



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Μελέτη των παρασιτικών νετρονίων στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε
«Δημόκριτος» με χρήση του κώδικα Monte Carlo
GEANT4**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της **Αναστασίας Ζιαγκοβά**

Επιβλέπων: **Μιχάλης Κόκκορης**

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2022

*Στους γονείς μου, Θανάση και Φωτεινή
και στην αδερφή μου, Ηλιάνα...*

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή Δρ. Κόκκορη Μιχάλη για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής της. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη και την κατανόηση που έδειξε ακόμα και τις στιγμές μειωμένης απόδοσής μου.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ, οφείλω στον ερευνητή του Ι.Π.Σ.Φ. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» Δρ. Αξιώτη Μιχάλη ο οποίος με τις γνώσεις του με καθοδήγησε και μου προσέφερε τη μέγιστη δυνατή βοήθεια σε καθημερινό επίπεδο με σκοπό την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την Ομότιμη Καθηγήτρια Δρ. Ζάννη – Βλαστού Ρόζα και την Επίκουρη Καθηγήτρια Δρ. Διακάκη Μαρία, για τις συμβουλές και τις επισημάνσεις τους καθώς και για το όμορφο και φιλικό κλίμα που δημιουργούν με την παρουσία τους.

Ένα ακόμη μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον ερευνητή του Ι.Π.Σ.Φ του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» Δρ. Λαγογιάννη Αναστάσιο για την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει, την υπομονή του καθώς και για όλες τις ευκαιρίες που μου έχει δώσει ώστε να αγαπήσω περισσότερο τον κλάδο της Πυρηνικής Φυσικής.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω, φυσικά, όλα τα μέλη της ομάδας πυρηνικής Φυσικής του Πολυτεχνείου. Κάποιοι τους, έπαιξαν περισσότερο καθοριστικό ρόλο στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας εργασίας και τους ευχαριστώ θερμά αλλά σίγουρα η βοήθεια και η παρουσία όλων ήταν πολύτιμη. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα Σωτήρη Χασάπογλου για τις αμέτρητες ώρες συζητήσεων που ξόδεψε για την περαιτέρω κατανόηση του προβλήματος.

Την επόμενη παράγραφο ευχαριστιών θα την αφιερώσω σε δύο άτομα που στέκονται δίπλα μου εδώ και δύο χρόνια και τους ευχαριστώ από καρδιάς για τη βοήθεια, τη συνεργασία αλλά και τη φιλία που μου έχουν προσφέρει. Σίγουρα δεν τους συγχωρώ, βέβαια, την μη επισήμανση του ονόματός μου στις ευχαριστίες των δικών τους μεταπτυχιακών εργασιών. Ευχαριστώ, λοιπόν τον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Γκάτη και την συνεργάτιδά μου Ευαγγελία Ταϊμπίρη.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την στήριξη και την κατανόηση που έδειξαν απέναντι στην χρονικά περιορισμένη διαθεσιμότητα μου την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου απέναντι στους γονείς μου, Θανάση και Φωτεινή, την αδερφή μου, Ηλιάνα και τον φίλο της, Γιώργο, για όλη τη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έχουν δείξει όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Κατά τα πειράματα σχάσης και νετρονικής ενεργοποίησης που πραγματοποιούνται στο εργαστήριο του επιταχυντή Tandem van de Graaff 5.5 MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος» μια από τις κύριες αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων που χρησιμοποιείται είναι η ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$. Στη γεωμετρία του κυρίως στόχου, δηλαδή του τριτίου, εμπεριέχονται στοιχεία όπως το μολυβδαίνιο, ο χαλκός και το τιτάνιο όπου κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης πρωτονίων με αυτά, είναι πιθανό να παραχθούν νετρόνια που θα «μολύνουν» την κύρια δέσμη νετρονίων. Τα νετρόνια αυτά καλούνται παρασιτικά και η ποσοτικοποίησή τους είναι απαραίτητη για την εξαγωγή μη εσφαλμένων αποτελεσμάτων όσον αφορά τους υπό μελέτη προς σχάση στόχους. Μέσω της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η κατασκευή κατάλληλου κώδικα προσομοίωσης με την βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου GEANT₄ με στόχο την ποσοτικοποίηση των παρασιτικών νετρονίων. Στο συγκεκριμένο κώδικα έγινε η εφαρμογή μιας μεροληπτικής τεχνικής (cross section biasing technique) ώστε να εξασφαλιστεί η αύξηση της ενεργού διατομής των αντιδράσεων με στόχο τη βελτιστοποίηση των στατιστικών αποτελεσμάτων σε μικρούς υπολογιστικούς χρόνους.

Καθώς η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής μπορεί να επιφέρει μεταβολή των φυσικών διαδικασιών που πραγματοποιούνται κατά την προσομοίωση, υλοποιήθηκε ο έλεγχος της συγκεκριμένης τεχνικής μέσω επιπλέον προσομοιώσεων ελέγχου για να αποφευχθούν τυχόν αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από τα θεωρητικά αναμενόμενα.

Abstract

One of the main reactions for the production of the neutron beam which is used during fusion and neutron activation experiments at the Tandem accelerator laboratory of Tandem Van de Graaff 5.5 MV at N.C.S.R "Demokritos" is the ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ one. In the geometry of the main tritium target, elements such as molybdenum, copper and titanium are contained. During the interaction of the proton beam with them, it is possible to produce neutrons that will "contaminate" the main neutron beam. These neutrons are called parasitic and their quantification is necessary in order to avoid obtaining erroneous results for the targets under study. In the framework of the present work, an appropriate simulation code was developed via the GEANT₄ toolkit in order to quantify the parasitic neutrons. A cross section biasing technique was applied to this code in order to force the increase of the cross section of the reactions and thus to optimize the statistical results in short computational times.

As the application of the biasing technique can cause a change in the physical processes occurring during the simulation, the specific technique was tested through additional control simulations to avoid any deviations of the results from the theoretically expected ones.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή	1
1.1 Ο κώδικας GEANT4	1
1.2 Τεχνικές Μεροληπτικής Προσομοίωσης.....	3
1.3 Πειραματική διαδικασία και προσέγγιση προσομοιώσεων μέχρι τώρα.....	4
1.4 Η μεροληπτική τεχνική προσομοίωσης για την παρούσα εργασία.....	5

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή.....	8
2.1 Έλεγχος σε παχύ στόχο αλουμινίου (^{27}Al).....	8
2.1.1 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 10 MeV.....	8
2.1.2 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 6.5 MeV.....	17
2.2 Έλεγχος σε παχύ στόχο Σιδήρου (^{56}Fe).....	23
2.2.1 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 10 MeV.....	23
2.2.2 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 6.5 MeV.....	30
2.3 Έλεγχος αξιοπιστίας της μεθόδου σχετικά με τη συμπεριφορά της δέσμης των πρωτονίων.....	35
2.4 Διαδικασία επιλογής του κατάλληλου πολλαπλασιαστικού παράγοντα (biasing factor)	37

Κεφάλαιο 3

Εισαγωγή.....	39
3.1 Γεωμετρία της πειραματικής διάταξης.....	39
3.2 Επιλογή της κατάλληλης τιμής του biasing factor για την πειραματική διάταξη ενδιαφέροντος.....	40
3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	45

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	52
----------------------------------	----

Βιβλιογραφία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια μικρή αναφορά στον κώδικα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, GEANT₄[1], καθώς και στα βασικά χαρακτηριστικά των μεροληπτικών τεχνικών προσομοίωσης. Επιπλέον, θα γίνει η περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιείται από την ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π. για τον υπολογισμό της ροής των νετρονίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σχάσης και νετρονικής ενεργοποίησης. Τέλος, θα δοθεί η θεωρητική προσέγγιση πάνω στην οποία βασίζεται η μεροληπτική τεχνική που εφαρμόστηκε, με σκοπό την κάλυψη των αναγκών που αφορούν τη μελέτη των παρασιτικών νετρονίων της παρούσας εργασίας.

1.1 Ο κώδικας GEANT₄

Ο κώδικας GEANT₄ αποτελεί ένα υπολογιστικό εργαλείο προσομοίωσης φυσικών διεργασιών κάνοντας χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Αρχικά, κατασκευάστηκε για την εξυπηρέτηση των αναγκών του κλάδου της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών. Εν συνεχεία, γεννήθηκε η ανάγκη προσθήκης σε αυτόν επιπλέον δυνατοτήτων για την αντιμετώπιση προβλημάτων που αφορούν διάφορους κλάδους της φυσικής όπως αυτούς της Πυρηνικής Φυσικής, της Ιατρικής Φυσικής, της Φυσικής των Επιταχυντών και της Αστροφυσικής. Η ανάπτυξη του βασίστηκε στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό (C++). Το GEANT₄ αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να έχει εύκολη πρόσβαση σε αυτό και να μπορεί να αλληλεπιδράσει με την επιστημονική κοινότητα που το χρησιμοποιεί, ενώ επίσης, υπόκειται σε συνεχείς βελτιώσεις βασισμένες στις απαιτήσεις των διαφόρων φυσικών διεργασιών.

Οι βασικές δυνατότητες του GEANT₄ παρέχουν στο χρήστη την ευκολία να αναπαραγάγει την ακριβή γεωμετρία του υπό μελέτη προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις λεπτομέρειες που θεωρούνται απαραίτητες για την καλώς καθορισμένη αλληλεπίδραση των διαφόρων σωματιδίων με τις επιφάνειες και τους όγκους που περιλαμβάνονται σε αυτή. Επιπλέον, μπορεί να «παρακολουθεί» με ακρίβεια την πορεία και τα χαρακτηριστικά του κάθε σωματιδίου που εισέρχεται στη γεωμετρία από το χρήστη ή «γεννάται» μέσω αλληλεπιδράσεων και αποδιεγέρσεων με τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Έτσι, η ικανότητα ανίχνευσης και προσδιορισμού της απόκρισης ενός ανιχνευτικού συστήματος αλλά και η καταγραφή πληθώρας πληροφοριών για κάθε στοιχείο που περιλαμβάνεται σε μια προσομοίωση, σε κάθε στάδιο αυτής, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες δυνατότητες του κώδικα.

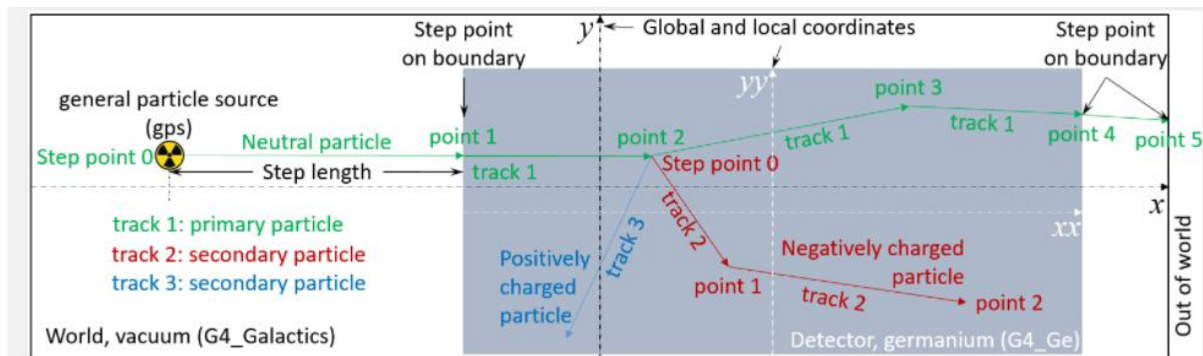
Οι πρώτες εφαρμογές για τις οποίες κατασκευάστηκε το λογισμικό GEANT₄ αντικατόπτριζαν την κάλυψη των αναγκών της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών. Σε αυτή την περίπτωση, οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με την ύλη αφορούν κατά κύριο λόγο ενέργειες της τάξης των GeV και είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως. Για το λόγο αυτό, ο τρόπος υπολογισμού των ενεργών διατομών των αντιδράσεων και του υπολογισμού της απώλειας ενέργειας των σωματιδίων κατά την διέλευσή τους μέσα από την ύλη βασίστηκε, στα πρώτα στάδια ανάπτυξης του λογισμικού, στη χρήση διαφόρων θεωρητικών μοντέλων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η προσθήκη περαιτέρω διαδικασιών που αφορούν αδρονικές αλληλεπιδράσεις καθώς και πληθώρα πειραματικών και αξιολογημένων δεδομένων (evaluated data), μέσω της χρήσης διαφόρων βιβλιοθηκών, όπως οι TENDL[2], JENDL[3], JEFF[4], ENDF[5].

Για την ανάπτυξη του κυρίως κώδικα μέσω του GEANT₄, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει σε αυτόν διάφορες έτοιμες κλάσεις με στόχο την αναλυτική περιγραφή του προβλήματος του αλλά και την ακριβή εξαγωγή των αποτελεσμάτων που τον ενδιαφέρουν. Οι βασικές προϋποθέσεις για την πραγμάτωση μιας προσομοίωσης αφορούν:

- την κατασκευή της γεωμετρίας και τον ορισμό των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν
- τον ορισμό των σωματιδίων και της πηγής που καλούνται να αλληλεπιδράσουν με τους όγκους της γεωμετρίας
- τους τρόπους με τους οποίους θα γίνεται η κάθε αλληλεπίδραση, δηλαδή τον ορισμό των μοντέλων φυσικής ή βιβλιοθηκών που θα χρησιμοποιηθούν
- την αρχικοποίηση και τον τρόπο πραγματοποίησης της προσομοίωσης (run)
- την διαχείριση των γεγονότων (events) και των τροχιών των σωματιδίων (tracks)
- την οπτικοποίηση του προβλήματος για την καλύτερη εξαγωγή των αποτελεσμάτων και αλληλεπίδραση του χρήστη με το περιβάλλον του GEANT₄

Εφόσον οριστούν με σωστό τρόπο όλα τα παραπάνω, μπορεί να ξεκινήσει, με τις κατάλληλες εντολές, η διαδικασία της προσομοίωσης (run). Το βασικό στοιχείο του κάθε run αποτελεί η παραγωγή των γεγονότων (events) όπως αυτά έχουν οριστεί από το χρήστη μέσω του ορισμού της πηγής. Το event είναι η βασική μονάδα κατά την προσομοίωση μέσω του κώδικα. Στην αρχή του κάθε run, δημιουργούνται τα ίχνη (tracks) των αρχικών σωματιδίων τα οποία αποθηκεύονται στη μνήμη. Στη συνέχεια, γίνεται η παρακολούθηση αυτών, ένα προς ένα και βήμα προς βήμα (step by step) μέχρι να εξέλθουν από την καθορισμένη γεωμετρία, μέχρι να γίνει η απορρόφησή τους από κάποιο υλικό, ή μέχρι να πραγματοποιηθεί η αλλαγή τους σε κάποιο άλλο σωματίδιο. Η αλλαγή των αρχικών σωματιδίων σε διαφορετικού τύπου σωματίδια γίνεται μέσω των διαδικασιών αλληλεπίδρασης με τα υλικά της γεωμετρίας. Τα δευτερογενή πλέον σωματίδια έχουν τα δικά τους ίχνη (secondary tracks), αποθηκεύονται και εξετάζονται από τον κώδικα ένα προς ένα με τον ίδιο τρόπο. Το σύνολο των ιχνών των αρχικών και των δευτερογενών σωματιδίων αποτελούν επιμέρους μονάδες του εκάστοτε γεγονότος. Ως αποτέλεσμα της

όλης διαδικασίας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να λάβει πληροφορίες για όλα τα είδη σωματιδίων και για κάθε στάδιο αυτής σύμφωνα με τις ανάγκες του. Σχηματικά, η αναπαράσταση της διαδικασίας παραγωγής και εξέλιξης ενός γεγονότος φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 1.1)[6].



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας προσομοίωσης ενός event.

1.2 Τεχνικές Μεροληπτικής Προσομοίωσης

Σε αρκετές από τις διαδικασίες προσομοίωσης και σύμφωνα με τα επιθυμητά αποτελέσματα, είναι πιθανό να κρίνεται αναγκαία η χρήση τεχνικών μεροληπτικής προσέγγισης (biasing techniques). Οι τεχνικές αυτές είναι μέθοδοι περιγραφής μιας φυσικής – αναλογικής διαδικασίας με τρόπο περισσότερο προκατειλημμένο. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις περιπτώσεις προσομοίωσης όπου λαμβάνουν χώρα «σπάνια» γεγονότα. Ο κύριος σκοπός τους είναι να αποδώσουν με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια τα σπάνια αυτά γεγονότα με βελτιωμένη στατιστική, σε μικρούς υπολογιστικούς χρόνους και χωρίς να μεταβάλλουν τα αναμενόμενα, από την αναλογική διαδικασία, αποτελέσματα.

Οι τεχνικές biasing ποικίλουν σε πλήθος και είδος ανάλογα με το λογισμικό του κώδικα που θα χρησιμοποιηθεί. Πέρα από τις τυχόν διαφορές όμως που μπορεί να παρουσιάζουν ανά περίπτωση, οι περισσότερες εξ αυτών είναι δυνατόν να διαχωριστούν, σε δύο μεγάλες βασικές κατηγορίες. Η πρώτη βασίζεται στη διαδικασία μεταβολής της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (pdf) μιας συγκεκριμένης διεργασίας ώστε να επιτευχθεί ένας διαφορετικός τρόπος δειγματοληψίας σύμφωνα με τη μέθοδο Monte Carlo. Στη δεύτερη περίπτωση, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας παραμένει ίδια με την αναλογική περίπτωση όμως τα αρχικά σωματίδια μπορούν να αναγκάζονται να «παράξουν» πανομοιότυπα με αυτά νέα σωματίδια, τα οποία είτε θα παρακολουθούνται είτε όχι, σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που θα ορίσει ο χρήστης.

Το βασικό πρόβλημα που μπορεί να προκύψει κατά την εφαρμογή τέτοιων τεχνικών είναι η βίαιη μεταβολή των πραγματοποιούμενων φυσικών διεργασιών με αποτέλεσμα την αλλοίωση, με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το είδος της τεχνικής, των αποτελεσμάτων. Έτσι, για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ των

θεωρητικά αναμενόμενων αποτελεσμάτων και των τελικών μετά την εφαρμογή της εκάστοτε τεχνικής, είναι απαραίτητη η χρήση τους με σύνεση και μεγάλη προσοχή.

1.3 Πειραματική διαδικασία και προσέγγιση μέχρι τώρα

Η μελέτη των αντιδράσεων σχάσης και των αντιδράσεων νετρονικής ενεργοποίησης πραγματοποιείται στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος» με τη χρήση δέσμης (ιδανικά μονοενεργειακών) νετρονίων παραγόμενων από τις αντιδράσεις ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ και ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$. Βασική προϋπόθεση για τον ακριβή προσδιορισμό των ενεργών διατομών των υπό μελέτη αντιδράσεων, αποτελεί ο προσδιορισμός της ροής των νετρονίων που προσπίπτουν στο στόχο συναρτήσει της ενέργειάς τους. Δυστυχώς, στον υπολογισμό του μεγέθους αυτού, εκτός από τον αριθμό των νετρονίων που παράγονται από τις κύριες αντιδράσεις, συνεισφέρουν κατά ένα ποσοστό και νετρόνια προερχόμενα από παρασιτικές αντιδράσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Αυτές οι παρασιτικές αντιδράσεις μπορεί να οφείλονται στην αλληλεπίδραση της κύριας δέσμης ιόντων είτε με τα στοιχεία της επιταχυντικής γραμμής (π.χ. το ίδιο το υλικό του επιταχυντικού σωλήνα, τους κατευθυντήρες – *collimators*) είτε με τα υλικά που περιβάλλουν τον κύριο στόχο (π.χ. μολυβδαίνιο, χαλκός) είτε τέλος, με στοιχεία που έχουν προκαλέσει επιμόλυνση της διάταξης (π.χ. το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, ή οργανικές ενώσεις που έχουν επικαθίσει στο στόχο ή σε στοιχεία της πειραματικής διάταξης π.χ. από τα λάδια των αντλιών κενού).

Η μέθοδος που ακολουθείται μέχρι στιγμής για τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων, από την ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π., είναι η εξής:

- Γίνεται η περιγραφή της κύριας αντίδρασης παραγωγής νετρονίων μέσω του κώδικα NeuSDesc [7] από τον οποίο εξάγεται ένα αρχείο εισόδου για τον κώδικα προσομοίωσης MCNP [8]. Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει την περιγραφή μιας πηγής νετρονίων με τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά σύμφωνα με την κύρια αντίδραση.
- Κατασκευάζεται η γεωμετρία της διάταξης και ορίζονται οι κατάλληλες συνθήκες με χρήση του κώδικα MCNP, στον οποίο ως πηγή νετρονίων ορίζεται αυτή που προέκυψε από τον κώδικα NeuSDesc. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω προσομοίωσης προκύπτει η ροή των νετρονίων σε κάθε υπό μελέτη στόχο.
- Τέλος, οι τιμές της ροής των νετρονίων εισάγονται στα αποτελέσματα υπολογισμού των ενεργών διατομών.

Στο πλαίσιο της παραπάνω μεθόδου, δεν περιλαμβάνεται σε κανένα στάδιο η μελέτη και ο προσδιορισμός της συνεισφοράς των παρασιτικών νετρονίων, που παράγονται από την αλληλεπίδραση της φορτισμένης δέσμης με τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης, στις ροές που προκύπτουν. Η αδυναμία αυτή μπορεί να αποφευχθεί εφόσον γίνει πλήρης προσέγγιση της όλης διαδικασίας, μέσω της προσομοίωσης, κάνοντας χρήση της πρωτογενούς δέσμης φορτισμένων σωματιδίων. Σε αυτή την περίπτωση, τα νετρόνια που θα παραχθούν αντιστοιχούν σε κάθε πιθανή αντίδραση μεταξύ της κύριας δέσμης και των

υλικών της διάταξης και ως αποτέλεσμα, η προσομοίωση αντικατοπτρίζει πλέον όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικά την όλη διαδικασία ενός πειράματος σε φυσικό χώρο.

Στη βάση της ιδανικής αυτής περίπτωσης προσομοίωσης ενέχεται ένα μεγάλο, υπολογιστικής φύσεως, πρόβλημα ως απόρροια των φυσικών διαδικασιών. Ο υπολογιστικός χρόνος (computing time) που απαιτείται για την εξαγωγή στατιστικά ασφαλών αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγάλος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων έχουν ως επί το πλείστον πολύ χαμηλές τιμές ενεργών διατομών σε σύγκριση με τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Επιπλέον, το ποσοστό επιμόλυνσης της διάταξης με τα στοιχεία που παράγουν τα παρασιτικά νετρόνια είναι σε μικρά επίπεδα, συνθήκη που δυσχεραίνει ακόμη περισσότερο την όλη κατάσταση υπό το πρίσμα της υπολογιστικής διαδικασίας.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος που περιγράφηκε παραπάνω, είναι απαραίτητη η χρήση μεροληπτικών τεχνικών κατά την ανάπτυξη του κώδικα προσομοίωσης. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχουν διαθέσιμες διάφορες τεχνικές τέτοιου είδους και ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει μια, ή συνδυασμό αυτών, ανάλογα με την περίπτωση που καλείται να εξετάσει και τις απαιτήσεις του υπό μελέτη προβλήματος. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, έγινε η εφαρμογή μιας εξ αυτών η οποία βασίζεται στην μεροληπτική επιλογή των ενεργών διατομών των αντιδράσεων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Στις παρακάτω ενότητες, θα γίνει η περιγραφή της συγκεκριμένης τεχνικής καθώς και η ανάλυση της μεθόδου για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της.

