



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών
και Φυσικών Επιστημών
Τομέας Φυσικής

Μελέτη της δέσμης νετρονίων για την αντίδραση (d,n) στο τρίτιο με χρήση του κώδικα Monte Carlo GEANT4

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του Ιωάννη Τσορπατζόγλου

Υπεύθυνος Καθηγητής: Μιχαήλ Κόκκορης

ΑΘΗΝΑ, 2023

Περίληψη

Σε αυτή την μελέτη, αναπτύχθηκε ένας κώδικας προσομοίωσης χρησιμοποιώντας το περιβάλλον GEANT4[1] έτσι ώστε να ερευνηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η παραγωγή νετρονίων από την αντίδραση ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$, που προκαλείται από την αλληλεπίδραση δευτερίων με την ύλη. Ο κύριος στόχος είναι να μελετηθεί επαρκώς η παραγωγή των νετρονίων χρησιμοποιώντας την μεροληπτική τεχνική (cross section biasing technique) για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου της προσομοίωσης. Ωστόσο, η εφαρμογή μίας τέτοιας τεχνικής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις φυσικές διεργασίες που προσομοιώνονται. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής αυτής, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά, γεωμετρίες και παράγοντες εξαναγκασμού (biasing factors). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις μη εξαναγκασμένες περιπτώσεις.

Στον επιταχυντή TANDEM του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος, η αντίδραση ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ χρησιμοποιείται για την παραγωγή δέσμης νετρονίων. Η φλάντζα του τρίτου περιέχει ως επιπρόσθετα στοιχεία μολυβδαίνιο, χαλκό και τιτάνιο. Κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης της δέσμης των δευτερίων με αυτά τα στοιχεία, υπάρχει πιθανότητα δευτερογενούς παραγωγής νετρονίων που μπορεί να οδηγήσει σε μη επιθυμητή παραγωγή παρασιτικών νετρονίων και επιμόλυνση της κύριας δέσμης των νετρονίων.

Η παραγόμενη δέσμη νετρονίων προσπίπτει σε διάφορα υλικά προκειμένου να πραγματοποιηθούν πειράματα μέτρησης ενεργού διατομής. Ο κώδικας προσομοίωσης στοχεύει στην κατανόηση της κατανομής και της ροής των νετρονίων μέσα σε αυτούς του στόχους. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τον κώδικα GEANT4, μέσω της εφαρμογής της μεροληπτικής τεχνικής, συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση των προγραμμάτων MCNP[2] και NeuSDesc[3].

Abstract

In this study, a simulation code is developed using the GEANT4[1] toolkit to investigate and quantify the neutron production from deuteron-induced reactions. The main purpose is to properly study the neutron generation using the technique of cross section biasing to reduce the computing time. However, the implementation of a biasing technique can significantly affect the physical processes. To evaluate the effectiveness of the biasing technique, validation simulations using different materials, geometries and biasing factors were performed and the results were compared to the unbiased cases.

At the Tandem accelerator laboratory of the N.C.S.R. “Demokritos”[8], the ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ reaction is used for neutron beam production. The tritium target setup contains molybdenum, copper and titanium. During the deuteron beam interaction with these elements, there is a probability of secondary neutron generation that can result into undesired parasitic neutron production and contamination of the main neutron beam.

Various target materials are purposefully exposed to a neutron beam in order to conduct cross-section measurement experiments. The simulation code aims to understand neutron flux distribution and transport through the targets. The corresponding results obtained using GEANT4, through the application of biasing techniques, were compared to those resulting from the combined use of MCNP[2] and NeuSDesc[3] codes.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	8
1.1	Κίνητρο	8
1.2	Στάδια Μελέτης της Ροής των Νετρονίων	9
1.3	Θεωρία Ολοκλήρωσης Monte Carlo	10
1.3.1	Γέννηση Τυχαίων Αριθμών	11
1.3.2	Χαοτικό Πρόβλημα	11
2	Σχετικά με το GEANT4	12
2.1	Ο κώδικας GEANT4	12
2.2	Μεροληπτικές Τεχνικές στις προσομοιώσεις ⁽¹¹⁾	13
2.3	Μεροληπτική Τεχνική στην Ενεργό Διατομή (Cross Section Biasing Technique)	14
2.4	Ευαισθησία του παράγοντα εξαναγκασμού f_b	15
2.4.1	Μηχανισμός Παραγωγής των Νετρονίων στον Στόχο	16
2.4.2	Απώλεια Ενέργειας στον στόχο	17
2.4.3	Ενεργός Διατομή της Αντίδρασης	17
2.4.4	Επιπλέον Παρατηρήσεις	18
3	Συμπεριφορά της Μεροληπτικής Τεχνικής για το κανάλι (d,n)	19
3.1	Αξιολόγηση της Μεροληπτικής Τεχνικής στο ²⁷ Al	19
3.1.1	Παχύς στόχος ²⁷ Al	20
3.1.2	Λεπτός στόχος ²⁷ Al	27
3.2	Αξιολόγηση της Μεροληπτικής Τεχνικής στα Ισότοπα του Μολυβδαίνιου και του Χαλκού	39
3.2.1	Μολυβδαίνιο	39
3.2.2	Χαλκός	42
3.3	Ο Κύριος Στόχος του Τριτίου	45
3.3.1	Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 0.91 MeV	45
3.3.2	Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 1.98 MeV	48
3.3.3	Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.64 MeV	53
3.4	Αξιολόγηση της Μεροληπτικής Τεχνικής στον Άνθρακα - $E_d = 3.45\text{MeV}$	57
3.4.1	Παχύς στόχος Άνθρακα	57
3.4.2	Λεπτός στόχος Άνθρακα	60
4	Χαρακτηρισμός της ροής των νετρονίων για την πειραματική διάταξη	64
4.1	Γεωμετρία της Πειραματικής Διάταξης	64
4.2	Επιλογή του κατάλληλου f_b	66

4.3	Ανελαστικές σκεδάσεις (n,xn) για τους στόχους Mo, Cu και το ισότοπο ^{48}Ti του στόχου TiT	67
4.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	70
4.4.1	Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.11 MeV	71
4.4.2	Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.9 MeV	73
4.4.3	Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 3.45 MeV	75
4.4.4	Παρατηρήσεις	79
4.5	Νέα Γεωμετρία της Πειραματικής Διάταξης	80
4.5.1	Ορισμός δέσμης δευτερίων με χωρική διασπορά	80
4.5.2	Έλεγχος του φάσματος με προσθήκη γκαουσιανής (Gaussian) δέσμης και φυσικού άνθρακα για την ενέργεια ενδιαφέροντος $E_d = 3.45\text{MeV}$	80
5	Συμπεράσματα - Προοπτικές	82
6	Παράρτημα	84
6.1	GEANT4 - Γεωμετρία των στόχων προς ακτινοβολήση	84
6.2	GEANT4 - Macro αρχείο για τον ορισμό της νέας δέσμης	94

1 Εισαγωγή

Η αντίδραση ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ είναι μία αντίδραση πυρηνικής σύντηξης και παρουσιάζει εφαρμογές σε διάφορους κλάδους της φυσικής. Στην αστροφυσική, η μελέτη αυτής της αντίδρασης μας βοηθά να κατανοήσουμε την ενεργειακή παραγωγή των αστέρων και την εξέλιξη τους, στην πυρηνική ενέργεια μελετάται ως δυνατή πηγή ενέργειας μέσω πυρηνικής σύντηξης και στην πυρηνική ιατρική μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή νετρονίων για θεραπευτικούς σκοπούς. Επιπλέον, στον κλάδο της πυρηνικής φυσικής αποτελεί μια από τις βασικές αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων με στόχο την δευτερογενή χρήση της δέσμης αυτής για τη μελέτη υλικών. Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί το κίνητρο της παρούσας μελέτης, που αφορά τη συγκεκριμένη αντίδραση, καθώς και τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την ολοκλήρωσή της.

1.1 Κίνητρο

Το κίνητρο της μελέτης αυτής βασίζεται στην ανάγκη ποσοτικοποίησης των νετρονίων που παράγονται από την αντίδραση (d,n) στο τρίτιο στο ενεργειακό εύρος νετρονίων 15-20MeV, με στόχο τη χρήση της οιονεί μονοενεργειακής δέσμης που προκύπτει, για τη μελέτη ενεργών διατομών σε διάφορους στόχους. Για τον καλό προσδιορισμό της ροής αυτής χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, γίνεται χρήση του κώδικα Monte Carlo GEANT4 και προσδιορίζεται η ροή των νετρονίων που προέρχονται από την κύρια αντίδραση, ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ όπως επιπλέον, και τα παρασιτικά νετρόνια τα οποία προκαλούν την επιμόλυνσή της και προέρχονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης των δευτερίων με τα διάφορα στοιχεία της πειραματικής διάταξης.

Με τον κώδικα GEANT4 υπάρχει η δυνατότητα να παρακολουθηθούν τα δευτέρια μέσα στον στόχο. Χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες με αξιολογημένα (evaluated) δεδομένα αντιδράσεων για ενέργειες μικρότερες των 20MeV, όπως η TENDL¹ και η ENDF². Επειδή οι αντιδράσεις (d,n) έχουν σχετικά χαμηλή ενεργό διατομή, γεγονός που επιφέρει χαμηλή στατιστική στην παραγωγή των νετρονίων, υπήρχε η ανάγκη εφαρμογής μεροληπτικών τεχνικών (cross section biasing techniques) στην δειγματοληψία Monte Carlo (βλ. Κεφάλαιο 1.3), έτσι ώστε να μειωθούν οι υπολογιστικοί χρόνοι των προσομοιώσεων. Ενδεικτικά, μία τυπική προσομοίωση Monte Carlo διαρκούσε 6-7 ώρες ενώ με την εφαρμογή μεροληπτικών τεχνικών διαρκούσε μόλις 10 λεπτά.

