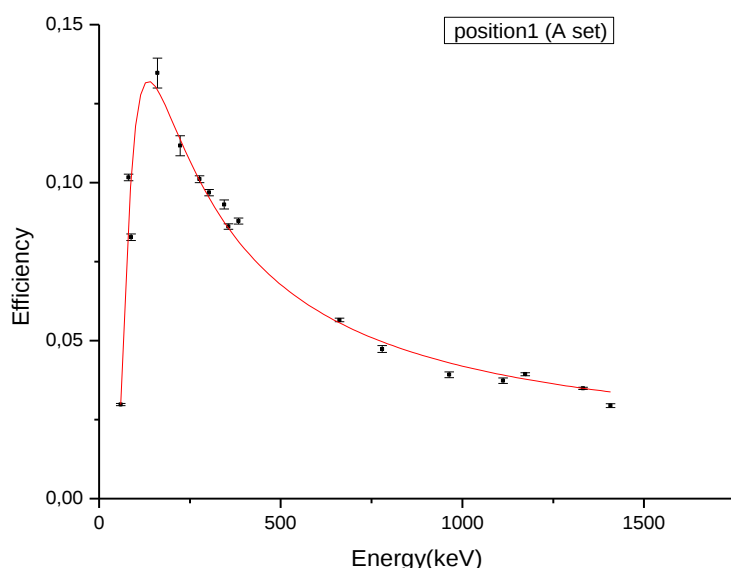
$A(\text{Bq})$: η ενεργότητα της πηγής τη στιγμή της βαθμονόμησης του ανιχνευτή (όπως προκύπτει από τον εκθετικό νόμο)

Η σχετική αβεβαιότητα υπολογίστηκε ως εξής:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\sigma_{\text{Net}}^2 + \sigma_A^2} \quad (12)$$

Η τιμή της απόδοσης εξαρτάται από τη γεωμετρία της πηγής-δείγματος (μέγεθος, πυκνότητα), καθώς και από την απόσταση της από τον ανιχνευτή.

Η βαθμονόμηση της απόδοσης για τις πρότυπες πηγές που αναγράφονται στον Πίνακα 8 πραγματοποιήθηκε για πέντε διαφορετικές αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή (1 cm, 6 cm, 12 cm, 18 cm, 24 cm). Το διάγραμμα που απεικονίζει την καμπύλη απόδοσης για τις προαναφερθείσες αποστάσεις βρίσκεται στο Παράρτημα Β. Η απόσταση που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των ελασμάτων ενεργοποίησης της πειραματικής διαδικασίας επιλέχθηκε να είναι το 1cm και δίνεται στο ακόλουθο γράφημα :



Σχήμα 23: Καμπύλη απόδοσης του ανιχνευτή HpGe για απόσταση 1cm

Η μεταβολή της απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας επιτεύχθηκε με τη χρήση ενός «non-linear curved» fit. Η εξίσωση και οι συντελεστές παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.

Εξίσωση και συντελεστές του fit της καμπύλης απόδοσης για απόσταση 1cm

Εξίσωση		$P_0+P_1 \cdot x^{-1}+P_2 \cdot x^{-2}+P_3 \cdot x^{-3}+P_4 \cdot x^{-4}+P_5 \cdot x^{-5}$
Adj. R-Square		0,95115
Efficiency	Συντελεστές	Τιμές
	P ₀	0.0124
	P ₁	31.32926
	P ₂	-1721.23585
	P ₃	-56037.97156
	P ₄	489098.28542
	P ₅	1.52179E8

Ένα φαινόμενο που επηρέασε τις μετρούμενες κρούσεις στον ανιχνευτή γερμανίου λόγω των διασπάσεων των πρότυπων ραδιενεργών πηγών και για το οποίο χρειάστηκε να γίνουν διορθώσεις στην καμπύλη απόδοσης, είναι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence). Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης περιγράφεται ως η ταυτόχρονη ανίχνευση από το ανιχνευτικό σύστημα, δύο ή και περισσότερων φωτονίων που εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο του διαγράμματος διάσπασης ενός πυρήνα ραδιενεργού

ισοτόπου. Η ύπαρξη των αθροιστικών φωτονίων οφείλεται στην αντικειμενική αδυναμία της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται, να παρακολουθήσει ορθά την εξέλιξη του φαινομένου και να αντιληφθεί τα δύο ή και περισσότερα φωτόνια ως μεμονωμένα και όχι ως ένα (Chionis, et al., 2014).

Ως εκ τούτου σύμφωνα με τα παραπάνω κρίθηκε απαραίτητη η διόρθωση της καμπύλης απόδοσης του ανιχνευτή με συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, οι οποίοι υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος «TrueCoinc» με αβεβαιότητα 2%.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Υπολογισμός της ροής των νετρονίων του ιατρικού γραμμικού επιταχυντή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ακτινοβολήση των ελασμάτων ενεργοποίησης διενεργήθηκε σε δυο στάδια, με συνολικό χρόνο ακτινοβολήσης τα 5760 δευτερόλεπτα.

Όσον αφορά τους επιμέρους χρόνους ακτινοβολήσης (1^ο, 2^ο στάδιο), αποδιέγερσης (t_{d1} , t_{d2}) και μέτρησης των activation κατά την γ-φασματοσκοπία (t_c) παραθέτουμε το χρονοδιάγραμμα της πειραματικής διαδικασίας στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 10).

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.

Χρόνοι εκτέλεσης πειραματικής διαδικασίας

Ελάσματα	λ (s ⁻¹)	T _{irr1} (s)	T _{irr2} (s)	t _{d1} * (s)	Τέλος Ακτινοβολήσης	Έναρξη μέτρησης	t _{d2} * (s)	t _c (s)
Cu	1.52E-05	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	15/12/2017 2:49	15660	904.5
Au	2.98E-06	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	15/12/2017 3:15	17220	2044.6
Au(Cd)	2.98E-06	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	15/12/2017 3:50	19320	2000.7
In	2.13E-04	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	14/12/2017 23:21	3180	298.4
In(Cd)	2.13E-04	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	14/12/2017 23:28	3600	354.5
Co	4.17E-09	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	5/01/2018 14:39	1872660	604536.0
Mn	7.46E-05	3720	2400	2040	14/12/2017 22:28	15/12/2017 1:20	10320	1018.9

*(t_{d1} = Χρόνος μεταξύ της πρώτης και δεύτερης ακτινοβολήσης, t_{d2} = Έναρξη μέτρησης – Τέλος ακτινοβολήσης, $T_{total} = T_{irr1} + T_{irr2} = 5760s$)

Μετά την ακτινοβολήση οι εκπεμπόμενες ακτίνες-γ κατά την αποδιέγερση των πυρήνων που σχηματίστηκαν κατά την νετρονική ενεργοποίηση για κάθε νουκλίδιο, μετρήθηκαν στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (Πίνακας 11). Τα ελάσματα ενεργοποίησης κατά τη γ-φασματοσκοπία τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1 cm από τον ανιχνευτή γερμανίου με αβεβαιότητα απόδοσης 8.43%. Ο χρόνος μέτρησης, όπως διαπιστώνουμε και από τον πίνακα 11 ήταν διαφορετικός για κάθε έλασμα με κριτήριο καταγραφής ικανού αριθμού καθαρών παλμών (net counts) με αντίστοιχη σχετική αβεβαιότητα μικρότερη του 10%. Στη συνέχεια, ο αριθμός των καθαρών παλμών υφίστανται διόρθωση με τη βοήθεια των συντελεστών του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης (TCC) που υπολογίστηκαν με χρήση του προγράμματος «TrueCoinc» και των συντελεστών αυτό-απορρόφησης φωτονίων (G_γ) μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων (Πίνακας 12). Η αβεβαιότητα των τιμών των συντελεστών TCC, G_γ εκτιμήθηκε στα 2% και 0.05% αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 11.

Αποτελέσματα γ-φασματοσκοπίας των activation foils

Foils	Αντίδραση	T _{1/2}	T _c (s)	E _γ (keV)	I _γ (%)	Net counts	Απόδοση HpGe (στην θέση 1cm)
Cu	⁶³ Cu(n,γ) ⁶⁴ Cu	12.70h	904.54	511	35.0	1501 ± 54	6.67·10 ⁻²
				1345.8	0.48	-	3.47·10 ⁻²
	⁶³ Cu(n,a) ⁶⁰ Co	5.27y		1173.2	99.9	-	3.78·10 ⁻²
				1332.5	100	-	3.49·10 ⁻²
Au	¹⁹⁷ Au(n,γ) ¹⁹⁸ Au	2.69d	2044.6	411.8	95.5	1075 ± 34	7.76·10 ⁻²
Au(Cd)	¹⁹⁷ Au(n,γ) ¹⁹⁸ Au	2.69d	2000.7	411.8	95.5	785 ± 30	7.76·10 ⁻²
In	¹¹⁵ In(n,γ) ^{116m} In	54.15m	298.38	416.9	29.2	7026 ± 87	7.69·10 ⁻²
				818.7	11.5	1700 ± 49	4.80·10 ⁻²
				1097.3	56.2	7575 ± 91	3.95·10 ⁻²
				1293.5	84.4	9458 ± 101	3.56·10 ⁻²
In(Cd)	¹¹⁵ In(n,γ) ^{116m} In	54.15m	354.54	2112.3	15.5	1244 ± 46	2.68·10 ⁻²
				416.9	29.2	2992 ± 57	7.69·10 ⁻²
				818.7	11.5	698 ± 35	4.80·10 ⁻²
				1097.3	56.2	3064 ± 57	3.95·10 ⁻²
Co	⁵⁹ Co(n,γ) ⁶⁰ Co	5.27y	604536	1293.5	84.4	4079 ± 65	3.56·10 ⁻²
				2112.3	15.5	549 ± 24	2.68·10 ⁻²
				1173.2	99.9	2555 ± 102	3.78·10 ⁻²
				1332.5	100	2430 ± 122	3.49·10 ⁻²
Mn	⁵⁸ Co(n,a) ⁵⁶ Mn	2.58h	1018.9	846.8	98.9	-	4.69·10 ⁻²
				1810.7	27.3	-	2.92·10 ⁻²
				2113.0	14.3	-	2.68·10 ⁻²
				846.8	98.9	1018 ± 32	4.69·10 ⁻²
	⁵⁵ Mn(n,γ) ⁵⁶ Mn	2.58h		1810.7	27.3	138 ± 11	2.92·10 ⁻²
				2113.0	14.3	80 ± 5	2.68·10 ⁻²
				55Mn(n,2n) ⁵⁴ Mn	312.5d		834.8

ΠΙΝΑΚΑΣ 12.

Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης (Tcc) και αυτο-απορρόφησης φωτονίων (gamma self-shielding factor)

Αντίδραση	Ενέργεια(keV)	TCC	G _γ
⁶³ Cu(n,γ) ⁶⁴ Cu	511	1	0.969
¹⁹⁷ Au(n,γ) ¹⁹⁸ Au	411.8	1	0.991
¹¹⁵ In(n,γ) ^{116m} In	416.9	0.650	0.975
	818.7	0.605	0.983
	1097.3	0.747	0.985
	1293.5	0.731	0.987
	2112.3	0.831	0.987
⁵⁹ Co(n,γ) ⁶⁰ Co	1173.2	0.754	0.978
	1332.5	0.763	0.979
⁵⁵ Mn(n,γ) ⁵⁶ Mn	846.8	0.878	0.994
	1810.7	0.779	0.994
	2113.0	0.779	0.993

Υπολογισμός ενεργού διατομής

Με τη βοήθεια του κώδικα MCNP5 όπου προσομοιώθηκε η γεωμετρία του θαλάμου θεραπείας, οι ακριβείς διαστάσεις των παθητικών ανιχνευτών και οι πηγές των νετρονίων που εξετάστηκαν (βλ. κεφάλαιο 3.1.2) υπολογίστηκαν μέσω της σχέσης (9) οι ενεργές διατομές για τα ελάσματα και τις πυρηνικές αντιδράσεις σ_{eff} (effective cross section) που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 13.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13.