1.3 Η μεροληπτική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας

Κάθε σωματίδιο κατά τη διέλευσή του μέσα από κάποιο υλικό μπορεί να αλληλεπιδράσει με αυτό με διάφορους μηχανισμούς. Η μέση απόσταση που διανύει μεταξύ δύο διαδοχικών αλληλεπιδράσεων περιγράφεται από το φυσικό μέγεθος της «μέσης ελεύθερης διαδρομής» (mean free path) το οποίο συνδέεται με την αντίστοιχη πιθανότητα πραγματοποίησης της εκάστοτε αντίδρασης. Η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι άμεσα εξαρτώμενη και αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της ενεργού διατομής της εκάστοτε αντίδρασης αλλά και της πυκνότητας του υλικού. Η τιμή της ολικής μέσης ελεύθερης διαδρομής δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_T = \int_0^{\infty} x p(x) dx \quad (1.1)$$

Όπου,

- x είναι η μέση απόσταση που έχει διανύσει το σωματίδιο μέσα στην ύλη χωρίς να έχει αλληλεπιδράσει
- $p(x)$ η πιθανότητα αλληλεπίδρασης

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης στο χωρικό διάστημα dx ακολουθεί τη σχέση:

$$p(x)dx = \Sigma_T e^{-\Sigma_T x} dx \quad (1.2)$$

όπου Σ_T είναι η μακροσκοπική ολική ενεργός διατομή, οπότε τελικά προκύπτει πως η μέση ελεύθερη διαδρομή ισούται με $\lambda_T = \frac{1}{\Sigma_T}$.

Τέλος, για τη μακροσκοπική ενεργό διατομή ισχύουν οι σχέσεις:

$$\Sigma_T = \Sigma \Sigma_i \quad (1.3)$$

και

$$\Sigma_i(m^{-1}) = N(\text{nuclei}/m^3) [\sigma_i(m^2)] \quad (1.4)$$

Στην παραπάνω σχέση είναι εμφανής και ο τρόπος που συνδέεται η μακροσκοπική ενεργός διατομή Σ , με τη μικροσκοπική σ . Ο δείκτης i αναφέρεται στα διαφορετικά είδη αλληλεπίδρασης που μπορεί να πραγματοποιήσει το σωματίδιο κατά τη διέλευσή του από το υλικό το οποίο αποτελείται από N πυρήνες/ m^3 [9].

Η μικροσκοπική ενεργός διατομή μιας αντίδρασης εξαρτάται άμεσα από την ενέργεια που θα έχει το εισερχόμενο στην ύλη σωματίδιο καθώς επίσης και από το είδος των πυρήνων που θα συναντήσει σε αυτό, δηλαδή από το μαζικό και ατομικό αριθμό τους. Παρατηρώντας τις παραπάνω σχέσεις βλέπουμε πως η εξάρτηση αυτή επηρεάζει άμεσα και την τιμή της μέσης ελεύθερης διαδρομής.

Στο πλαίσιο ανάπτυξης του κατάλληλου κώδικα με τη βοήθεια του GEANT₄ ώστε να είναι εφικτή η πλήρης περιγραφή του προβλήματος της μελέτης των παρασιτικών νετρονίων, όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, έγινε χρήση μιας από τις βασικές τεχνικές biasing όπως εμφανίζεται στο παράδειγμα extended/biasing/GB01 το οποίο παρέχεται μαζί με τον πηγαίο κώδικα. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική γίνεται ο εναγκαλισμός (wrap) της κάθε διαδικασίας που πρόκειται να λάβει χώρα από μια νέα διαδικασία με τα ίδια χαρακτηριστικά αλλά με μια βασική διαφορά. Ορίζεται η μέση ελεύθερη διαδρομή των αντιδράσεων στο υλικό και από αυτή με βάση τη σχέση $\lambda_T = \frac{1}{\Sigma_T}$ εξάγεται η μακροσκοπική ενεργός διατομή η οποία στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται κατά έναν αριθμητικό παράγοντα (θα αναφέρεται στο εξής ως biasing factor (f_b)). Η νέα αυτή τιμή της ενεργού διατομής χρησιμοποιείται έναντι της αναλογικής και η διαδικασία δειγματοληψίας κατά την προσομοίωση πραγματοποιείται με βάση τις νέες συνθήκες.

Για την ενεργοποίηση της συγκεκριμένης τεχνικής εισάγεται στον ήδη υπάρχοντα κώδικα μία καινούργια κλάση απαραίτητη για την περιγραφή της. Επιπλέον, στην κλάση που αναφέρεται στην κατασκευή της γεωμετρίας εισάγεται η αντίστοιχη εντολή που κατευθύνει την εφαρμογή της τεχνικής biasing σε συγκεκριμένο όγκο αλλά και στο είδος

των σωματιδίων που θα αντιστοιχεί σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Η εφαρμογή είναι εφικτή τόσο σε περισσότερους από έναν όγκους όσο και για διαφορετικά είδη σωματιδίων. Τέλος, στο main file του προγράμματος είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση της τεχνικής ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί ως υποκατηγορία στη βασική βιβλιοθήκη της φυσικής που χρησιμοποιείται. Τα παραπάνω βήματα αποτελούν τις βασικές προϋποθέσεις ώστε να ενεργοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί από τον κώδικα η συγκεκριμένη τεχνική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εισαγωγή

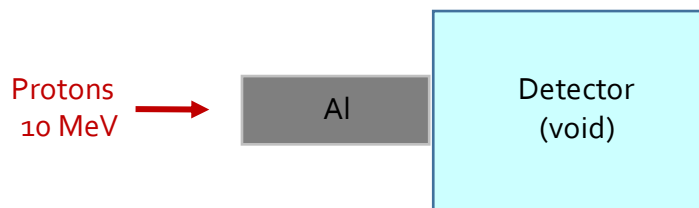
Στο παρόν κεφάλαιο θα αποτυπωθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με χρήση του κώδικα GEANT₄ από τους διάφορους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα και τα επιτρεπτά όρια της εφαρμογής της συγκεκριμένης μεροληπτικής τεχνικής που εφαρμόστηκε και περιγράφηκε παραπάνω. Οι έλεγχοι αυτοί είναι απαραίτητοι για την αναγνώριση τυχόν προβλημάτων και περιορισμών που μπορεί να προκύψουν κατά την εφαρμογή της τεχνικής στο πραγματικό πρόβλημα μελέτης των παρασιτικών νετρονίων.

2.1 Έλεγχος σε παχύ στόχο αλουμινίου (²⁷Al)

Για τους ελέγχους της συμπεριφοράς της μεροληπτικής τεχνικής που εφαρμόστηκε, χρησιμοποιήθηκε σε πρώτο στάδιο το αλουμίνιο ως στόχος μελέτης και η αντίδραση $^{27}\text{Al}(p,n)^{27}\text{Si}$. Η συγκεκριμένη αντίδραση είναι ενδόθερμη, έχει Q-value = -5594.71 keV και ενέργεια κατωφλίου $E_{th} = 5803.62$ keV.

2.1.1 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 10 MeV

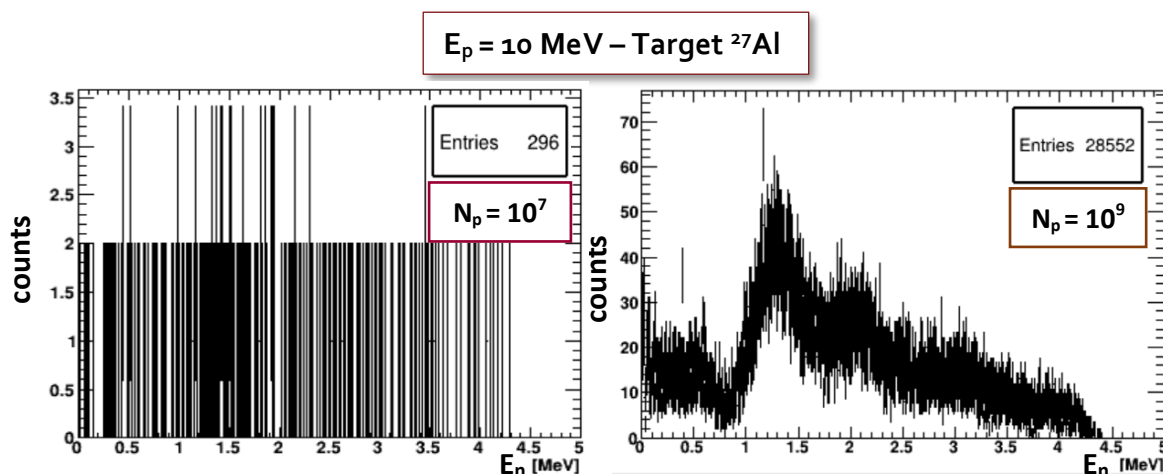
Στο πρώτο στάδιο του ελέγχου χρησιμοποιήθηκε μια απλή γεωμετρία για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και την αποφυγή παρερμηνείας των αποτελεσμάτων. Κατασκευάστηκε ένας παχύς στόχος αλουμινίου (²⁷Al) κυλινδρικής μορφής και ένας κενός κύλινδρος καταγραφής νετρονίων (θα αναφέρεται ως ανιχνευτής (detector) στη συνέχεια του κειμένου). Η παραγωγή των πρωτονίων γίνεται με χρήση σημειακής πηγής με διεύθυνση κατά τον άξονα z. Τα πρωτόνια συναντούν πρώτα τη μια βάση του κυλίνδρου που αποτελείται από αλουμίνιο. Η βάση αυτή είναι τοποθετημένη κάθετα ως προς τον άξονα της διεύθυνσης της δέσμης, η ακτίνα της είναι περίπου 0.5 cm ενώ το μήκος του κυλίνδρου είναι ορισμένο έτσι ώστε η δέσμη των πρωτονίων να χάνει όλη την ενέργεια της και να σταματά μέσα σε αυτόν. Ο ανιχνευτής (detector) είναι τοποθετημένος σε σειρά μετά το αλουμίνιο. Η ακτίνα του είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα του κυλίνδρου του αλουμινίου – ώστε να βελτιωθεί η στατιστική των καταγραφόμενων νετρονίων – και το μήκος του είναι κάποια εκατοστά (το ακριβές μήκος είναι αδιάφορο στο πλαίσιο του τρόπου χρήσης του). Μια αναπαράσταση της διάταξης παρουσιάζεται στην *Εικόνα 2.1*.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης.

Το πρώτο βήμα ήταν να χρησιμοποιηθεί μια δέσμη πρωτονίων ενέργειας 10 MeV και να πραγματοποιηθούν δύο πανομοιότυπες προσομοιώσεις όπου ο αρχικός αριθμός των πρωτονίων να είναι ίσος με 10^7 και 10^9 , αντίστοιχα. Οι δύο αυτές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής ώστε τα αποτελέσματά τους να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφόσον εφαρμοστεί η συγκεκριμένη τεχνική. Σε όλες τις προσομοιώσεις γινόταν η καταγραφή της κινητικής ενέργειας των νετρονίων που περνούσαν από την επιφάνεια της βάσης του ανιχνευτή αλλά και τα σημεία γέννησης των νετρονίων μέσα στο στόχο του αλουμινίου καθώς και η αντίστοιχη κινητική τους ενέργεια.

Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον ανιχνευτή στις δύο αυτές αναλογικές περιπτώσεις.

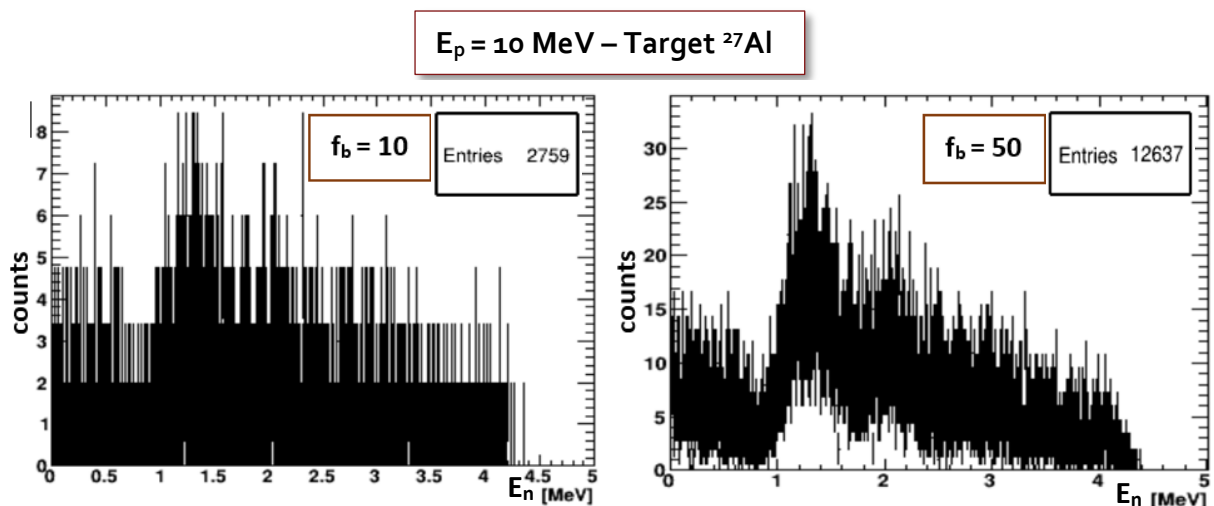


Εικόνα 2.2: Στο πρώτο ιστόγραμμα (αριστερά) εμφανίζεται το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφεται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 . Στο αντίστοιχο δεύτερο ιστόγραμμα (δεξιά) ο αρχικός αριθμός των πρωτονίων είναι 10^9 . Και τα δύο ιστογράμματα προκύπτουν από αναλογικές προσομοιώσεις.

Όπως παρατηρούμε από την πρώτη εικόνα, η στατιστική στην πρώτη περίπτωση είναι πολύ χαμηλή και μη επαρκής για τη μελέτη των νετρονίων που παράγονται ενώ για

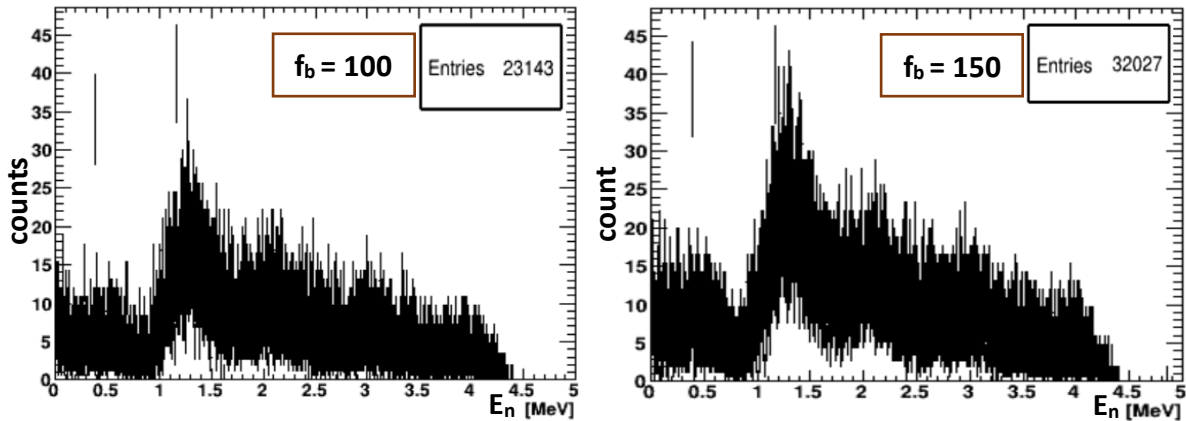
τη δεύτερη περίπτωση παρατηρούμε ένα αρκετά βελτιωμένο στατιστικό αποτέλεσμα. Το βασικό πρόβλημα το οποίο μας αποτρέπει από το να θεωρηθεί ικανοποιητικό και επαρκές το αποτέλεσμα με 10^9 αρχικό αριθμό πρωτονίων είναι η διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε ώστε να προκύψουν τα παραπάνω ιστογράμματα. Η διάρκεια της πρώτης προσομοίωσης είναι περίπου 4.5 min ενώ της δεύτερης περίπου 7 h υπό τις ίδιες συνθήκες. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί και έναν από τους βασικούς λόγους που οδήγησαν στην ανάγκη εφαρμογής της τεχνικής biasing. Στην κατασκευή μιας περισσότερο πολύπλοκης γεωμετρίας, όπου μάλιστα εμφανίζονται λεπτοί στόχοι – όπως αυτή που αντικατοπτρίζει το πρόβλημα των παρασιτικών νετρονίων που αφορά την παρούσα εργασία – οι απαιτούμενοι υπολογιστικοί χρόνοι θα αυξάνονταν ραγδαία.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή στον κώδικα της τεχνικής biasing για αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^7 και έγιναν έξι πανομοιότυπα runs με τη μόνη διαφορά στον αριθμό του biasing factor που ορίστηκε για το καθένα από αυτά. Οι biasing factors που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $f_b = 10, 50, 100, 150, 1000$ και 10000 . Στις Εικόνες 2.3, 2.4 και 2.5 εμφανίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά της Εικόνας 2.2 για την καθεμιά από τις έξι περιπτώσεις.



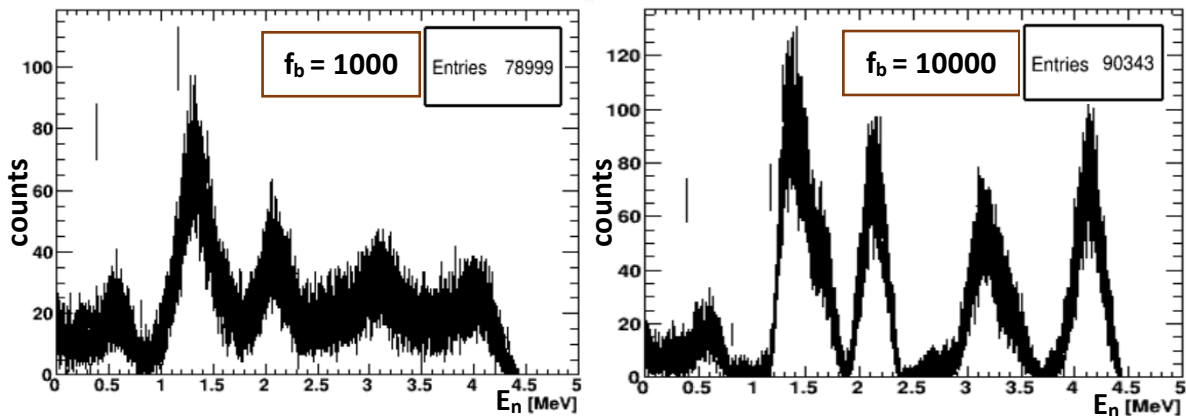
Εικόνα 2.3: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 10$ (αριστερά) και $f_b = 50$ (δεξιά).

$E_p = 10 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$



Εικόνα 2.4: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).

$E_p = 10 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$

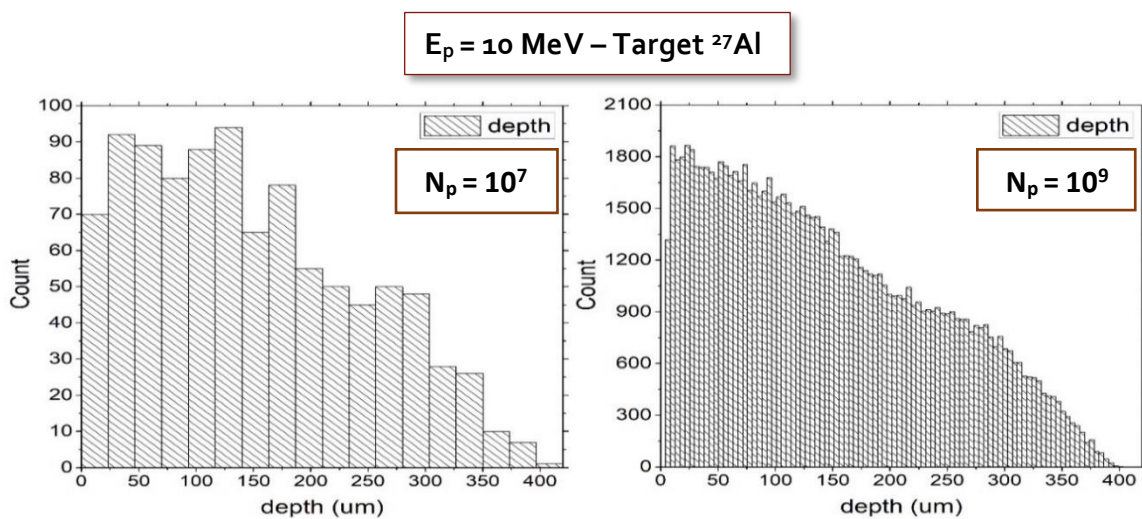


Εικόνα 2.5: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).

Στα παραπάνω ιστογράμματα παρατηρείται η αύξηση του αριθμού των συνολικών γεγονότων, δηλαδή του αριθμού των νετρονίων που παράγονται στην κάθε περίπτωση, συναρτήσει της αύξησης της τιμής του biasing factor. Παρόλα αυτά, είναι εύκολο να διακρίνει κανείς πως ενώ συνολικά η στατιστική βελτιώνεται, γεγονός που αποτελεί ένα από τα κύρια ζητούμενα, η ενεργειακή κατανομή φαίνεται να παρουσιάζει μεταβολές μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων. Κατά την χρήση των μικρότερων πολλαπλασιαστικών παραγόντων (~μέχρι $f_b = 150$), οι κορυφές που εμφανίζονται στο διάγραμμα διατηρούν σε έναν καλό βαθμό την αναλογία μεταξύ τους ενώ επιπλέον η ενεργειακή κατανομή συνολικά δεν φαίνεται να έχει μεγάλη απόκλιση από την αναλογική περίπτωση (οποιαδήποτε σύγκριση θα γίνεται έχοντας ως κριτήριο την περίπτωση που

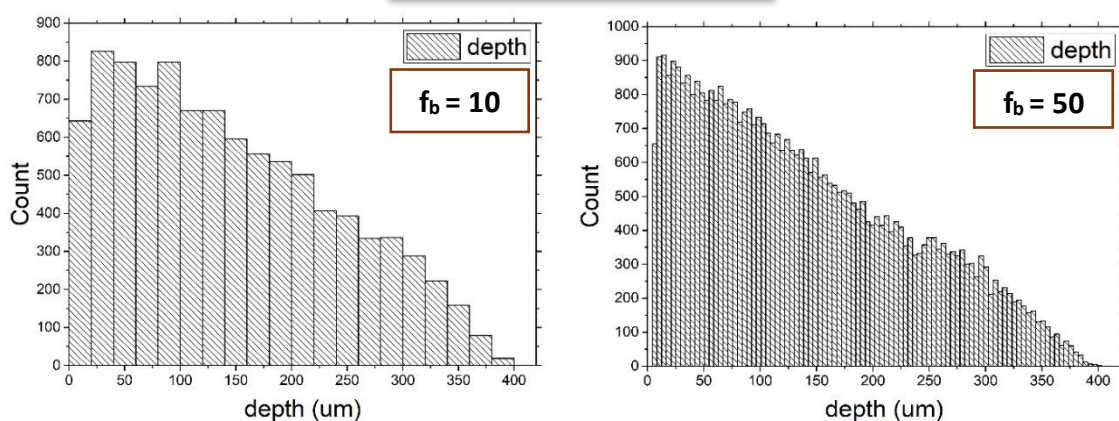
αντιστοιχεί στα 10^9 αρχικό αριθμό πρωτονίων όπου έχουμε καλύτερη στατιστική οπότε και πιο αξιόπιστη εικόνα των αποτελεσμάτων). Αντίθετα, αυξάνοντας τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα, f_b , η αναλογία μεταξύ των κορυφών φαίνεται να αλλάζει ολοένα και περισσότερο, μέχρι που η μορφή της κατανομής αλλοιώνεται σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με την αναλογική περίπτωση.

Η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων σε σχέση με τον biasing factor που χρησιμοποιείται ενέχει την υποψία μεταβολής ή ακόμα και αλλοίωσης των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Οπότε είναι απαραίτητο να γίνει ένας πιο εξονυχιστικός έλεγχος του αντίκτυπου που έχει η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής στα αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή θα επιτρέψει την επιλογή του κατάλληλου biasing factor έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ακολουθούν όσο το δυνατόν περισσότερο την αναλογική περίπτωση. Για το σκοπό αυτό, ζητήθηκε από τον κώδικα να καταγράψει τις ακριβείς θέσεις παραγωγής των νετρονίων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της δέσμης με το αλουμίνιο κατά μήκος του όγκου του υλικού. Από την καταγραφή αυτή προκύπτουν τα ιστογράμματα που φαίνονται παρακάτω στις Εικόνες 2.6, 2.7, 2.8 και 2.9, που αντιστοιχούν στο πλήθος των νετρονίων συναρτήσει του σημείου παραγωγής τους κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου και κατά τη διεύθυνση της δέσμης.