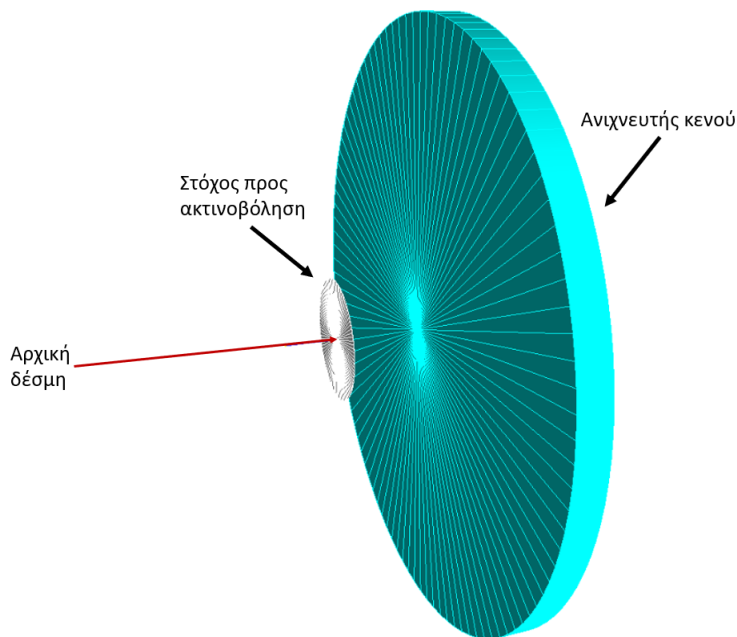
¹https://tendl.web.psi.ch/tendl_2021/tendl2021.html

²<https://www-nds.iaea.org/endl/>

1.2 Στάδια Μελέτης της Ροής των Νετρονίων

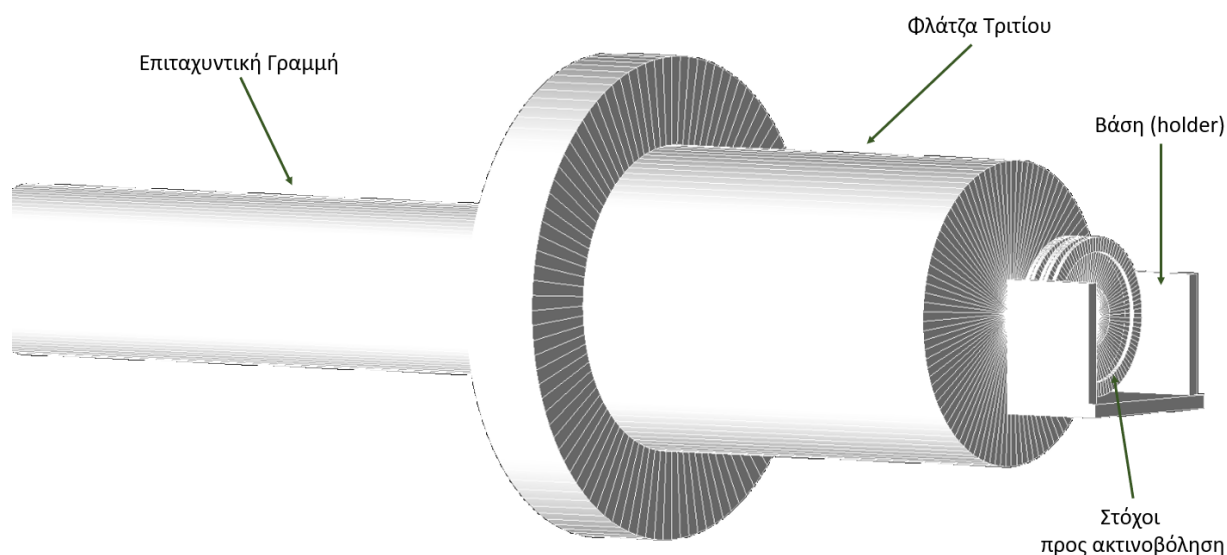
Η μελέτη της αντίδρασης χωρίστηκε σε δύο στάδια:

1. Στο πρώτο στάδιο (Κεφάλαιο 3), βασική αφετηρία ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς της ροής των νετρονίων σε περιπτώσεις στις οποίες έχει εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική, για ενέργειες δευτερίων από 2-3.45MeV, για διαφορετικά πάχη στόχων και διαφορετικά υλικά στόχων (χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στόχοι που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη ενδιαφέροντος). Η γεωμετρία που προσομοιώθηκε (Εικόνα 1.1) στο GEANT4 αποτελείται από έναν στόχο μικρής ακτίνας (1 - 2 cm) και σε απόσταση 1cm έχει τοποθετηθεί ένας ανιχνευτής κενού από τον οποίο λαμβάνεται το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων. Ο ανιχνευτής είναι πολύ μεγαλύτερος σε διάμετρο έτσι ώστε να καλύπτει στερεά γωνία ανίχνευσης σχεδόν ίση με 2π . Για την αξιολόγηση της χρήσης αυτής της μεθόδου, έγινε σύγκριση των φασμάτων που προκύψαν με την αναλογική τους περίπτωση (στις οποίες δεν έχει εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική).



Εικόνα 1.1: Οπτικοποίηση της γεωμετρίας στόχου - ανιχνευτή μέσω του GEANT4. Ο ανιχνευτής έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 1cm από τον στόχο. Η αρχική δέσμη δευτερίων προσπίπτει κάθετα στο στόχο.

2. Στο δεύτερο στάδιο (Κεφάλαιο 4), γίνεται προσομοίωση της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή των νετρονίων, και αποτελείται από την επιταχυντική γραμμή, τη φλάτζα του τρίτου και μία βάση (holder) σε απόσταση 3cm από τη φλάτζα, η οποία περιλαμβάνει κάποιους στόχους (Εικόνα 1.2). Η επιλογή των στόχων βασίζεται σε πείραμα προσδιορισμού ενεργών διατομών αντιδράσεων νετρονίων σε ισότοπα του γερμανίου, το οποίο πραγματοποιήθηκε από μέλος της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π.. Στο στάδιο αυτό, καταγράφονται τα νετρόνια που προσπίπτουν στους στόχους



Εικόνα 1.2: Οπτικοποίηση της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης μέσω του GEANT4.

και μελετάται η συμπεριφορά της συνολικής ροής αυτών. Οι ενέργειες ενδιαφέροντος για τη μελέτη της ροής των νετρονίων είναι τα 2.11MeV, 2.9MeV και 3.45MeV όσον αφορά την αρχική δέσμη των δευτερίων.

1.3 Θεωρία Ολοκλήρωσης Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo που αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι μια στοχαστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τυχαιότητα και αβεβαιότητα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την τυχαιότητα για να εξετάσει πολλές δυνατές λύσεις ενός προβλήματος και να παράγει στατιστικά αποτελέσματα που μπορούν να δώσουν εκτιμήσεις ή προσεγγίσεις της λύσης.

Στα πλαίσια της αντίδρασης που μελετάται, που αφορά τη μελέτη της δέσμης των νετρονίων για την αντίδραση ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$, η μέθοδος της ολοκλήρωσης Monte Carlo αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο το οποίο επιτρέπει την προσομοίωση της κίνησης των νετρονίων καθώς αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες των στοιχείων που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη.

Κατά τη διάρκεια αυτής της μεθόδου, παράγονται στατιστικά δεδομένα που παρουσιάζουν τη δέσμη των νετρονίων κατά την αλληλεπίδρασή τους με τους πυρήνες του ${}^3\text{H}$ (τριτίου). Τα δεδομένα ενδιαφέροντος είναι τα σημεία γεννήσεως των νετρονίων μέσα σε όλη την πειραματική διάταξη και οι αντίστοιχες ενέργειές τους, η γωνιακή κατανομή και το ενεργειακό φάσμα τους. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες προκλήσεις της μεθόδου αυτής όπως ο χρόνος εκτέλεσης, οι απαιτήσεις σε μνήμη και οι ακρίβειες των μοντέλων αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιούνται.

Γενικά, η ολοκλήρωση Monte Carlo είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στον κλάδο της πυρηνικής φυσικής για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση πυρηνικών αντιδράσεων. Αυτή η τεχνική βασίζεται στη χρήση **τυχαίων αριθμών** και την επαναληπτική δειγματοληψία για τον υπολογισμό φυσικών ποσοτήτων (ενέργεια,

θέση κ.τ.λ.) που σχετίζονται με πυρηνικές αντιδράσεις.

1.3.1 Γέννηση Τυχαίων Αριθμών

Η γέννηση τυχαίων αριθμών στο πλαίσιο των πυρηνικών αντιδράσεων είναι συχνά απαραίτητη για προσομοιώσεις και αναλύσεις. Ένα απλό παράδειγμα είναι η παραγωγή τυχαίων αριθμών για την ενέργεια ενός εκπεμπόμενου νετρονίου ή το σημείο παραγωγής του μέσα σε έναν στόχο που ακτινοβολείται. Γίνεται δηλαδή να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Monte Carlo ώστε να παραχθούν τυχαίες ενέργειες, ακολουθώντας την κατανομή ενέργειας που περιγράφει τη συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση. Συνήθως χρησιμοποιούνται κατανομές όπως η κανονική κατανομή (Gaussian) ή οι κατανομές Maxwell-Boltzmann. Συνοπτικά, η γέννηση τυχαίων αριθμών χρησιμοποιείται από τη μέθοδο ώστε να προσεγγιστούν λύσεις σε προβλήματα που σχετίζονται με τυχαιότητα και αβεβαιότητα, συμπεριλαμβανομένων και των **χαοτικών προβλημάτων**.

1.3.2 Χαοτικό Πρόβλημα

Το χαοτικό πρόβλημα αναφέρεται στην ευαισθησία των αρχικών συνθηκών και των παραμέτρων του συστήματος, όπου μικρές αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους μπορεί να οδηγήσουν σε αισθητές αλλαγές στην εξέλιξη του συστήματος. Στη περίπτωση της αντίδρασης ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$, η παρουσία χαοτικού προβλήματος είναι αναπόφευκτη καθώς η εξέλιξη των αντιδράσεων μέσα στα στοιχεία της πειραματικής διάταξης παρουσιάζει χαοτικό χαρακτήρα.

Ένα παράδειγμα του χαοτικού προβλήματος που αντιμετωπίζεται στην εν λόγω αντίδραση είναι η ευαισθησία στην αρχική κινητική ενέργεια των δευτερίων. Ακόμα και μικρές αλλαγές στην αρχική ενέργεια της αντίδρασης μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικές πορείες αλληλεπίδρασης και διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτή η ευαισθησία στην αρχική ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε μια ευρεία ποικιλία αποτελεσμάτων, περιλαμβανομένης της κατανομής των εκπεμπόμενων νετρονίων, της ενέργειάς τους και της γωνίας υπό την οποία εκπέμπονται.

2 Σχετικά με το GEANT4

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται αρχικά κάποιες γενικές πληροφορίες σχετικά με τον κώδικα GEANT4 και τη λειτουργικότητά του. Στη συνέχεια, γίνεται μία πρώτη αναφορά στην εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής στις αντιδράσεις.

2.1 Ο κώδικας GEANT4

Το GEANT4 (GEometry ANd Tracking) είναι ένα ανοιχτού κωδικα αντικειμενοστρεφές πρόγραμμα προσομοίωσης σωματιδίων που αναπτύχθηκε σε C++, παρέχει στον χρήστη μία ποικιλία εργαλείων και χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τη διάδοση σωματιδίων στην ύλη. Συγκεκριμένα, ο κώδικας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά την αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη για ένα ευρύ ενεργειακό φάσμα (από keV ως TeV).

Το λογισμικό GEANT4 αναπτύχθηκε αρχικά για να καλύψει τις ανάγκες της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών. Υπό αυτό το πρίσμα, οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με την ύλη είναι κυρίως ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και συμβαίνουν σε ενέργειες της τάξης των GeV. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης του GEANT4, ο τρόπος υπολογισμού των ενεργών διατομών των αντιδράσεων και των απωλειών ενέργειας των σωματιδίων κατά την διέλευσή τους μέσα από την ύλη, βασιζόταν στη χρήση διαφόρων θεωρητικών μοντέλων. Ωστόσο, με την περαιτέρω ανάπτυξη του λογισμικού, προστέθηκαν επιπλέον διαδικασίες που αφορούν αδρονικές αλληλεπιδράσεις και ενσωματώθηκε μία ποικιλία πειραματικών και αξιολογημένων δεδομένων (evaluated data) βασισμένα στις βιβλιοθήκες όπως οι TENDL[4], JENDL [5], JEFF[6], ENDF[7].