Υπολογισμός effective cross section για τις γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής του επιταχυντή που εξετάστηκαν (βλ. Πίνακα 3)

Ελάσματα	Αντίδραση	σ_{eff} (barns)					
		Vega-Carrillo source	Point source W(x=8cm)	Point source W(x=12cm)	Point source Cu(x=10cm)	Point source Pb(x=15cm)	Cell source W(r=10cm)
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	$(1.68 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}$	$(1.50 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}$	$(1.59 \pm 0.06) \cdot 10^{-3}$	$(1.54 \pm 0.05) \cdot 10^{-3}$	$(1.74 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$	$(1.63 \pm 0.05) \cdot 10^{-3}$
Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	$(6.24 \pm 0.48) \cdot 10^{-4}$	$(8.58 \pm 0.98) \cdot 10^{-4}$	$(6.85 \pm 0.56) \cdot 10^{-4}$	$(9.51 \pm 0.93) \cdot 10^{-4}$	$(1.24 \pm 0.10) \cdot 10^{-3}$	$(6.83 \pm 0.47) \cdot 10^{-4}$
Au(Cd)	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	$(4.73 \pm 0.44) \cdot 10^{-4}$	$(4.36 \pm 0.55) \cdot 10^{-4}$	$(4.09 \pm 0.43) \cdot 10^{-4}$	$(5.06 \pm 0.50) \cdot 10^{-4}$	$(8.46 \pm 0.71) \cdot 10^{-4}$	$(6.04 \pm 0.60) \cdot 10^{-4}$
In	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$	$(7.99 \pm 0.21) \cdot 10^{-3}$	$(8.61 \pm 0.35) \cdot 10^{-3}$	$(8.33 \pm 0.33) \cdot 10^{-3}$	$(9.07 \pm 0.37) \cdot 10^{-3}$	$(9.40 \pm 0.33) \cdot 10^{-3}$	$(9.25 \pm 0.36) \cdot 10^{-3}$
In(Cd)	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$	$(3.10 \pm 0.17) \cdot 10^{-3}$	$(2.75 \pm 0.20) \cdot 10^{-3}$	$(2.61 \pm 0.18) \cdot 10^{-3}$	$(2.78 \pm 0.18) \cdot 10^{-3}$	$(3.44 \pm 0.24) \cdot 10^{-3}$	$(2.81 \pm 0.21) \cdot 10^{-3}$
Co	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	$(9.45 \pm 0.20) \cdot 10^{-3}$	$(1.06 \pm 0.03) \cdot 10^{-2}$	$(1.11 \pm 0.03) \cdot 10^{-2}$	$(1.09 \pm 0.03) \cdot 10^{-2}$	$(1.21 \pm 0.03) \cdot 10^{-2}$	$(1.15 \pm 0.03) \cdot 10^{-2}$
Mn	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	$(3.10 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$	$(3.26 \pm 0.21) \cdot 10^{-4}$	$(3.26 \pm 0.13) \cdot 10^{-4}$	$(3.96 \pm 0.19) \cdot 10^{-4}$	$(3.78 \pm 0.14) \cdot 10^{-4}$	$(3.87 \pm 0.21) \cdot 10^{-4}$

Επομένως, με βάση τα δεδομένα και αποτελέσματα που συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν στους παραπάνω πίνακες (Πίνακες 10-13) και σύμφωνα με τη σχέση (8) υπολογίστηκε η νετρονική ροή ανά τετραγωνικό εκατοστό για κάθε ένα από τα ελάσματα ενεργοποίησης με βάση τις 6 γεωμετρίες της πηγής νετρονίων που αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.1.2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 14 και 15.

Για την εύρεση της ροής νετρονίων στις περιπτώσεις των ελασμάτων In, In(Cd), Co, Mn χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος υπολογισμού του σταθμισμένου μέσου, που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ. Στον Πίνακα 15 υπολογίστηκε επίσης η μέση τιμή και διασπορά της ροής νετρονίων των 7 ελασμάτων (foils) με τη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου για την εκάστοτε γεωμετρία πηγής που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ο δείκτης CV (coefficient of variation), ο οποίος ορίζεται ως :

$$CV = \frac{\text{Total error}}{\bar{X}} \quad (10)$$

Επομένως η ελαχιστοποίηση του συντελεστή CV, οδηγεί σε μειωμένη διασπορά των τιμών της νετρονικής ροής γύρω από την μέση τιμή για το εκάστοτε έλασμα ενεργοποίησης και γενικευμένης γεωμετρίας προσομοίωσης της κεφαλής με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μέγιστη σύγκλιση της ροής νετρονίων που προσδιορίζεται μέσω των διαφορετικών ελασμάτων. Η σύγκλιση αυτή των τιμών της νετρονικής ροής για τα 7 ακτινοβοληθέντα ελάσματα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα και δείκτη καταλληλότητας της γεωμετρίας περιγραφής της κεφαλής του επιταχυντή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 14.

Υπολογισμός της ροής νετρονίων στα 60 cm από το στόχο της κεφαλής γραμμικού επιταχυντή με χρήση των 6 γεωμετριών πηγής νετρονίων για 30000 MU

Foil	Αντίδραση	E γ (keV)	Φ (n/cm ²)					
			Vega-Carrillo source	Point source W(x=8cm)	Point source W(x=12cm)	Point source Cu(x=10cm)	Point source Pb(x=15cm)	Cell source W(r=10cm)
Cu Au Au(Cd)	⁶³ Cu(n, γ) ⁶⁴ Cu	511	(3.63 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(4.08 $\pm$ 0.38)·10 ⁹	(3.83 $\pm$ 0.37)·10 ⁹	(3.96 $\pm$ 0.37)·10 ⁹	(3.51 $\pm$ 0.36)·10 ⁹	(3.74 $\pm$ 0.35)·10 ⁹
	¹⁹⁷ Au(n, γ) ¹⁹⁸ Au	411.8	(3.88 $\pm$ 0.47)·10 ⁹	(2.82 $\pm$ 0.41)·10 ⁹	(3.54 $\pm$ 0.44)·10 ⁹	(2.55 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(1.95 $\pm$ 0.23)·10 ⁹	(3.55 $\pm$ 0.41)·10 ⁹
	¹⁹⁷ Au(n, γ) ¹⁹⁸ Au	411.8	(3.85 $\pm$ 0.51)·10 ⁹	(4.18 $\pm$ 0.66)·10 ⁹	(4.44 $\pm$ 0.63)·10 ⁹	(3.60 $\pm$ 0.49)·10 ⁹	(2.15 $\pm$ 0.27)·10 ⁹	(3.01 $\pm$ 0.41)·10 ⁹
In	¹¹⁵ In(n, γ) ^{116m} In	416.9	(3.96 $\pm$ 0.38)·10 ⁹	(3.67 $\pm$ 0.35)·10 ⁹	(3.80 $\pm$ 0.37)·10 ⁹	(3.48 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(3.36 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(3.42 $\pm$ 0.33)·10 ⁹
		818.7	(4.16 $\pm$ 0.40)·10 ⁹	(3.85 $\pm$ 0.38)·10 ⁹	(3.98 $\pm$ 0.40)·10 ⁹	(3.67 $\pm$ 0.36)·10 ⁹	(3.53 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(3.59 $\pm$ 0.36)·10 ⁹
		1097.3	(3.73 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(3.45 $\pm$ 0.33)·10 ⁹	(3.57 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(3.28 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(3.16 $\pm$ 0.30)·10 ⁹	(3.21 $\pm$ 0.31)·10 ⁹
		1293.5	(3.51 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(3.25 $\pm$ 0.31)·10 ⁹	(3.36 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(3.08 $\pm$ 0.30)·10 ⁹	(2.98 $\pm$ 0.28)·10 ⁹	(3.02 $\pm$ 0.29)·10 ⁹
		2112.3	(2.93 $\pm$ 0.29)·10 ⁹	(2.71 $\pm$ 0.28)·10 ⁹	(2.80 $\pm$ 0.29)·10 ⁹	(2.57 $\pm$ 0.26)·10 ⁹	(2.49 $\pm$ 0.25)·10 ⁹	(2.52 $\pm$ 0.26)·10 ⁹
In(Cd)	¹¹⁵ In(n, γ) ^{116m} In	416.9	(4.02 $\pm$ 0.42)·10 ⁹	(4.53 $\pm$ 0.52)·10 ⁹	(4.77 $\pm$ 0.54)·10 ⁹	(4.49 $\pm$ 0.49)·10 ⁹	(3.62 $\pm$ 0.41)·10 ⁹	(4.43 $\pm$ 0.51)·10 ⁹
		818.7	(4.06 $\pm$ 0.46)·10 ⁹	(4.58 $\pm$ 0.57)·10 ⁹	(4.83 $\pm$ 0.59)·10 ⁹	(4.55 $\pm$ 0.54)·10 ⁹	(3.67 $\pm$ 0.45)·10 ⁹	(4.48 $\pm$ 0.56)·10 ⁹
		1097.3	(3.59 $\pm$ 0.37)·10 ⁹	(4.05 $\pm$ 0.47)·10 ⁹	(4.26 $\pm$ 0.48)·10 ⁹	(4.01 $\pm$ 0.44)·10 ⁹	(3.23 $\pm$ 0.36)·10 ⁹	(3.95 $\pm$ 0.46)·10 ⁹
		1293.5	(3.60 $\pm$ 0.37)·10 ⁹	(4.06 $\pm$ 0.47)·10 ⁹	(4.28 $\pm$ 0.48)·10 ⁹	(4.03 $\pm$ 0.44)·10 ⁹	(3.25 $\pm$ 0.36)·10 ⁹	(3.97 $\pm$ 0.46)·10 ⁹
		2112.3	(3.07 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(3.47 $\pm$ 0.42)·10 ⁹	(3.65 $\pm$ 0.44)·10 ⁹	(3.44 $\pm$ 0.40)·10 ⁹	(2.77 $\pm$ 0.33)·10 ⁹	(3.39 $\pm$ 0.41)·10 ⁹
Co	⁵⁹ Co(n, γ) ⁶⁰ Co	1173.2	(3.66 $\pm$ 0.35)·10 ⁹	(3.25 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(3.11 $\pm$ 0.31)·10 ⁹	(3.17 $\pm$ 0.31)·10 ⁹	(2.86 $\pm$ 0.29)·10 ⁹	(2.99 $\pm$ 0.30)·10 ⁹
		1332.5	(3.71 $\pm$ 0.37)·10 ⁹	(3.31 $\pm$ 0.35)·10 ⁹	(3.15 $\pm$ 0.33)·10 ⁹	(3.22 $\pm$ 0.33)·10 ⁹	(2.91 $\pm$ 0.30)·10 ⁹	(3.04 $\pm$ 0.32)·10 ⁹
Mn	⁵⁵ Mn(n, γ) ⁵⁶ Mn	846.8	(3.04 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(2.89 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(2.90 $\pm$ 0.29)·10 ⁹	(2.38 $\pm$ 0.25)·10 ⁹	(2.49 $\pm$ 0.25)·10 ⁹	(2.44 $\pm$ 0.26)·10 ⁹
		1810.7	(2.71 $\pm$ 0.35)·10 ⁹	(2.57 $\pm$ 0.34)·10 ⁹	(2.58 $\pm$ 0.32)·10 ⁹	(2.12 $\pm$ 0.27)·10 ⁹	(2.22 $\pm$ 0.27)·10 ⁹	(2.17 $\pm$ 0.28)·10 ⁹
		2113.0	(3.26 $\pm$ 0.39)·10 ⁹	(3.10 $\pm$ 0.39)·10 ⁹	(3.10 $\pm$ 0.36)·10 ⁹	(2.55 $\pm$ 0.30)·10 ⁹	(2.67 $\pm$ 0.30)·10 ⁹	(2.61 $\pm$ 0.31)·10 ⁹

ΠΙΝΑΚΑΣ 15.