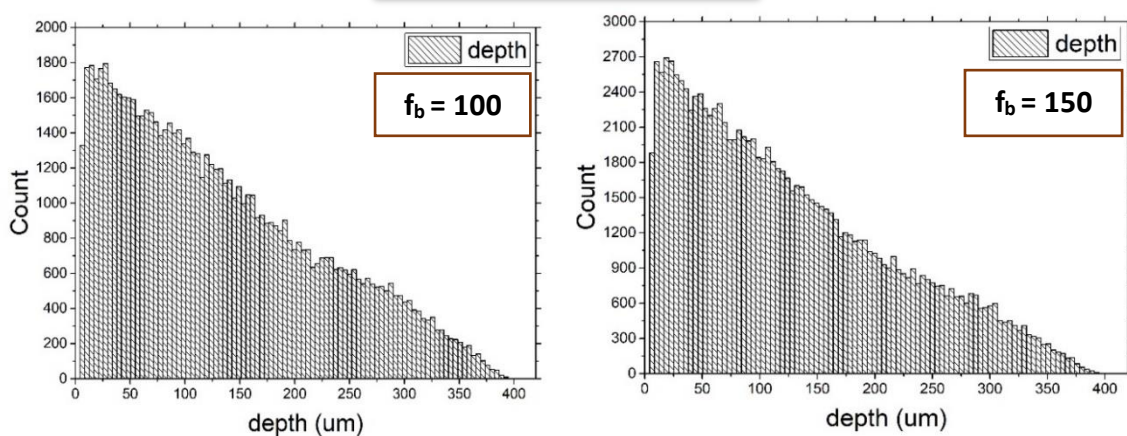
Εικόνα 2.6: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 (αριστερά) και 10^9 (δεξιά) χωρίς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής.

$E_p = 10 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$



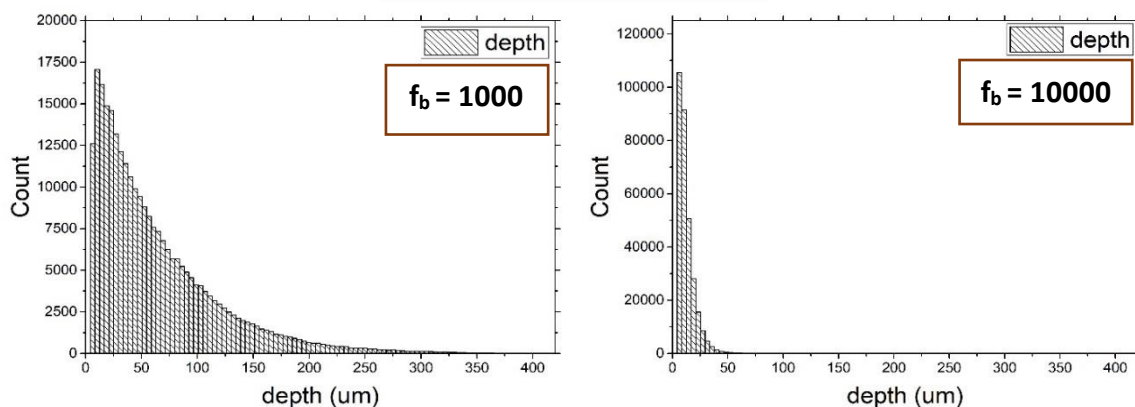
Εικόνα 2.7: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 10$ (αριστερά) και $f_b = 50$ (δεξιά).

$E_p = 10 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$



Εικόνα 2.8: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).

$E_p = 10 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$



Εικόνα 2.9: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).

Από τα παραπάνω ιστογράμματα, είναι εμφανές πως αυξάνοντας την τιμή του biasing factor η κατανομή των θέσεων παραγωγής των νετρονίων αλλάζει μορφή και μάλιστα για τις μεγάλες τιμές αυτού δεν εμφανίζει σχεδόν καμία ομοιότητα με την αναλογική περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή των νετρονίων φαίνεται να πραγματοποιείται σε όλο και περισσότερο μικρότερα βάθη μέσα στο στόχο και αντίστοιχα, οι αντιδράσεις των πρωτονίων να λαμβάνουν χώρα όλο και πιο κοντά στην επιφάνεια αυτού. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο εάν αναλογιστεί κανείς τον πραγματικό μηχανισμό λειτουργίας της μεροληπτικής τεχνικής που χρησιμοποιείται. Με την εφαρμογή αυτής, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.2.2, εξαναγκάζεται η αύξηση της μακροσκοπικής ενεργού διατομής των αντιδράσεων. Έτσι, προκύπτει και η ανάλογη μείωση στην πιθανότητα μη αλληλεπίδρασης σε κάποια δεδομένη απόσταση dx , δηλαδή στην τιμή της μέσης ελεύθερης διαδρομής. Εφόσον, λοιπόν, τα σωματίδια απαιτείται να διανύσουν μικρότερο διάστημα χωρικά μέχρι να αντιδράσουν με τους πυρήνες του αλουμινίου, τότε όλες οι αντιδράσεις θα πραγματοποιηθούν στην επιφάνεια του στόχου ή σε απόσταση πολύ κοντινή από αυτή.

Η μεταβολή των αποτελεσμάτων και η απομάκρυνση της προσομοίωσης από την αναλογική περίπτωση δε θα δημιουργούσε απαραίτητα κάποιο πρόβλημα εάν η ενεργός διατομή της κάθε αντίδρασης δεν είχε άμεση εξάρτηση από την ενέργεια. Εφόσον η ενεργός διατομή αλλά και η ενέργεια των παραγόμενων νετρονίων εξαρτώνται από την ενέργεια της δέσμης, τότε η μεταβολή της ενεργειακής κατανομής των ανιχνεύσιμων σωματιδίων είναι αναπόφευκτη στην περίπτωση εφαρμογής της μεροληπτικής τεχνικής. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η τελική ενεργειακή κατανομή των νετρονίων είναι ο εξής:

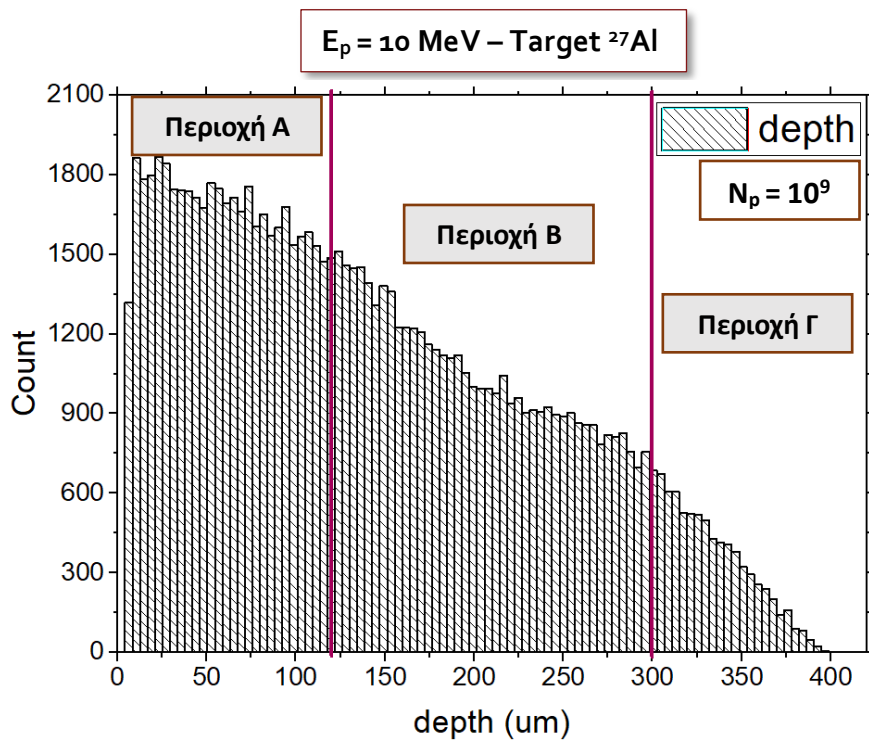
- Αναλογική περίπτωση αλληλεπίδρασης: Για ένα σταθερό μήκος μέσης ελεύθερης διαδρομής, τα σωματίδια της δέσμης με αρχική ενέργεια E_{initial} , έχουν

συγκεκριμένη πιθανότητα, έστω $\Sigma(E)$, να πραγματοποιήσουν κάποια αλληλεπίδραση σε κάποια απόσταση x μέσα στο υλικό. Μέχρι να καταφέρουν να φτάσουν στο σημείο που αντιστοιχεί στην απόσταση αυτή, θα έχουν χάσει μέρος της ενέργειάς τους, σύμφωνα με τη σχέση που περιγράφει την απώλεια ενέργειας (stopping power) των σωματιδίων της δέσμης με το υλικό που αλληλεπιδρούν, και θα έχουν ενέργεια $E' < E_{\text{initial}}$. Η αντίδραση τότε θα πραγματοποιηθεί και το παραγόμενο σωματίδιο, δηλαδή το νετρόνιο σύμφωνα με την περίπτωση μας, θα έχει ενέργεια E_n της οποίας η τιμή προκύπτει από τους νόμους της κινηματικής. Ενώ, η μικροσκοπική ενεργός διατομή της αντίδρασης θα δίνεται από την τιμή $\sigma(E')$.

- Εξαναγκασμένη αλληλεπίδραση λόγω της τεχνικής biasing: Αυξάνοντας την πιθανότητα αλληλεπίδρασης μέσω του biasing factor, το μήκος της μέσης ελεύθερης διαδρομής μειώνεται και η απόσταση που απαιτείται να διανύσει ένα σωματίδιο μέσα στο στόχο μέχρι να αλληλεπιδράσει θα είναι $x' < x$. Φτάνοντας στο σημείο αυτό, η ενέργειά του σωματιδίου θα έχει την τιμή $E'' > E'$ καθώς η απώλεια ενέργειάς του θα είναι μικρότερη. Ως αποτέλεσμα αυτού, η ενέργεια του παραγόμενου νετρονίου θα είναι επίσης μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή $E_n' > E_n$. Επιπλέον, η πιθανότητα πραγματοποίησης της αντίδρασης θα έχει μεταβληθεί από $\sigma(E')$ σε $\sigma(E'')$.

Με βάση τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις είναι ευδιάκριτος ο λόγος για τον οποίο οι κατανομές των θέσεων παραγωγής των νετρονίων αλλά και των ενεργειακών κατανομών τους στον ανιχνευτή παρουσιάζουν τη συμπεριφορά που εμφανίζεται σε όλα τα παραπάνω ιστογράμματα. Εφαρμόζοντας την μεροληπτική τεχνική, οι ποσότητες που είναι υπεύθυνες για την μορφή της κατανομής, δηλαδή η ενέργεια και η μικροσκοπική ενεργός διατομή της αντίδρασης, μεταβάλλονται και με ανάλογο τρόπο παρουσιάζεται και η μεταβολή της εκάστοτε κατανομής νετρονίων. Έτσι, οι περιπτώσεις με biasing factor $f_b = 1000$ και $f_b = 10000$ αποκλείστηκαν εξ' αρχής ως μη ικανές να αποδώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα συμβατά με αυτά της αναλογικής περίπτωσης για το συγκεκριμένο υπό μελέτη πρόβλημα. Για τις υπόλοιπες τιμές, όπου οι διαφορές μεταξύ αυτών και της αναλογικής περίπτωσης δεν είναι απολύτως ευδιάκριτες, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται παρακάτω ώστε να εξακριβωθεί ποια μπορεί είναι η ιδανική τιμή του biasing factor για την οποία δεν θα παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα αναμενόμενα.

Το καθένα από τα ιστογράμματα της χωρικής κατανομής της παραγωγής των νετρονίων που αντιστοιχεί στις προσομοιώσεις με χρήση του biasing factor (< 1000) αλλά και αυτό που αντιστοιχεί στην προσομοίωση χωρίς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής και στον αρχικό αριθμό πρωτονίων 10^9 , χωρίστηκε σε τρεις περιοχές, όπως φαίνεται στην παρακάτω *Εικόνα 2.10*. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν είναι οι ίδιες για όλες τις περιπτώσεις – ενδεικτικά στην εικόνα εμφανίζεται μόνο η περίπτωση της αναλογικής προσομοίωσης που αντιστοιχεί σε αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^9 .



Εικόνα 2.10: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει του σημείου που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου. Η εικόνα αφορά την αναλογική περίπτωση προσομοίωσης για αρχικό αριθμό πρωτονίων 10^9 . Διακρίνονται οι 3 περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω μελέτη της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συνολικός αριθμός των γεγονότων που αντιστοιχούν σε καθεμιά από τις περιοχές A, B και Γ και υπολογίστηκαν οι λόγοι των γεγονότων αυτών μεταξύ των περιοχών A/B και A/Γ. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για όλες τις περιπτώσεις φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($N_p = 10^9$)	1.023	5.906
$f_b = 50$	1.136	7.167
$f_b = 100$	1.243	8.489
$f_b = 150$	1.369	10.131

Πίνακας 2.1: Οι λόγοι μεταξύ των συνολικών γεγονότων της περιοχής A ως προς τα αντίστοιχα περιοχών B και Γ, για την αναλογική περίπτωση με 10^9 αρχικό αριθμό πρωτονίων και τις περιπτώσεις με εφαρμογή του $f_b = 50, 100$ και 150 στις προσομοιώσεις με αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^7 .

Όπως παρατηρείται, η θεωρητική προσέγγιση της συμπεριφοράς της προσομοίωσης επιβεβαιώνεται, καθώς οι λόγοι μεταξύ των περιοχών A, B και A, Γ τείνουν να παρουσιάζουν κάποια αύξηση όσο αυξάνεται και η τιμή του biasing factor. Στη

συνέχεια, υπολογίστηκαν οι λόγοι μεταξύ των παραπάνω τιμών που αντιστοιχούν στην αναλογική περίπτωση ως προς τις τιμές αυτές για κάθε διαφορετική τιμή του biasing factor. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 50}$	0.9	0.824
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 100}$	0.823	0.696
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 150}$	0.747	0.583

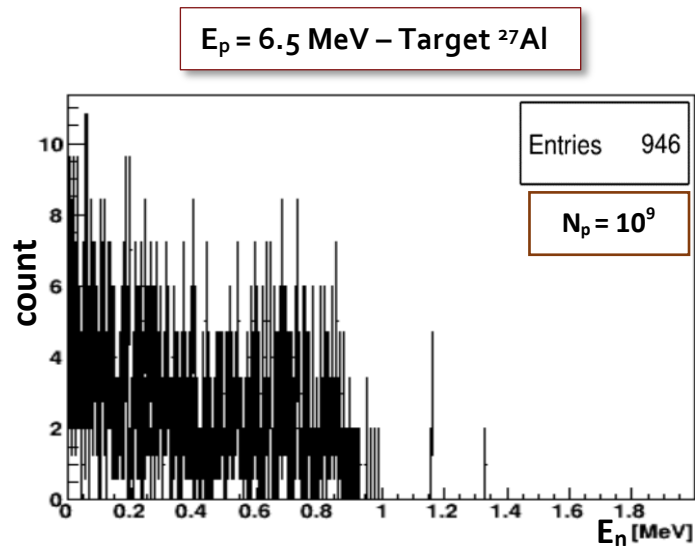
Πίνακας 2.2: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για χρήση του biasing factor με τιμές = 50, 100 και 150.

Ο Πίνακας 2.2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί το ποσοστό απομάκρυνσης από την αναλογική προσομοίωση για καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις για διαφορετικές τιμές του biasing factor. Όμως, πριν βγει οποιοδήποτε γενικό συμπέρασμα για τη συμπεριφορά της μεθόδου θα πρέπει να γίνει μια αντίστοιχη διαδικασία ελέγχου για τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τα παραπάνω αποτελέσματα. Αυτοί οι παράγοντες είναι η αρχική ενέργεια των πρωτονίων που επιλέχθηκε αλλά και η επιλογή του ισοτόπου που χρησιμοποιήθηκε ως στόχος.

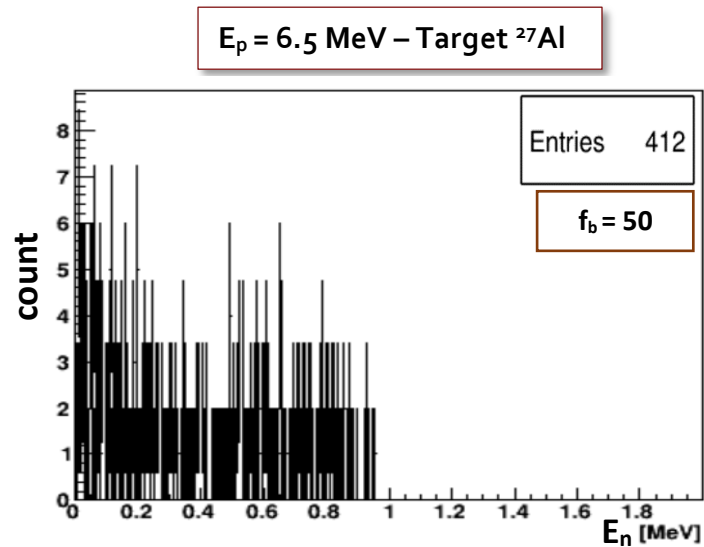
Στις επόμενες ενότητες εμφανίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν κάνοντας χρήση της ίδιας μεθοδολογίας για χρήση πλέον του σιδήρου - ^{56}Fe , ως στόχου μελέτης και της αντίδρασης (p,n) σε αυτό, αλλά και για ενέργεια της δέσμης πρωτονίων ίση με 6.5 MeV και για τα δύο διαφορετικά είδη υλικού.

2.1.2 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 6.5 MeV

Σε αυτή την περίπτωση μελέτης, η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε ήταν πανομοιότυπη με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης. Η μόνη διαφορά αφορά στην αλλαγή της ενέργειας της δέσμης από 10 MeV σε 6.5 MeV. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την ενεργειακή κατανομή των νετρονίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 2.11, 2.12, 2.13 και 2.14). Να σημειωθεί, πως επειδή η ενεργός διατομή της αντίδρασης για τη συγκεκριμένη ενέργεια είναι χαμηλή, η περίπτωση της αναλογικής προσομοίωσης για 10^7 αρχικό αριθμό σωματιδίων αλλά και biasing factor $f_b = 10$, δεν εμφανίζονται σε αυτά λόγω της χαμηλής στατιστικής τους.

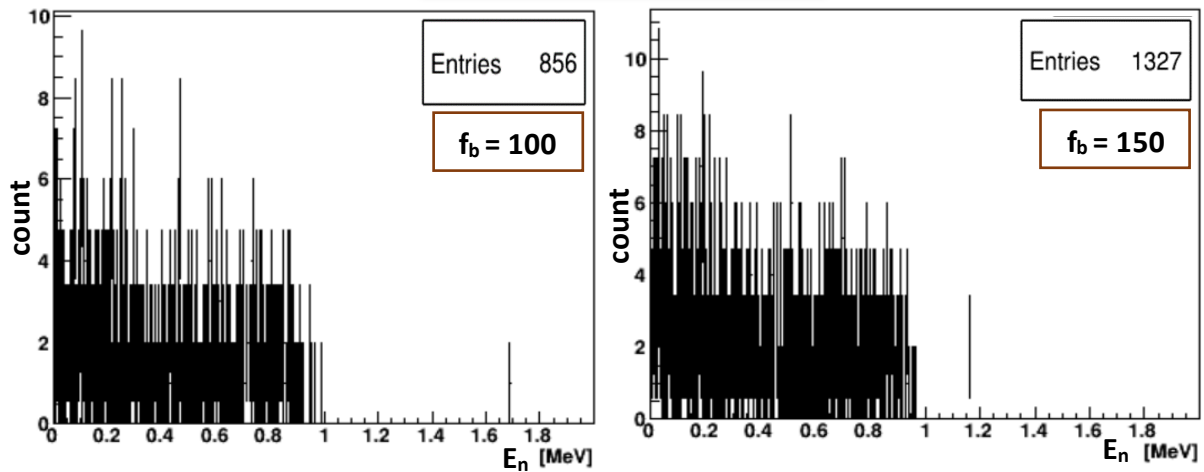


Εικόνα 2.11: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^9 . Το ιστόγραμμα προκύπτει από την αναλογική προσομοίωση.



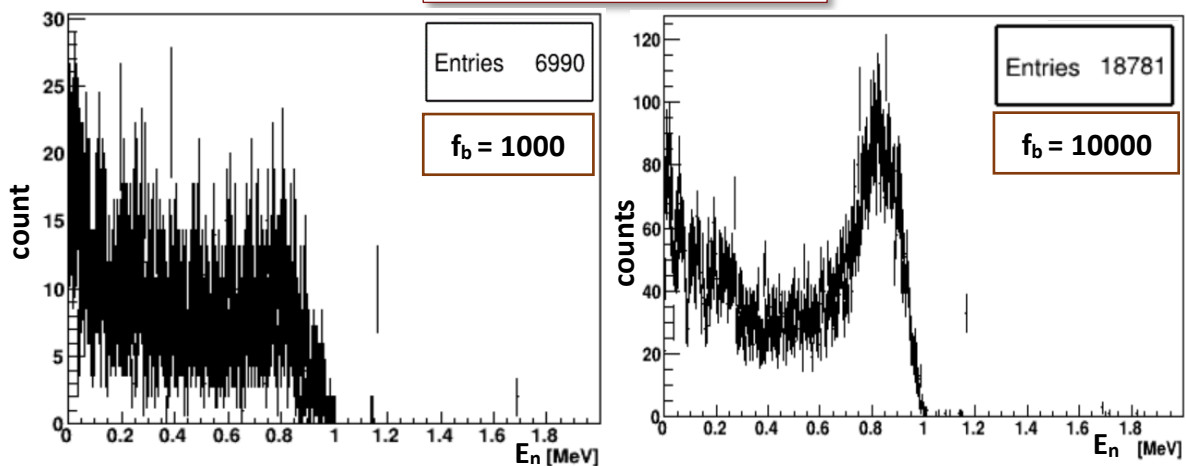
Εικόνα 2.12: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 50$.

$E_p = 6.5 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$



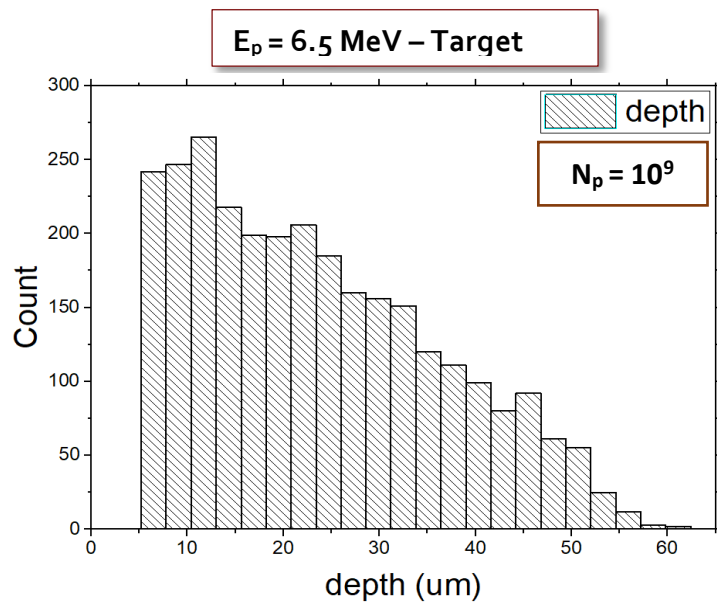
Εικόνα 2.13: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).

$E_p = 6.5 \text{ MeV} - \text{Target } ^{27}\text{Al}$

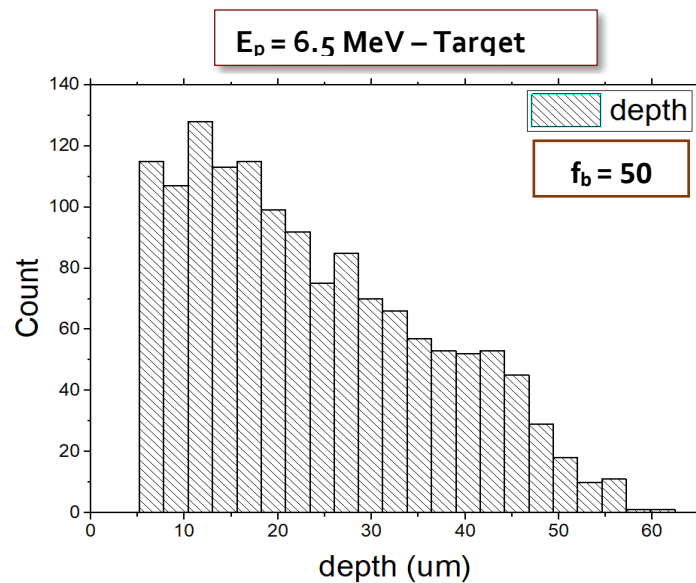


Εικόνα 2.14 : Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).