Το GEANT4 αποτελείται από μία πληθώρα κλάσεων που καλύπτουν διάφορες πτυχές της προσομοίωσης σωματιδίων ως προς τον ορισμό της αρχικής δέσμης, την γεωμετρία και τη φυσική που θα χρησιμοποιηθεί. Ορισμένες από τις κύριες κλάσεις που συναντάμε στον κώδικα είναι:

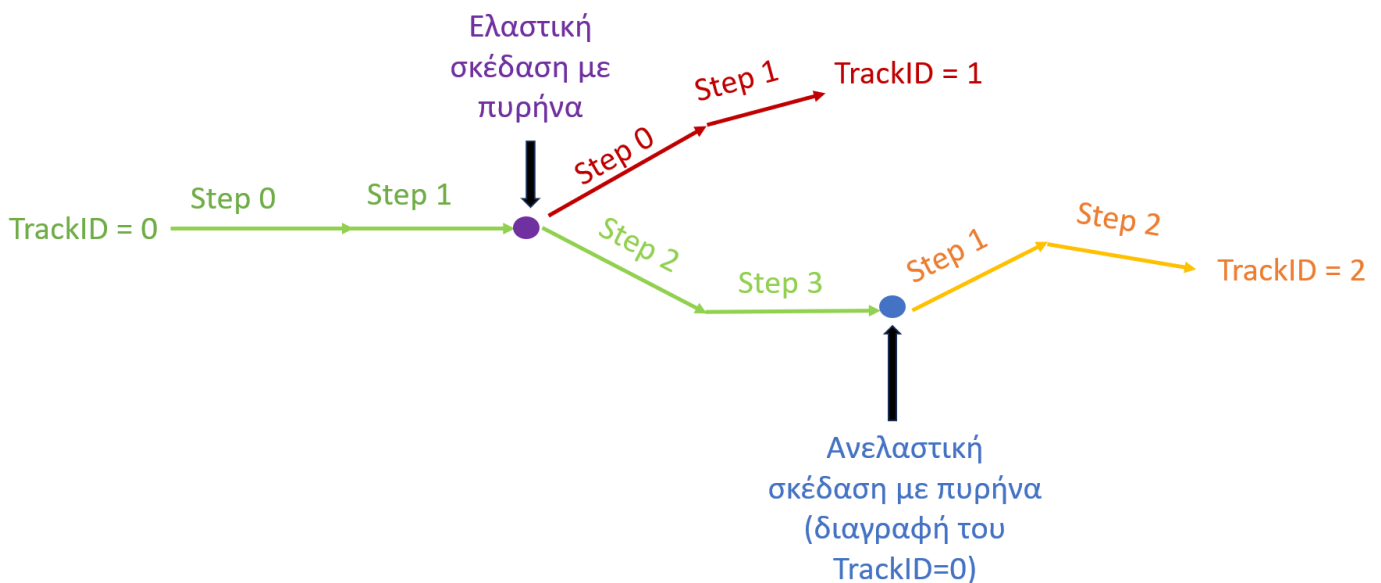
G4RunManager: Αυτή η κλάση είναι υπεύθυνη για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης και μέσω αυτής γίνεται η αρχικοποίηση των επιμέρους διαδικασιών.

G4VUserDetectorConstruction: Χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ανιχνευτών και της γεωμετρίας της προσομοίωσης. Ο χρήστης ορίζει τους ανιχνευτές και τη δομή της γεωμετρίας μέσω της υλοποίησης των αντίστοιχων μεθόδων.

G4VUserPhysicsList: Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των μοντέλων φυσικής και των πειραματικών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν.

G4VUserPrimaryGeneratorAction: Χρησιμοποιείται για την περιγραφή της αρχικής δέσμης σωματιδίων της εκάστοτε προσομοίωσης.

Αφού ο χρήστης κατανοήσει τη λειτουργικότητα της κάθε κλάσης, μπορεί να ξεκινήσει τη διαδικασία προσομοίωσης (run). Σε ένα run, είναι απαραίτητο να ορισθεί ο αριθμός των γεγονότων (events), δηλαδή ο αριθμός των αρχικών σωματιδίων της δέσμης που πρόκειται να αλληλεπιδράσουν με τους όγκους της γεωμετρίας. Για κάθε ένα event, δημιουργούνται τα ίχνη (tracks) των αρχικών σωματιδίων που αποθηκεύονται στη μνήμη και γίνεται παρακολούθηση του κάθε σωματιδίου σε βήματα (steps) μέσα στην καθορισμένη γεωμετρία (ή τον καθορισμένο όγκο - volume) έως ότου να εξέλθουν από αυτήν. Αν τα αρχικά σωματίδια πραγματοποιήσουν κάποια αντίδραση, τότε τα δευτερογενή σωματίδια (secondary tracks) που θα προκύψουν, θα ταυτοποιηθούν με διαφορετικό ίχνος (trackID) και θα αλληλεπιδράσουν με τους όγκους της γεωμετρίας, ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση μίας προσομοίωσης (run). Το κάθε σωματίδιο με συγκεκριμένο Track ID εκτελεί τα δικά του steps.

Για παράδειγμα (Εικ. 2.1), το αρχικό σωματίδιο με Track ID = 0 κάνει δύο steps, έπειτα αλληλεπιδρά ελαστικά με έναν πυρήνα και το σωματίδιο που προκύπτει έχει TrackID = 1. Στη συνέχεια, το σωματίδιο με trackID = 0 πραγματοποιεί κάποια πυρηνική αντίδραση και το παραγόμενο σωματίδιο θα έχει trackID = 2. Στο σημείο αυτό, το trackID του αρχικού σωματιδίου έχει διαγραφεί.

Τέλος, μέσω του κώδικα υπάρχει η δυνατότητα οπτικοποίησης της γεωμετρικής διάταξης και των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων. Επιπλέον, η καταγραφή και εξαγωγή πληροφοριών που αφορούν τα χαρακτηριστικά και τις φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων, σε όλα τα στάδια της προσομοίωσης, μπορεί να γίνει μέσω της χρήσης διαφόρων εργαλείων ανάλυσης (π.χ. δημιουργία ιστογραμμάτων).

2.2 Μεροληπτικές Τεχνικές στις προσομοιώσεις ^[11]

Σε ορισμένα προβλήματα προσομοίωσης, αναδύεται ενδιαφέρον σχετικά με "σπάνια" γεγονότα, είτε λόγω των φυσικών διαδικασιών που τα διέπουν, είτε λόγω

ιδιομορφιών των πειραματικών διατάξεων στα οποία αυτά λαμβάνουν χώρα. Στην περίπτωση της υπό μελέτη πειραματικής διάταξης, η χαμηλή ενεργός διατομή στο κανάλι (d,n), για τα περισσότερα υλικά από τα οποία αποτελείται, δεν φέρεται να αποδίδει ικανοποιητική στατιστική στον αριθμό των παραγόμενων νετρονίων κατά την πραγματοποίηση μιας αναλογικής προσομοίωσης σε ρεαλιστικούς χρόνους. Για ένα τέτοιο πρόβλημα, η αναλογική προσομοίωση είναι ανεπαρκής και μη αποδοτική.

Οι μεροληπτικές τεχνικές (biasing techniques) στις προσομοιώσεις Monte Carlo ποικίλουν ανάλογα με το λογισμικό που χρησιμοποιείται, αλλά μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στην πρώτη κατηγορία, η προσέγγιση επικεντρώνεται στον τρόπο που τροποποιείται η πιθανοκρατική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) μιας διεργασίας, προκειμένου να επιτύχουμε διαφορετική δειγματοληψία μέσω της μεθόδου Monte Carlo.
2. Στη δεύτερη κατηγορία, η pdf παραμένει αναλλοίωτη, αλλά επιτρέπεται στα αρχικά σωματίδια να δημιουργήσουν νέα, παρόμοια σωματίδια, τα οποία μπορεί να παρακολουθηθούν ή να αγνοηθούν ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη.

Στη συγκεκριμένη εργασία, εφαρμόζεται η μεροληπτική τεχνική στην ενεργό διατομή της αντίδρασης (cross section biasing technique) που ανήκει στην πρώτη κατηγορία. Η εφαρμογή της τεχνικής στην ενεργό διατομή στοχεύει στην αύξηση των εκπεμπόμενων σωματιδίων και τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου της προσομοίωσης, με απαραίτητη προϋπόθεση να μην υπάρχουν αλλοιώσεις στη στατιστική σε σχέση με την αρχική (αναλογική) προσομοίωση.

2.3 Μεροληπτική Τεχνική στην Ενεργό Διατομή (Cross Section Biasing Technique)

Κατά τη διέλευση ενός σωματιδίου από ένα υλικό, υπάρχει η πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με τους πυρήνες αυτού. Το μήκος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αλληλεπιδράσεις του σωματιδίου με την ύλη ονομάζεται **μέση ελεύθερη διαδρομή** (mean free path) του σωματιδίου, συμβολίζεται με λ και δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \int_0^{\infty} xp(x)dx \quad (2.1)$$

Η συνάρτηση $p(x)$ αποτελεί την πυκνότητα πιθανότητας αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με τους πυρήνες - στόχους του υλικού και δίνεται από την σχέση:

$$p(x) = 1 - e^{-x/\lambda} \quad (2.2)$$

Ενώ η πιθανότητα αλληλεπίδρασης σε ένα διάστημα dx είναι:

$$p(x)dx = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-x/\lambda} dx \quad (2.3)$$

Επιπλέον, η **μακροσκοπική ενεργός διατομή** μιας αντίδρασης είναι το άθροισμα των επιμέρους μακροσκοπικών ενεργών διατομών και συμβολίζεται με Σ :

$$\Sigma = \sum_i \Sigma_i \quad (2.4)$$

ενώ συνδέεται με την μικροσκοπική ενεργό διατομή (σ_i) μέσω της σχέσης:

$$\Sigma = N[nuclei/m^3]\sigma_i[m^2] \quad (2.5)$$

Τέλος, η μακροσκοπική ενεργός διατομή είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέσης ελεύθερης διαδρομής

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} \quad (2.6)$$

και εξαρτάται από τον μαζικό αριθμό του στοιχείου που θα συναντήσει το σωματίδιο που διέρχεται από κάποιο υλικό, καθώς και την αρχική ενέργειά του.

Η μεροληπτική τεχνική στην μακροσκοπική ενεργό διατομή (σχέση (2.5)) έχει ως στόχο την μείωση της μέσης ελεύθερης διαδρομής λ (σχέση (2.6)) του σωματιδίου κατά έναν παράγοντα f_b , που ονομάζεται παράγοντας εξαναγκασμού (biasing factor), έτσι ώστε να αυξηθούν οι αλληλεπιδράσεις του σωματιδίου με την ύλη.