Η νετρονική ροή που μετρήθηκε από τα 7 ελάσματα ενεργοποίησης και τις 6 γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή που διερευνήθηκαν για 30000 MU

Foil	$\Phi(\text{n/cm}^2)$					
	Vega-Carrillo source	Point source W(x=8cm)	Point source W(x=12cm)	Point source Cu(x=10cm)	Point source Pb(x=15cm)	Cell source W(r=10cm)
Cu	$(3.63 \pm 0.34) \cdot 10^9$	$(4.08 \pm 0.38) \cdot 10^9$	$(3.83 \pm 0.37) \cdot 10^9$	$(3.96 \pm 0.37) \cdot 10^9$	$(3.51 \pm 0.36) \cdot 10^9$	$(3.74 \pm 0.35) \cdot 10^9$
Au	$(3.88 \pm 0.47) \cdot 10^9$	$(2.82 \pm 0.41) \cdot 10^9$	$(3.54 \pm 0.44) \cdot 10^9$	$(2.55 \pm 0.34) \cdot 10^9$	$(1.95 \pm 0.23) \cdot 10^9$	$(3.55 \pm 0.41) \cdot 10^9$
Au(Cd)	$(3.85 \pm 0.51) \cdot 10^9$	$(4.18 \pm 0.66) \cdot 10^9$	$(4.44 \pm 0.63) \cdot 10^9$	$(3.60 \pm 0.49) \cdot 10^9$	$(2.15 \pm 0.27) \cdot 10^9$	$(3.01 \pm 0.41) \cdot 10^9$
In	$(3.68 \pm 0.42) \cdot 10^9$	$(3.40 \pm 0.40) \cdot 10^9$	$(3.52 \pm 0.42) \cdot 10^9$	$(3.23 \pm 0.38) \cdot 10^9$	$(3.12 \pm 0.36) \cdot 10^9$	$(3.17 \pm 0.37) \cdot 10^9$
In(Cd)	$(3.66 \pm 0.45) \cdot 10^9$	$(4.13 \pm 0.55) \cdot 10^9$	$(4.35 \pm 0.56) \cdot 10^9$	$(4.10 \pm 0.52) \cdot 10^9$	$(3.31 \pm 0.43) \cdot 10^9$	$(4.04 \pm 0.53) \cdot 10^9$
Co*	$(3.68 \pm 0.34) \cdot 10^9$	$(3.28 \pm 0.31) \cdot 10^9$	$(3.13 \pm 0.30) \cdot 10^9$	$(3.19 \pm 0.31) \cdot 10^9$	$(2.88 \pm 0.28) \cdot 10^9$	$(3.01 \pm 0.29) \cdot 10^9$
Mn	$(3.03 \pm 0.34) \cdot 10^9$	$(2.88 \pm 0.34) \cdot 10^9$	$(2.88 \pm 0.31) \cdot 10^9$	$(2.37 \pm 0.26) \cdot 10^9$	$(2.48 \pm 0.27) \cdot 10^9$	$(2.43 \pm 0.28) \cdot 10^9$
Μέση ροή $\bar{x}$	$3.61 \cdot 10^9$	$3.54 \cdot 10^9$	$3.75 \cdot 10^9$	$3.27 \cdot 10^9$	$2.45 \cdot 10^9$	$3.39 \cdot 10^9$
Total error	$0.22 \cdot 10^9$	$0.54 \cdot 10^9$	$0.29 \cdot 10^9$	$0.56 \cdot 10^9$	$0.61 \cdot 10^9$	$0.29 \cdot 10^9$
CV	6.09%	15.25%	7.73%	17.13%	25.10%	8.55%

* Διαβαθμονήση JRC

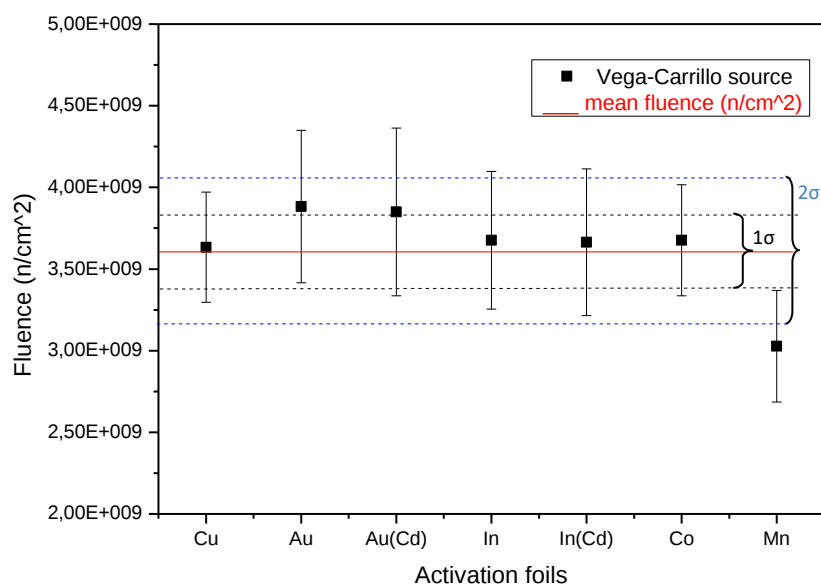
ΠΙΝΑΚΑΣ 16.

Η νετρονική ροή (εκφρασμένη σε $\text{n/cm}^2 \cdot \text{Gy}$) για τα 7 activation foils και τις 6 απλουστευμένες γεωμετρίες πηγών προσομοίωσης της κεφαλής γραμμικού επιταχυντή που διερευνήθηκαν για 30000 MU

Foil	$\Phi(\text{n/cm}^2 \cdot \text{Gy})$					
	Vega-Carrillo source	Point source W(x=8cm)	Point source W(x=12cm)	Point source Cu(x=10cm)	Point source Pb(x=15cm)	Cell source W(r=10cm)
Cu	$(1.21 \pm 0.11) \cdot 10^7$	$(1.36 \pm 0.13) \cdot 10^7$	$(1.28 \pm 0.12) \cdot 10^7$	$(1.32 \pm 0.12) \cdot 10^7$	$(1.17 \pm 0.12) \cdot 10^7$	$(1.25 \pm 0.12) \cdot 10^7$
Au	$(1.29 \pm 0.16) \cdot 10^7$	$(0.94 \pm 0.14) \cdot 10^7$	$(1.18 \pm 0.15) \cdot 10^7$	$(0.85 \pm 0.11) \cdot 10^7$	$(0.65 \pm 0.08) \cdot 10^7$	$(1.18 \pm 0.14) \cdot 10^7$
Au(Cd)	$(1.28 \pm 0.17) \cdot 10^7$	$(1.39 \pm 0.22) \cdot 10^7$	$(1.48 \pm 0.21) \cdot 10^7$	$(1.20 \pm 0.17) \cdot 10^7$	$(0.72 \pm 0.09) \cdot 10^7$	$(1.00 \pm 0.14) \cdot 10^7$
In	$(1.23 \pm 0.14) \cdot 10^7$	$(1.13 \pm 0.14) \cdot 10^7$	$(1.17 \pm 0.14) \cdot 10^7$	$(1.08 \pm 0.13) \cdot 10^7$	$(1.04 \pm 0.12) \cdot 10^7$	$(1.06 \pm 0.13) \cdot 10^7$
In(Cd)	$(1.22 \pm 0.15) \cdot 10^7$	$(1.38 \pm 0.18) \cdot 10^7$	$(1.45 \pm 0.19) \cdot 10^7$	$(1.37 \pm 0.17) \cdot 10^7$	$(1.10 \pm 0.14) \cdot 10^7$	$(1.35 \pm 0.18) \cdot 10^7$
Co	$(1.23 \pm 0.11) \cdot 10^7$	$(1.09 \pm 0.10) \cdot 10^7$	$(1.04 \pm 0.10) \cdot 10^7$	$(1.06 \pm 0.10) \cdot 10^7$	$(0.96 \pm 0.09) \cdot 10^7$	$(1.00 \pm 0.10) \cdot 10^7$
Mn	$(1.01 \pm 0.11) \cdot 10^7$	$(0.96 \pm 0.11) \cdot 10^7$	$(0.96 \pm 0.10) \cdot 10^7$	$(0.79 \pm 0.08) \cdot 10^7$	$(0.82 \pm 0.09) \cdot 10^7$	$(0.81 \pm 0.09) \cdot 10^7$

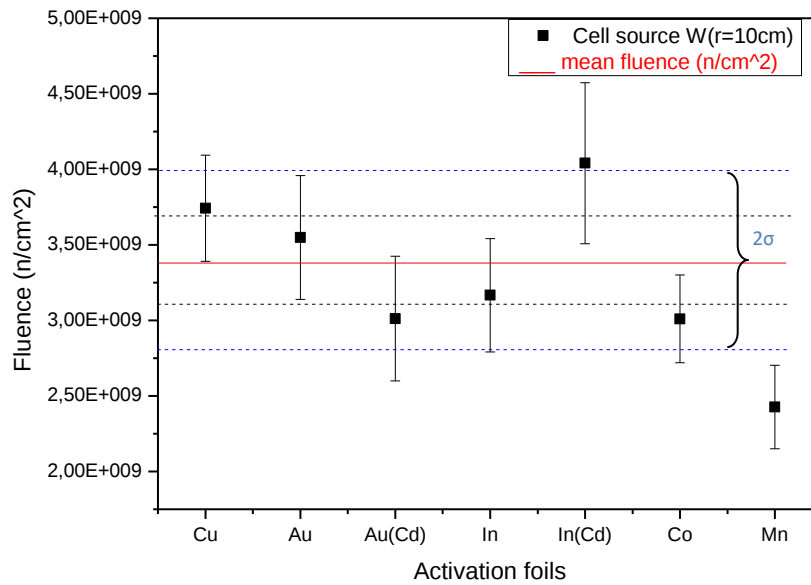
Ο υπολογισμός της νετρονικής ροής εξαρτάται κυρίως από παράγοντες όπως η ενέργεια των νετρονίων (φάσμα), τις διατομές των πυρηνικών αντιδράσεων καθώς και τη γεωμετρία περιγραφής της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή

Από τον πίνακα 15 γίνεται εμφανής η σχετική σύγκλιση των πειραματικών τιμών της νετρονικής ροής μεταξύ των ελασμάτων που επήλθε μέσω της γεωμετρίας προσομοίωσης της κεφαλής γραμμικού επιταχυντή που πρότεινε ο Vega-Carrillo (ο δείκτης Q πήρε την ελάχιστη τιμή), πράγμα που είναι ευκρινές και από την ακόλουθη γραφική απεικόνιση (Σχήμα 24).



Σχήμα 24 : Διάγραμμα συνολικής νετρονικής ροής [cm^{-2}] για κάθε ένα έλασμα ενεργοποίησης με χρήση της πηγής Vega-Carrillo

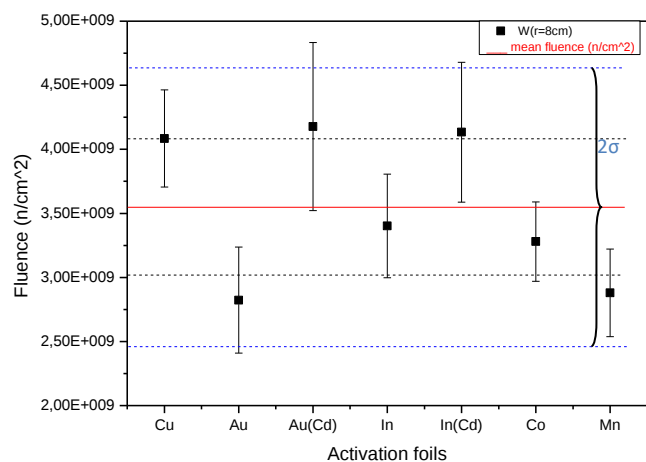
Η «κόκκινη γραμμή» στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην τιμή της μέσης νετρονικής ροής που σύμφωνα με τον πίνακα 15 υπολογίστηκε στα $(3.61 \pm 0.22) \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2$. Παρατηρούμε επίσης πως συμπεριλαμβανομένης της αβεβαιότητας των τιμών της νετρονικής ροής των ελασμάτων ενεργοποίησης η τιμή της ροής τους κυμαίνεται μέσα στα πλαίσια της αβεβαιότητας της συνολικής μέσης σταθμισμένης ροής στα 2σ. Τέλος το μέγιστο εύρος της νετρονικής ροής (λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των ακραίων τιμών) υπολογίζεται από : $(4.36 \text{ έως } 2.69) \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2$.



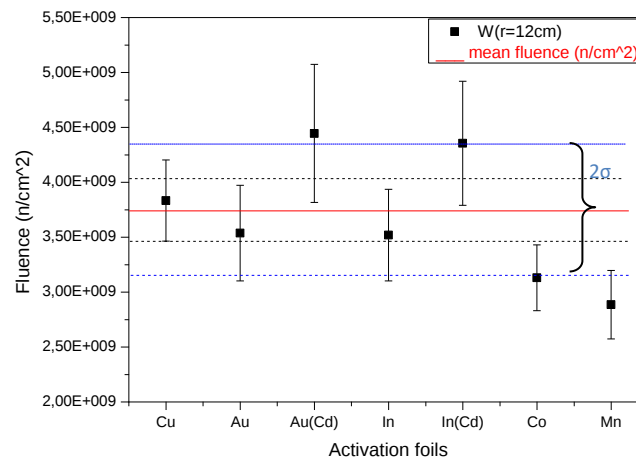
Σχήμα 25: Διάγραμμα νετρονικής ροής [cm^{-2}] για κάθε ένα έλασμα ενεργοποίησης με χρήση της σφαιρικής πηγής βολφραμίου ακτίνας 10cm (cell source)

Από το Σχήμα 25, παρατηρούμε πως η τιμή της νετρονικής ροής που καταγράφεται από το μεταλλικό έλασμα Mn με τη χρήση της ισοτροπικής σφαιρικής πηγής βολφραμίου ακτίνας 10cm, αποκλίνει αρκετά από την αβεβαιότητα (στα 2σ) της μέσης σταθμισμένης ροής των νετρονίων. Ακόμα το μέγιστο εύρος της νετρονικής ροής (λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των ακραίων τιμών) υπολογίζεται από $(4.57 \text{ έως } 2.15) \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2$, αυξημένο κατά 31% σε σχέση με το αντίστοιχο με χρήση της πηγής Vega-Carrillo.