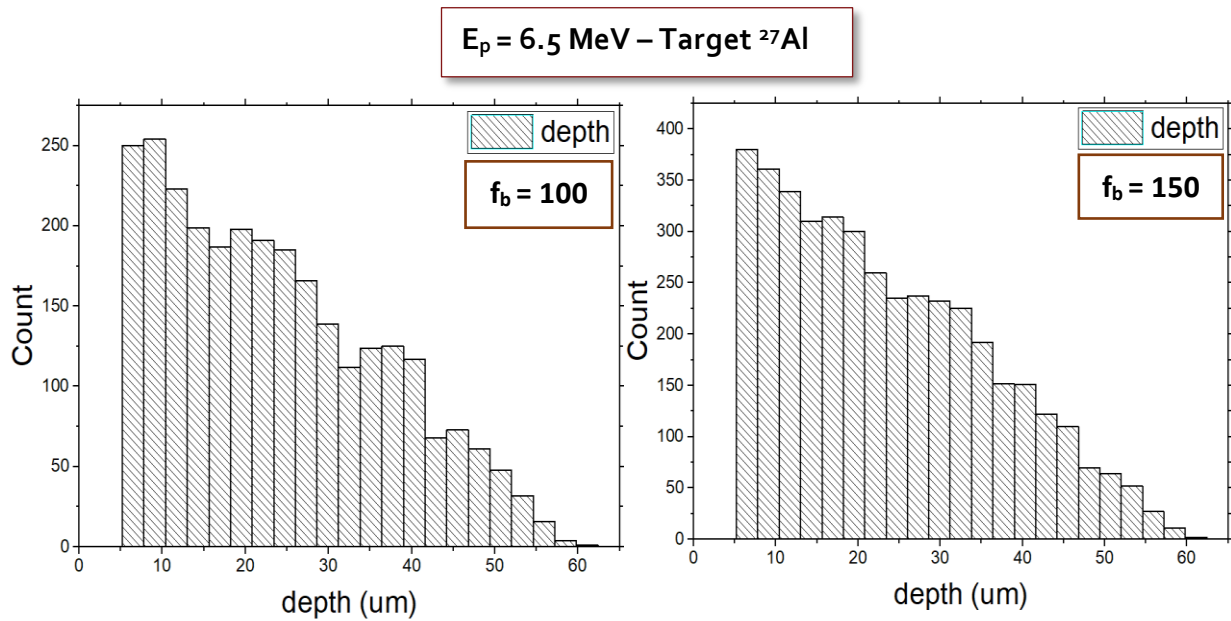
Αν και η στατιστική στα παραπάνω ιστογράμματα είναι αρκετά χαμηλή, η γενική συμπεριφορά της μορφής της κατανομής φαίνεται να είναι παρόμοια με αυτή που παρουσίαζαν τα αποτελέσματα για ενέργεια πρωτονίων 10 MeV. Για πιο έγκυρη εξαγωγή συμπερασμάτων εφαρμόστηκε και εδώ η ίδια μεθοδολογία του διαχωρισμού της κατανομής, η οποία αφορά τα σημεία παραγωγής των νετρονίων μέσα στο στόχο, σε τρεις περιοχές. Τα αντίστοιχα ιστογράμματα, οι περιοχές διαχωρισμού της κατανομής αλλά και οι πίνακες με τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων λόγων μεταξύ των περιοχών, δίνονται παρακάτω.



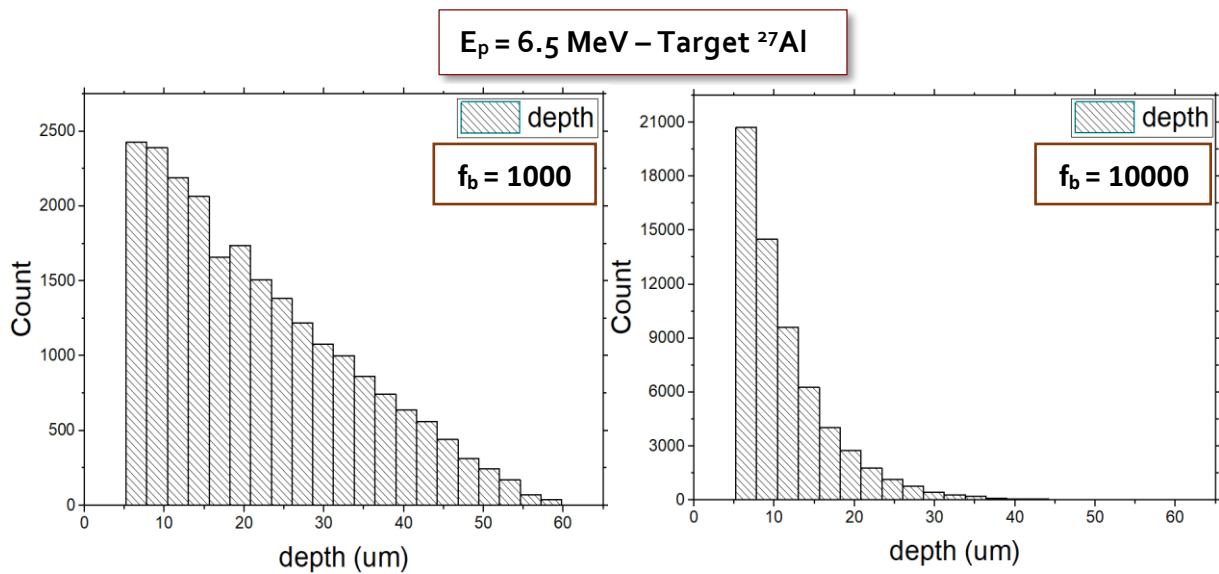
Εικόνα 2.15: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^9 χωρίς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής.



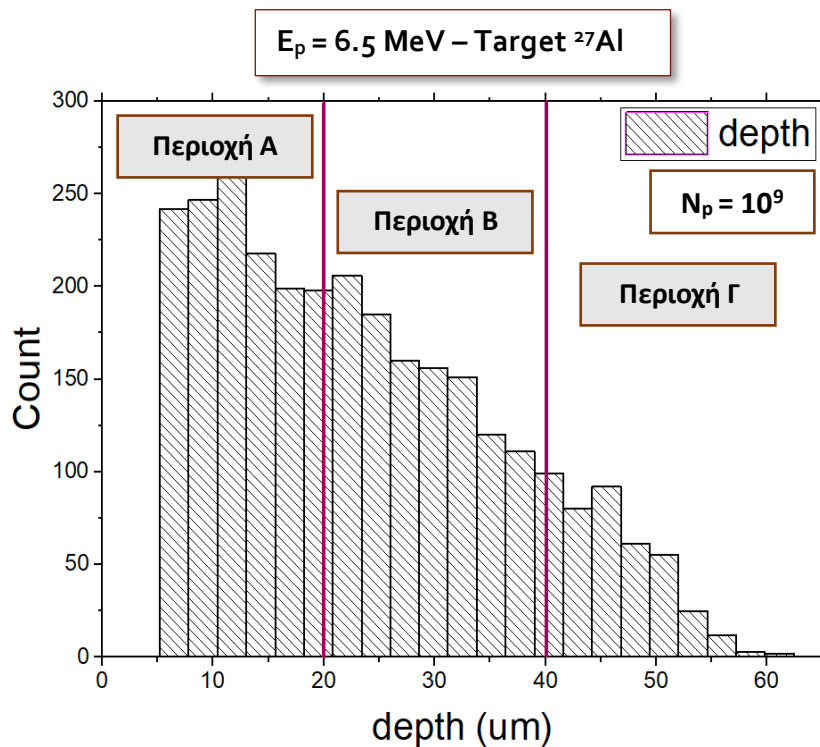
Εικόνα 2.16: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 50$.



Εικόνα 2.17: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).



Εικόνα 2.18: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).



Εικόνα 2.19: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει του σημείου που παράγονται κατά μήκος του όγκου του αλουμινίου. Η εικόνα αφορά την αναλογική περίπτωση προσομοίωσης για αρχικό αριθμό πρωτονίων 10^9 . Διακρίνονται οι 3 περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω μελέτη της προσομοίωσης.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($N_p = 10^9$)	1.120	3.400
$f_b = 50$	1.176	3.289
$f_b = 100$	1.120	3.291
$f_b = 150$	1.160	3.510

Πίνακας 2.3: Οι λόγοι μεταξύ των συνολικών γεγονότων της περιοχής A ως προς τα αντίστοιχα των περιοχών B και Γ, για την αναλογική περίπτωση με 10^9 αρχικό αριθμό πρωτονίων και τις περιπτώσεις με εφαρμογή του $f_b = 50, 100$ και 150 στις προσομοιώσεις με αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^7 .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 50}$	1.176	1.006
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 100}$	1.000	1.033
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 150}$	0.966	0.969

Πίνακας 2.4: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για χρήση του biasing factor με τιμές = 50, 100 και 150.

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται πως μειώνοντας την ενέργεια η απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση γίνεται με πιο ομαλό τρόπο συναρτήσει της αύξησης της τιμής του biasing factor σε σχέση με την περίπτωση επιλογής μεγαλύτερης ενέργειας. Για παράδειγμα, για biasing factor ίσο με 150 στην περίπτωση των 10 MeV ο λόγος μεταξύ αναλογικής και μη προσομοίωσης φτάνει μέχρι το 40% περίπου για τον λόγο των περιοχών A/Γ. Ενώ αντίθετα, για ενέργεια πρωτονίων 6.5 MeV, ο αντίστοιχος λόγος, μειώνεται στο 5%. Να σημειωθεί, πως οι διακυμάνσεις που εμφανίζονται στα αποτελέσματα για τον $f_b = 50$, οφείλονται στην χαμηλή στατιστική των γεγονότων που καταμετρήθηκαν.

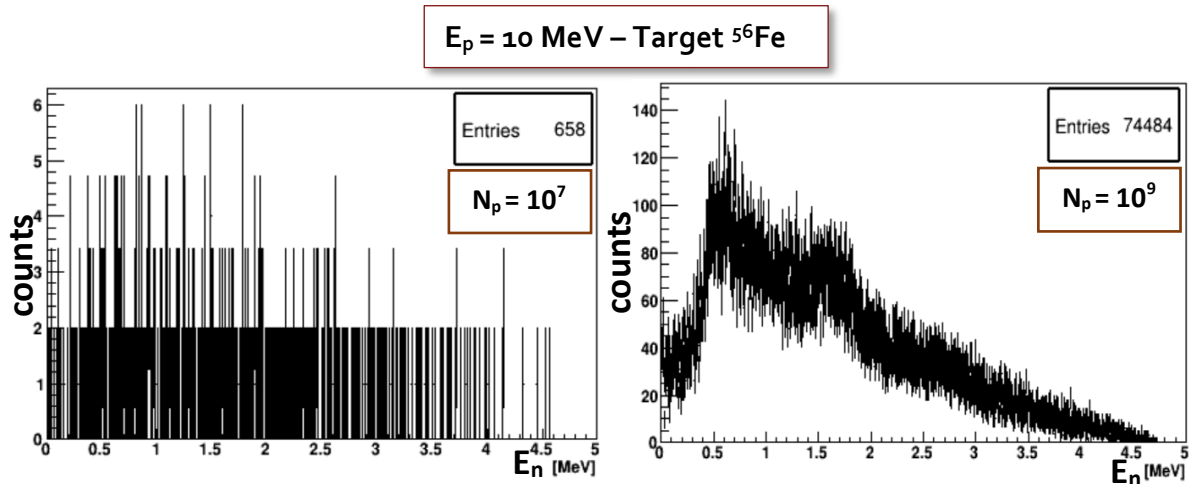
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p,n)$ είναι ίση με $E_{th} = 5803.62$ keV. Αυτό σημαίνει πως το διαθέσιμο εύρος ενεργειών της δέσμης για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης αντίδρασης μέσα στο στόχο είναι μόλις 700 keV στην περίπτωση της μικρότερης ενέργειας ακτινοβολήσης. Αντίθετα, στην προηγούμενη περίπτωση, το εύρος αυτό ξεπερνούσε τα 4 MeV. Όταν λοιπόν, πραγματοποιείται η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής για μικρό εύρος διαθέσιμων ενεργειών, η μεταβολή, από την αναλογική περίπτωση, των ενεργειακών κατανομών των πρωτονίων και αντίστοιχα των νετρονίων που παράγονται δεν είναι τόσο έντονη σε σχέση με μεγάλα εύρη ενεργειών. Το γεγονός αυτό μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή μεγαλύτερων τιμών του biasing factor, στην περίπτωση όπου το εύρος των ενεργειών προς αλληλεπίδραση μέσα σε ένα στόχο είναι μικρό.

2.2 Έλεγχος σε παχύ στόχο Σιδήρου (^{56}Fe)

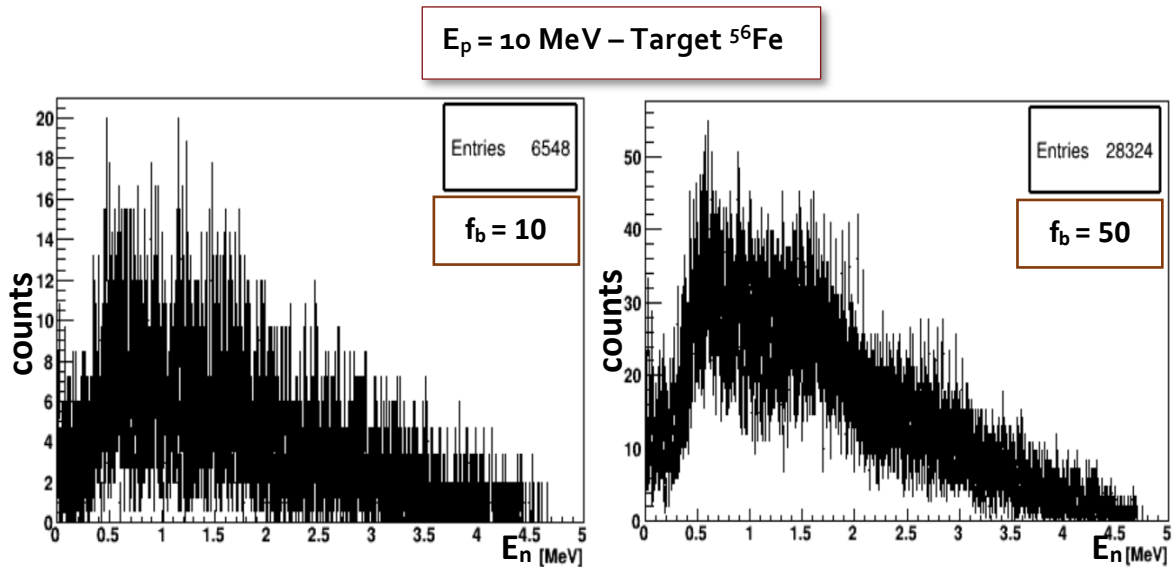
Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της συμπεριφοράς της μεροληπτικής μεθόδου με χρήση κάποιου ισοτόπου με διαφορετικό ατομικό αριθμό. Για αυτό το σκοπό, στις επόμενες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε παχύς στόχος αποτελούμενος από ^{56}Fe και πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι έλεγχοι με αυτούς του αλουμινίου για ενέργειες δέσμης πρωτονίων 10 MeV και 6.5 MeV. Η αντίδραση $^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$ είναι επίσης ενδόθερμη και έχει Q-value = -5349.0 keV και ενέργεια κατωφλίου $E_{th} = 5445.4$ keV.

2.2.1 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 10 MeV

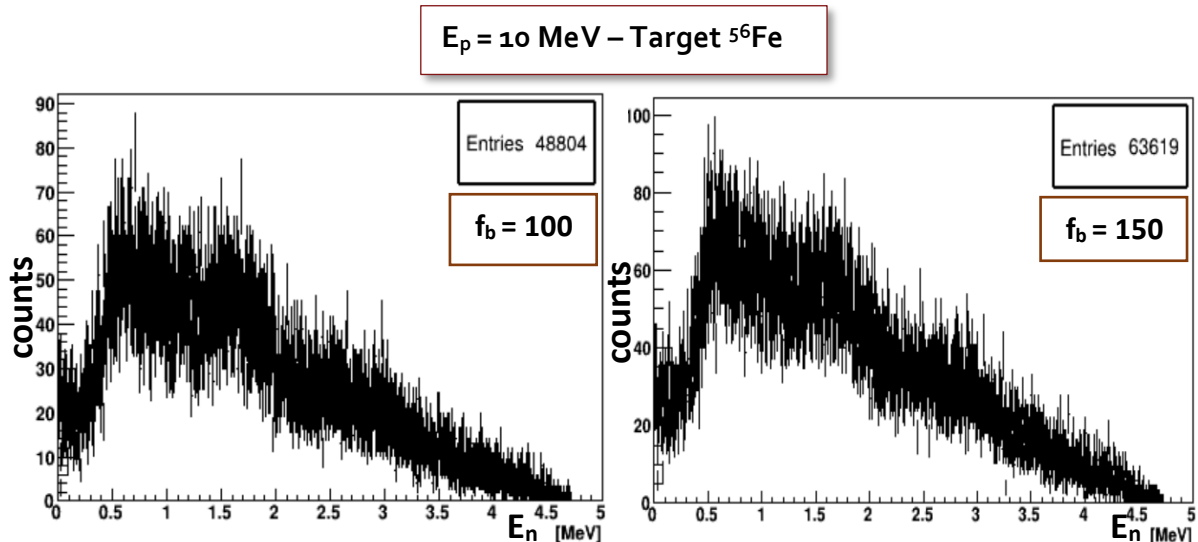
Για τη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης η γεωμετρία που κατασκευάστηκε στον κώδικα GEANT4, είναι η ίδια με την περίπτωση του αλουμινίου με μόνη διαφορά την αλλαγή του υπό μελέτη ισοτόπου. Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε κατέγραψε το πλήθος και την ενέργεια των νετρονίων που προσέπιπταν στην επιφάνεια της βάσης του και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



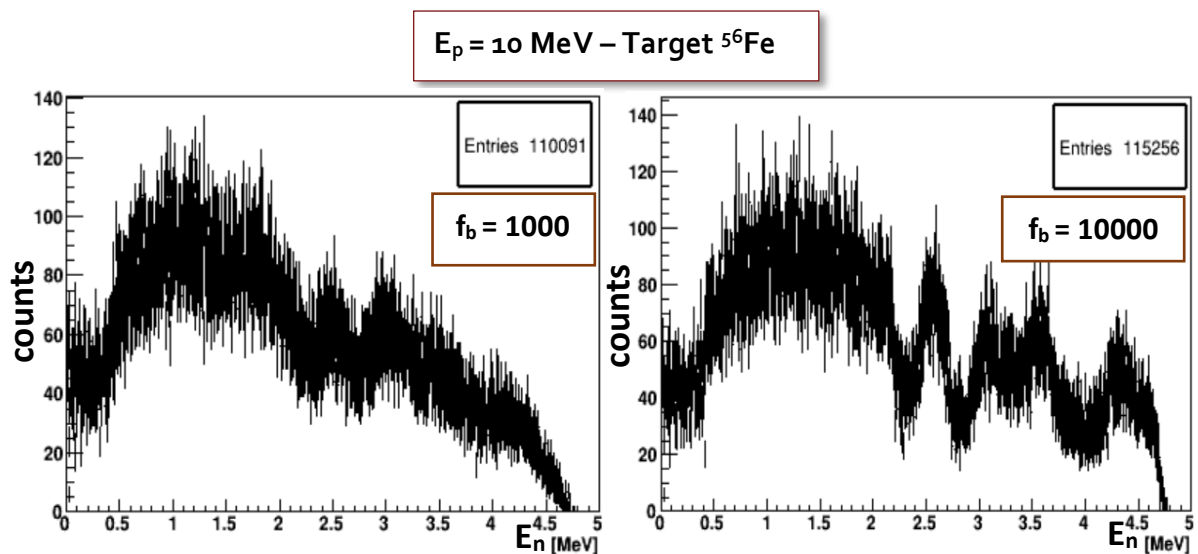
Εικόνα 2.20: Στο πρώτο ιστόγραμμα (αριστερά) εμφανίζεται το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 . Στο αντίστοιχο δεύτερο ιστόγραμμα (δεξιά) ο αρχικός αριθμός των πρωτονίων είναι 10^9 . Και τα δύο ιστογράμματα προκύπτουν από αναλογικές προσομοιώσεις.



Εικόνα 2.21: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 10$ (αριστερά) και $f_b = 50$ (δεξιά).

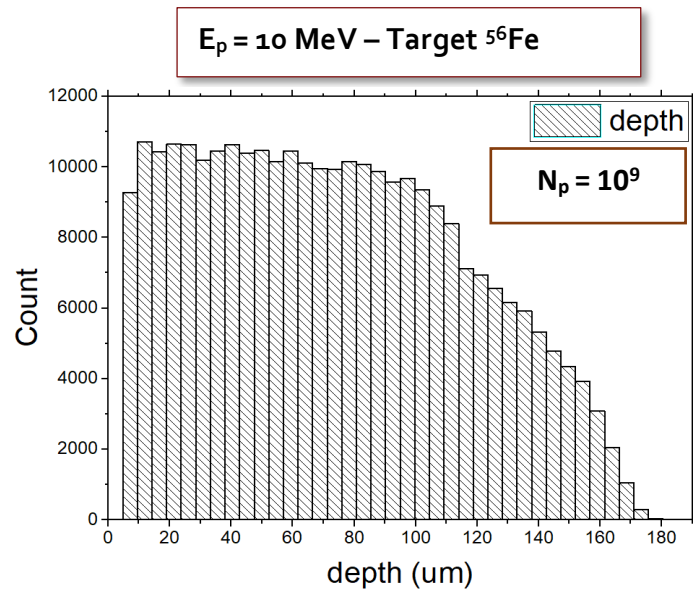


Εικόνα 2.22: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).

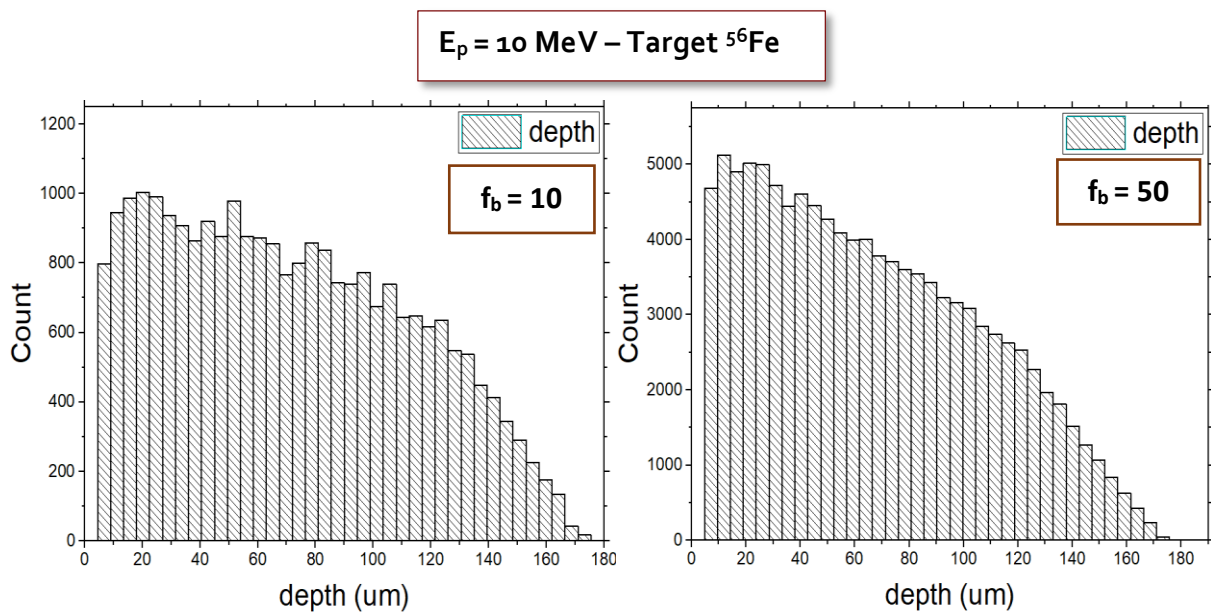


Εικόνα 2.23: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).