Λόγω της σχέσης (2.6), με την μείωση της μέσης ελεύθερης διαδρομής κατά f_b αυξάνεται η μακροσκοπική ενεργός διατομή κατά τον ίδιο παράγοντα (σχέση (2.7)):

$$\lambda' = \frac{\lambda}{f_b} = \frac{1}{f_b \cdot \Sigma} \quad (2.7)$$

Στο GEANT4, η συγκεκριμένη τεχνική ενεργοποιείται μέσω των κλάσεων `main.cc` και `OptrChangeCrossSection.cc` αφού πρώτα οριστεί ο όγκος - στόχος (μέσω της `DetectorConstruction.cc`) και το είδος των σωματιδίων (μέσω της `PrimaryGeneratorAction.cc`) για τα οποία θα εφαρμοστεί.

2.4 Ευαισθησία του παράγοντα εξαναγκασμού f_b

Υπάρχουν κάποιες παράμετροι οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου παράγοντα εξαναγκασμού: η απώλεια ενέργειας (stopping power) της αρχικής δέσμης (δευτερίων) μέσα στον υπό μελέτη στόχο, η οποία έχει άμεση συσχέτιση με το πάχος του και η ενεργός διατομή της αντίδρασης. Στη

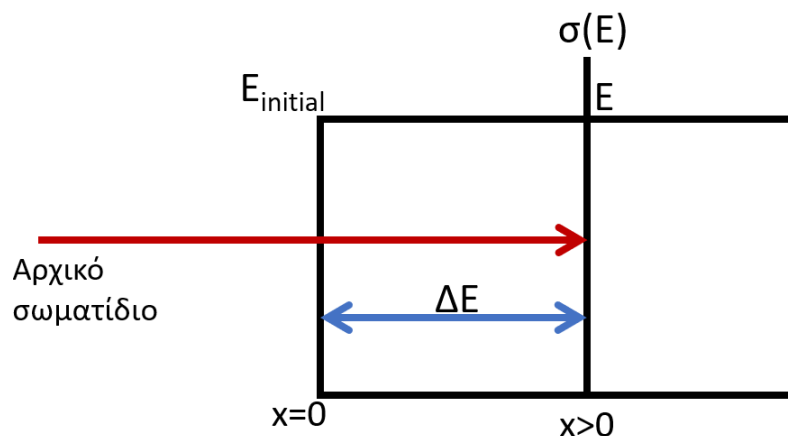
συνέχεια, παρουσιάζονται βασικά στοιχεία του μηχανισμού παραγωγής νετρονίων κατά την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, περιγράφεται και η συσχέτιση αυτού με τις παραπάνω παραμέτρους επιλογής του κατάλληλου παράγοντα εξαναγκασμού, στην περίπτωση εφαρμογής της τεχνικής σε κάποια προσομοίωση.

2.4.1 Μηχανισμός Παραγωγής των Νετρονίων στον Στόχο

Ο μηχανισμός παραγωγής των νετρονίων κατά μήκος ενός στόχου φαίνεται παρακάτω, συγκρίνοντας μία αναλογική περίπτωση (1) με μία εξαναγκασμένη περίπτωση (2):

1. Αναλογική Περίπτωση:

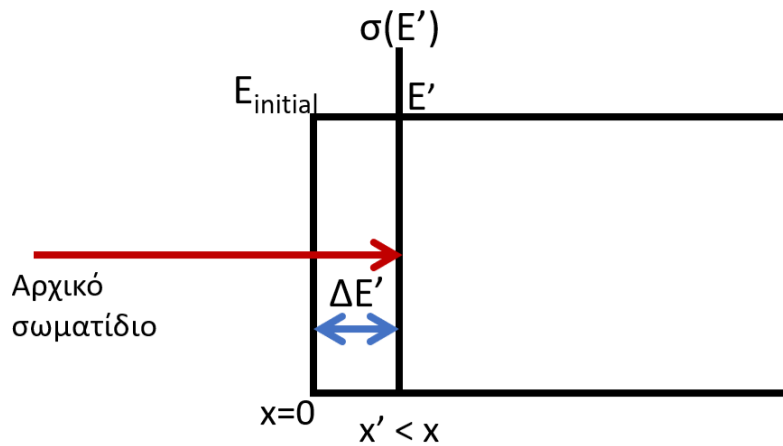
Έστω $E_{initial}$ η αρχική ενέργεια του σωματιδίου προς αλληλεπίδραση και x το βάθος του στόχου στο οποίο θα αλληλεπιδράσει (Εικόνα 2.2). Τότε, λόγω απώλειας ενέργειας μέσα στον στόχο (stopping power), το σωματίδιο χάνει ενέργεια ΔE στο βάθος x και αποκτά τελική ενέργεια $E = E_{initial} - \Delta E$. Το παραγόμενο σωματίδιο (νετρόνιο) θα έχει ενέργεια E_n .



Εικόνα 2.2: Αναλογική περίπτωση με $f_b = 0$. Το τυχαίο σημείο $x > 0$ αναφέρεται στο σημείο αλληλεπίδρασης του αρχικού σωματιδίου με τον στόχο. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης στο σημείο αυτό είναι $\sigma(E)$ και το αρχικό σωματίδιο έχει ενέργεια E .

2. Εξαναγκασμένη Περίπτωση:

Με την μείωση της μέσης ελεύθερης διαδρομής που οφείλεται στην εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής, το αρχικό σωματίδιο αλληλεπιδρά με τον στόχο σε απόσταση $x' < x$ (Εικόνα 2.3) και η απώλεια ενέργειας θα είναι $\Delta E' < \Delta E$. Στη περίπτωση αυτή, η αλληλεπίδραση θα γίνει με ενέργεια $E' = E_{initial} - \Delta E' > E$. Το παραγόμενο σωματίδιο θα έχει και αυτό μεγαλύτερη ενέργεια $E'_n > E_n$. Η ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης θα έχει μεταβληθεί από $\sigma(E)$ σε $\sigma(E')$.



Εικόνα 2.3: Εξαναγκασμένη περίπτωση με $f_b > 0$. Το σωματίδιο έχει διαφορετική πιθανότητα αλληλεπίδρασης με τον στόχο. Η αλληλεπίδραση γίνεται με διαφορετική ενέργεια.

2.4.2 Απώλεια Ενέργειας στον στόχο

Με την αύξηση του παράγοντα f_b , ευνοείται η πραγματοποίηση των αντιδράσεων κοντά στην επιφάνεια του στόχου διότι αυξάνεται η μακροσκοπική ενεργός διατομή. Έτσι, μειώνεται η πιθανότητα μη αλληλεπίδρασης μέσα στο υλικό. Το γεγονός αυτό, μπορεί να επηρεάσει τη κατανομή των δευτερογενώς παραγόμενων σωματιδίων (νετρονίων) μέσα στο στόχο.

Κατά συνέπεια, όσο πιο μικρό είναι το εύρος των διαθέσιμων ενεργειών προς αλληλεπίδραση (ΔE) - το οποίο εξαρτάται άμεσα από την συνολική απώλεια ενέργειας της δέσμης μέσα στον στόχο - τόσο πιο ήπιες θα είναι οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων κατά τις οποίες έχει εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική, από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αναλογική περίπτωση (μη εξαναγκασμένη προσομοίωση). Οι αποκλίσεις αυτές αφορούν την ενεργειακή κατανομή της δέσμης και των δευτερογενών σωματιδίων. Επομένως, όσο πιο λεπτός είναι ένας στόχος, τόσο μικρότερο είναι το εύρος ΔE , άρα μπορεί να μην υπάρχουν σημαντικές αλλοιώσεις στη κατανομή γεγονότων (ενεργειακή ή χωρική) με την αύξηση του παράγοντα f_b .

2.4.3 Ενεργός Διατομή της Αντίδρασης

Η ενεργός διατομή μιας αντίδρασης έχει άμεση εξάρτηση από την ενέργεια, γεγονός που επηρεάζει την ενεργειακή και χωρική κατανομή των δευτερογενών σωματιδίων σε μια αντίδραση. Κατά συνέπεια, όσο πιο απότομη είναι η ενεργός διατομή για κάποιο εύρος ενεργειών, τόσο πιο απότομη θα είναι η μεταβολή της ενεργειακής κατανομής των παραγόμενων νετρονίων, στην περίπτωση εφαρμογής της μεροληπτικής τεχνικής. Επομένως, για αντιδράσεις με ομαλή μεταβολή της ενεργού διατομής στο εύρος ενεργειών ενδιαφέροντος, η ευελιξία ως προς την επιλογή μεγαλύτερης τιμής του παράγοντα εξαναγκασμού γίνεται μεγαλύτερη.

2.4.4 Επιπλέον Παρατηρήσεις

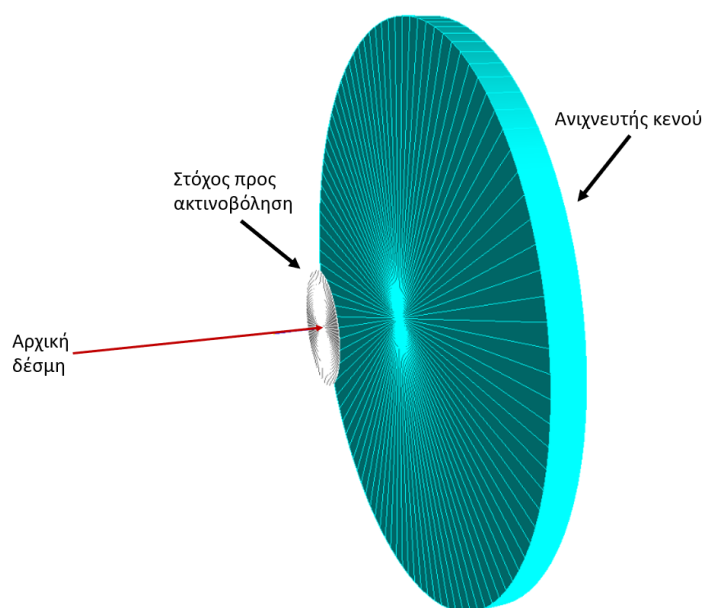
Μία εκτενής ανάλυση της ευαισθησίας του παράγοντα f_b γίνεται στο Κεφάλαιο 3, όπου μελετάται η συμπεριφορά της μεροληπτικής τεχνικής στο ισότοπο του ^{27}Al (αλουμίνιο: βρίσκεται στο περίβλημα της φλάντζας του τρίτου) και στα ισότοπα ενδιαφέροντος της πειραματικής διάταξης (μολυβδαίνιο: Mo, τρίτιο: ^3H και χαλκός: Cu) χρησιμοποιώντας την ως άνω προαπαιτούμενη θεωρία.