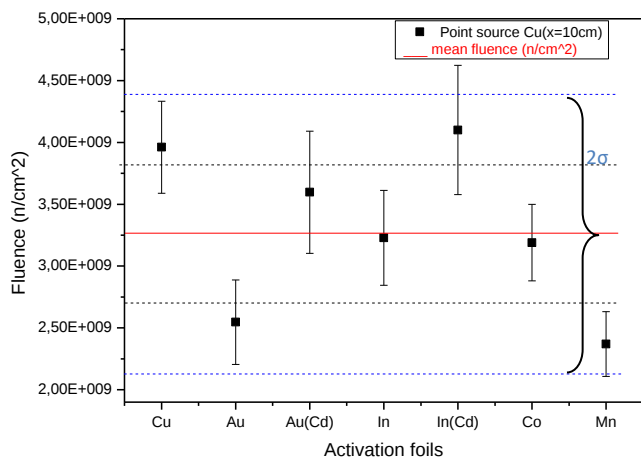
Στα ακόλουθα σχήματα απεικονίζεται γραφικά η νετρονική ροή που ανίχνευσαν τα μεταλλικά ελάσματα συναρτήσει των υπολοίπων γενικευμένων γεωμετριών περιγραφής της κεφαλής ενός γραμμικού επιταχυντή που εξετάστηκαν, όσον αφορά την παραγωγή νετρονίων.



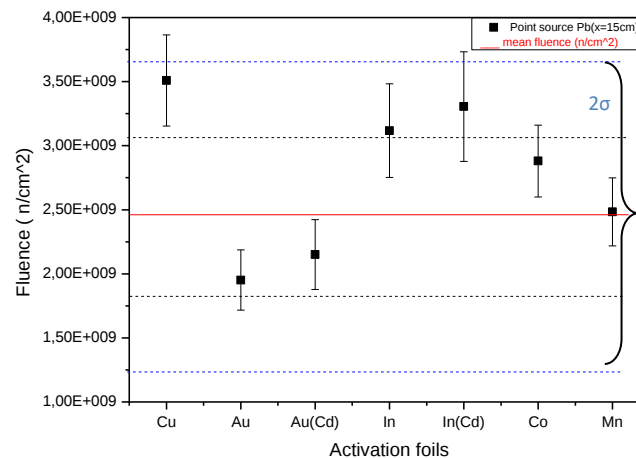
Σχήμα 26: Διαγραμματική απεικόνιση της διασποράς της νετρονικής ροής συναρτήσει των ελασμάτων με τη χρήση σημειακής πηγής νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού βολφραμίου πάχους 8cm



Σχήμα 27 : Διαγραμματική απεικόνιση της διασποράς της νετρονικής ροής συναρτήσει των ελασμάτων με τη χρήση σημειακής πηγής νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού βολφραμίου πάχους 12cm



Σχήμα 28: Διαγραμματική απεικόνιση της διασποράς της νετρονικής ροής συναρτήσει των ελασμάτων με τη χρήση της σημειακής πηγής νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού χαλκού πάχους 10cm



Σχήμα 29: Διαγραμματική απεικόνιση της διασποράς της νετρονικής ροής συναρτήσει των ελασμάτων με τη χρήση σημειακής πηγής νετρονίων στο κέντρο σφαιρικού φλοιού μολύβδου πάχους 15cm

- Από το Σχήμα 26 παρατηρούμε ότι η μείωση του πάχους του σφαιρικού φλοιού κατά 2cm σε σχέση με τον σφαιρικό φλοιό βολφραμίου πάχους 10cm που πρότεινε ο Vega-Carrillo επέφερε αισθητή αύξηση της νετρονικής ροής που καταγράφεται μέσω των foil Au(Cd), In(Cd). Με άλλα λόγια, ενισχύεται το επιθερμικό τμήμα του φάσματος, ενώ παράλληλα διαπιστώνεται σαφής ελάττωση στο θερμικό, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη υπολογιζόμενη από το foil Au ροή. Συγκεκριμένα με τον περιορισμό του εξωτερικού περιβλήματος κατά 2 cm, η νετρονική ροή στο χρυσό μεταβλήθηκε κατά 27% .
- Ομοίως η αύξηση του πάχους του σφαιρικού φλοιού βολφραμίου κατά 2cm (Σχήμα 27) ενισχύει επίσης σημαντικά την επιθερμική περιοχή του φάσματος σε σχέση με την πηγή του Vega-Carrillo, πράγμα που γίνεται εμφανές με την αυξημένη κατά 15% και 19% νετρονική ροή που ανιχνεύουν τα foil Au(Cd), In(Cd) αντίστοιχα.
- Η αντικατάσταση του υλικού του σφαιρικού φλοιού που περιβάλλει τη σημειακή πηγή νετρονίων από βολφράμιο σε χαλκό (Σχήμα 28) επέφερε σημαντική αλλαγή κυρίως στη θερμική περιοχή του φάσματος, πράγμα που εκφράζεται έντονα από την νετρονική ροή που κατέγραψε το foil χρυσού. Αντίθετα το επιθερμικό τμήμα του φάσματος από το οποίο λαμβάνουμε πληροφορίες μέσω των ελασμάτων Au(Cd), In και In(Cd) δεν παρουσιάστηκε ιδιαίτερα ενισχυμένο.
- Από το Σχήμα 29, η μέση νετρονική ροή υπολογίστηκε στα $(2.45 \pm 0.61) \cdot 10^9$ n/cm² , απέχοντας από 25-35% σε σχέση με την μέση νετρονική ροή που προέκυψε με την χρήση των υπόλοιπων απλουστευμένων πηγών προσομοίωσης, οι τιμές των οποίων κυμάνθηκαν από $(3.27-3.75) \cdot 10^9$ n/cm². Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση της συγκεκριμένης γεωμετρίας οδήγησε στη μέγιστη μείωση της θερμικής περιοχής του φάσματος όπως διαπιστώνεται μέσω της τιμής της νετρονικής ροής που καταγράφεται από το έλασμα χρυσού.
- Τέλος, για όλες τις γεωμετρίες περιγραφής της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή που διερευνήθηκαν, συμπεριλαμβανομένης της αβεβαιότητας των τιμών της νετρονικής ροής που ανίχνευαν τα activation foils, η τιμή της ροής τους κυμαίνεται μέσα στα πλαίσια της αβεβαιότητας της συνολικής μέσης σταθμισμένης ροής στα 3σ.

4.2 Υπολογισμός της συνεισφοράς της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας

Η συνεισφορά της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας (room scatter) στη ροή των νετρονίων (fluence/cm²-source neutron) καθώς και στον ρυθμό αντίδρασης ανά μονάδα κυβικού εκατοστού και νετρονίου εκπεμπόμενου από την πηγή (reaction rate/cm³-source neutron)

συναρτήσει των διάφορων foil που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και του τύπου της αντίδρασης που πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo για τις δύο γεωμετρίες που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.1.7, παρουσιάζονται στους Πίνακες 17 και 18.

ΠΙΝΑΚΑΣ 17.

Συνεισφορά σκεδαζόμενης ακτινοβολίας συναρτήσει του υλικού των μεταλλικών ελασμάτων στη διαμόρφωση της νετρονικής ροής (τα ελάσματα τοποθετήθηκαν στα 50cm από την πηγή)

Foil	Fluence/cm ² ·n		
	Γεωμετρία θαλάμου	Γεωμετρία αέρα	Παράγοντας σκέδασης
Cu	$(3.81 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.21 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.19 ± 0.02
Au	$(3.72 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.20 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.16 ± 0.02
Co	$(3.78 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.22 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.17 ± 0.02
In	$(3.65 \pm 0.05) \cdot 10^{-5}$	$(3.17 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.15 ± 0.02
Ag	$(3.73 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.19 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.17 ± 0.02
Mn	$(3.76 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.20 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.18 ± 0.02
Zn	$(3.80 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.20 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.19 ± 0.02
Al	$(3.73 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.18 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.17 ± 0.02
Ni	$(3.79 \pm 0.06) \cdot 10^{-5}$	$(3.21 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.18 ± 0.02
Μέση τιμή	$(3.73 \pm 0.02) \cdot 10^{-5}$	$(3.20 \pm 0.01) \cdot 10^{-5}$	1.17 ± 0.02

Από τον Πίνακα 17 γίνεται αντιληπτό ότι τα υλικά θωράκισης του θαλάμου θεραπείας αυξάνουν την νετρονική ροή στο σημείο της μέτρησης κατά παράγοντα του 1.17 ± 0.02 . Η αύξηση της νετρονικής ροής αυτής είναι κυρίως το αποτέλεσμα σκεδάσεων των νετρονίων από τα τοιχώματα του δωματίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 18.

Συνεισφορά σκεδαζόμενης ακτινοβολίας συναρτήσει του τύπου της αντίδρασης και του υλικού των foil στη διαμόρφωση της τιμής του reaction rate/cm³·source neutron (τα ελάσματα τοποθετήθηκαν στα 50cm από την πηγή)

Foil	Neutron reaction	Reaction rate/cm ³ ·n		
		Γεωμετρία θαλάμου	Γεωμετρία αέρα	Παράγοντας σκέδασης
Cu	⁶³ Cu(n,γ) ⁶⁴ Cu	$(6.42 \pm 0.56) \cdot 10^{-7}$	$(5.38 \pm 0.05) \cdot 10^{-8}$	11.93 ± 1.05
	⁶³ Cu(n,a) ⁶⁰ Co	$(4.38 \pm 0.29) \cdot 10^{-9}$	$(4.05 \pm 0.06) \cdot 10^{-9}$	1.08 ± 0.07
Au	¹⁹⁷ Au(n,γ) ¹⁹⁸ Au	$(7.87 \pm 0.61) \cdot 10^{-6}$	$(3.32 \pm 0.02) \cdot 10^{-7}$	23.70 ± 1.84
Co	⁵⁹ Co(n,γ) ⁶⁰ Co	$(4.31 \pm 0.33) \cdot 10^{-6}$	$(3.03 \pm 0.17) \cdot 10^{-8}$	142.24 ± 13.50
	⁵⁹ Co(n,a) ⁵⁶ Mn	$(2.82 \pm 0.20) \cdot 10^{-9}$	$(2.68 \pm 0.04) \cdot 10^{-9}$	1.05 ± 0.08
In	¹¹⁵ In(n,γ) ^{116m} In	$(6.01 \pm 0.47) \cdot 10^{-6}$	$(2.04 \pm 0.01) \cdot 10^{-7}$	29.46 ± 2.31
Ag	¹⁰⁹ Ag(n,γ) ^{110m} Ag	$(4.32 \pm 0.41) \cdot 10^{-7}$	$(3.89 \pm 0.01) \cdot 10^{-8}$	11.10 ± 1.05
Mn	⁵⁵ Mn(n,γ) ⁵⁶ Mn	$(1.55 \pm 0.14) \cdot 10^{-6}$	$(1.79 \pm 0.04) \cdot 10^{-8}$	86.60 ± 8.06
	⁵⁵ Mn(n,2n) ⁵⁴ Mn	$(4.39 \pm 0.41) \cdot 10^{-8}$	$(4.20 \pm 0.08) \cdot 10^{-8}$	1.05 ± 0.10
Zn	⁶⁴ Zn(n,p) ⁶⁴ Cu	$(3.14 \pm 0.16) \cdot 10^{-8}$	$(2.78 \pm 0.03) \cdot 10^{-8}$	1.13 ± 0.06
Al	²⁷ Al(n,p) ²⁷ Mg	$(8.34 \pm 0.50) \cdot 10^{-9}$	$(7.44 \pm 0.10) \cdot 10^{-9}$	1.12 ± 0.07
	²⁷ Al(n,a) ²⁴ Na	$(8.05 \pm 0.55) \cdot 10^{-9}$	$(7.48 \pm 0.11) \cdot 10^{-9}$	1.08 ± 0.08
Ni	⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co	$(1.12 \pm 0.06) \cdot 10^{-8}$	$(9.91 \pm 0.11) \cdot 10^{-9}$	1.13 ± 0.06
	⁵⁸ Ni(n,2n) ⁵⁷ Ni	$(2.56 \pm 0.25) \cdot 10^{-9}$	$(2.35 \pm 0.05) \cdot 10^{-9}$	1.09 ± 0.10

Από τον πίνακα 18, παρατηρούμε ότι η συνεισφορά της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο ρυθμό αντίδρασης ($\text{reaction rate}/\text{cm}^3 \cdot \text{source neutron}$) εξαρτάται ουσιαστικά από τον τύπο της αντίδρασης που πραγματοποιείται για το αντίστοιχο έλασμα (foil) που μελετάται. Συγκεκριμένα ο ρυθμός αντίδρασης στις αντιδράσεις τύπου (n,γ) εμφανίζεται δραματικά ενισχυμένος κατά παράγοντα του 10 ή και του 100 (σε ορισμένες περιπτώσεις) βάσει της γεωμετρίας προσομοίωσης του κεντρικού θαλάμου του γραμμικού επιταχυντή σε σχέση με την ίσων διαστάσεων γεωμετρίας αέρα.