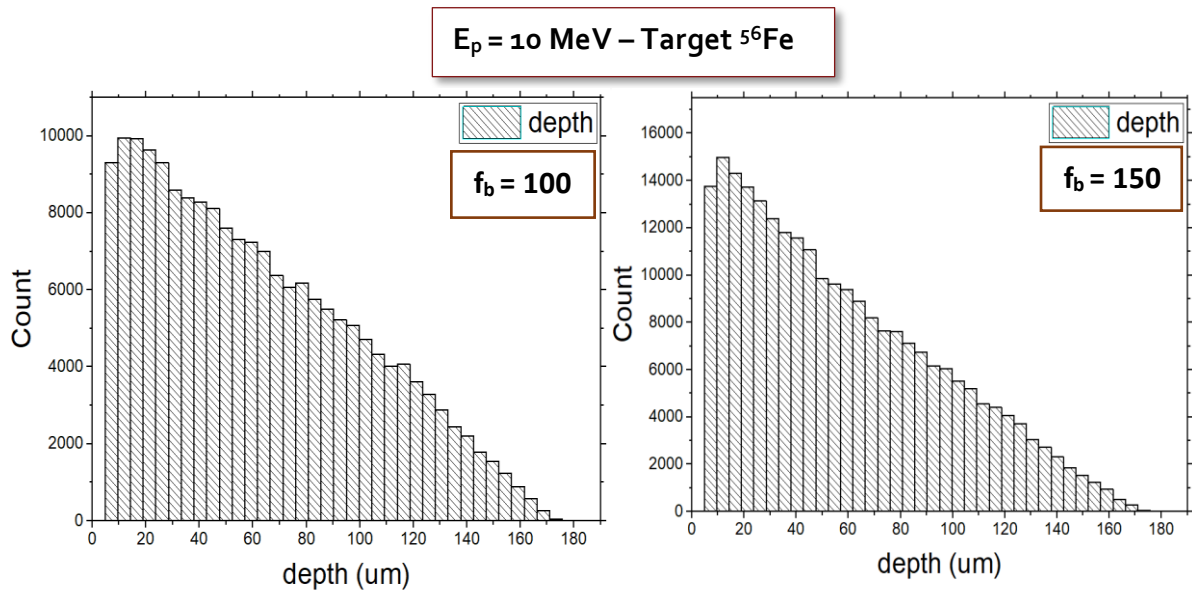
Στη συνέχεια, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, εμφανίζονται οι κατανομές των σημείων παραγωγής των νετρονίων κατά μήκος του στόχου αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσπάθεια προσδιορισμού του ποσοστού απομάκρυνσης των αποτελεσμάτων από την αναλογική περίπτωση προσομοίωσης.



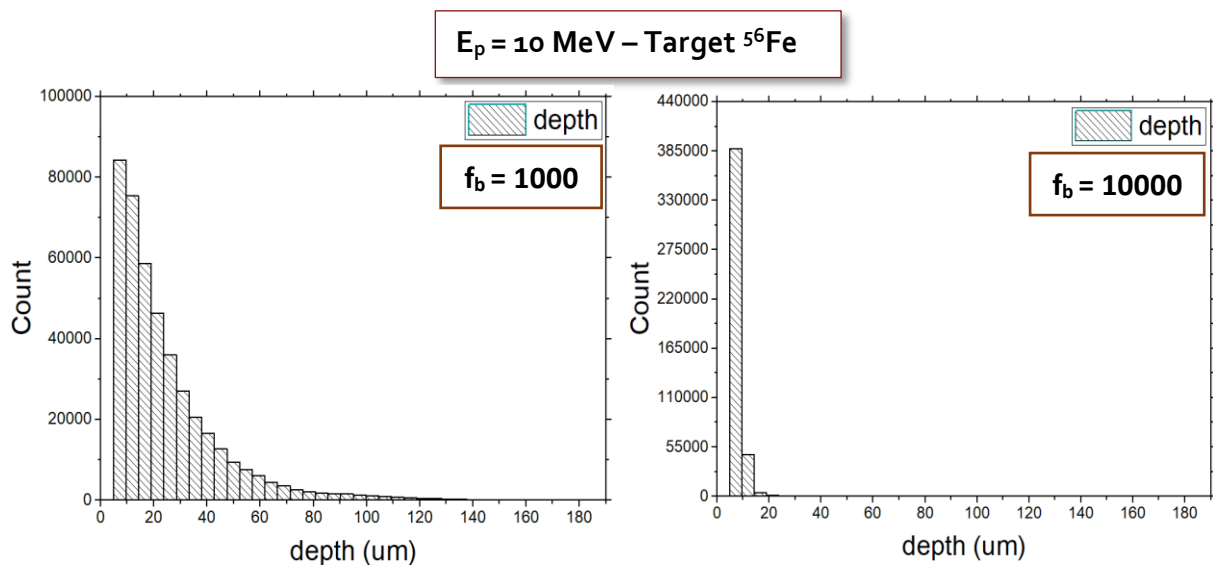
Εικόνα 2.24: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^9 χωρίς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής.



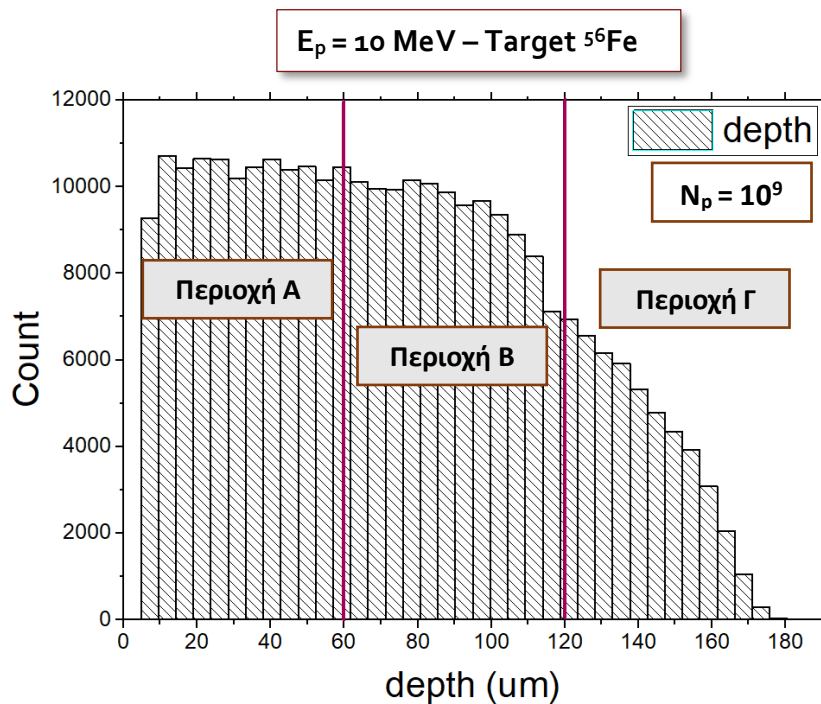
Εικόνα 2.25: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 10$ (αριστερά) και $f_b = 50$ (δεξιά).



Εικόνα 2.26: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).



Εικόνα 2.27: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).



Εικόνα 2.28: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει του σημείου που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου. Η εικόνα αφορά την αναλογική περίπτωση προσομοίωσης για αρχικό αριθμό πρωτονίων 10^9 . Διακρίνονται οι 3 περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω μελέτη της προσομοίωσης.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($N_p = 10^9$)	1.017	2.489
$f_b = 50$	1.284	3.868
$f_b = 100$	1.497	4.629
$f_b = 150$	1.722	6.104

Πίνακας 2.5: Οι λόγοι μεταξύ των συνολικών γεγονότων της περιοχής A ως προς τα αντίστοιχα των περιοχών B και Γ, για την αναλογική περίπτωση με 10^9 αρχικό αριθμό πρωτονίων και τις περιπτώσεις με εφαρμογή του $f_b = 50, 100$ και 150 στις προσομοιώσεις με αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^7 .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 50}$	0.792	0.643
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 100}$	0.679	0.538
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 150}$	0.591	0.282

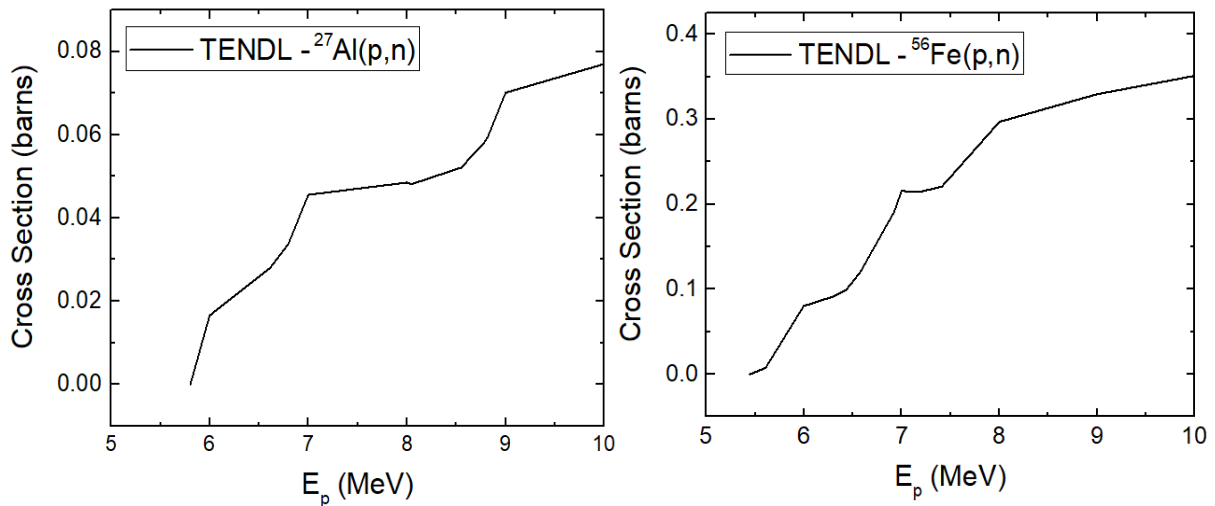
Πίνακας 2.6: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για χρήση του biasing factor με τιμές = 50, 100 και 150.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία για την περίπτωση χρήσης του ισοτόπου του σιδήρου ως στόχου μελέτης, είναι εμφανές πως η γενική συμπεριφορά των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη με αυτή των προηγούμενων περιπτώσεων. Δηλαδή, για μεγαλύτερες τιμές του biasing factor η παραγωγή των νετρονίων γίνεται ολοένα και πιο κοντά στην επιφάνεια του στόχου. Έτσι και εδώ, οι μορφές των κατανομών αλλοιώνονται σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τις αναμενόμενες από την αναλογική περίπτωση, για τις μεγάλες τιμές του biasing factor που χρησιμοποιήθηκαν.

Επιπλέον, παρατηρώντας τις κατανομές που αφορούν τα σημεία γέννησης των νετρονίων κατά μήκος του στόχου αλλά και τις τιμές που προκύπτουν από τον Πίνακα 2.6, είναι ευδιάκριτο το γεγονός ότι για την περίπτωση χρήσης του στόχου του σιδήρου, η απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση γίνεται με περισσότερο γρήγορους ρυθμούς συναρτήσει της αύξησης του biasing factor σε σχέση με την περίπτωση του αλουμινίου.

Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις διαφορετικές μικροσκοπικές ενεργές διατομές που αντιστοιχούν στην αντίδραση (p,n) του εκάστοτε ισοτόπου (Εικόνα 2.29). Η μορφή αυτών μοιάζει να είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, το εύρος των διαθέσιμων ενεργειών των πρωτονίων μέσα στο στόχο, για την ίδια αρχική ενέργεια δέσμης (10 MeV) είναι σχεδόν ίδιο για τα δύο ισότοπα (~4.2 MeV για το Αλουμίνιο και ~ 4.5 MeV για το Σίδηρο) εφόσον η ενέργεια κατωφλίου για τις δύο αντιδράσεις δεν διαφέρει περισσότερο από ~300 keV. Παρόλα αυτά, η μεταβολή της συνολικής cross section για το συγκεκριμένο εύρος ενεργειών διαφέρει κατά μία τάξη μεγέθους μεταξύ των δύο περιπτώσεων, με την τιμή που αντιστοιχεί στο σίδηρο να υπερισχύει. Αυτή η συνθήκη είναι υπεύθυνη για τη συμπεριφορά των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν για τα δύο ισότοπα καθώς:

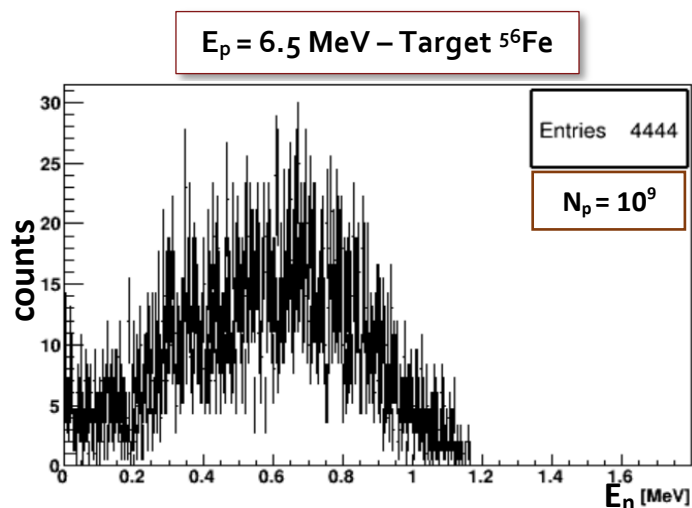
- η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής επιφέρει μετακίνηση των σημείων παραγωγής των νετρονίων προς την επιφάνεια του στόχου.
- η μετακίνηση αυτή μεταβάλλει το εύρος των ενεργειών της δέσμης με τις οποίες θα πραγματοποιηθεί πλέον η αντίδραση.
- η πιθανότητα πραγματοποίησης της αντίδρασης, δηλαδή η ενεργός διατομή, έχει άμεση εξάρτηση από την ενέργεια του σωματιδίου που θα προκαλέσει την αντίδραση. Οπότε η απότομη μεταβολή της ενεργού διατομής για συγκεκριμένο εύρος ενεργειών επιφέρει και απότομη μεταβολή της μορφής της κατανομής των νετρονίων.



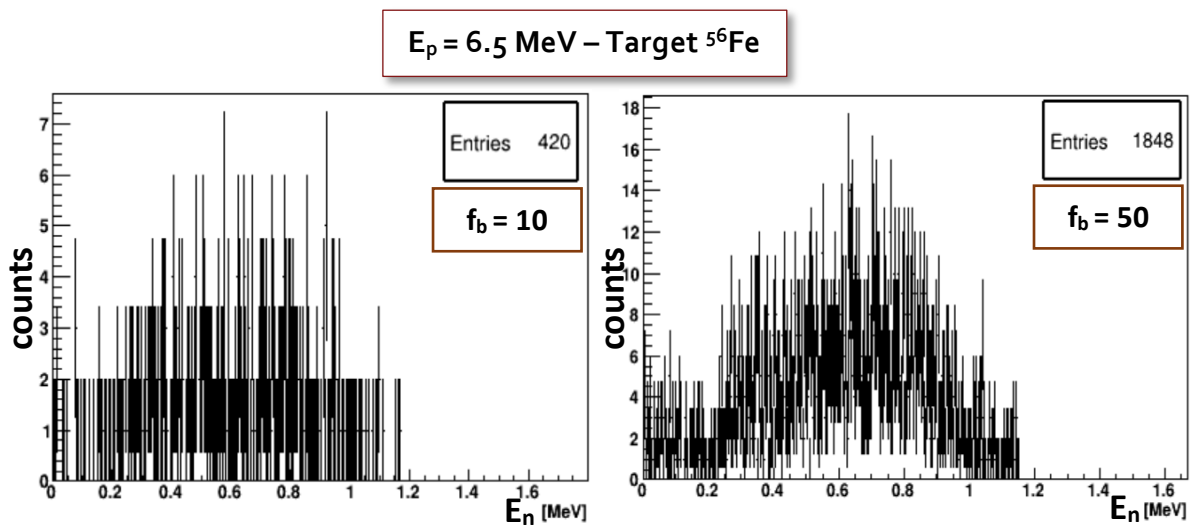
Εικόνα 2.29: Τα αξιολογημένα δεδομένα της βιβλιοθήκης TENDL-2019 για τις αντιδράσεις (p,n) στο ^{27}Al (αριστερά και στο ^{56}Fe (δεξιά).

2.2.2 Χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 6.5 MeV

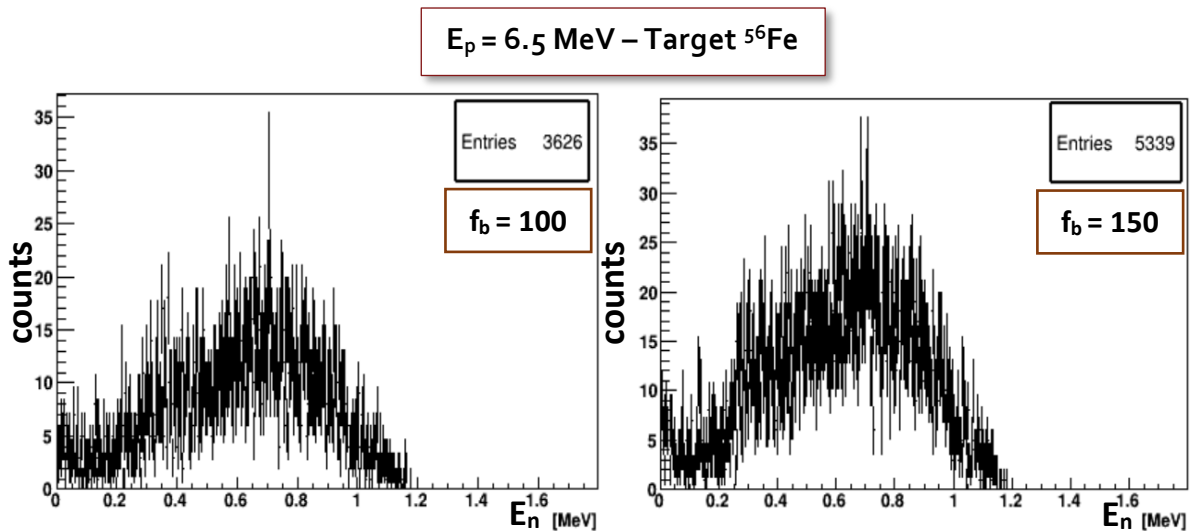
Στην τελευταία περίπτωση ελέγχου που αφορά το είδος του στόχου και την ενέργεια ακτινοβολήσης χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος στόχος σιδήρου και η ενέργεια των πρωτονίων τέθηκε ίση με $E_p = 6.5 \text{ MeV}$. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν είναι αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις και αφορούν την κατανομή των νετρονίων όπως καταγράφηκε από τον ανιχνευτή, την κατανομή των νετρονίων που αντιστοιχεί στα σημεία παραγωγής αυτών κατά μήκος του στόχου και τους πίνακες των αναλογιών μεταξύ των ολοκληρωμάτων των τριών περιοχών της κάθε κατανομής, για να διαπιστωθεί η απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση για τις διαφορετικές τιμές του biasing factor που χρησιμοποιήθηκαν.



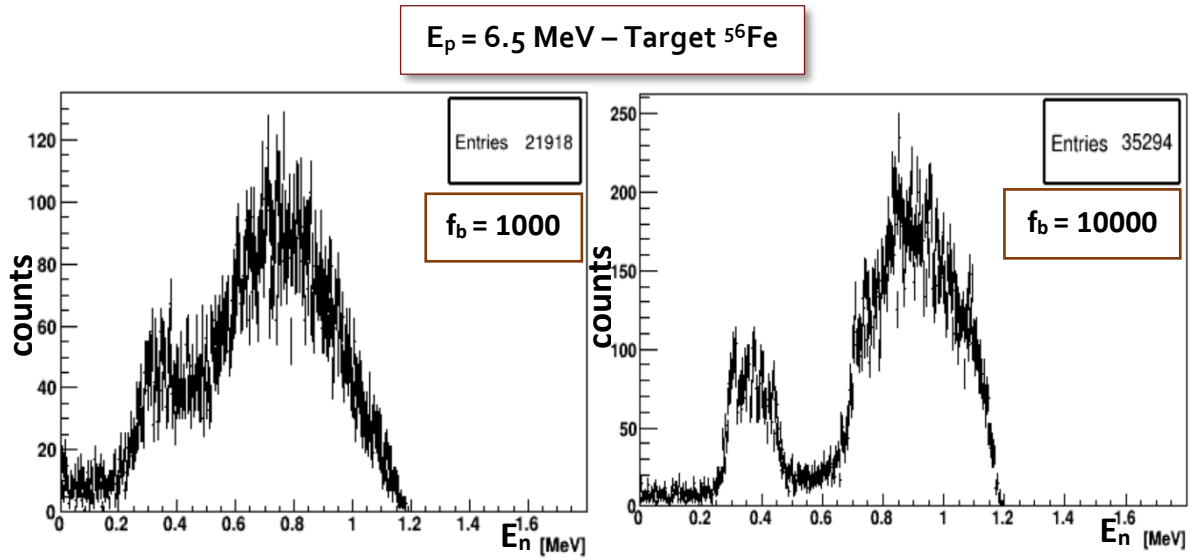
Εικόνα 2.30: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^9 . Το ιστόγραμμα προκύπτει από την αναλογική προσομοίωση.



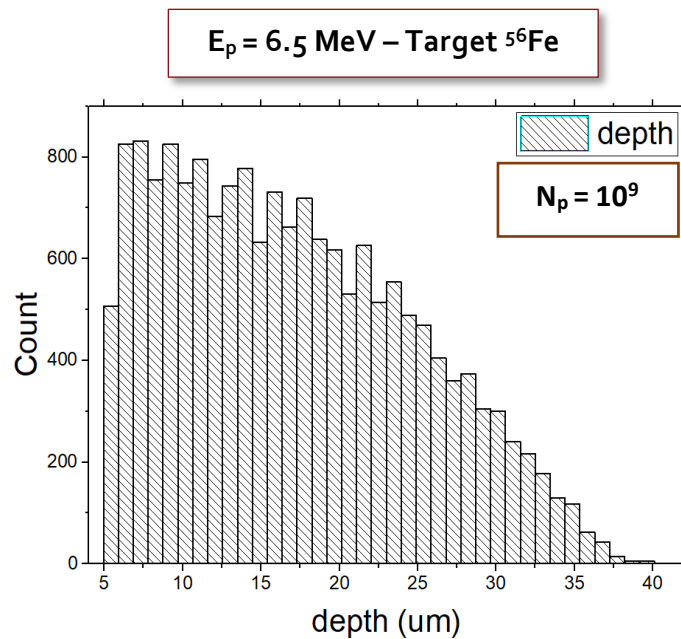
Εικόνα 2.31: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 10$ (αριστερά) και $f_b = 50$ (δεξιά).



Εικόνα 2.32: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).

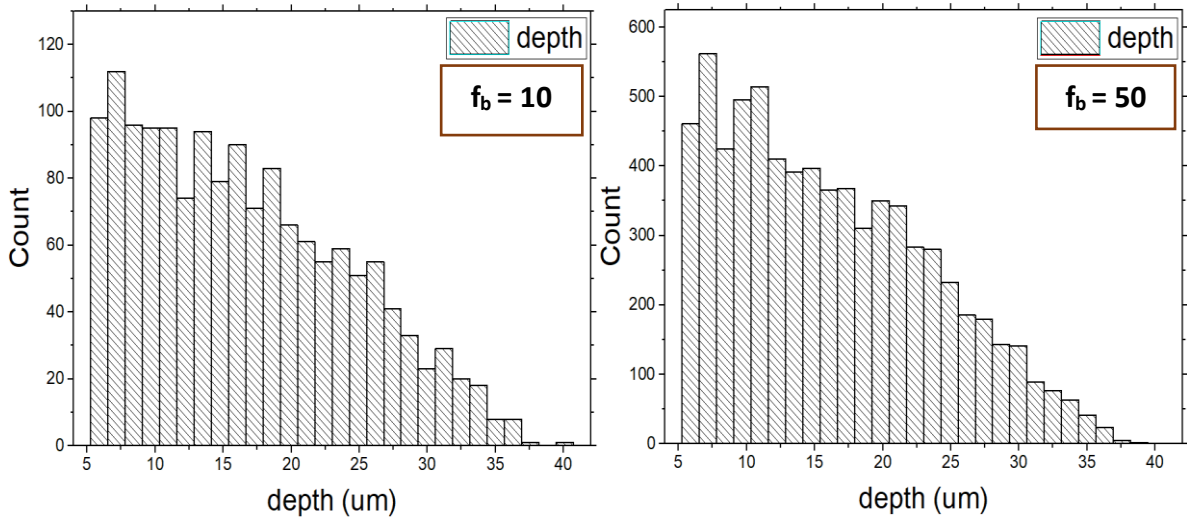


Εικόνα 2.33: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας που καταγράφονται από τον ανιχνευτή όταν ο αρχικός αριθμός πρωτονίων είναι 10^7 για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).