3 Συμπεριφορά της Μεροληπτικής Τεχνικής για το κανάλι (d,n)

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η μελέτη της συμπεριφοράς των προσομοιώσεων μετά την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής. Βασικός σκοπός είναι να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων κατά τη χρήση της καθώς και η εκτίμηση των ορίων της. Μελετάται δηλαδή, η συμπεριφορά της ενεργειακής κατανομής των νετρονίων και τα σημεία παραγωγής τους υπό την εφαρμογή μεροληπτικών τεχνικών, και γίνεται σε όλες τις περιπτώσεις σύγκριση με τις αντίστοιχες αναλογικές προσομοιώσεις³. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι στόχοι για ενέργειες αρχικής δέσμης δευτερίων στο εύρος 2 - 3.45 MeV, οι οποίοι αποτελούν και τα στοιχεία που περιέχονται στην πειραματική διάταξη του Δημόκριτου (φλάντζα τρίτιου, ευθυγραμμιστής, οπισθοσκεδαστής, λάδια των αντλιών κενού και τα λοιπά). Αρχικά, σε στόχο ^{27}Al , έπειτα στα ισότοπα του Mo (^{92}Mo , ^{93}Mo , ^{94}Mo κ.τ.λ.) και του Cu (^{63}Cu και ^{65}Cu) και τέλος στον κύριο στόχο του ^3H για τις ενέργειες ενδιαφέροντος αρχικής δέσμης δευτερίων (2.11MeV, 2.9MeV και 3.45MeV). Τέλος, στη τελευταία ενότητα, ελέγχεται και η συμπεριφορά της μεροληπτικής τεχνικής στον φυσικό άνθρακα (στην υψηλή ενέργεια, 3.45 MeV) ο οποίος βρίσκεται σε μικρή ποσότητα στα λάδια των αντλιών κενού, στην επιταχυντική γραμμή, στους ευθυγραμμιστές και στην φλάντζα.

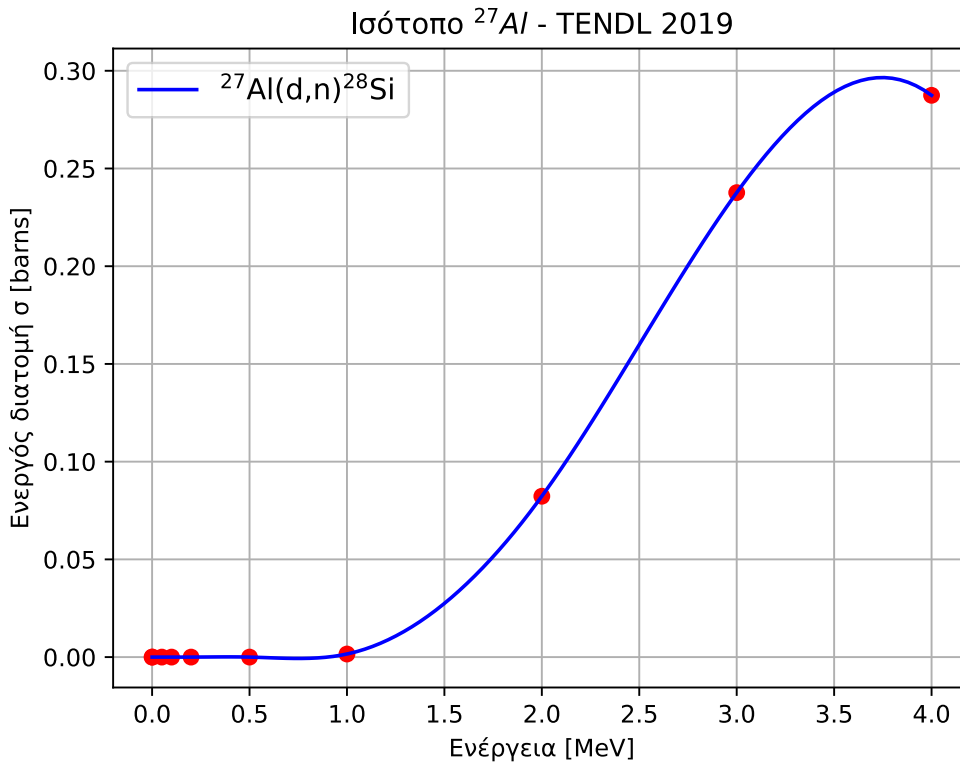
3.1 Αξιολόγηση της Μεροληπτικής Τεχνικής στο ^{27}Al

Μελετάται η αντίδραση $^{27}\text{Al}(d,n)^{28}\text{Si}$ σε παχύ στόχο και σε λεπτό στόχο για ενέργειες αρχικής δέσμης δευτερίων $E_d = 2\text{MeV}$ και 3.45MeV , χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία ανιχνευτή - στόχου, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1:



³Στις αναλογικές προσομοιώσεις δεν εφαρμόζεται η μεροληπτική τεχνική.

Στην περίπτωση της προσομοίωσης με χρήση του παχέος στόχου, οι διαστάσεις επιλέχθηκαν έτσι ώστε τα δευτέρια να εναποθέτουν όλη τους την ενέργεια μέσα σε αυτόν. Στην δεύτερη περίπτωση χρήσης λεπτού στόχου αλουμινίου, το πάχος είναι τόσο ώστε να χάνουν τα δευτέρια περίπου 100keV κατά τη διέλευσή τους από αυτόν. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης εμφανίζεται παρακάτω στην Εικόνα 3.1.

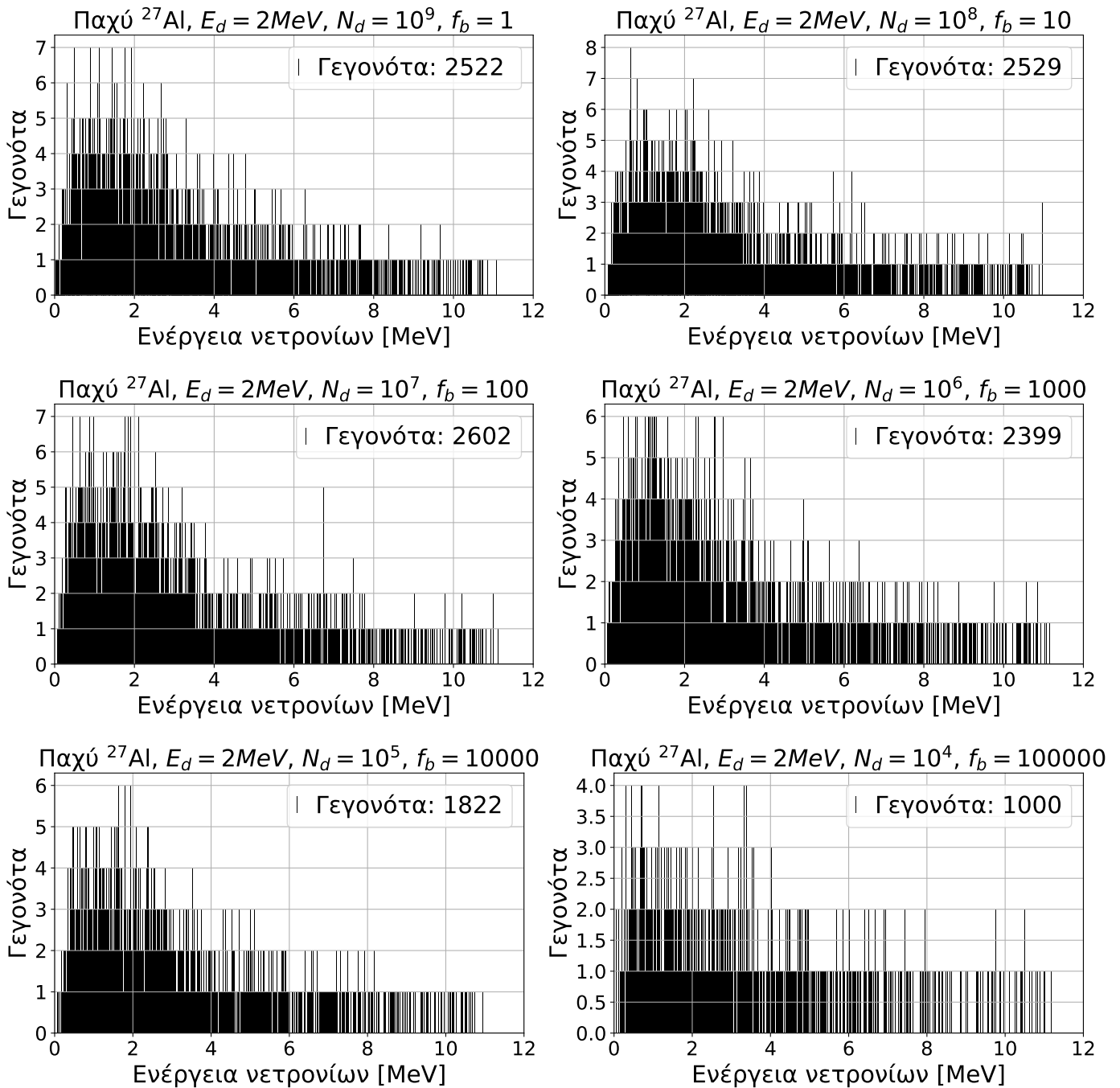


Εικόνα 3.1: Ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στο αλουμίνιο. Εμφανίζεται μεταβολή της ενεργού διατομής στο διάστημα 1.0MeV - 3.45MeV. Δεδομένα της TENDL 2019.

3.1.1 Παχύς στόχος ^{27}Al

- Για ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2MeV:

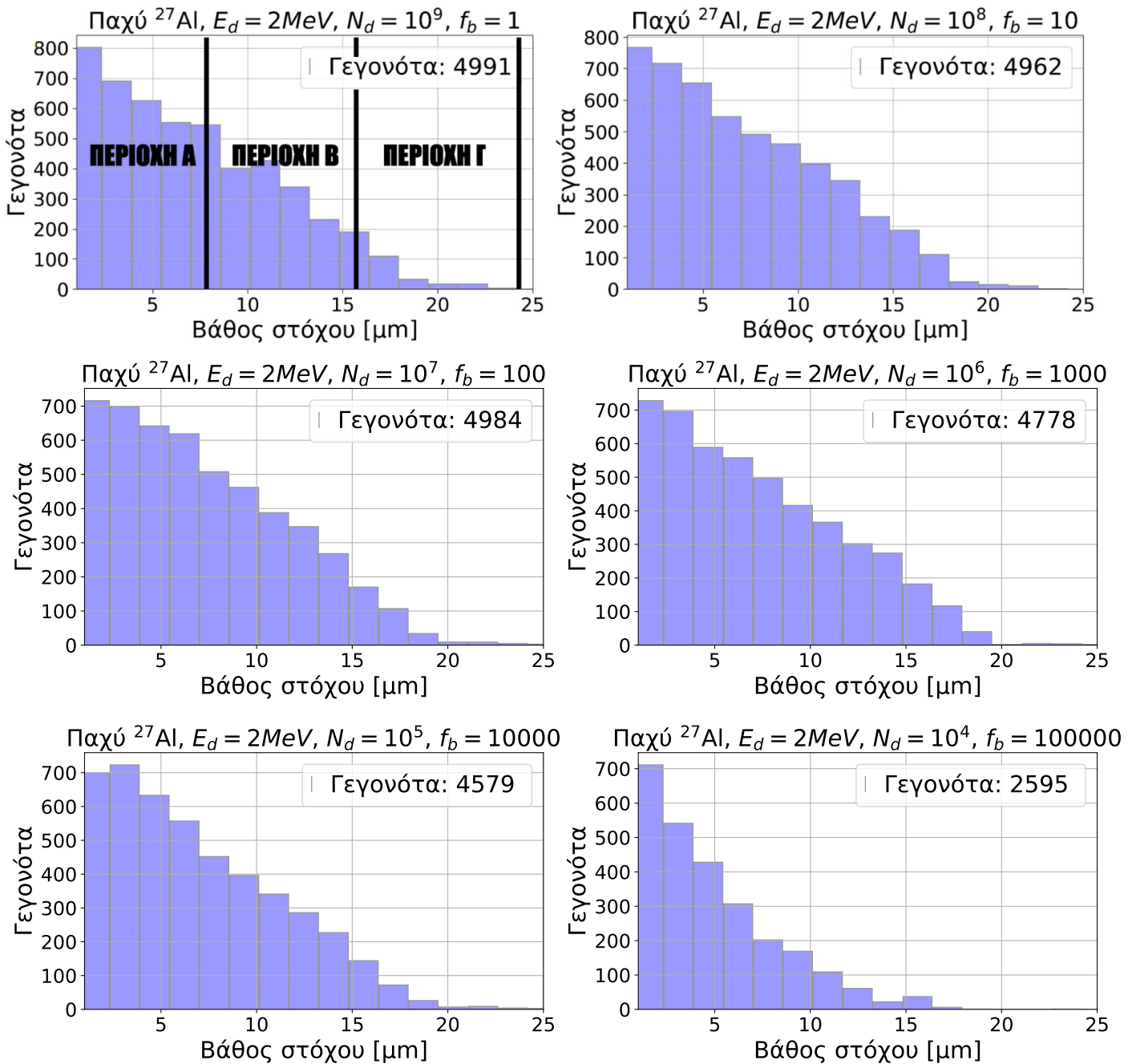
Στην παρακάτω Εικόνα 3.2, φαίνεται η ενεργειακή κατανομή των νετρονίων που εισέρχονται στο παράθυρο του ανιχνευτή, για κάθε περίπτωση με $f_b > 1$ και αρχική ενέργεια δέσμης δευτερίων ίση με 2MeV, και συγκρίνεται με την αναλογική περίπτωση (πρώτο ιστόγραμμα). Σε κάθε ιστόγραμμα, το γινόμενο $N_d \cdot f_b$ (N_d : αριθμός αρχικών δευτερίων) παραμένει σταθερό έτσι ώστε τα γεγονότα να είναι κανονικοποιημένα στην αναλογική περίπτωση για να γίνει ευκολότερη η σύγκριση.



Εικόνα 3.2: Παχύς στόχος αλουμινίου με αρχική ενέργεια δευτερίων 2MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Το ενεργειακό εύρος των δευτερίων εντός του στόχου είναι $\Delta E = 2\text{MeV}$ και η ενεργός διατομή δεν παρουσιάζει απότομες μεταβολές εντός αυτού. Όπως παρατηρείται, ήδη από την τιμή 1000, αλλά και πιο έντονα για $f_b = 10000$ και 100000, η μορφή της ενεργειακής κατανομής έχει αλλοιωθεί σε σχέση με την αναλογική περίπτωση. Επιπλέον, από τον αριθμό των συνολικά καταγραφόμενων νετρονίων για κάθε περίπτωση, είναι εμφανής η απόκλιση από την αναλογικότητα αυτών ως συνάρτηση της αύξησης της τιμής του μεροληπτικού παράγοντα.

Για την καλύτερη επιλογή του παράγοντα μεροληπτικής τεχνικής, κρίνεται απαραίτητη και η εξέταση των σημείων παραγωγής των νετρονίων μέσα στον στόχο:



Εικόνα 3.3: Παχύς στόχος αλουμινίου με αρχική ενέργεια δευτερίων 2MeV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων κατά μήκος του στόχου των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Με την αύξηση του παράγοντα f_b , η παραγωγή νετρονίων σε όλο και μικρότερα βάθη γίνεται εντονότερη. Αυτό οφείλεται στο μηχανισμό παραγωγής των νετρονίων μέσα στον στόχο υπό την εφαρμογή μεροληπτικών τεχνικών (Κεφάλαιο 2.4.3). Η αλλοίωση των αποτελεσμάτων ως συνέπεια της μείωσης της μέσης ελεύθερης διδρομής είναι έντονα εμφανής στα παραπάνω ιστογράμματα - ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις

τώσεις χρήσης μεγάλης τιμής του μεροληπτικού παράγοντα. Η μελέτη αυτών των ιστογραμμάτων μπορεί εύκολα να υποδείξει και τους περιορισμούς της εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής ανά περίπτωση μελέτης.

Για την καλύτερη ποσοτικοποίηση των διαφορών που προκύπτουν, έχει υπολογιστεί ο αριθμός των γεγονότων κάθε ιστογράμματος σε τρεις περιοχές A, B και Γ, όπου οι περιοχές αυτές προκύπτουν από τον διαχωρισμό του εκάστοτε ιστογράμματος σε τρία ίσα μέρη⁴ ως προς τον αριθμό των συνολικών κελιών. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το ολοκλήρωμα των γεγονότων της κάθε περιοχής και βρέθηκε ο λόγος του ολοκληρώματος της περιοχής A ως προς τα ολοκλήρωματα των άλλων δύο (B και Γ) για κάθε ιστόγραμμα (στην Εικόνα 3.5 φαίνεται πως έχει γίνει ο χωρισμός του ιστογράμματος σε όλες τις περιπτώσεις). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1:

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	2.00	17.58
$f_b = 10$	1.96	19.61
$f_b = 100$	1.95	19.05
$f_b = 1000$	1.99	18.05
$f_b = 10000$	2.20	25.32
$f_b = 100000$	5.50	273.63

Πίνακας 3.1: Το ιστόγραμμα έχει χωριστεί σε τρία ίσα μέρη A, B και Γ. Φαίνονται οι λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε f_b .

Στον παρακάτω Πίνακα 3.2, παρουσιάζεται η τιμή των ολοκληρωμάτων του Πίνακα 3.1 που αντιστοιχεί στην αναλογική προσομοίωση αφού διαιρεθεί με την αντίστοιχη τιμή της εκάστοτε εξαναγκασμένης περίπτωσης για διαφορετική τιμή του παράγοντα μεροληπτικής τεχνικής.

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν, είναι ευδιάκριτες οι αποκλίσεις από την αναλογική περίπτωση για τις περιπτώσεις χρήσης των biasing factors 10000 και 100000 (αποκλίσεις έως και περίπου 100%) για την προσομοίωση παχέος στόχου αλουμινίου με αρχική ενέργεια δευτερίων 2MeV.

⁴Η ίδια μεθοδολογία εφαρμόζεται αντίστοιχα για όλες τις περιπτώσεις στη συνέχεια της μελέτης αυτής.

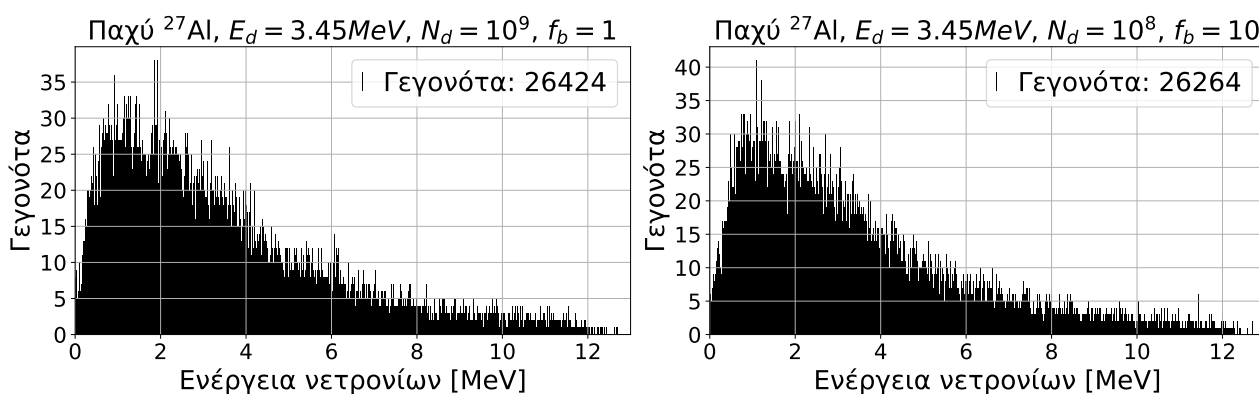
	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	1.03	0.90
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	1.04	0.92
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	1.02	0.97
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.92	0.69
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100000}$	0.37	0.06

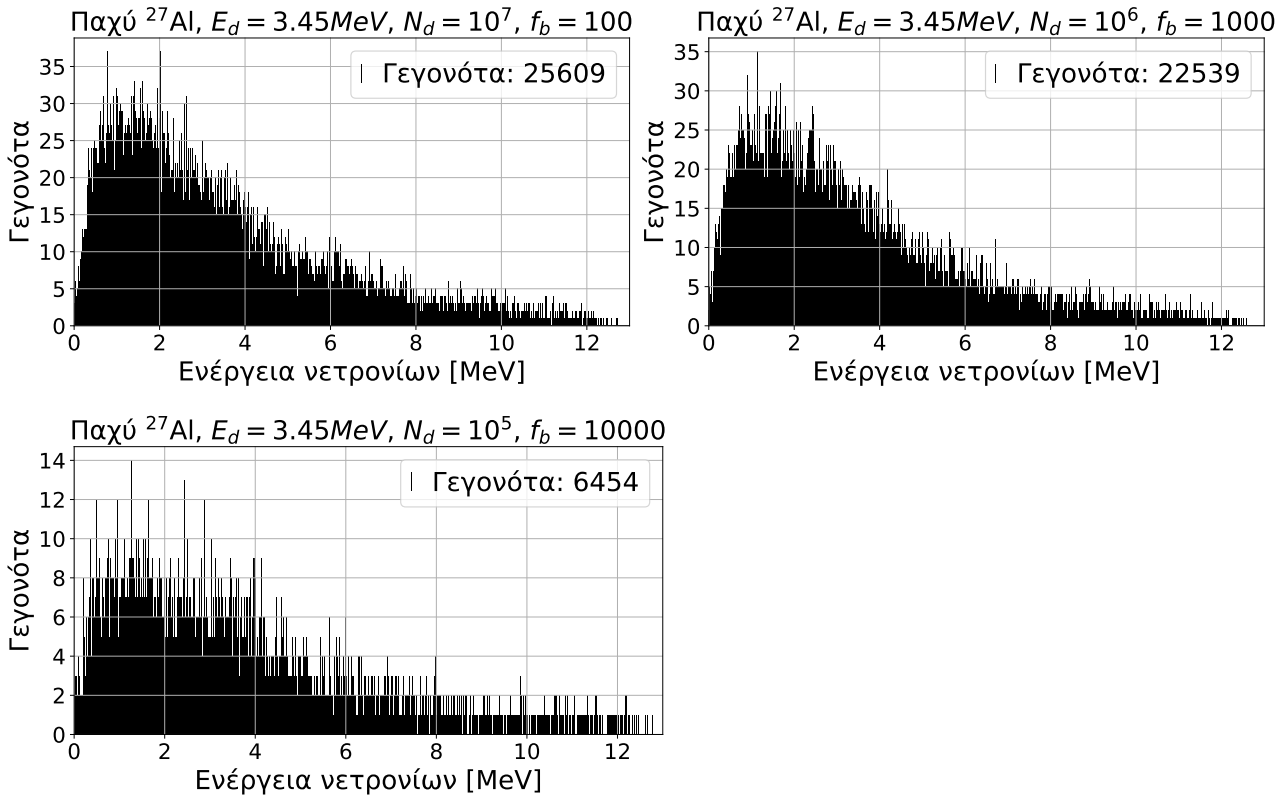
Πίνακας 3.2: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για $f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$.