Απ' την άλλη μεριά, οι αντιδράσεις τύπου (n,p), (n,a), (n,2n) είναι αντιδράσεις με υψηλό ενεργειακό κατώφλι και η αλλαγή στην τιμή του $\text{reaction rate}/\text{cm}^3/\text{n}$ για την πλειονότητα των foil μεταξύ των δύο γεωμετριών είναι μικρή με το λόγο σκέδασης να κυμαίνεται στο 1.09 ± 0.07 .

Αντίθετα οι αντιδράσεις τύπου (n,γ) είναι αντιδράσεις χωρίς κατώφλι ενέργειας. Τα νετρόνια της πηγής αλληλεπιδρούν με τα υλικά του θαλάμου και σκεδάζονται ελαστικά με αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας τους. Επομένως η γεωμετρία θαλάμου οδηγεί στη δυναμική αύξηση του ρυθμού αντίδρασης των (n,γ) αντιδράσεων.

5. ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ροή των νετρονίων σε θάλαμο θεραπείας που παράγονται στη κεφαλή γραμμικού επιταχυντή ενέργειας 18 MV. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκε και διευρύνθηκε η υπόθεση ότι μια γενικευμένη γεωμετρία πηγής νετρονίων μπορεί να προσομοιάσει ικανοποιητικά την κεφαλή ενός ιατρικού γραμμικού επιταχυντή με σκοπό την σημαντική απλούστευση των υπολογισμών μεταφοράς νετρονίων στο θάλαμο και κατά μήκος του λαβυρίνθου.

Η διαδικασία προσομοίωσης βασίστηκε στην ανάπτυξη μοντέλου με τη χρήση του κώδικα MCNP (Monte Carlo N-Particles) και εξήχθησαν αντιστοίχως μια σειρά αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για τη νετρονική ροή με χρήση κατάλληλων μεταλλικών ελασμάτων νετρονικής ενεργοποίησης τα οποία ακτινοβολήθηκαν και στη συνέχεια μετρήθηκαν με βαθμονομημένο ανιχνευτή γερμανίου.

Για τον λόγο αυτό, προτάθηκαν και συγκρίθηκαν 6 γενικευμένες και σχετικά απλές γεωμετρίες κεφαλής (βλ. Πίνακα 3).

Στο πρώτο μέρος της εργασίας μας, προσδιορίστηκαν οι ενεργές διατομές για τα μεταλλικά ελάσματα (activation foils) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων για τα ενεργειακά φάσματα νετρονίων που προέκυψαν από τις 6 γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή που εξετάστηκαν. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός συνόλου ελασμάτων που αποτελείται από Au, Au(Cd), In, In(Cd), Co, Mn, Cu. Κάθε μεταλλικό έλασμα ενεργοποίησης ανάλογα με το υλικό από το οποίο αποτελείται και την αντίστοιχη ενεργό διατομή του (effective cross section) έχει διαφορετική απόκριση στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων. Ιδανικά όμως, η τιμή της νετρονικής ροής που καταγράφουν όλα τα ελάσματα που χρησιμοποιήσαμε θα πρέπει να ταυτίζεται. Επομένως η σύγκλιση των τιμών της νετρονικής ροής για τα 7 ακτινοβοληθέντα ελάσματα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα και δείκτη καταλληλότητας της γεωμετρίας περιγραφής της κεφαλής του επιταχυντή σε όλο το εύρος του φάσματος νετρονίων που παράγονται.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η καλύτερη σύγκλιση των πειραματικών τιμών της νετρονικής ροής για τα διαφορετικά ελάσματα σε συνδυασμό με το φάσμα των νετρονίων επιτεύχθηκε με τη χρήση της γεωμετρίας προσομοίωσης της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή που πρότεινε ο Vega-Carrillo (Vega-Carrillo, et al., 2011). Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στο συμπέρασμα η συγκεκριμένη γενικευμένη γεωμετρία εν τέλει αντικατοπτρίζει καλύτερα την πραγματικότητα, συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες γεωμετρικές προσεγγίσεις που διερευνήθηκαν. Η μέση νετρονική ροή υπολογίστηκε στα $(3.61 \pm 0.22) \cdot 10^9$

n/cm^2 με συστηματικά σφάλματα να υπεισέρχονται στους υπολογισμούς μας λόγω των παραδοχών για το φάσμα και τον αριθμό των παραγόμενων νετρονίων, την γεωμετρία του θαλάμου και της πηγής καθώς και τα υλικά της κεφαλής και θωράκισης που συμπεριλήφθησαν κατά την προσομοίωση.

Η απλοποίηση της γεωμετρίας της κεφαλής (πρόταση Vega-Carrillo) έχει σαν αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται υπόψη όλα τα φαινόμενα που συμβαίνουν από την στιγμή της παραγωγής των νετρονίων στον στόχο και τα υλικά θωράκισης της κεφαλής, την μεταφορά των νετρονίων μέσω των υλικών που αποτελούν την κεφαλή, η διαρροή ακτινοβολίας και οι σκεδάσεις των σωματιδίων από τα υλικά της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή. Επίσης κατά την προσομοίωση του θαλάμου, δεν λήφθηκαν υπόψη τα αντικείμενα και υλικά που υπάρχουν στον πραγματικό θάλαμο θεραπείας του νοσοκομείου όπως τα ηλεκτρονικά στοιχεία, η κλίνη με την βάση της κ.α., που σκεδάζουν και απορροφούν νετρόνια και κατά συνέπεια επηρεάζουν την μεταφορά των νετρονίων στο εσωτερικό του θαλάμου και στον διάδρομο.

Τέλος, στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές σύστασης σκυροδέματος τύπου Portland (NBS ordinary) με διαστάσεις όπως δίνονται στα σχέδια κατασκευής του θαλάμου. Η σύσταση του υλικού της θωράκισης του πραγματικού θαλάμου δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αποκλίσεις και λόγω της μη ακριβούς προσομοίωσης της σύστασης των υλικών της θωράκισης του θαλάμου. Ιδιαίτερη σημασία έχει και το ποσοστό υδρογόνου στο Celotex που χρησιμοποιήθηκε σαν επίστρωση στο σκυρόδεμα. Αξίζει να αναφέρουμε πως η επίστρωση του ήδη υπάρχοντος σκυροδέματος με το υλικό Celotex (πυκνότητας 0.3143 g/cm^3) μπορεί να μειώσει την δόση στη θύρα του θαλάμου θεραπείας κατά 53% περίπου σε σχέση με την ίδιου πάχους θωράκιση με απλό σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει γιατί, η μεγάλη περιεκτικότητα του ξύλου σε υδρογόνο επιβραδύνει τα νετρόνια που παράγονται από τον γραμμικό επιταχυντή. Επιπλέον η επίστρωση προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της δόσης όταν τοποθετείται στον κυρίως θάλαμο και όχι μόνο στο λαβύρινθο του θαλάμου (Φακίνου, 2014).

Στον Πίνακα 19 παραθέτουμε την νετρονική ροή ($n/cm^2 \cdot Gy \cdot X$) που υπολογίστηκε στο ισόκεντρο από άλλους ερευνητές με τη μέθοδο των activation foils, σε άλλους τύπους γραμμικών επιταχυντών παρόμοιας ενέργειας, συγκρίνοντας τη με τα δικά μας πειραματικά αποτελέσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 19.

Σύγκριση της πειραματικής μας ροής νετρονίων (αναγωγή στο ισόκεντρο) με την υπολογιζόμενη ροή στο ισόκεντρο άλλων τύπων ιατρικών γραμμικών επιταχυντών παρόμοιας ενέργειας

Ιατρικός γραμμικός επιταχυντής	Ενέργεια (MV)	SSD (cm)	Μέγεθος Πεδίου Ακτίνων X (cm ²)	Μέθοδος	Νετρονική ροή (ncm ⁻² /Gy-X)	Αναφορά
Varian CLINAC21EX	15	100	20×20	In foil	1.97×10 ⁵	(Liu, et al. 2011)
Varian CLINAC2300	20	100	10×10	In foil	1.51×10 ⁶	(Konefal, et al. 2005)
Mevatron 77	18	100	15×15	Au foil	2.30×10 ⁵	(Palta, et al. 1984)
Philips SL/75-20	18	100	10×10	In foil	1.40×10 ⁶	(Gur, et al. 1978)
Allis-Chalmers Betatron	25	100	10×10	In foil	3.80×10 ⁵	(McGinley, et al. 1976)
Microtron, MM22	21	100	10×10	In foil	3.20×10 ⁵	(Uwamino, et al. 1986)
Elekta Precise	18	100	None (0×0)	Au foil	9.11×10 ⁶	(Esposito, et al. 2008)
Elekta Synergy1 (παρούσα μελέτη)	18	100	None (0×0)	In foil	4.64×10 ⁶	
				Au foil	4.43×10 ⁶	

Η νετρονική ροή που υπολογίσαμε κατά την πειραματική μας διαδικασία για τον ιατρικό γραμμικό επιταχυντή Elekta - Synergy 1 18MV αν και όπως διαπιστώνεται εύκολα από τον παραπάνω πίνακα εμφανίζεται έως μία τάξη μεγέθους αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη ροή που καταγράφηκε με χρήση ίδιου υλικού κατασκευής μεταλλικού ελάσματος σε άλλους τύπους γραμμικών επιταχυντών παρόμοιας ενέργειας, εν τούτοις οφείλουμε να αξιολογήσουμε την κρισιμότητα δύο παραμέτρων που οδηγούν σε αυτή την απόκλιση. Αρχικά τα ελάσματα ενεργοποίησης που χρησιμοποιήσαμε τοποθετήθηκαν στα 60 cm από την κεφαλή και όχι στο ισόκεντρο, γεγονός που σίγουρα ενισχύει έως ένα βαθμό την ανιχνεύσιμη νετρονική ροή. Μια προσπάθεια αναγωγής της νετρονικής ροής που ανιχνεύσαμε στο ισόκεντρο θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας προσεγγιστικά πως η ροή ακολουθεί το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης, πράγμα που δεν ισχύει απόλυτα, μιας και στην πραγματικότητα δεν τηρούνται οι προϋποθέσεις της σημειακής πηγής που εκπέμπει ιστροπικά. Εν τούτοις δεχόμενοι αυτή την απλούστευση και την μεταβολή στη νετρονική ροή που αυτή επιφέρει, η ροή στο ισόκεντρο υπολογίστηκε περίπου στα $4.43 \cdot 10^6$ n/cm²-Gy (για το έλασμα χρυσού). Όμως ο σημαντικότερος λόγος για την παρατηρούμενη διάσταση τιμών της νετρονικής ροής του πειράματος μας με τις υπόλοιπες ροές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 19 είναι ότι κατά την ακτινοβολήση των ελασμάτων επιλέξαμε να διατηρήσουμε κλειστά τα διαφράγματα (0x0 cm²) του επιταχυντή Elekta - Synergy 1 σε σχέση με τους υπόλοιπους γραμμικούς επιταχυντές, εξαιρουμένου του Elekta Precise.

Η επιλογή αυτή (των κλειστών διαφραγμάτων) επηρέασε αυξητικά το πλήθος των παραγόμενων νετρονίων στη κεφαλή του επιταχυντή και κατ' επέκταση το μέγεθος της νετρονικής ροής. Άλλωστε υπενθυμίζουμε πως τα κύρια μέρη της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή όπως ο στόχος, οι κατευθυντήρες και το φίλτρο επιπέδωσης είναι κατασκευασμένα από υλικά όπως Au, W, Al, Fe, Pb με κατώφλι ενέργειας για την παραγωγή φωτονετρονίων (γ, n). Διατηρώντας επομένως κλειστά τα διαφράγματα ενισχύουμε την νετρονική ροή, μιας και διαμορφώνεται χωρικά μεγαλύτερος όγκος υλικών που έχουν την δυνατότητα να αντιδράσουν με τα φωτόνια οδηγώντας στην παραγωγή φωτονετρονίων. Με άλλα λόγια η κίνηση αυτή αυξάνει έμμεσα τις διαστάσεις του στόχου. Γι' αυτό άλλωστε πολλοί ερευνητές θεωρούν πως με κλειστά διαγράμματα η ιδανική Monte Carlo απλουστευμένη προσομοίωση της πηγής νετρονίων είναι μια σφαίρα από βολφράμιο (cell source) είτε ένας σφαιρικός δακτύλιος βολφραμίου που περιβάλλει τη σημειακή πηγή νετρονίων (πρόταση Vega-Carrillo).