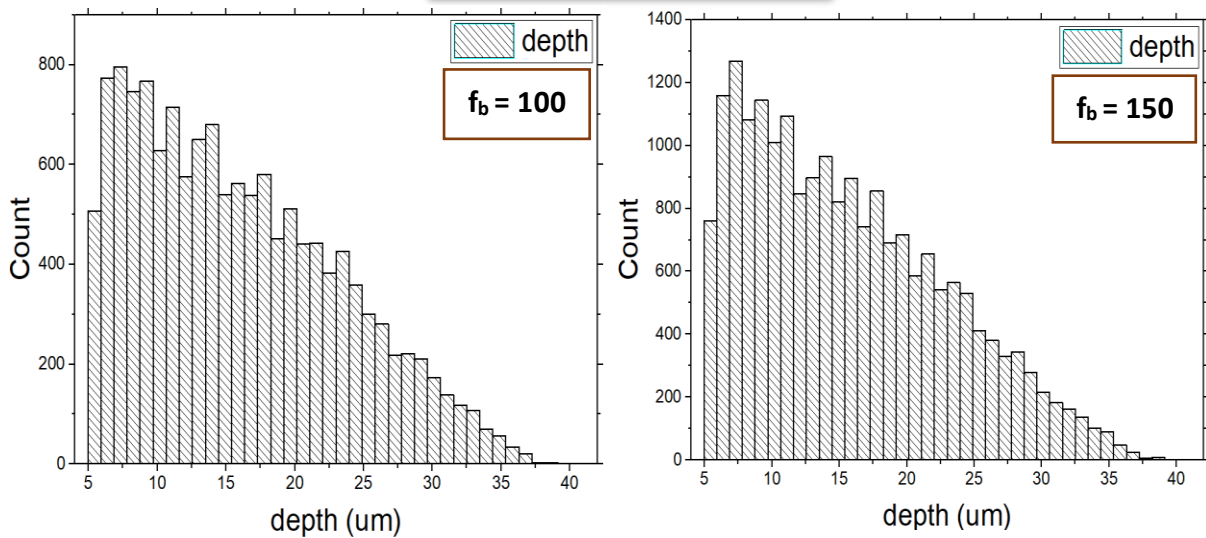
Εικόνα 2.34: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^9 , χωρίς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής.

$E_p = 6.5 \text{ MeV} - \text{Target } ^{56}\text{Fe}$

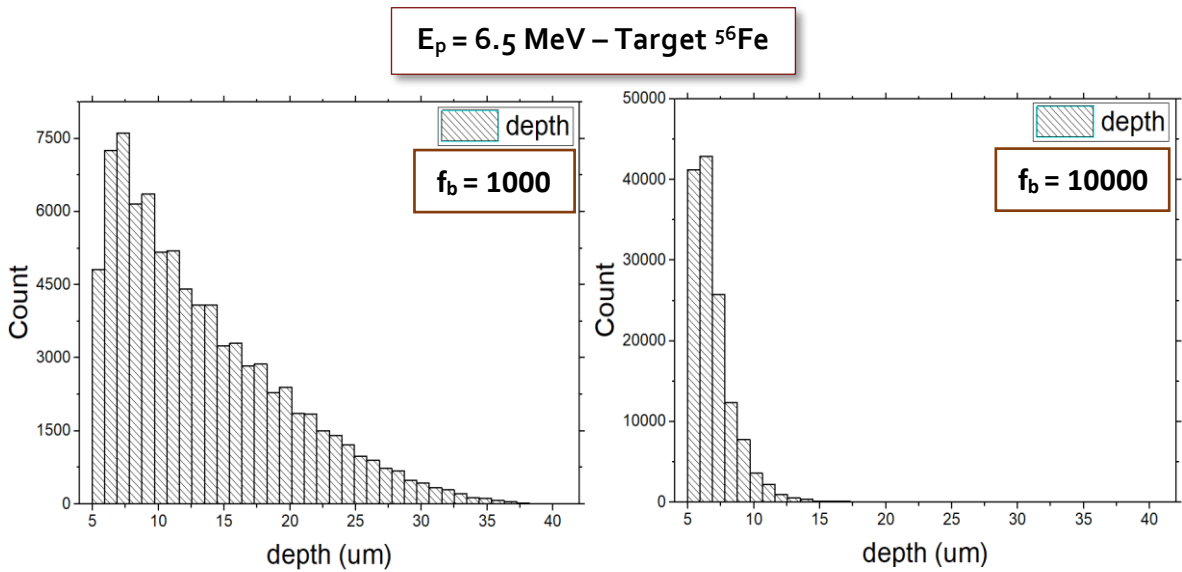


Εικόνα 2.35: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 10$ (αριστερά) και $f_b = 50$ (δεξιά).

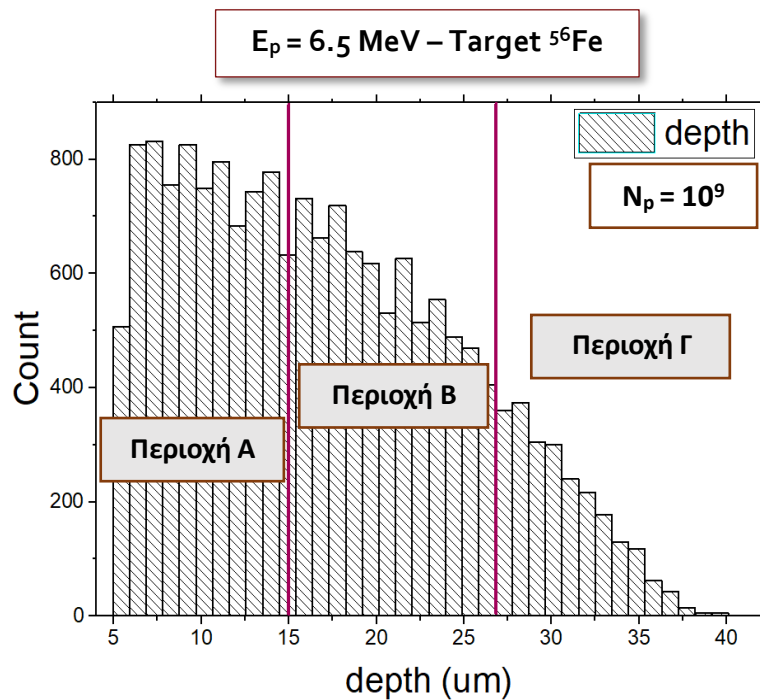
$E_p = 6.5 \text{ MeV} - \text{Target } ^{56}\text{Fe}$



Εικόνα 2.36: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 100$ (αριστερά) και $f_b = 150$ (δεξιά).



Εικόνα 2.37: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει των σημείων που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου για αριθμό αρχικών πρωτονίων ίσο με 10^7 και για biasing factor $f_b = 1000$ (αριστερά) και $f_b = 10000$ (δεξιά).



Εικόνα 2.38: Το πλήθος των νετρονίων συναρτήσει του σημείου που παράγονται κατά μήκος του όγκου του σιδήρου. Η εικόνα αφορά την αναλογική περίπτωση προσομοίωσης για αρχικό αριθμό πρωτονίων 10^9 . Διακρίνονται οι 3 περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω μελέτη της προσομοίωσης.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($N_p = 10^9$)	1.147	2.976
$f_b = 50$	1.331	4.094
$f_b = 100$	1.311	1.916
$f_b = 150$	1.366	2.190

Πίνακας 2.7: Οι λόγοι μεταξύ των συνολικών γεγονότων της περιοχής A ως προς τα αντίστοιχα των περιοχών B και Γ, για την αναλογική περίπτωση με 10^9 αρχικό αριθμό πρωτονίων και τις περιπτώσεις με εφαρμογή του $f_b = 50, 100$ και 150 στις προσομοιώσεις με αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^7 .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 50}$	0.862	0.727
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 100}$	0.875	1.553
$\frac{\text{analog } (N_p = 10^9)}{f_b = 150}$	0.839	1.359

Πίνακας 2.8: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για χρήση του biasing factor με τιμές = 50, 100 και 150.

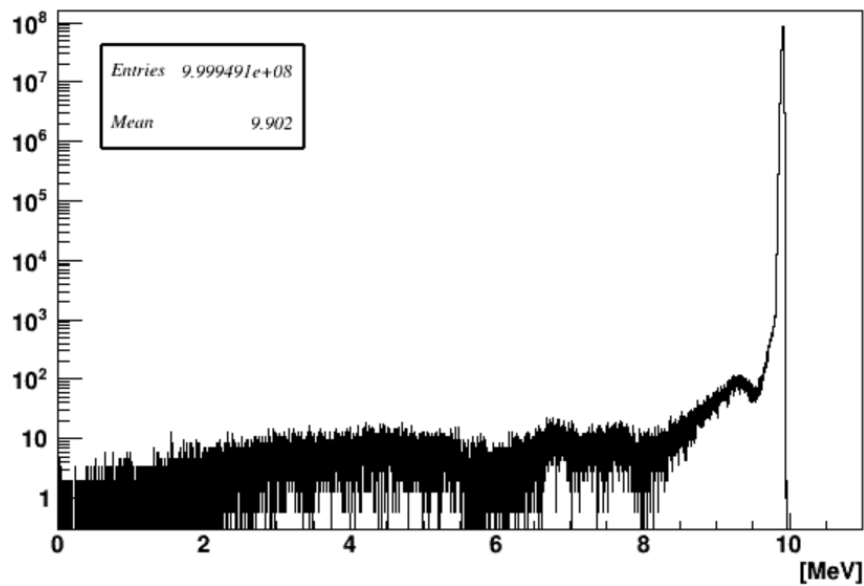
Η συμπεριφορά της εφαρμογής της μεροληπτικής μεθόδου στην περίπτωση της χρήσης δέσμης πρωτονίων $E_p = 6.5$ MeV στο ισότοπο ^{56}Fe είναι ίδια με όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις ελέγχου και επιβεβαιώνει όλες τις παρατηρήσεις που προέκυψαν μέχρι στιγμής.

2.3 Έλεγχος αξιοπιστίας της μεθόδου σχετικά με τη συμπεριφορά της δέσμης των πρωτονίων

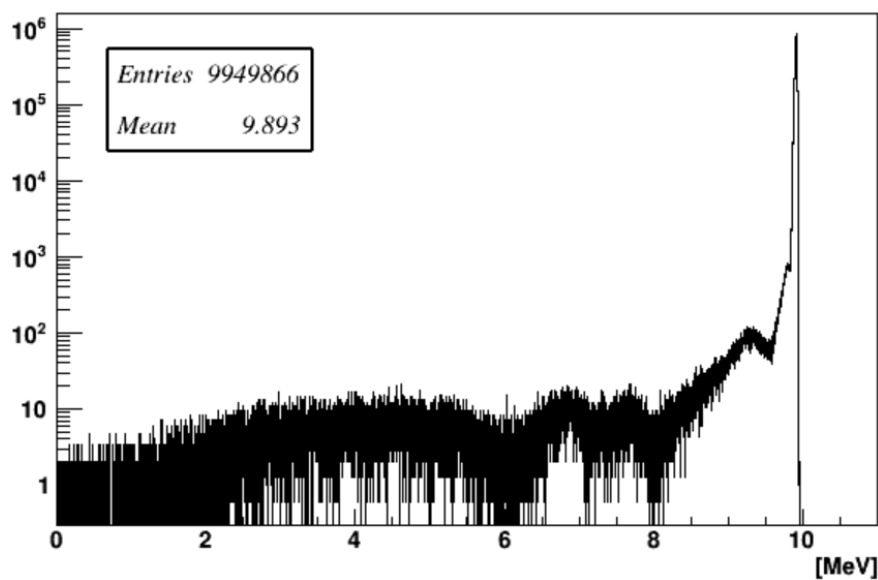
Πριν την εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων ως προς την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε, αξίζει να αναφερθεί ένας επιπλέον έλεγχος που έλαβε χώρα για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του κώδικα. Το ζητούμενο αυτή τη φορά δεν ήταν να ελεγχθεί ο τρόπος παραγωγής των νετρονίων αλλά η συμπεριφορά της δέσμης των πρωτονίων καθώς εισέρχεται σε έναν στόχο.

Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε ένας λεπτός κύλινδρος από αλουμίνιο. Το πάχος του ήταν τόσο ώστε η δέσμη των πρωτονίων ενέργειας ίση με 10 MeV, να υποστεί απώλεια ενέργειας περίπου ίση με 100 keV διερχόμενη από αυτόν. Ο αντίστοιχος ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είχε την μια βάση του σχεδόν κολλημένη στην πίσω βάση του αλουμινίου, έτσι ώστε η στερεά γωνία η οποία καλύπτει να είναι περίπου 2π. Σε αυτή την περίπτωση, η καταγραφή της ενέργειας των γεγονότων που έφταναν στον ανιχνευτή αφορά τα πρωτόνια. Εξήχθησαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την αναλογική περίπτωση με χρήση αρχικού αριθμού πρωτονίων ίσο με 10^9 και για την

περίπτωση της μεροληπτικής προσομοίωσης με biasing factor ίσο με 100 και αρχικό αριθμό πρωτονίων ίσο με 10^7 και παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 2.39: Η ενεργειακή κατανομή της δέσμης των πρωτονίων αφού εξέλθει από το λεπτό στόχο αλουμινίου. Η αρχική ενέργεια των πρωτονίων είναι 10 MeV. Η προσομοίωση είναι αναλογική και ο αρχικός αριθμός των πρωτονίων ίσος με 10^9 .



Εικόνα 2.40: Η ενεργειακή κατανομή της δέσμης των πρωτονίων αφού εξέλθει από το λεπτό στόχο αλουμινίου. Η αρχική ενέργεια των πρωτονίων είναι 10 MeV. Η προσομοίωση είναι μεροληπτική με χρήση του πολλαπλασιαστικού παράγοντα $f_b = 100$ και ο αρχικός αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος με 10^7 .

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στη μορφή της κατανομής για τις δύο αυτές περιπτώσεις. Το συνολικό ποσοστό μείωσης του αριθμού των πρωτονίων της δέσμης μετά την αλληλεπίδραση με το στόχο, δεν ξεπερνάει το 0.005% στην αναλογική προσομοίωση ενώ το ίδιο ποσοστό για την μη αναλογική υπολογίστηκε περίπου στο 0.5%. Η διαφορά αυτή είναι αμελητέα και δεν θεωρείται πως μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στις απαιτούμενες προσομοιώσεις, εφόσον και οι μορφές των κατανομών μοιάζει να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Η μόνη ιδιαιτερότητα που παρουσιάζεται είναι πως υπάρχει μια μικρή αύξηση των σωματιδίων με ενέργειες μικρότερης της ενέργειας της κύριας κορυφής. Αυτό συμβαίνει γιατί η ελαστική σκέδαση των πρωτονίων από το στόχο υπόκειται ομοίως στην εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής. Η τιμή της ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης είναι ως επί το πλείστον μεγαλύτερη έναντι αυτών που αφορούν διαφορετικά είδη αντιδράσεων, κυρίως για τις μικρές και μπροστινές γωνίες σκέδασης. Έτσι, ενώ το ολοκλήρωμα των γεγονότων συναρτήσει του αρχικού αριθμού σωματιδίων της κάθε περίπτωσης, που προκύπτει από το φάσμα, δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό για τις δυο προσομοιώσεις, η μείωση του λόγου των γεγονότων της κύριας κορυφής ως προς το ολοκλήρωμα των γεγονότων της «ουράς» της κατανομής είναι αναπόφευκτη.

2.4 Διαδικασία επιλογής του κατάλληλου πολλαπλασιαστικού παράγοντα (biasing factor)

Σύμφωνα με όλους τους παραπάνω ελέγχους που διενεργήθηκαν, φαίνεται πως η επιλογή του κατάλληλου biasing factor για τις ανάγκες μιας προσομοίωσης δεν αποτελεί τετριμμένη διαδικασία. Για να επιλέξει κανείς την κατάλληλη τιμή του θα πρέπει να «ζυγίσει» δυο βασικές απαιτήσεις. Η πρώτη αφορά την καλύτερη στατιστική των αποτελεσμάτων και η δεύτερη την μη παραβίαση των φυσικών διαδικασιών σε τέτοιο βαθμό που να οδηγεί σε πλήρη αλλοίωση των αποτελεσμάτων. Όσον αφορά την πρώτη απαίτηση, οι επιλογές μειώνονται καθώς το βάρος της δεύτερης είναι αρκετά μεγαλύτερο.

Η γενική συμπεριφορά των αποτελεσμάτων μετά τη χρήση της μεροληπτικής τεχνικής παρουσιάστηκε εκτενώς στο παρόν κεφάλαιο και οι γενικές γραμμές που προέκυψαν είναι οι εξής:

1. Το εύρος των διαθέσιμων ενεργειών προς αλληλεπίδραση κατά μήκος του στόχου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αντίστοιχο εύρος των ενεργειών που θα παραχθούν. Επομένως η επιλογή της κατάλληλης τιμής του biasing factor εξαρτάται άμεσα από το εύρος αυτό καθώς η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής μπορεί να το μεταβάλλει.
2. Η μορφή της cross section της υπό μελέτη αντίδρασης είναι εξίσου σημαντική καθώς είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ενέργεια των σωματιδίων που καλούνται να αλληλεπιδράσουν.

Για να οδηγηθούμε στα επόμενα συμπεράσματα που αφορούν την επιλογή του biasing factor αξίζει να σημειωθούν τα εξής: (α) οι περιπτώσεις ενδιαφέροντος, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, είναι κατά κύριο λόγο οι αντιδράσεις (p,n). Το συγκεκριμένο είδος αντιδράσεων είναι ως επί το πλείστον ενδόθερμες και (β) οι περισσότεροι στόχοι που χρησιμοποιούνται στη διάταξη είναι λεπτοί.

Συνοψίζοντας, μέσω των παραπάνω παρατηρήσεων, προκύπτουν οι τρεις βασικοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή της κατάλληλης τιμής του biasing factor στην περίπτωση προσομοίωσης ενός πραγματικού πειράματος:

- Απώλεια Ενέργειας (Stopping power): Για κάθε στόχο ενδιαφέροντος, θα πρέπει να υπολογιστεί το ποσό απώλειας ενέργειας και η αβεβαιότητα λόγω του ενεργειακού διασκεδασμού (straggling) της δέσμης καθώς περνάει μέσα από αυτόν. Το ποσό αυτό σχετίζεται άμεσα με το συνολικό πάχος του στόχου και είναι αυτό που καθορίζει το διαθέσιμο εύρος ενεργειών προς αλληλεπίδραση. Όσο μικρότερο είναι το πάχος τόσο πιο μικρή θα είναι και η απώλεια ενέργειας. Ως αποτέλεσμα αυτού, σε περίπτωση χρήσης ενός στόχου με πολύ μικρό πάχος, η επιλογή μεγαλύτερης τιμής του biasing factor γίνεται πιο πιθανή.
- Ενέργεια Κατωφλίου (Energy Threshold): Με δεδομένο το πάχος του στόχου που μελετάται και την ενέργεια της δέσμης που χρησιμοποιείται με βάση τις πειραματικές ανάγκες, η τιμή της ενέργειας κατωφλίου μιας αντίδρασης είναι ικανή να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή του κατάλληλου biasing factor. Στην περίπτωση που η απώλεια ενέργειας, λόγω του πάχους του στόχου, είναι μεγαλύτερη από την διαφορά μεταξύ της ενέργειας της δέσμης και της ενέργειας κατωφλίου της αντίδρασης, τότε το διαθέσιμο εύρος ενεργειών προς αλληλεπίδραση, ισούται πλέον με τη διαφορά αυτή και ανεξαρτητοποιείται από το πάχος του στόχου και τη συνολική απώλεια ενέργειας μέσα σε αυτόν.
- Η μορφή της cross-section: Εάν η μορφή της ενεργού διατομής της αντίδρασης που μελετάται δεν παρουσιάζει απότομες μεταβολές στο εύρος ενεργειών που είναι διαθέσιμες προς αλληλεπίδραση κατά μήκος του στόχου, τότε το σφάλμα απομάκρυνσης από την αναλογική περίπτωση προσομοίωσης ελαχιστοποιείται. Ενώ αντίθετα, εάν η μορφή της παρουσιάζει απότομη αύξηση ή μείωση στο πρώτο κομμάτι του συγκεκριμένου εύρους ενεργειών, τότε θα οδηγηθούμε σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση, αντίστοιχα, των τελικών αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής στην γεωμετρία που αντιστοιχεί στην φυσική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των νετρονίων. Πριν την παρουσίαση τους θα αναφερθούν και κάποιες λεπτομέρειες που αφορούν την επιλογή των κατάλληλων biasing factors που χρησιμοποιήθηκαν ανά περίπτωση.

3.1 Γεωμετρία της πειραματικής διάταξης

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, κατασκευάστηκε με τον κώδικα GEANT₄ η γεωμετρία της προσομοίωσης έτσι ώστε να αντιστοιχεί όσο το δυνατόν περισσότερο στην αποτύπωση της πραγματικής πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των νετρονίων. Η γεωμετρία περιλαμβάνει:

- Την πειραματική γραμμή: Το κύριο μέρος της πειραματικής γραμμής περιλαμβάνει τον επιταχυντικό σωλήνα μέσα από τον οποίο διέρχεται η δέσμη των πρωτονίων μέχρι να καταφέρει να φτάσει στον επιθυμητό στόχο. Ο επιταχυντικός σωλήνας είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι. Μέσα σε αυτόν είναι τοποθετημένες, σε κατάλληλες θέσεις, δύο διάτρητες, ειδικά κατασκευασμένες βάσεις που χρησιμοποιούνται για την στήριξη των ευθυγραμμιστών της δέσμης (collimators). Οι βάσεις αυτές είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο. Επιπλέον στην διάταξη περιλαμβάνονται οι ίδιοι οι collimators οι οποίοι αποτελούνται από ταντάλιο.
- Τη φλάντζα του κυρίως στόχου (TiT): Η φλάντζα του στόχου του τρίτου αποτελείται από ένα αλουμινένιο περίβλημα μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένα δυο λεπτά φύλλα μολυβδαινίου συνολικού πάχους 10 μm και ακτίνας 1.425 cm. Τα φύλλα αυτά αποτελούν το πρώτο υλικό που συναντά η δέσμη των πρωτονίων καθώς φτάνει στο τέλος του επιταχυντικού σωλήνα. Ακριβώς πίσω από αυτά, βρίσκεται ο στόχος του τρίτου. Ο στόχος αποτελείται από τιτάνιο μαζί με τρίτιο (TiT), έχει πάχος 5 μm και ακτίνα 1.27 cm. Αμέσως μετά υπάρχει ένα φύλλο χαλκού πάχους 1000 μm και ακτίνας 1.425 cm.
- Τον ανιχνευτή: Στην περίπτωση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένας κενός κύλινδρος ο οποίος χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής των νετρονίων καταγράφοντας την ενέργειά τους (όπως αυτός στις προσομοιώσεις ελέγχου που αναφέρθηκαν παραπάνω). Οι διαστάσεις του είναι τέτοιες ώστε να προσεγγίζει με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο τους στόχους ακτινίδων που χρησιμοποιούνται συνήθως στα αντίστοιχα πειράματα. Το σημείο που τοποθετήθηκε αντιστοιχεί, επίσης, στην θέση που τοποθετούνται οι εν λόγω ακτινίδες. Η αβεβαιότητα στη γωνία ανίχνευσης ισούται με $\pm 15^\circ$.