- Για ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 3.45MeV:

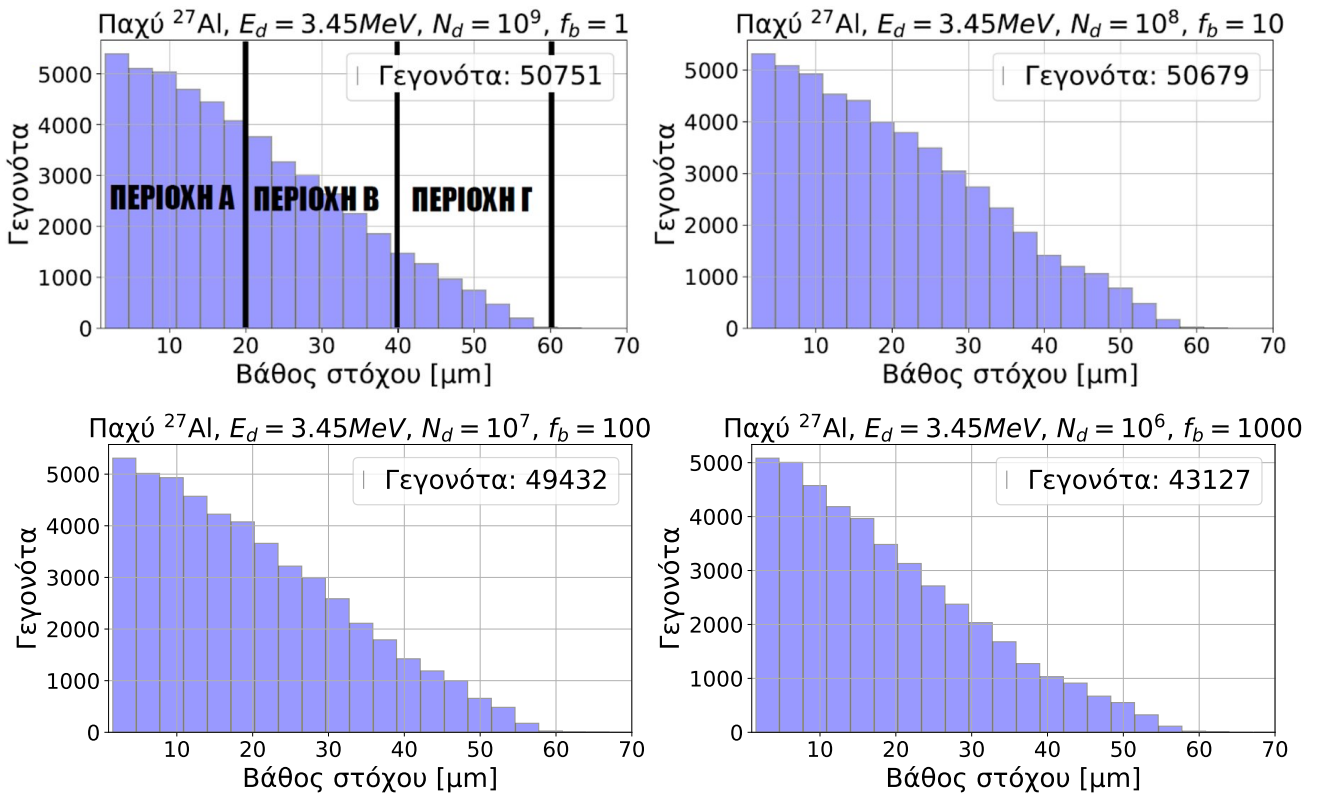
Το εύρος των διαθέσιμων ενεργειών των δευτερίων προς αλληλεπίδραση είναι μεγαλύτερο ($\Delta E = 3.45\text{MeV}$) σε σχέση με την περίπτωση των 2MeV. Μέσα σε αυτό το εύρος, η ενεργός διατομή στο αλουμίνιο παρουσιάζει απότομη μείωση. Αναμένεται να υπάρχει επομένως μικρότερη ευελιξία στην επιλογή του κατάλληλου παράγοντα f_b σε σχέση με την περίπτωση παχέος στόχου Al για τα 2MeV.

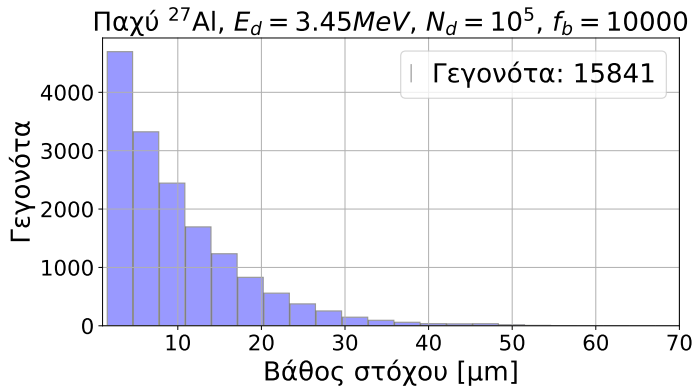
Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με πριν, για την αναλογική περίπτωση και για τη χρήση των biasing factors 10, 100, 1000 και 10000, παρατίθενται τα ιστογράμματα των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων (Εικόνα 3.4), τα ιστογράμματα παραγωγής των νετρονίων στον στόχο (Εικόνα 3.4), ο πίνακας (Πίνακας 3.3) με τους λόγους A/B και A/Γ των τριών περιοχών A, B και Γ και η σύγκριση των λόγων αυτών με την αναλογική περίπτωση (Πίνακας 3.4):





Εικόνα 3.4: Παχύς στόχος αλουμινίου για αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).





Εικόνα 3.5: Παχύς στόχος αλουμινίου για αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV . Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.70	5.46
$f_b = 10$	1.63	5.43
$f_b = 100$	1.71	5.57
$f_b = 1000$	1.98	7.12
$f_b = 10000$	9.48	107.65

Πίνακας 3.3: Το ιστόγραμμα έχει χωριστεί σε τρία ίσα μέρη A, B και Γ. Φαίνονται οι λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε f_b .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{\text{Analog}(f_b=1)}{f_b=10}$	1.05	1.00
$\frac{\text{Analog}(f_b=1)}{f_b=100}$	1.00	0.98
$\frac{\text{Analog}(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.86	0.77
$\frac{\text{Analog}(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.18	0.050

Πίνακας 3.4: 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 $f_b = 10, 100, 1000, 10000$.

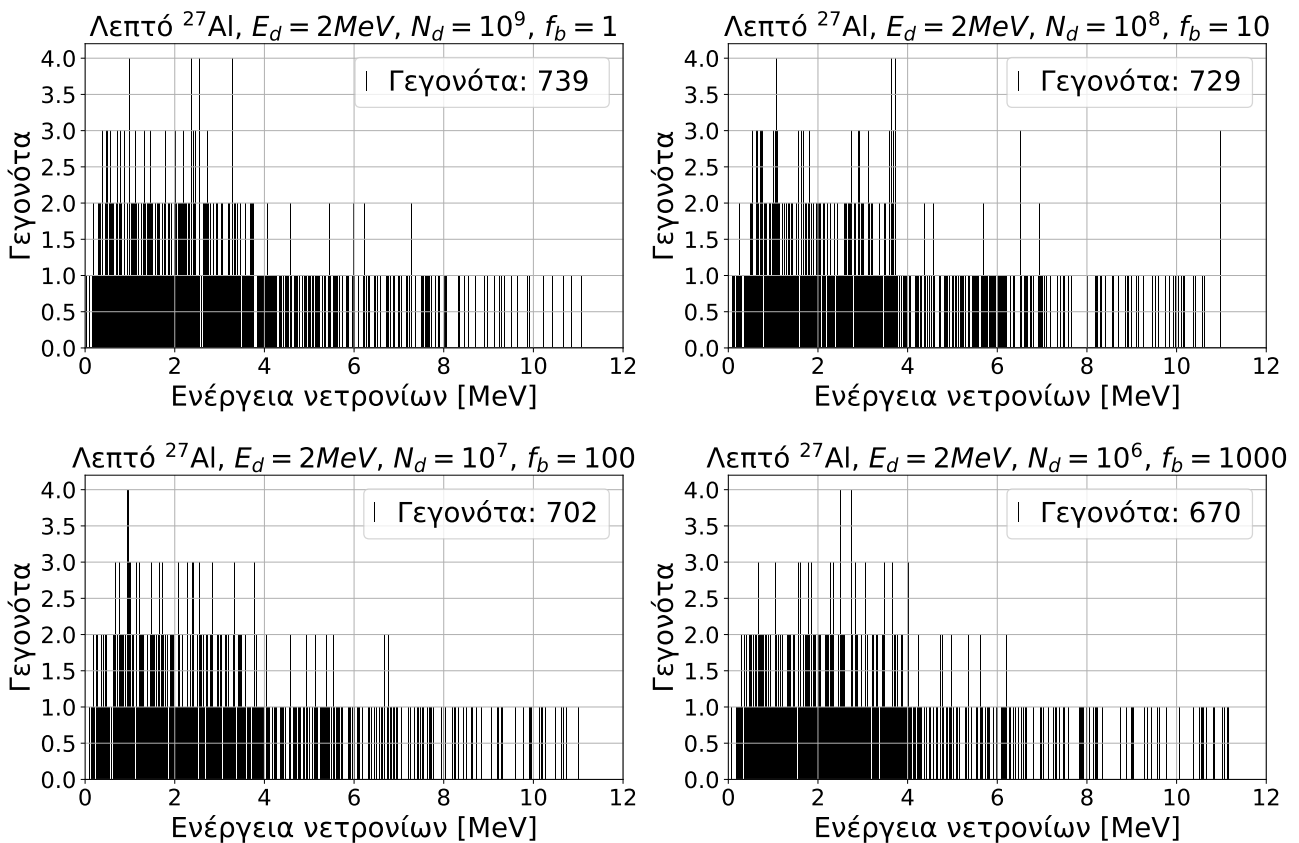
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φαίνεται πως για $f_b = 100$ δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην μορφή της ενεργειακής κατανομής των νετρονίων και στην κατανομή των σημείων παραγωγής τους σε σχέση με την αναλογική περίπτωση.