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, έγινε εκτίμηση της συνεισφοράς των σκεδάσεων από τα υλικά του θαλάμου στη ροή των νετρονίων. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τους διαφορετικούς τύπους μεταλλικών ελασμάτων και πυρηνικών αντιδράσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών έδειξαν ότι τα υλικά θωράκισης του θαλάμου θεραπείας συνέβαλαν στην αύξηση της νετρονικής ροής κατά 17% ως προς την τιμή χωρίς την ύπαρξη του θωρακισμένου θαλάμου. Τα νετρόνια της πηγής αλληλεπιδρούν με τα υλικά του θαλάμου και επιβραδύνονται μέσω σειράς ελαστικών σκεδάσεων και τέλος απορροφούνται με αντιδράσεις σύλληψης από τα υλικά του θαλάμου. Επίσης, η σύσταση των υλικών της θωράκισης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα του Celotex και της περιεκτικότητας του σε υδρογόνο επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην νετρονική ροή και στη ισοδύναμη δόση από νετρόνια. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαιώνουν ότι η αύξηση της ροής οφείλεται σε αργά νετρόνια καθώς οι αντίστοιχες τιμές για πυρηνικές αντιδράσεις με κατώφλι δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντική αύξηση. Από την άλλη, ο ρυθμός αντίδρασης των ελασμάτων ενεργοποίησης που πραγματοποιούν αντιδράσεις τύπου (n, γ), οι οποίες υπενθυμίζουμε πως είναι αντιδράσεις χωρίς ενεργειακό κατώφλι, αυξήθηκε έως και 2 τάξεις μεγέθους με τη μεταβολή της θωράκισης.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά στη μέτρηση της ροής νετρονίων σε θάλαμο γραμμικού επιταχυντή είναι η επιλογή των κατάλληλων διατομών πυρηνικών αντιδράσεων. Οι διατομές των πυρηνικών αντιδράσεων εξαρτώνται από το υλικό και την ενέργεια των νετρονίων. Η πολύπλοκη γεωμετρία της κεφαλής και του θαλάμου ενός ιατρικού γραμμικού επιταχυντή καθιστά τη γνώση του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων στο σημείο της μέτρησης ιδιαίτερα δύσκολη. Η χρήση διατομών θερμικών νετρονίων από την βιβλιογραφία οδηγεί σε

σημαντικά σφάλματα καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η σημαντική συνεισφορά των επιθερμικών και ταχέων νετρονίων. Γι' αυτό στην παρούσα εργασία η ενεργός διατομή των πυρηνικών αντιδράσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της ροής των νετρονίων εκτιμήθηκε μέσω προσομοιώσεων με τον κώδικα Monte Carlo MCNP5. Τονίζεται ότι στο περιβάλλον ενός γραμμικού επιταχυντή και κοντά στην κεφαλή τα νετρόνια που παράγονται είναι κυρίως επιθερμικά ή ταχεία και μάλιστα από την αναλυτική σχέση του Tosi που περιγράφει το φάσμα των νετρονίων υπολογίζονται σε ποσοστά 44,6% (intermediate neutron region) και 55% (fast neutron region) αντίστοιχα, με μια υποεκτίμηση του 5-10% στην θερμική και επιθερμική περιοχή για ενέργειες έως 1 MeV (Vega-Carrillo, et al., 2011).

Ολοκληρώνοντας τη συζήτηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, θα μπορούσαμε συμπερασματικά να πούμε πως η μελέτη αυτή έδειξε ότι με τη χρήση μιας γενικευμένης γεωμετρίας περιγραφής της κεφαλής του επιταχυντή της προσομοίωσης του θαλάμου θεραπείας καθώς και του φάσματος των νετρονίων όπως διατυπώνεται από τη σχέση του Tosi, μπορεί να εκτιμηθεί η ροή των νετρονίων στο ισόκεντρο του θαλάμου θεραπείας.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αναμένεται να συνεισφέρουν στην απλοποίηση και επιτάχυνση των χρονοβόρων αναλυτικών προσομοιώσεων της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή, οι οποίες επιβάλλουν ειδικές γνώσεις διαστάσεων και υλικών που συχνά δεν είναι διαθέσιμες ή σκοπίμως αποκρύπτονται για λόγους ανταγωνισμού από τις κατασκευάστριες εταιρίες, με στόχο την εκτίμηση της νετρονικής ροής στο ισόκεντρο του θαλάμου θεραπείας ή ακόμα τη δημιουργία νέων οριζόντων στην εξίσου αξιόπιστη μελέτη και της ισοδύναμης δόσης από νετρόνια είτε κατά μήκος του λαβύρινθου του θαλάμου θεραπείας είτε ακόμα και στον ίδιο τον ασθενή. Το γεγονός αυτό έρχεται να ενισχύσει την ανάγκη για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού θωρακίσεων ιατρικών γραμμικών επιταχυντών υψηλής ενέργειας και επομένως στην αρτιότερη ακτινοπροστασία των ασθενών, του προσωπικού, των συνοδών και επισκεπτών των τμημάτων ακτινοθεραπείας.

Ωστόσο μέσω της εργασίας μας εγείρονται και νέα ερωτήματα προς περαιτέρω μελέτη, μιας και τα αποτελέσματα μας προκύπτουν από πολύ συγκεκριμένα δεδομένα. Η μεταβολή της νετρονικής ροής υπό την επίδραση ενός πιο σύνθετου γεωμετρικά θαλάμου με διπλές στροφές, πετάσματα και πολλούς σκεδαστές στο εσωτερικό του, ή διαφορετικού φάσματος πηγής νετρονίων και υλικών θωράκισης του θαλάμου είναι μόνο μερικά από αυτά.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

American Association of Physicist in Medicine, 1986, Neutron measurements around high energy x ray radiotherapy machines, AAPM Report No. 19, New York.

Agosteo, S Foglio Para, A., 1994, Energy and spatial dependence of neutron fluxes in radiotherapy rooms for a simple dose estimate method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 93, 362–369.

Agosteo, S., Foglio Para, A., Maggioni, B., Sangiust, V., Terrani, S., Borasi, G., 1995, Radiation transport in a radiotherapy room. Health Phys., 68, 27-34.

Agosteo, S., Foglio Para, A., Silari, M., Torresin A., Tosi, G., 1992, Monte Carlo simulations of neutron transport in linac radiotherapy room, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 72, 84-90 .

Capote, Roberto, Zolotarev, Konstantin I., Pronyaer, Vladimir G., Trkov, Andrey., 2012, Updating and extending the IRDF-2002 dosimetry library. Journal of ASTM International, 9, 1-9.

Carinou, E., Kamenopoulou, V., Stamatelatos, I.E. 1999, Evaluation of neutron dose in the maze of medical electron accelerators. Medical Physics, 26, 2520-2525.

Chionis, D.A., Savva, M.I., Karfopoulos, K.L., Anagnostakis, M.J., 2014, Determination of true coincidence correction factors using Monte-Carlo simulation techniques, Nuclear Technology and Radiation Protection, 29, 8-14.

D’Amico, Natalia M.B., Mayer, Roberto E. 2015, DEVELOPMENT OF NEUTRON INTERROGATION TECHNIQUES TO DETECT DANGEROUS SUBSTANCES, European Scientific Journal,11, 10.

Esposito, A., Bedogni, R., Lembo, Morelli, M., 2008, Determination of the neutron spectra around an 18 MV medical LINAC with a passive Bonner sphere spectrometer based on gold foils and TLD pairs, Rad. Measurements, 43, 1038-1043.

Forster, R.A., Godfrey, T.N.K. 2005, MCNP - a general Monte Carlo code for neutron and photon transport. s.l., 240, 33-55, Springer, Berlin, Heidelberg.

Ghassoun, J., Senhou, N., Jehouani, A. 2011, Neutron and photon doses in high energy radiotherapy facilities and evaluation of shielding performance by Monte Carlo method, Annals of Nuclear Energy, 38, 2163-2167.

Gur, D., Rosen, J.C., Bukovitz, A.G., Gill, A.W., 1978, Fast and slow neutrons in an 18-MV photon beam from a Philips SL/75-20 linear accelerator, Medical Physics, 5, 221-222.

Hall, E.J., Martin, S.G, Almols, H., Hei, T.K., 1995, Photoneutrons from medical linac accelerators- Radiobiological measurements and risk estimates, *Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 33, 225-230.

International Atomic Energy Agency, 2000, Handbook on photonuclear data for applications: cross sections and spectra (Vienna: IAEA 2000)

Knoll, Glenn F., 2012, Radiation Detection and Measurement. 4th Edition, John Wiley & Sons, New York.

Konefal, A., Dybek, M., Zipper, W., Łobodziec, W., Szczucka, K., 2005, Thermal and epithermal neutrons in the vicinity of the Primus Siemens biomedical accelerator, *Nukleonika*, 50, 73- 81

Kossakowski, R., Grivot, P., Liaud, P., Schreckenbach, K., Azuelos, G., 1989, Neutron lifetime measurement with a helium-filled time projection chamber, *Nuclear Physics A.*, 503, 473-500.

Liu, W.S., Changlai, S.P, Pan, L.K., Tseng, H.C., Chen, C.Y., 2011, Thermal neutron fluence in a treatment room with a Varian linear accelerator at a medical university hospital, *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 917-922.

McGinley, P.H., Wood, M., Mills, M., Rodriguez, R., 1976, Dose levels due to neutrons in the vicinity of high-energy medical accelerators, *Medical Physics*. 3, 397-402.

Mohammadi, N., et al. 2015, Neutron spectrometry and determination of neutron contamination around the 15 MV Siemens Primus LINAC, *J Radioanal Nucl Chem*, 304, 1001–1008.

National Council on Radiation Protection and Measurements 1984, Neutron Contamination from Medical Electron Accelerator, NCRP Report No. 79.

National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005, Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, NCRP Report No. 151.

Palta, J.R., Hogstrom, K.R. and Tannanonta, C. 1984, Neutron leakage measurements from a medical linear accelerator, *Medical Physics.*, 11, 498-501.

Stamatelatos, I.E., Vasilopoulou, T., Filippaki, E., Georgolopoulou, P., Ntalla, E., Bassiakos, Y., 2016, Photon activation analysis of large metallurgical slag samples using a 23 MV medical linear accelerator, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 309, 165-171.

Tavendale, A.J., Ewan, G.T. 1963, A high resolution lithium-drift germanium gamma-ray spectrometer, *Nucl. Instr. Methods*, 25, 185-187.

Team, X-5 Monte Carlo. 2005, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 - Vol. I: Overview and Theory, (University of California: Los Alamos National Laboratory, April 2003 revised Oct. 3, 2005).

Tosi, G., Torresin, A., Agosteo, S., Folgio Para, A., Sangiust, V., Zeni, L., Silari, M., 1991, Neutron measurements around medical electron accelerators by active and passive detection techniques, Med. Phys. 18, 54–60.

Uwamino, Y., Nakamura, Ohkubo T., Hara, A., 1986, Measurement and calculation of neutron leakage from a medical electron accelerator, Medical Physics, 13, 374-384.

Vega-Carrillo, H.R, Martinez-Ovalle S.A, Benites-Rengifo, J.L, Lallena, A.M., 2011, XII International Symposium/XXII National Congress on Solid State Dosimetry, Mexico.

Vega-Carrillo, H., Baltazar-Raigosa, A., 2011, Photoneutron spectra around an 18 MV linac, J. Radioanal. Nucl. Chem. 287, 323–327.

Xu, X.George, Bednarz, B., Paganetti, H. 2008, A review of dosimetry studies on external-beam radiation treatment with respect to second cancer induction, Physics in Medicine & Biology, 53, 193.

Βασιλοπούλου, Θεοδώρα. 2012, Ανάπτυξη πυρηνικών τεχνικών στοιχειακής ανάλυσης δειγμάτων μεγάλου όγκου, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.