Τα πρωτόνια που χρησιμοποιήθηκαν «γεννιούνται» από μια σημειακή πηγή τοποθετημένη μέσα στον επιταχυντικό σωλήνα με κατεύθυνση προς τον στόχο του τριτίου. Οι ενέργειες που μελετήθηκαν συμπίπτουν με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε πραγματικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος» [10][11]. Αναλυτικά, στον Πίνακα 3.1, φαίνεται η αρχική ενέργεια των πρωτονίων, η ενέργειά τους αφού περάσουν τα φύλλα μολυβδαινίου και τέλος, η ενέργειά τους πριν φτάσουν στο φύλλο του χαλκού. Για τις ενεργές διατομές των αντιδράσεων των πρωτονίων χρησιμοποιήθηκαν τα αξιολογημένα δεδομένα της βιβλιοθήκης TENDL-2019.

	Αρχική ενέργεια πρωτονίων (MeV)	Μετά τα φύλλα Mo (MeV)	Μετά το Τρίτιο (MeV)
1	3.400	2.879	2.713
2	3.849	3.367	3.218
3	4.300	3.857	3.720
4	4.763	4.347	4.225
5	5.229	4.839	4.726
6	5.550	5.123	5.068
7	5.850	5.490	5.386
8	6.500	6.164	6.070

Πίνακας 3.1: Οι αρχικές ενέργειες των πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν και οι ενέργειες μετά από τα φύλλα μολυβδαινίου, τον στόχο του τριτίου και του χαλκού.

3.2 Επιλογή της κατάλληλης τιμής του biasing factor για την πειραματική διάταξη ενδιαφέροντος

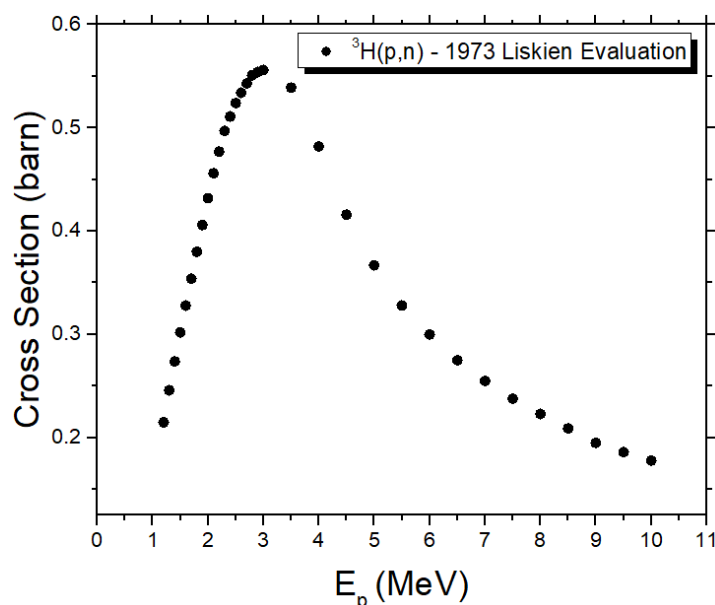
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η δέσμη των πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκε προκύπτει από μια σημειακή πηγή, κατ' αρχήν χωρίς γωνιακό άνοιγμα. Τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή είναι μόνο τα φύλλα μολυβδαινίου, ο στόχος του τριτίου και το φύλλο του χαλκού. Η επιλογή του κατάλληλου biasing factor προκύπτει από τη συνεκτίμηση κάποιων προσομοιώσεων ελέγχου της συμπεριφοράς των αποτελεσμάτων και των κριτηρίων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται για καθένα από τα τρία υλικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

- **Για το στόχο Τριτίου (TiT)**

Η αντίδραση ${}^3\text{H}(\text{p},\text{n}){}^3\text{He}$ είναι ενδόθερμη με Q-value ίσο με $Q = -763.76 \text{ keV}$, ενώ η ενέργεια κατωφλίου είναι $E_{\text{th}} = 1018.87 \text{ keV}$.

Αρχικά, υπολογίστηκε η απώλεια ενέργειας της δέσμης κατά την διέλευσή της μέσα από τον στόχο και η τιμή που προέκυψε κυμαίνεται μεταξύ 166 και 95 keV για τις διαφορετικές ενέργειες πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν (όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 3.1). Μέσα σε αυτό το εύρος, η μορφή της ενεργού διατομής της αντίδρασης δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές για καμία από τις περιπτώσεις ακτινοβόλησης (Εικόνα 3.1). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν γρήγορες προσομοιώσεις ώστε να ελεγχθεί η μορφή της κατανομής των νετρονίων και να διαπιστωθεί εάν η κύρια

κορυφή συμπίπτει ενεργειακά με την αναμενόμενη σύμφωνα με τους κανόνες της κινηματικής. Έτσι, με βάση αυτά τα αποτελέσματα επιλέχθηκε η τιμή $f_b = 1000$, να είναι κατάλληλη ώστε να φέρει ως αποτέλεσμα ικανοποιητική στατιστική αλλά και έγκυρα αποτελέσματα από άποψη φυσικής.

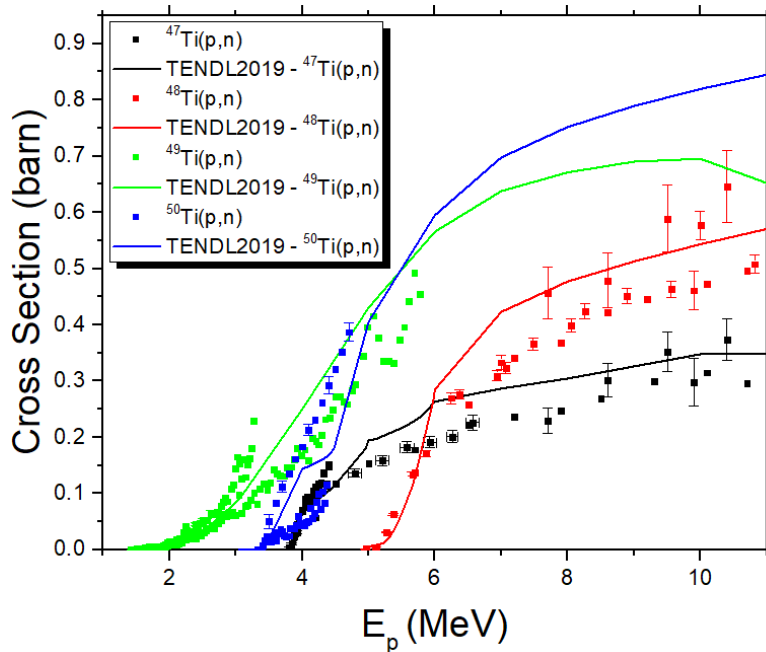


Εικόνα 3.1: Η ενεργός διατομή της αντίδρασης ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ [12].

Επιπλέον, επειδή ο στόχος αποτελείται και από Τιτάνιο στον Πίνακα 3.2 αναγράφονται τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των αντιδράσεων (p,n) που αφορούν τα ισότοπα του, δηλαδή το Q-value της εκάστοτε αντίδρασης, η ενέργεια κατωφλίου και το Proximity Barrier [13] (το οποίο αντιστοιχεί στο φράγμα δυναμικού Coulomb λαμβάνοντας υπόψη το πυρηνικό δυναμικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπό αλληλεπίδραση πυρήνων). Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται η ενεργός διατομή της συγκεκριμένης αντίδρασης σε αυτά. Το φυσικό τιτάνιο αποτελείται από 5 σταθερά ισότοπα με συγκεντρώσεις: ${}^{46}\text{Ti}$ (8.25%), ${}^{47}\text{Ti}$ (7.44%), ${}^{48}\text{Ti}$ (73.72%), ${}^{49}\text{Ti}$ (5.41%), ${}^{50}\text{Ti}$ (5.18%).

Αντίδραση	Q-value	Threshold (MeV)	Prox. Barrier (MeV)
${}^{46}\text{Ti}(p,n)$	-7.835	8.005	3.472
${}^{47}\text{Ti}(p,n)$	-3.713	3.792	3.462
${}^{48}\text{Ti}(p,n)$	-4.797	4.897	3.450
${}^{49}\text{Ti}(p,n)$	-1.384	1.412	3.437
${}^{50}\text{Ti}(p,n)$	-2.989	3.049	3.426

Πίνακας 3.3: Ενεργειακά χαρακτηριστικά των αντιδράσεων των ισότοπων του Τιτανίου.



Εικόνα 3.2: Πειραματικά δεδομένα της βιβλιοθήκης EXFOR[14] και τα αξιολογημένα δεδομένα της βιβλιοθήκης TENDL-2019 για τις αντιδράσεις (p,n) στα ισότοπα του Τιτανίου.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η απώλεια ενέργειας της δέσμης στο στόχο του TiT είναι μικρή. Επιπλέον, η ενεργός διατομή των αντιδράσεων (p,n) στα ισότοπα του τιτανίου για το συγκεκριμένο εύρος είναι σχεδόν σταθερή. Επομένως, δεν αναμένεται μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων από την αναλογική περίπτωση κατά τη χρήση της τιμής $f_b = 1000$.

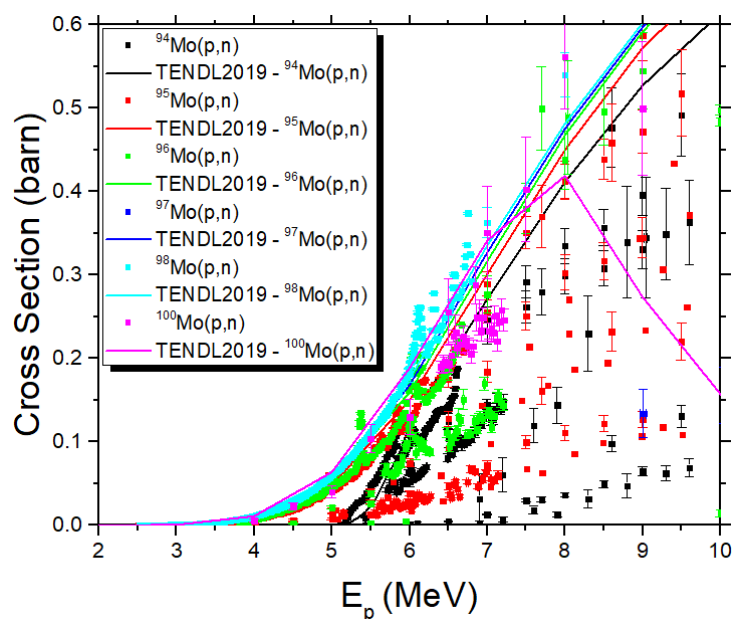
- **Για το Μολυβδαίνιο (Mo)**

Το μολυβδαίνιο αποτελείται από 7 φυσικά ισότοπα με διαφορετικές συγκεντρώσεις - ^{92}Mo (14.84%), ^{94}Mo (9.25%), ^{95}Mo (15.92%), ^{96}Mo (16.68%), ^{97}Mo (9.55%), ^{98}Mo (21.13%), ^{100}Mo (9.63%). Καθένα από αυτά έχει διαφορετική ενέργεια κατωφλίου για την αντίδραση (p,n). Το ίδιο ισχύει και για το Proximity Barrier του καθενός από αυτά. Οι τιμές του Q-value, του Threshold και του Proximity Barrier της εκάστοτε αντίδρασης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Αντίδραση	Q-value	Threshold (MeV)	Prox. Barrier (MeV)
$^{92}\text{Mo} (p,n)$	-8.664	8.759	6.103
$^{94}\text{Mo} (p,n)$	-5.038	5.092	6.078
$^{95}\text{Mo} (p,n)$	-2.473	2.499	6.065
$^{96}\text{Mo} (p,n)$	-3.756	3.795	6.053
$^{97}\text{Mo} (p,n)$	-1.107	1.118	6.042
$^{98}\text{Mo} (p,n)$	-2.466	2.491	6.030
$^{100}\text{Mo} (p,n)$	-0.952	0.961	6.008

Πίνακας 3.3: Ενεργειακά χαρακτηριστικά των αντιδράσεων των ισωτόπων του Μολυβδαινίου.

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα από τις τιμές των ενεργειών κατωφλίου, για κάποια από τα ισότοπα του Μολυβδαινίου η αντίδραση (p,n) είναι ενεργειακά επιτρεπτή μόνο για κάποιες από τις ενέργειες των πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Όμως, λόγω του υψηλού Proximity Barrier των αντιδράσεων, ο αριθμός των παραγόμενων νετρονίων θα είναι κοντά στο μηδέν. Αυτό δεν ισχύει για την τελευταία ενέργεια πρωτονίων, στα 6.5 MeV, όπου αναμένεται η συνεισφορά των νετρονίων που προέρχονται από τα ισότοπά του να είναι μεγάλη. Στη συνέχεια, παρατίθενται σε κοινό γράφημα οι ενεργές διατομές που είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία για όλα τα ισότοπα (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Πειραματικά δεδομένα της βιβλιοθήκης EXFOR και τα αξιολογημένα δεδομένα της βιβλιοθήκης TENDL-2019 για τις αντιδράσεις (p,n) στα ισότοπα του Μολυβδαινίου.

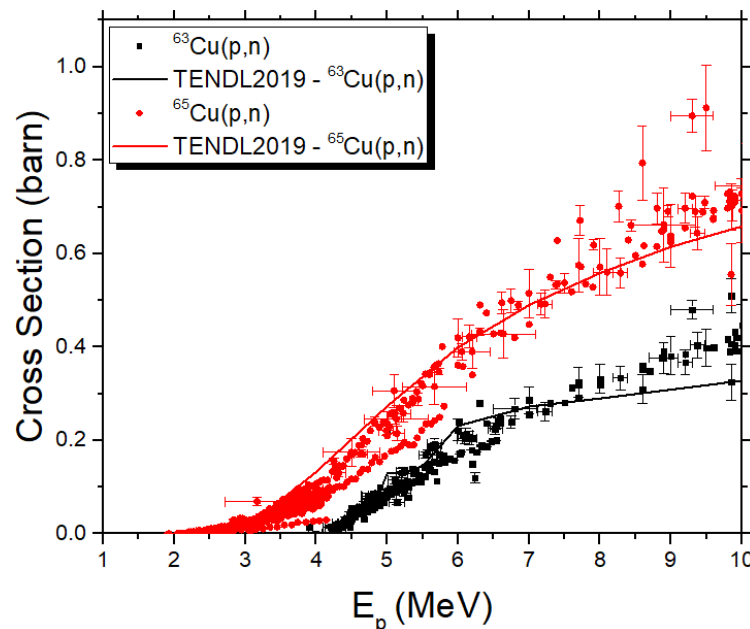
Στην περίπτωση του Μολυβδαινίου, η απώλεια ενέργειας της δέσμης μέσα στο στόχο για την ενέργεια πρωτονίων στα 6.5 MeV, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, είναι ίση με περίπου 330 keV. Η τιμή της ενεργού διατομής μέσα σε αυτό το εύρος ενεργειών μειώνεται κατά μέσο όρο κατά 30%. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, παρά τη σχετικά «απότομη» μείωση της cross section και θεωρώντας πως το μικρό εύρος των ενεργειών της δέσμης που καλούνται να αλληλεπιδράσουν με τον στόχο δεν αναμένεται να επηρεάσουν τη μορφή της ενεργειακής κατανομής των νετρονίων, η τιμή του biasing factor που επιλέχθηκε ήταν ίση με την αντίστοιχη για το στόχο του τριτίου και ίση με 1000, ενώ με τη βοήθεια γρήγορων προσομοιώσεων εκτιμάται πως κάτι τέτοιο δεν επιφέρει εσφαλμένα αποτελέσματα.

- Για το χαλκό (Cu)

Ο χαλκός αποτελείται από δυο φυσικά ισότοπα - ^{63}Cu (69.15%) και ^{65}Cu (30.85%). Οι τιμές των Q-values, των ενεργειών κατωφλίου και του Proximity Barrier της αντίδρασης (p,n) στα ισότοπα αυτά, φαίνονται στον Πίνακα 3.4. Οι τιμές της ενεργού διατομής των δύο αντιδράσεων φαίνεται στην Εικόνα 3.4.

Αντίδραση	Q-value	Threshold (MeV)	Prox. Barrier (MeV)
$^{63}\text{Cu} (p,n)$	-4.148	4.214	4.418
$^{65}\text{Cu} (p,n)$	-2.134	2.167	4.393

Πίνακας 3.4: Ενεργειακά χαρακτηριστικά των αντιδράσεων των ισωτόπων του Χαλκού.



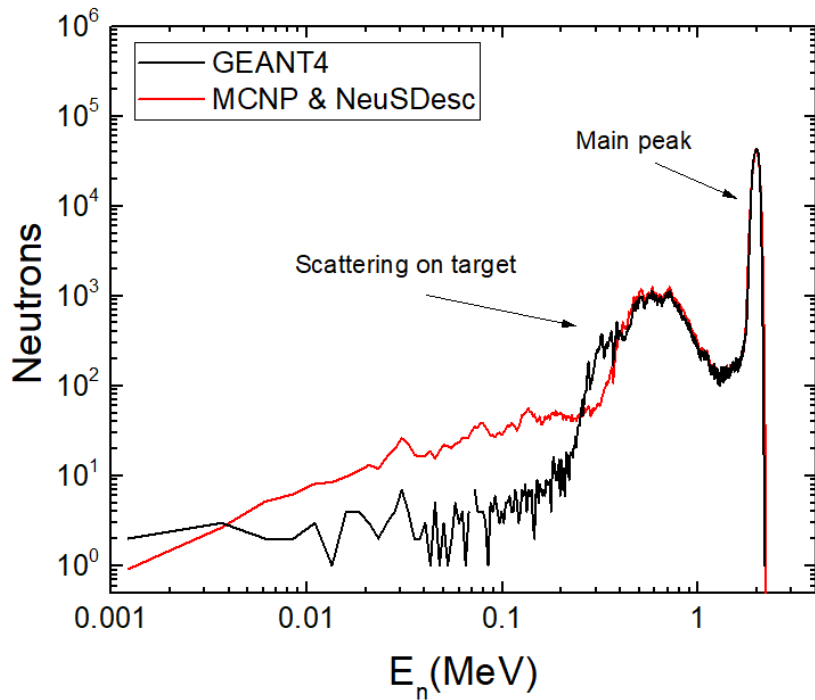
Εικόνα 3.4: Πειραματικά δεδομένα της βιβλιοθήκης EXFOR και τα αξιολογημένα δεδομένα της βιβλιοθήκης TENDL-2019 για τις αντιδράσεις (p,n) στα ισότοπα του Χαλκού.

Παρατηρώντας τις τιμές του παραπάνω Πίνακα 3.4 και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το στρώμα του χαλκού είναι πρακτικά απείρου πάχους για όλες τις ενέργειες της δέσμης των πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν, η επιλογή χρήσης της τιμής $f_b = 1000$ για το συγκεκριμένο γεωμετρικό όγκο αναμένεται να επιφέρει λανθασμένα αποτελέσματα στην προσομοίωση. Οπότε, για την περίπτωση του χαλκού χρησιμοποιήθηκε αναγκαστικά η τιμή $f_b = 100$ και στη συνέχεια, έγινε κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων ως προς τα αναμενόμενα για την μεγαλύτερη τιμή του biasing factor.

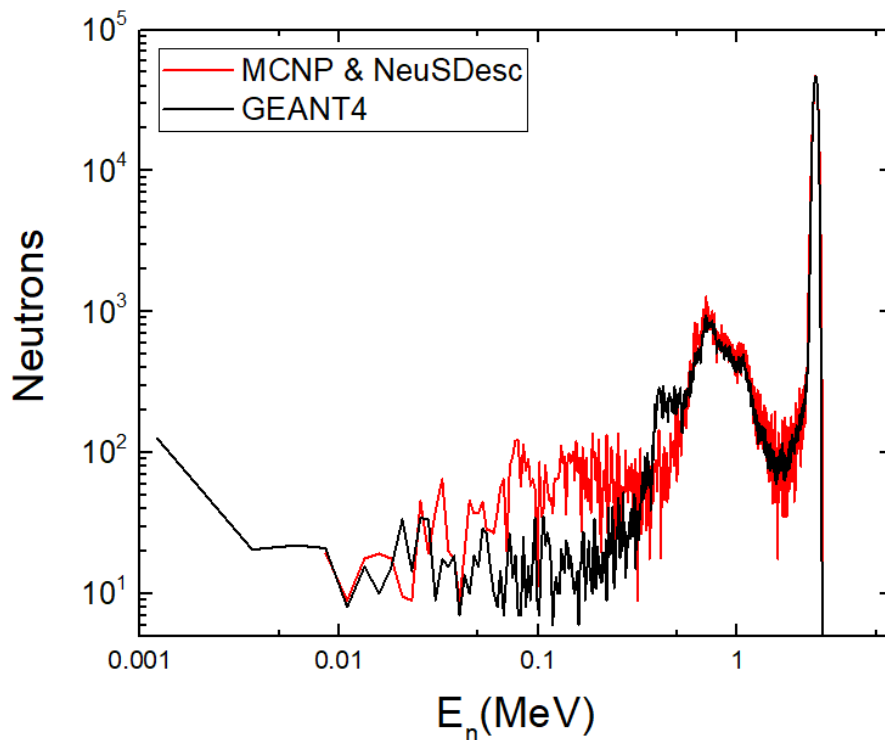
3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με τον κώδικα GEANT₄ για την γεωμετρία που περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Οι ενέργειες των πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν είναι $E_p = 3.400, 3.849, 4.300, 4.763, 5.229, 5.550, 5.850$ και 6.500 MeV. Για όλες τις περιπτώσεις έγινε η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής και χρησιμοποιήθηκε ο biasing factor $f_b = 1000$ για τους όγκους που περιέχουν το μολυβδαίνιο και το τρίτιο και ο biasing factor $f_b = 100$, με τη διόρθωση που αναφέρθηκε παραπάνω, για το στρώμα του χαλκού. Επιπλέον, για τους τρεις στόχους, το φύλλο του μολυβδαίνιου, τον στόχο του τριτίου και το στρώμα του χαλκού, για κάθε ενέργεια πραγματοποιήθηκαν 3 ξεχωριστά runs εφαρμόζοντας τον κατάλληλο biasing factor στον εκάστοτε όγκο αντίστοιχα. Τα γεγονότα που κατέγραφε ο ανιχνευτής εισέρχονταν σε 4 διαφορετικά ιστογράμματα: Στο πρώτο γινόταν η καταγραφή όλων των νετρονίων που έφταναν στον ανιχνευτή, στο δεύτερο μόνο τα νετρόνια που είχαν παραχθεί στο φύλλο του μολυβδαίνιου, στο τρίτο μόνο αυτά που αντιστοιχούσαν στον στόχο του τριτίου και στο τελευταίο ιστόγραμμα όσα έφταναν στον ανιχνευτή αλλά είχαν παραχθεί στο στρώμα του χαλκού. Για την τελική ενεργειακή κατανομή των νετρονίων, πραγματοποιήθηκε η πρόσθεση των τριών τελευταίων ιστογραμμάτων που προερχόταν από το αντίστοιχο run ανάλογα με την περιοχή στην οποία είχε εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική. Τέλος, για την πρώτη και την τελευταία ενέργεια, ο αριθμός των αρχικών πρωτονίων της πηγής ορίστηκε ίσος με 10^9 για όλες τις προσομοιώσεις.