Σταματελάτος, Ι.Ε. 2013, Φυσική των Ακτινοβολιών: Αλληλεπίδραση Νετρονίων με την Ύλη, Σημειώσεις από το Δ.Δ.Π.Μ.Σ. στην Ιατρική Φυσική-Ακτινοφυσική, Αθήνα

Φακίνου, Μαρία. 2014, Διπλωματική εργασία, Μελέτη της ισοδύναμης δόσης από νετρόνια στο λαβύρινθο θαλάμου γραμμικού επιταχυντή με προσομοίωση κώδικα Monte Carlo, ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αρχείο εισόδου κώδικα MCNP5

Agios Savvas Linac Room

c
c cell cards
c
c
c
1 1 -0.0013 1 -2 8 -4 -73 79 #56 #57 #58 #59 #60 #61 &
#62 #63 #64 #65 #66 #67 #68 #69 #70 #71 imp:n=1 \$air head low
2 1 -0.0013 5 -2 4 -6 -73 79 imp:n=1 \$air head up
3 2 -0.2500 5 -1 7 -4 -73 79 imp:n=1 \$wood 1 (left wall)
4 2 -0.2500 1 -2 7 -8 -73 79 imp:n=1 \$wood 2 (down wall)
5 3 -7.8200 5 -10 6 -9 -73 79 imp:n=1 \$iron sheet 1 (full up)
6 4 -2.3500 11 -5 7 -9 -73 79 imp:n=1 \$concrete 1 (left)
7 4 -2.3500 11 -13 14 -7 -73 79 imp:n=1 \$concrete 2 (down full)
8 4 -2.3500 11 -15 9 -16 -73 79 imp:n=1 \$concrete 3 (up)
9 4 -2.3500 10 -15 17 -9 -73 79 imp:n=1 \$concrete 4 (right)
10 4 -2.3500 18 -13 20 -19 -73 79 imp:n=1 \$concrete 5 (right from maze)
11 4 -2.3500 21 -13 7 -20 -73 79 imp:n=1 \$concrete 6 (faltso @ rd corner)
12 4 -2.3500 15 -22 23 -19 -73 79 imp:n=1 \$left tooth (@door)
13 4 -2.3500 24 -18 23 -19 -73 79 imp:n=1 \$right tooth (@door)
14 1 -0.0013 22 -24 23 -19 -81 79 imp:n=1 \$door
15 4 -2.3500 22 -24 23 -19 -73 81 imp:n=1 \$wall above door
16 1 -0.0013 2 -10 4 -6 -73 79 imp:n=1 \$air 3
17 4 -2.3500 10 -25 26 -17 -73 79 imp:n=1 \$concrete 7
18 4 -2.3500 27 -10 26 -28 -73 79 imp:n=1 \$concrete 8
19 3 -7.8200 29 -27 26 -28 -73 79 imp:n=1 \$thick steel plate
20 3 -7.8200 30 -29 26 -31 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 1
21 3 -7.8200 32 -30 33 -34 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 2
22 3 -7.8200 35 -32 36 -37 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 3
23 3 -7.8200 38 -35 39 -40 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 4
24 3 -7.8200 41 -38 42 -43 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 5
25 3 -7.8200 44 -41 45 -46 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 6
26 3 -7.8200 47 -44 48 -49 -73 79 imp:n=1 \$steel plate 7
27 4 -2.3500 11 -51 16 -50 -73 79 imp:n=1 \$concrete 9
28 1 -0.0013 51 -52 16 -50 -73 79 imp:n=1 \$air 4
30 1 -0.0013 54 -15 16 -56 -73 79 imp:n=1 \$air controller room
31 1 -0.0013 53 -13 19 -50 -73 79 imp:n=1 \$air 5
32 2 -0.2500 2 -59 7 -8 -73 79 imp:n=1 \$wood 3
33 2 -0.2500 7 -18 -21 59 -73 79 imp:n=1 \$wood 4
34 2 -0.2500 -59 -23 60 -18 -73 79 imp:n=1 \$wood 5
35 2 -0.2500 61 -10 62 -4 -73 79 imp:n=1 \$wood 6
36 2 -0.2500 63 -10 28 -62 -73 79 imp:n=1 \$wood 7
37 2 -0.2500 63 -29 64 -28 -73 79 #20 #21 #22 #23 #24 #25 #26 imp:n=1 \$wood 8
38 2 -0.2500 29 -65 64 -26 -73 79 imp:n=1 \$wood 9
39 2 -0.2500 65 67 -26 -25 -73 79 imp:n=1 \$wood 10
40 2 -0.2500 67 -70 -68 25 -73 79 imp:n=1 \$wood 11
41 2 -0.2500 -25 -23 15 -70 -73 79 imp:n=1 \$wood 12
42 1 -0.0013 2 -61 62 -4 -73 79 imp:n=1 \$air 6
43 1 -0.0013 2 -63 8 -62 -73 79 imp:n=1 \$air 7
44 1 -0.0013 63 -65 8 -64 -73 79 imp:n=1 \$air 8
45 1 -0.0013 65 -70 -67 8 -73 79 imp:n=1 \$air 9
46 1 -0.0013 -70 67 68 -73 79 imp:n=1 \$air 10
47 1 -0.0013 8 -20 70 -59 -73 79 imp:n=1 \$air 11
48 1 -0.0013 20 70 -23 -60 -73 79 imp:n=1 \$air 12
49 4 -2.3500 11 -13 14 -50 73 -84 #50 imp:n=1 \$ceiling
50 5 -11.200 75 -2 76 -77 74 -78 imp:n=1 \$lead shielding @ ceiling
51 4 -2.3500 11 -13 14 -50 80 -79 imp:n=1 \$floor
52 4 -2.3500 16 -50 52 -54 -73 79 imp:n=1 \$controller room wall 1
53 4 -2.3500 56 -50 54 -53 -73 79 imp:n=1 \$controller room wall 2
54 4 -2.3500 15 -53 -56 19 -73 79 imp:n=1 \$controller room wall 3
55 0 -11: -14: 50: 13: -80: 84 imp:n=0 \$universe
56 6 -19.250 -83 #71 imp:n=1 \$tungsten source
57 7 -2.70 -85 86 -87 88 89 -90 imp:n=1 \$surface Al
58 19 -8.94 -91 imp:n=1 \$foil Cu
59 23 -8.90 -92 imp:n=1 \$foil Ni
60 15 -8.9 -93 imp:n=1 \$foil Co
61 21 -7.2 -94 imp:n=1 \$foil Mn
62 13 -7.14 -95 imp:n=1 \$foil Zn

63	26	-10.2	-96	imp:n=1 \$ foil Ag
64	7	-2.70	-97	imp:n=1 \$ foil Al
65	11	-19.32	-98	imp:n=1 \$ foil Au
66	10	-8.65	-99 #67	imp:n=1 \$ cover Cd-Au(Cd)
67	11	-19.32	-100	imp:n=1 \$ foil Au(Cd)
68	8	-7.31	-101	imp:n=1 \$ foil In
69	10	-8.65	-102 #70	imp:n=1 \$ cover Cd-In(Cd)
70	8	-7.31	-103	imp:n=1 \$ foil In(Cd)
71	0		-104	imp:n=1 \$ void sphere r=10cm
c				
c	surface cards			
c				
1	px	-363		
2	px	244.5		
4	py	127		
5	px	-364		
6	py	336		
7	py	-287		
8	py	-286		
9	py	341		
10	px	381		
11	px	-424		
13	px	782		
14	py	-347		
15	px	522		
16	py	456		
17	py	-46.165		
18	px	702		
19	py	457.293		
20	py	-175.32		
21	p	702 -175.32 0 628.23 -287 0 702 -175.32 10		
22	px	554.5		
23	py	439.761		
24	px	669.5		
25	p	522 -46.165 0 457.293 -102.27 0 522 -46.165 10		
26	py	-102.27		
27	px	270.285		
28	py	-62.27		
29	px	260.285		
30	px	259.356		
31	py	-82.27		
32	px	258.427		
33	py	-104.27		
34	py	-84.27		
35	px	257.498		
36	py	-106.27		
37	py	-86.27		
38	px	256.569		
39	py	-108.27		
40	py	-88.27		
41	px	255.64		
42	py	-110.27		
43	py	-90.27		
44	px	254.711		
45	py	-112.27		
46	py	-92.27		
47	px	253.782		
48	py	-114.27		
49	py	-94.27		
50	py	675.15		
51	px	-394.47		
52	px	23.376		
53	px	536.61		
54	px	37.986		
55	px	522		
56	py	660.54		
57	p	628.23 -287 0 623.847 -286 0 628.23 -287 10		
58	p	702 -175.32 0 701 -163.194 0 702 -175.32 10		
59	p	701 -175.32 0 627.23 -287 0 701 -175.32 10		
60	px	701		
61	px	380		
62	py	-61.27		

```

63 px 252.782
64 py -115.27
65 px 265.285
66 p 457.293 -102.27 0 463.137 -103.27 0 457.293 -102.27 10
67 py -103.27
68 p 523 -46.165 0 458.293 -102.27 0 523 -46.165 10
69 p 522 -46.165 0 523 -51.135 0 523 -51.135 10
70 px 523
71 px 458.293
72 px 627.23
73 pz 316.642
74 pz 438.428
75 px -244.5
76 py -160
77 py 205
78 pz 439.928
79 pz -124
80 pz -212.571
81 pz 76
82 px 626.23
83 sz 100 20
84 pz 553.571
85 px 5
86 px -5
87 py 5
88 py -5
89 pz 39.85
90 pz 40
91 rcc 0 0 40 0 0 0.05 0.745 $foil Cu
92 rcc 3.5 0 40 0 0 0.05 0.745 $foil Ni
93 rcc -3.5 0 40 0 0 0.05 0.745 $foil Co
94 rcc -3.8 3.645 40 0 0 0.01 0.500 $foil Mn
95 rcc -1.6 3.645 40 0 0 0.01 0.575 $foil Zn
96 rcc 1.2 3.645 40 0 0 0.05 0.745 $foil Ag
97 rcc 3.5 3.645 40 0 0 0.01 0.650 $foil Al
98 rcc -3.8 -3.645 40 0 0 0.0015 0.600 $foil Au
99 rcc -1.6 -3.645 40 0 0 0.1 0.650 $cover Au(Cd)
100 rcc -1.6 -3.645 40.05 0 0 0.0015 0.600 $foil Au(Cd)
101 rcc 1.2 -3.645 40 0 0 0.042 0.575 $foil In
102 rcc 3.4 -3.645 40 0 0 0.1 0.625 $ cover In(Cd)
103 rcc 3.4 -3.645 40.03 0 0 0.042 0.625 $foil In(Cd)
104 sz 100 10

```

```

c
c data cards
c
mode n
c
c source specification : isotropic neutron 18MeV,Tosi spectrum
c
sdef erg=d1 pos= 0. 0. 100. par=1
si1 1E-20 1E-09 2E-08 5E-08 6E-08 7E-08 8E-08 1E-07 2E-07
5E-07 7E-07 1E-06 2E-06 5E-06 7E-06 1E-05 2E-05
5E-05 7E-05 1E-04 2E-04 5E-04 7E-04 1E-03 2E-03
5E-03 7E-03 1E-02 2E-02 5E-02 1E-01 0.125 0.375
0.625 0.875 1.125 1.375 1.625 1.875 2.125 2.375 2.625
2.875 3.125 3.375 3.625 3.875 4.125 4.375 4.625 4.875
5.125 5.375 5.625 5.875 6.125 6.375 6.625 6.875 7.125
7.375 7.625 7.875 8.125 8.375 8.625 8.875 9.125 9.375
9.625 9.875 10.125 10.375 10.675 10.875 11.125 11.375
11.675 11.875 12.125 12.375 12.675 12.875 13.125
13.375 13.675 13.875 14.125 14.375 14.675 14.875 15.125
15.375 15.675 15.875 16.125 16.375 16.625 16.875 17.125
17.375 17.625 17.875 18.000
sp1 0.000000 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001886 0.001886
0.001886 0.001888 0.001889 0.001891 0.001895 0.001909
0.001925 0.001942 0.001986 0.002120 0.002287 0.002454
0.002887 0.004214 0.005858 0.007486 0.011641 0.023755
0.045147 0.062089 0.103505 0.125156 0.114036 0.092583
0.070649 0.051934 0.037301 0.026434 0.018636 0.013174
0.009417 0.006869 0.005160 0.004024 0.003275 0.002784
0.002465 0.002257 0.002123 0.002037 0.001982 0.001947
0.001924 0.001910 0.001901 0.001895 0.001891 0.001889
0.001888 0.001887 0.001886 0.001886 0.001886 0.001885

```

```

0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
0.001885 0.001885
c
c tallies specification
c
F4:n 58    $ reaction rate Cu-ng
E4 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM4 0.0848 20 102
F14:n 58    $ reaction rate Cu-na
E14 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM14 0.0848 20 107
F24:n 59    $reaction rate Ni-np
E24 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM24 0.0913 24 103
F34:n 59    $reaction rate Ni-n2n
E34 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM34 0.0913 24 16
F44:n 60    $reaction rate Co-ng
E44 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM44 0.0910 16 102
F54:n 60    $reaction rate Co-na
E54 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM54 0.0910 16 107
F64:n 61    $reaction rate Mn-ng
E64 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM64 0.0789 22 102
F74:n 61    $reaction rate Mn-n2n
E74 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM74 0.0789 22 16
F84:n 62    $reaction rate Zn-np
E84 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
    5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
    7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
    3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
    16 18
FM84 0.0658 14 103
F94:n 63    $reaction rate Ag-ng
E94 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5