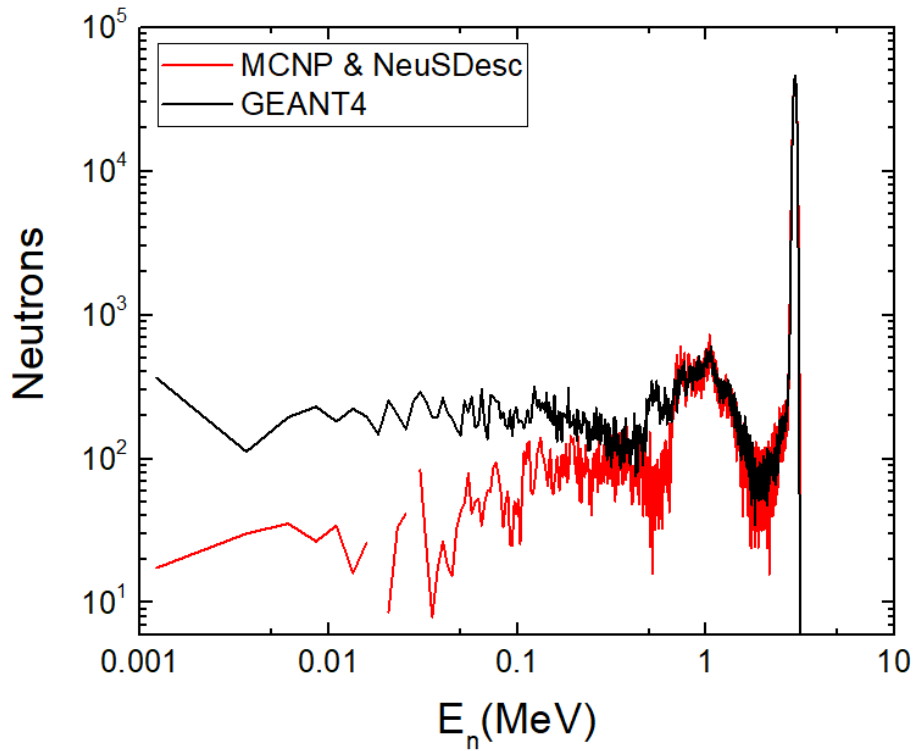
Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν με χρήση της ίδιας ακριβώς γεωμετρίας, προσομοιώσεις με χρήση του συνδυασμού των δύο κωδίκων προσομοίωσης NeuSDesc και MCNP. Σε αυτή την περίπτωση γινόταν ο υπολογισμός της ροής στον αντίστοιχο ανιχνευτή. Για να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο τεχνικών, στα αποτελέσματα της ροής έγινε κανονικοποίηση ως προς την κύρια κορυφή νετρονίων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση με το GEANT₄. Η σύγκριση μεταξύ των δύο κατανομών δεν παρέχει πληροφορίες για το πλήθος των καταγεγραμμένων γεγονότων αλλά δίνει μια ποιοτική σύγκριση τους. Ο αρχικός αριθμός των νετρονίων που χρησιμοποιήθηκε στο αρχείο εισόδου του MCNP είναι 10^9 νετρόνια στην πρώτη και τελευταία ενέργεια ακτινοβολήσης και 10^7 νετρόνια για τις υπόλοιπες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις *Εικόνες 3.5 – 3.13*. Για την ενέργεια $E_p = 6.5$ MeV παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα που αναδεικνύει τη συνεισφορά των νετρονίων από τον εκάστοτε στόχο.



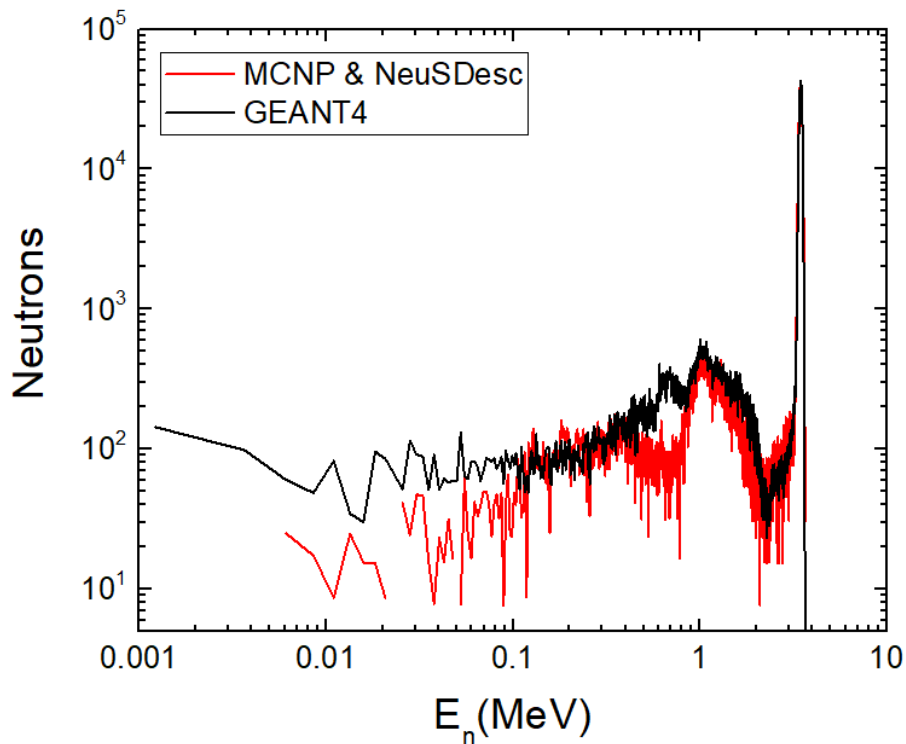
Εικόνα 3.5: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 3.400$ MeV.



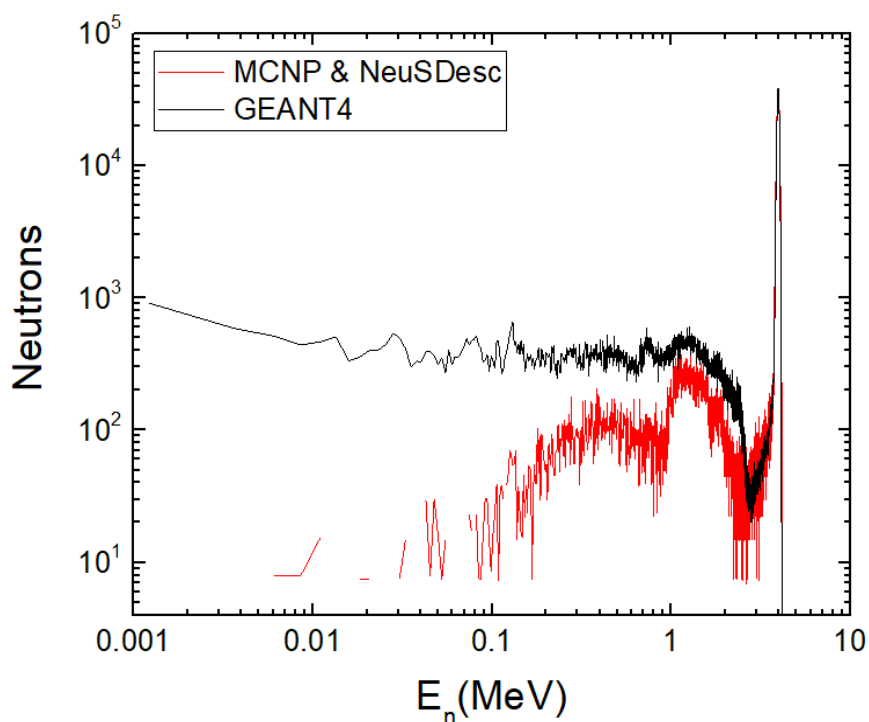
Εικόνα 3.6: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 3.849$ MeV.



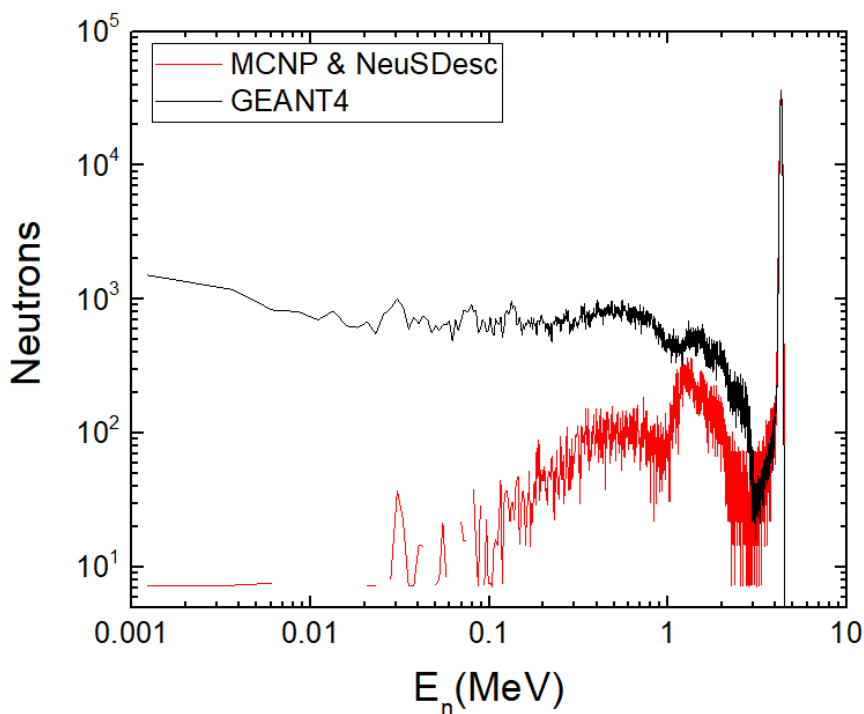
Εικόνα 3.9: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 4.300$ MeV.



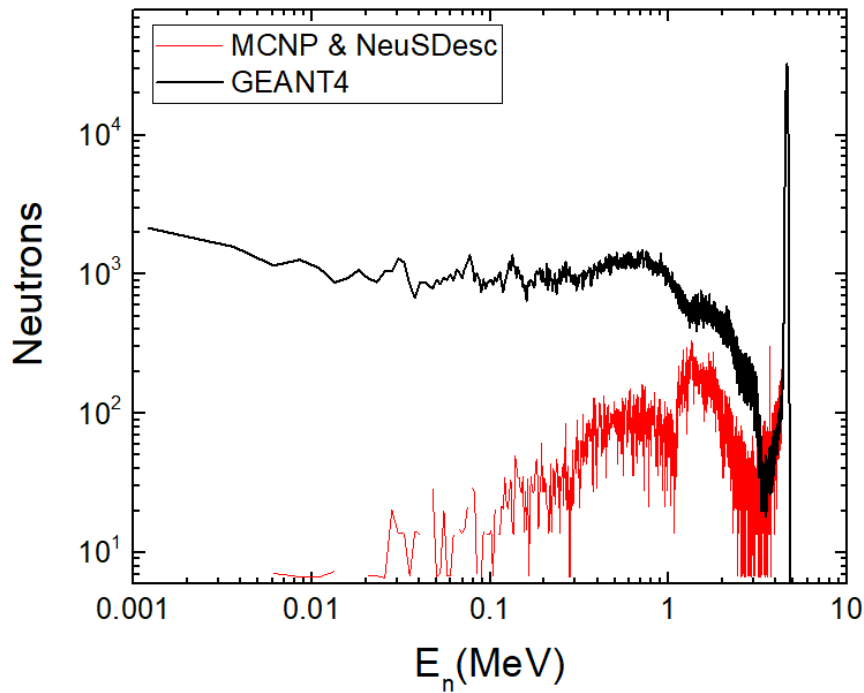
Εικόνα 3.9: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 4.763$ MeV.



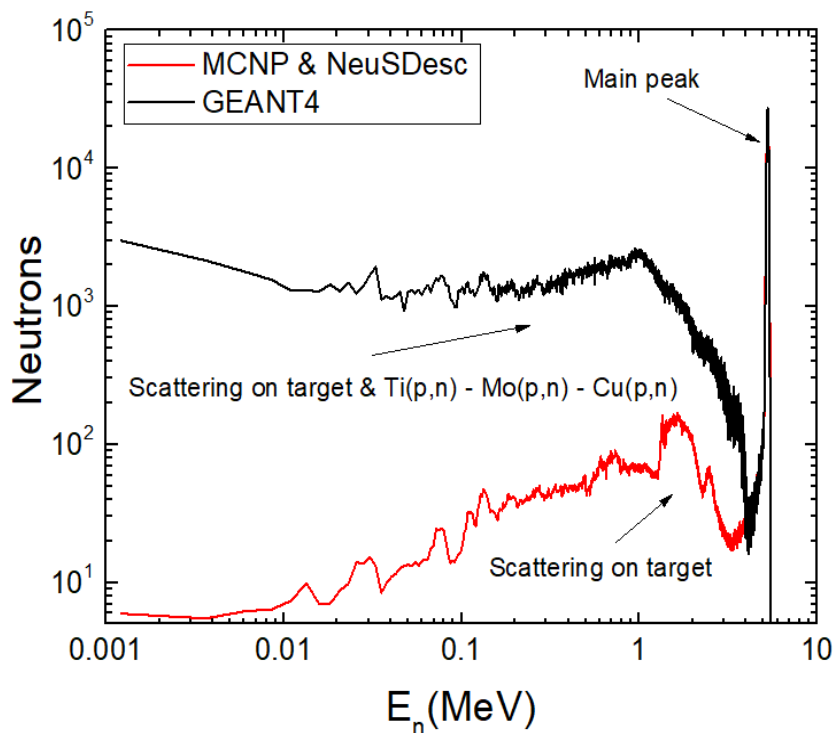
Εικόνα 3.9: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 5.29$ MeV.



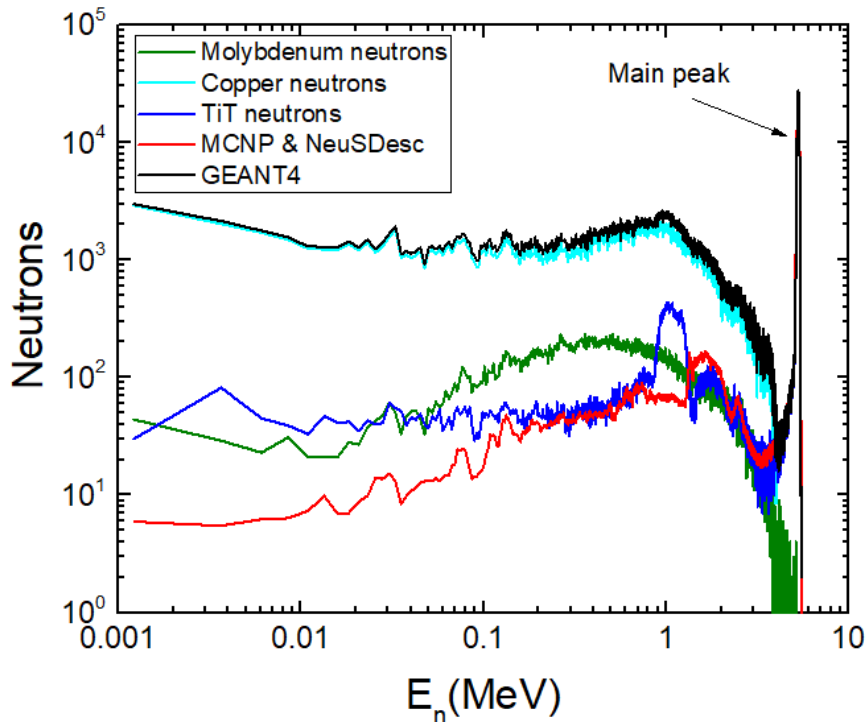
Εικόνα 3.10: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 5.550$ MeV.



Εικόνα 3.11: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 5.850$ MeV.



Εικόνα 3.12: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 6.5$ MeV.



Εικόνα 3.13: Σύγκριση της κατανομής των νετρονίων όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT₄ και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc στον ανιχνευτή για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 6.5$ MeV. Φαίνεται η συνεισφορά των νετρονίων που προέρχονται από τους στόχους Μολυβδαινίου, Τριτίου - Τιτανίου και Χαλκού.

Μελετώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις μέσω του κώδικα GEANT₄, μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για τις μικρότερες ενέργειες πρωτονίων οι κατανομές που προκύπτουν μεταξύ των δύο μεθόδων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Σε αυτές τις ενέργειες η παραγωγή των παρασιτικών νετρονίων από τα ισότοπα του μολυβδαινίου, του τιτανίου και του χαλκού είναι σχεδόν μηδενική σύμφωνα με τα ενεργειακά χαρακτηριστικά και τις ενεργές διατομές της εκάστοτε αντίδρασης. Οπότε, η μορφή των κατανομών οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στα νετρόνια που παράγονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης των πρωτονίων με τους πυρήνες του τριτίου και από τις σκεδάσεις αυτών μέσα στον ίδιο το στόχο αλλά και τα υλικά της διάταξης. Οι διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ των δύο κατανομών στις χαμηλές ενέργειες οφείλονται κατά κύριο λόγο στη διαφορετική στατιστική που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε περίπτωση.
- Με την αύξηση των ενεργειών των αρχικών πρωτονίων, παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των κατανομών που προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθόδους προσομοίωσης. Αρχίζουν να εμφανίζονται δηλαδή αποκλίσεις μεταξύ του λόγου της κύριας κορυφής με τις υπόλοιπες που εμφανίζονται στο φάσμα συναρτήσει της εκάστοτε διαφορετικής μεθόδου προσομοίωσης. Για ενέργειες μεγαλύτερες της $E_p = 4.763$ MeV, όλο και περισσότερες αντιδράσεις των διαφόρων ισotόπων της

διάταξης είναι επιτρεπτές ενεργειακά, ενώ παράλληλα η ενεργός διατομή αυτών έχει τιμές συγκρίσιμες πλέον με αυτές της κύριας αντίδρασης.

- Οι διαφορές μεταξύ των κατανομών μεγιστοποιούνται για την τελευταία ενέργεια ακτινοβολήσης, όπου όλες οι παρασιτικές αντιδράσεις είναι πλέον ενεργειακά επιτρεπτές. Οι ενεργές διατομές αυτών παρουσιάζουν αύξηση με αποτέλεσμα η συνεισφορά των παρασιτικών νετρονίων να ξεπερνάει το 70% για ενέργειες νετρονίων $E_n < 4$ MeV. Παρατηρώντας την *Εικόνα 3.13*, όπου εμφανίζεται το πλήθος των νετρονίων που προκύπτουν από τον κάθε διαφορετικό στόχο της διάταξης, φαίνεται πώς η συμβολή των νετρονίων που παράγονται από το στόχο του χαλκού είναι αυτή που προκαλεί τις μεγαλύτερες διαφορές στις δύο κατανομές. Επιπλέον, η συμφωνία μεταξύ της κατανομής που προκύπτει από τα νετρόνια που προέρχονται από τον στόχο του τιτανίου-τριτίου και της κατανομής όπως προέκυψε από το πρόγραμμα MCNP είναι αρκετά ικανοποιητική. Η κορυφή που εμφανίζεται για ενέργειες νετρονίων γύρω στο 1 MeV, οφείλεται στην αντίδραση (p,n) στο ισότοπο ^{48}Ti του τιτανίου και όπως είναι αναμενόμενο, η προσομοίωση μέσω του κώδικα MCNP αδυνατεί να την περιγράψει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή μιας μεροληπτικής υπολογιστικής μεθόδου, με τη βοήθεια του κώδικα προσομοίωσης GEANT₄, με στόχο την μελέτη των παρασιτικών νετρονίων που παράγονται στην επιταχυντική πειραματική γραμμή του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» η οποία χρησιμοποιείται για πειράματα σχάσης και νετρονικής ενεργοποίησης.

Η αντίδραση ενδιαφέροντος για την παραγωγή νετρονίων είναι η αντίδραση ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$. Για τη μελέτη, όμως της συμπεριφοράς της μεροληπτικής τεχνικής διενεργήθηκαν διάφοροι έλεγχοι κάνοντας χρήση διαφόρων στόχων και ενεργειών της δέσμης των πρωτονίων. Μετά την ολοκλήρωση της θεωρητικής μελέτης, κατασκευάστηκε μέσω του κώδικα η πειραματική διάταξη, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πειραματική διάταξη σε φυσικό χώρο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αφορούν 8 διαφορετικές ενέργειες δέσμης πρωτονίων και η επιλογή τους συμπίπτει με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε αντίστοιχο παλαιότερο πείραμα ενός μέλους της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης έγινε με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από το συνδυασμό χρήσης δύο πακέτων προσομοίωσης, του κώδικα NeuSDesc και του κώδικα MCNP. Φαίνεται πως η συμφωνία μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ικανοποιητική για τις ενέργειες όπου οι αντιδράσεις παραγωγής παρασιτικών νετρονίων είναι ενεργειακά μη επιτρεπτές ή έχουν χαμηλή ενεργό διατομή.

Στα μελλοντικά σχέδια που αφορούν την εξέλιξη της παρούσας μελέτης περιλαμβάνονται:

1. Ο περαιτέρω έλεγχος και βελτιστοποίηση του κώδικα που δημιουργήθηκε.
2. Η αντικατάσταση της σημειακής πηγής παραγωγής πρωτονίων με πηγή της οποίας τα γεωμετρικά και τα ενεργειακά χαρακτηριστικά θα προσεγγίζουν με καλύτερο τρόπο το ρεαλιστικό προφίλ της δέσμης πρωτονίων.
3. Η «επιμόλυνση» της γεωμετρίας με στοιχεία που πιθανόν υπάρχουν στη φυσική διάταξη, παράγουν επιπλέον παρασιτικά νετρόνια και οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα κατά τα πειράματα μελέτης της διαδικασίας της σχάσης.
4. Η κατασκευή ολοκληρωμένης γεωμετρίας που αφορά τους θαλάμους σχάσης ώστε να πραγματοποιείται η περιγραφή των σκεδάσεων των νετρονίων που πραγματοποιούνται από τα υλικά τους.
5. Η μελέτη της μεροληπτικής τεχνικής και η εξακρίβωση της συμπεριφοράς και των ορίων της κατά την εφαρμογή της σε διαφορετικούς τύπους αντιδράσεων παραγωγής νετρονίων που χρησιμοποιούνται στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» (${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ και ${}^3\text{H}(d,n){}^3\text{He}$).

Βιβλιογραφία

- [1] "Book For Application Developers — Book For Application Developers 11.0 documentation." <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html> (accessed Feb. 26, 2022).
- [2] "TENDL-2019 nuclear data library." https://tendl.web.psi.ch/tendl_2019/tendl2019.html (accessed Mar. 11, 2022).
- [3] "JENDL-4.0." <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html> (accessed Mar. 11, 2022).
- [4] "Nuclear Energy Agency (NEA) - Joint Evaluated Fission and Fusion (JEFF) Nuclear Data Library." https://www.oecd-nea.org/jcms/c_12798/joint-evaluated-fission-and-fusion-jeff-nuclear-data-library (accessed Mar. 11, 2022).
- [5] "ENDF: Evaluated Nuclear Data File." <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (accessed Feb. 26, 2022).
- [6] "GEARS 齿轮组 | Geant4 Example Application with Rich features yet Small footprint." <http://physino.xyz/gears/examples/output/> (accessed Feb. 26, 2022).
- [7] E. B. and G. Lövestam, "NeuSDesc – Neutron Source Description, Instruction Manual," 2008.
- [8] "Los Alamos National Laboratory: MCNP Home Page." <https://mcnp.lanl.gov/> (accessed Feb. 26, 2022).
- [9] N. Tsoufanidis and S. Landsberger, *Measurement detection of radiation, 4th edition*. 2015.
- [10] "Μελέτη της αντίδρασης παραγωγής νετρονίων $^3\text{H}(\text{p},\text{n})^3\text{He}$ στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δημόκριτος' – Εφαρμογή στην αντίδραση $^{232}\text{Th}(\text{n},\text{f})$."
- [11] V. Michalopoulou *et al.*, "Measurement of the $^{232}\text{Th}(\text{n},\text{f})$ cross section with quasi-monoenergetic neutron beams in the energy range 2–18 MeV," *Eur. Phys. J. A* 2021 579, vol. 57, no. 9, pp. 1–10, Sep. 2021, doi: 10.1140/EPJA/S10050-021-00590-W.
- [12] H. Liskien and A. Paulsen, "Neutron production cross sections and energies for the reactions $\text{T}(\text{p},\text{n})^3\text{He}$, $\text{D}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$, and $\text{T}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$," *At. Data Nucl. Data Tables*, vol. 11, no. 7, pp. 569–619, Jun. 1973, doi: 10.1016/S0092-640X(73)80081-6.
- [13] J. Błocki, J. Randrup, W. J. Świątecki, and C. F. Tsang, "Proximity forces," *Ann. Phys. (N. Y.)*, vol. 105, no. 2, pp. 427–462, Jun. 1977, doi: 10.1016/0003-4916(77)90249-4.
- [14] "EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data." <https://www-nds.iaea.org/exfor/> (accessed Mar. 11, 2022).
- [15] E. Mendoza *et al.*, "Neutron production induced by α -decay with Geant4," 2019.