```

5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15

 16 18
 FM94 0.0586 27 12102
 F104:n 64 \$reaction rate Al-ng
 E104 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM104 0.0602 25 102
 F114:n 64 \$reaction rate Al-na
 E114 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM114 0.0602 25 107
 F124:n 64 \$reaction rate Al-np
 E124 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM124 0.0602 25 103
 F134:n 65 \$reaction rate Au-ng
 E134 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM134 0.0591 12 102
 F144:n 67 \$reaction rate Au(Cd)
 E144 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM144 0.0591 12 102
 F154:n 68 \$reaction rate In-ng
 E154 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM154 0.0254 9 102
 F164:n 70 \$reaction rate In(Cd)
 E164 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 FM164 0.0254 9 102
 F174:n 58 \$Fluence Cu
 E174 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F184:n 59 \$Fluence Ni
 E184 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F194:n 60 \$Fluence Co
 E194 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F204:n 61 \$Fluence Mn
 E204 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5

5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F214:n 62 \$Fluence Zn
 E214 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F224:n 63 \$Fluence Ag
 E224 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F234:n 64 \$Fluence Al
 E234 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F244:n 65 \$Fluence Au
 E244 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F254:n 67 \$Fluence Au(Cd)
 E254 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F264:n 68 \$Fluence In
 E264 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18
 F274:n 70 \$Fluence In(Cd)
 E274 1E-9 1E-8 2.53E-8 1E-7 2E-7 5E-7 1E-6 2E-6 5E-6 1E-5 2E-5
 5E-5 1E-4 2E-4 5E-4 1E-3 2E-3 5E-3 1E-2 2E-2 3E-2 5E-2
 7E-2 1E-1 1.5E-1 2E-1 3E-1 5E-1 7E-1 9E-1 1 1.2 2
 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15
 16 18

c

c material cards

c

m1 7014 -0.780 \$ nitrogen (air)
 8016 -0.2095 \$ oxygen
 18000 -0.0093 \$ argon
 m2 6012 6 \$ carbon (wood)
 1001 10 \$ hydrogen
 8016 5 \$ oxygen
 m3 6012 -0.005 \$ carbon (steel carbon)
 26056 -0.995 \$ iron
 m4 1001 -0.0056 \$ hydrogen (NBS ordinary concrete)
 8016 -0.4956 \$ oxygen
 11023 -0.0171 \$ sodium
 13027 -0.0456 \$ aluminium
 14028 -0.3135 \$ silicon
 16032 -0.0012 \$ sulfur
 20040 -0.0826 \$ calcium
 26056 -0.0122 \$ iron
 19000 -0.0192 \$ potassium
 12000 -0.0024 \$ magnesium
 m5 82207 1 \$ lead
 m6 74000 1 \$ tungsten
 m7 13027 1 \$ Al
 m8 49000. 1 \$ In-115
 m9 49115.10y -0.957 \$ dummy
 m10 48000. 1 \$ Cd
 m11 79197. 1 \$ Au-197
 m12 79197.10y 1 \$ dummy Au

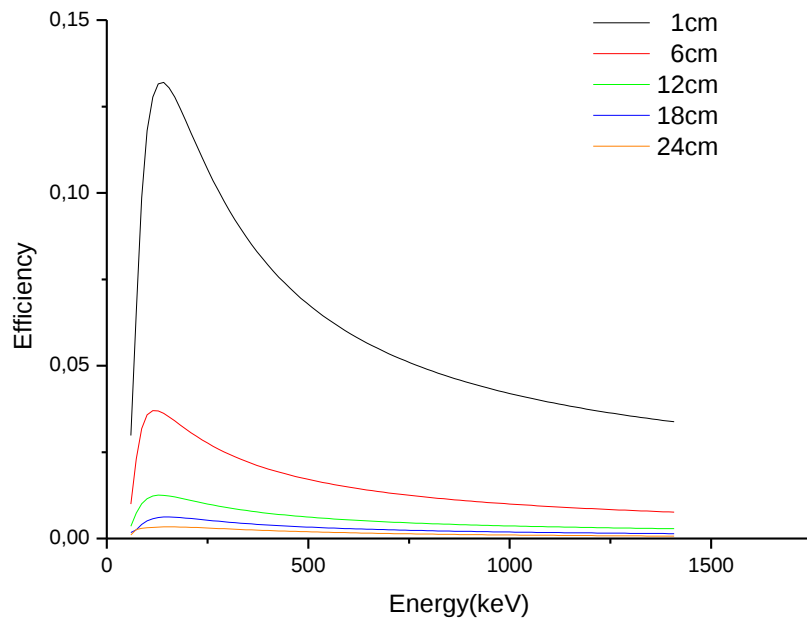
```

m13 30000. 1 $ Zn-64
m14 30064.10y -0.4917 $ dummy Zn
m15 27059. 1 $ Co-59
m16 27059.10y 1 $ dummy Co-59
m17 11023. 1 $ Na-23
m18 11023.10y 1 $ dummy Na
m19 29000. 1 $ Cu
m20 29063.10y -0.6915 $ dummy Cu
m21 25055 1 $ Mn-55
m22 25055.10y 1 $ dummy Mn
m23 28000. 1 $ Ni-58
m24 28058.10y -0.680769 $ dummy Ni-58
m25 13027.10y 1 $ dummy Al
m26 47000. 1 $ Ag
m27 47109.10y -0.4816 $ dummmmy Ag-109
c
c problem cut-offs
c
nps 1.0E+17
ctme 7000

```

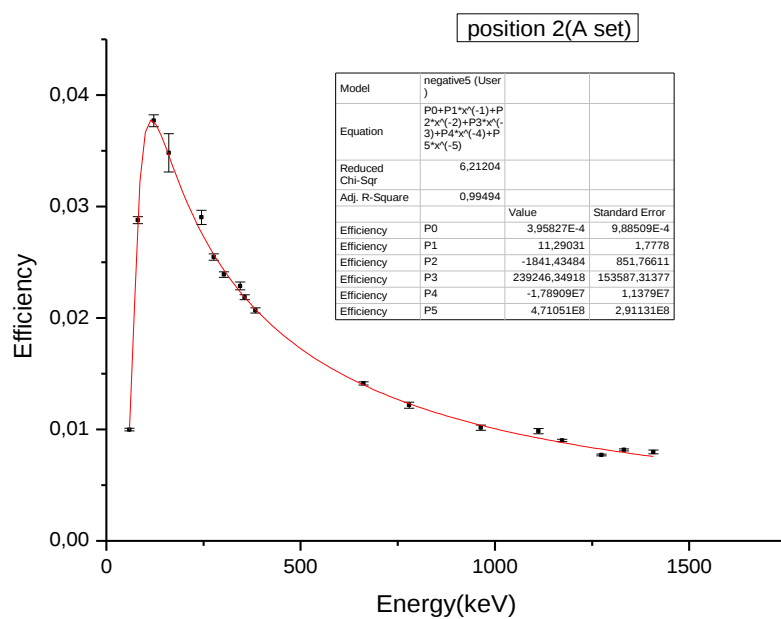
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

(Βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτή γερμανίου τύπου GEM80)

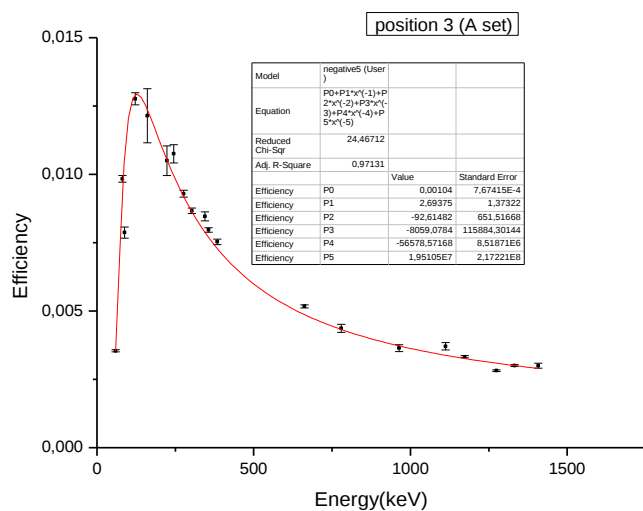


Σχήμα Β1 : Καμπύλες απόδοσης για τις αντίστοιχες θέσεις πηγής-ανιχνευτή HpGe

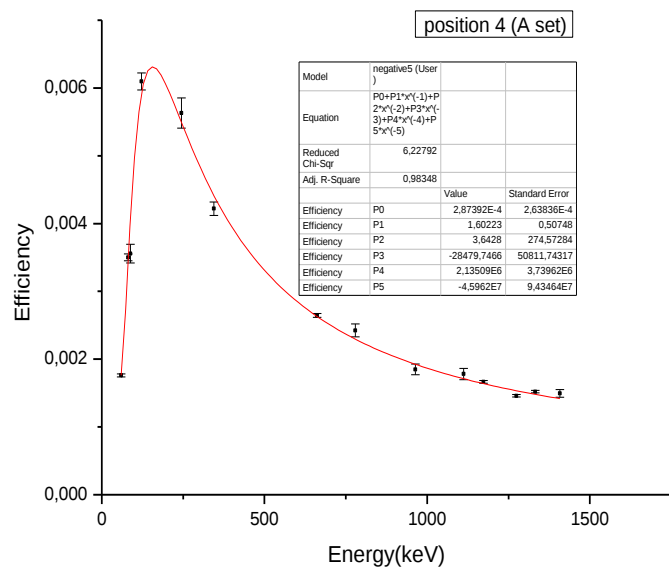
- Για τη θέση 6cm :



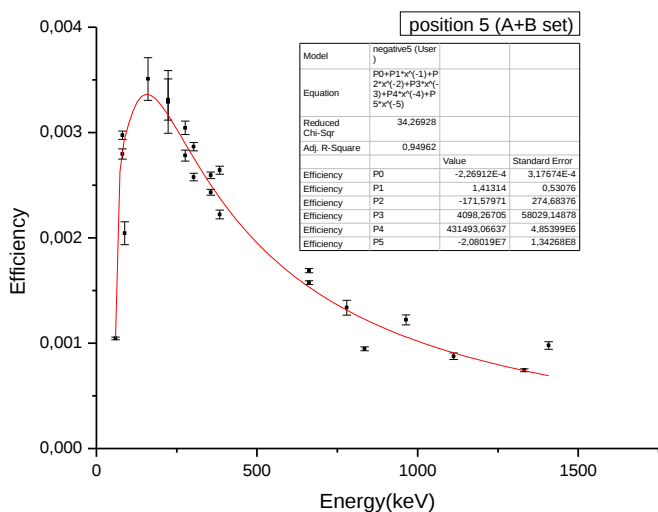
- Για τη θέση 12cm :



- Για τη θέση 18cm :



- Για τη θέση 24cm :



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

(Υπολογισμός σταθμισμένου μέσου)

Στο παρόν παράρτημα περιγράφεται η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών, ο υπολογισμός δηλαδή του σταθμισμένου μέσου των τιμών αυτών και της αντίστοιχης αβεβαιότητας, ο οποίος βασίζεται στη μεθοδολογία που προτείνεται στη βιβλιογραφία (Gilmore & Hemingway, 1995).

Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν

$$x_1 \pm \delta x_1, x_2 \pm \delta x_2, \dots, x_i \pm \delta x_i$$

όπου

$x_1, x_2, \dots, x_i$: οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους και

$\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_i$: οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή των x_i . Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά σωστός ο απλοϊκός αυτός υπολογισμός, καθώς λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξαρτήτως του αν αυτές συνοδεύονται από μικρό ή μεγαλύτερο σφάλμα. Η ορθή διαδικασία είναι ο υπολογισμός του «σταθμισμένου» μέσου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i} \quad (\Gamma.1)$$

όπου

w_i : συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της απόκλισης της

κάθε τιμής, δηλαδή $w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2}$.

Η τυπική απόκλιση της σταθμισμένης μέσης τιμής θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{\sum w_i} \quad (\Gamma.2)$$

η οποία ονομάζεται και «εσωτερική διακύμανση» (internal variance), διότι λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες των τιμών.

Διαφορετικά, αν συνυπολογιστεί και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η «εξωτερική διακύμανση», η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\text{var}(x) = \frac{\sum [x_i - \bar{x}]^2 w_i}{\sum w_i} \quad (\Gamma.3)$$

Ανάμεσα στις δύο, επιλέγεται η αβεβαιότητα με τη μεγαλύτερη τιμή, ώστε να αποφεύγεται υποεκτίμηση του σφάλματος. Η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος περιλαμβάνει τελικά το σταθμισμένο μέσο και την αντίστοιχη αβεβαιότητα

$$\bar{x} \pm \text{var}(x) \quad (\Gamma.4)$$

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος και η αβεβαιότητα δέσμης τιμών στα πλαίσια της Δ.Ε.