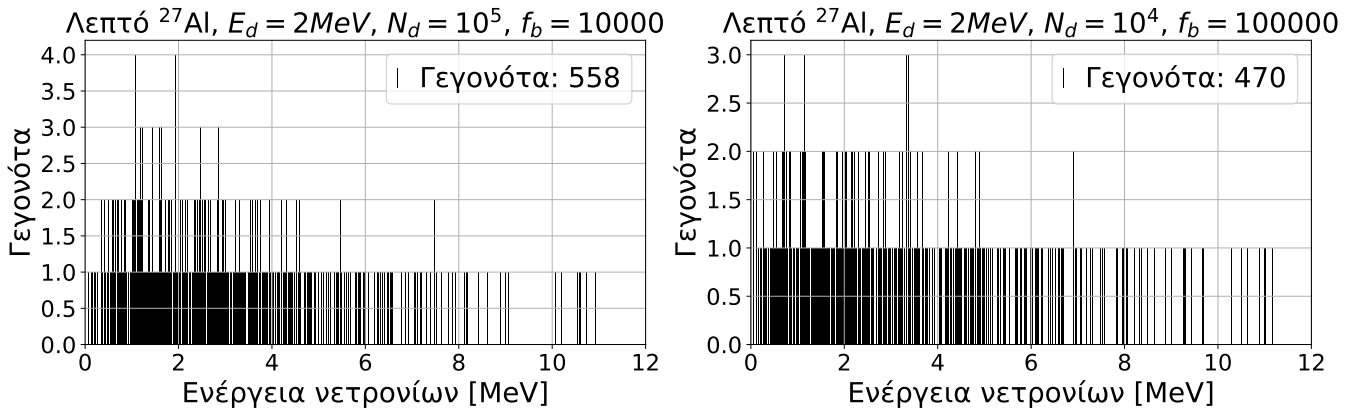
Τέλος, για $f_b = 1000$ και για $f_b = 10000$ υπάρχει σημαντική αλλοίωση στις τιμές που αφορούν τη στατιστική των γεγονότων (15841 έναντι 50751 της αναλογικής περίπτωσης), αλλά και στις κατανομές των σημείων παραγωγής των νετρονίων. Το γεγονός αυτό επαληθεύει τους αναμενόμενους περιορισμούς ως προς την εφαρμογή μεγαλύτερων τιμών f_b όταν το διαθέσιμο ενεργειακό εύρος της δέσμης αυξηθεί για έναν στόχο.

3.1.2 Λεπτός στόχος ^{27}Al

- Για ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2MeV :

Στον λεπτό στόχο αλουμινίου πάχους $3\mu\text{m}$ για $E_d = 2\text{MeV}$, το διαθέσιμο εύρος ενεργειών μέσα στο στόχο είναι $\Delta E = 100\text{keV}$. Αυτό σημαίνει ότι οι ενέργειες των δευτερίων που αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες του στόχου κυμαίνονται από 1.9MeV ως 2MeV . Η ενεργός διατομή σε αυτό το εύρος είναι αμετάβλητη και αυτό επιτρέπει την επιλογή μεγαλύτερου παράγοντα f_b , όπως θα δειχτεί παρακάτω.

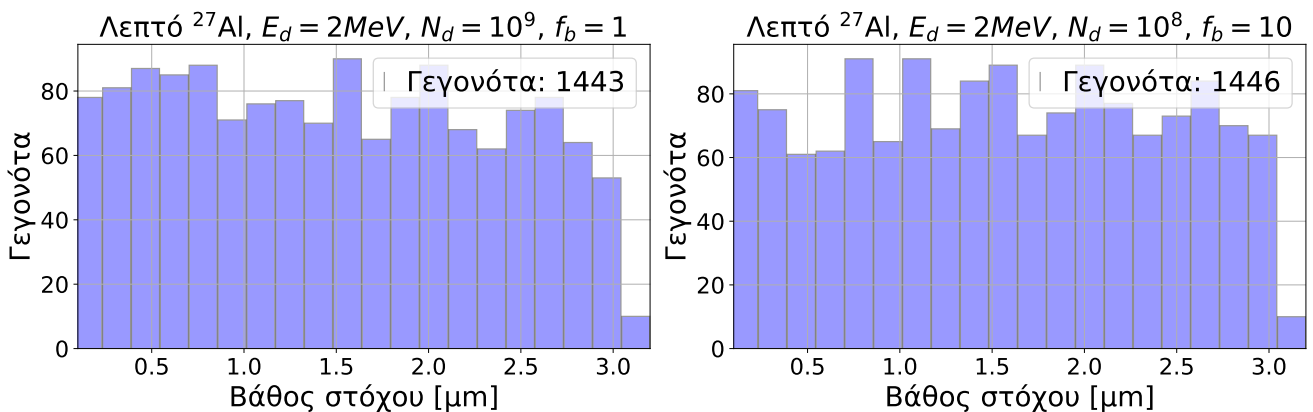


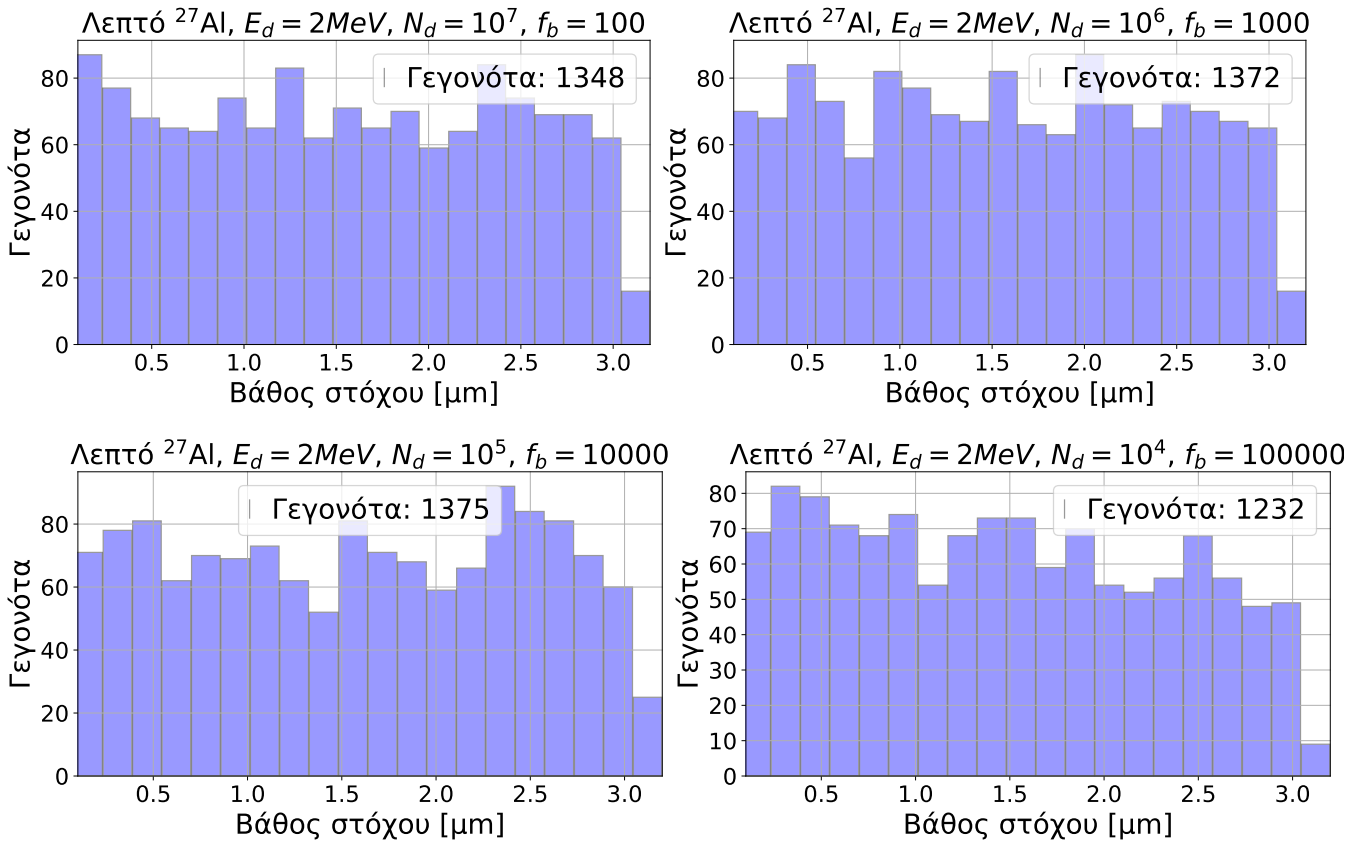


Εικόνα 3.6: Λεπτός στόχος αλουμινίου με αρχική ενέργεια δευτερίων 2MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3.6, η αναλογικότητα των γεγονότων διατηρείται σε μεγάλο βαθμό ακόμα και για $f_b = 10000$ ή για $f_b = 100000$. Σε σύγκριση με τον παχύ στόχο αλουμινίου, παρατηρείται ότι ο ρυθμός αύξησης του σφάλματος απομάκρυνσης από την αναλογική περίπτωση με την αύξηση του παράγοντα f_b είναι μικρότερος.

Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου παράγοντα εξαναγκασμού δεν μπορεί να γίνει με μόνο κριτήριο την ενεργειακή κατανομή των νετρονίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή. Χρειάζονται επιπλέον και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων στον στόχο, αλλά και το ενεργειακό προφίλ της δέσμης των δευτερίων καθώς αυτά εξέρχονται από τον στόχο:





Εικόνα 3.7: Λεπτός στόχος αλουμινίου με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV . Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Τα γεγονότα των παραγόμενων νετρονίων ως συνάρτηση του βάθους δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές ανά κελί λόγω του μικρού εύρους ενεργειών δευτερίων προς αλληλεπίδραση με τον στόχο, και η ενεργός διατομή παραμένει πρακτικά σταθερή στο εύρος αυτό. Τέλος, με την αύξηση του παράγοντα της μεροληπτικής τεχνικής δεν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις από την αναλογική περίπτωση.

Παρακάτω παρατίθενται και οι αντίστοιχοι πίνακες που δίνουν τους λόγους A/B και A/Γ των ολοκληρωμάτων των περιοχών A, B και Γ, που χωρίζουν τα ιστογράμματα σε τρία ίσα μέρη (Πίνακας 3.5), για κάθε f_b , και η σύγκρισή τους με την αναλογική περίπτωση (Πίνακας 3.6):

Για κάθε επιλογή του $f_b = 10$ ως 100000 , η κατανομή των παραγόμενων νετρονίων του στόχου δεν παρουσιάζει έντονες μεταβολές. Ωστόσο, με κριτήριο την ενεργειακή κατανομή τους (Εικόνα 3.6), υπάρχει αισθητή απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση σε σύγκριση με τα σφάλματα απομάκρυνσης για τα σημεία παραγωγής τους.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς που επιφέρει η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής στην προσομοίωση και για την καλύτερη επιλογή του f_b πρέπει να ελεγχθεί και η ενεργειακή κατανομή των εξερχόμενων δευτερίων από τον

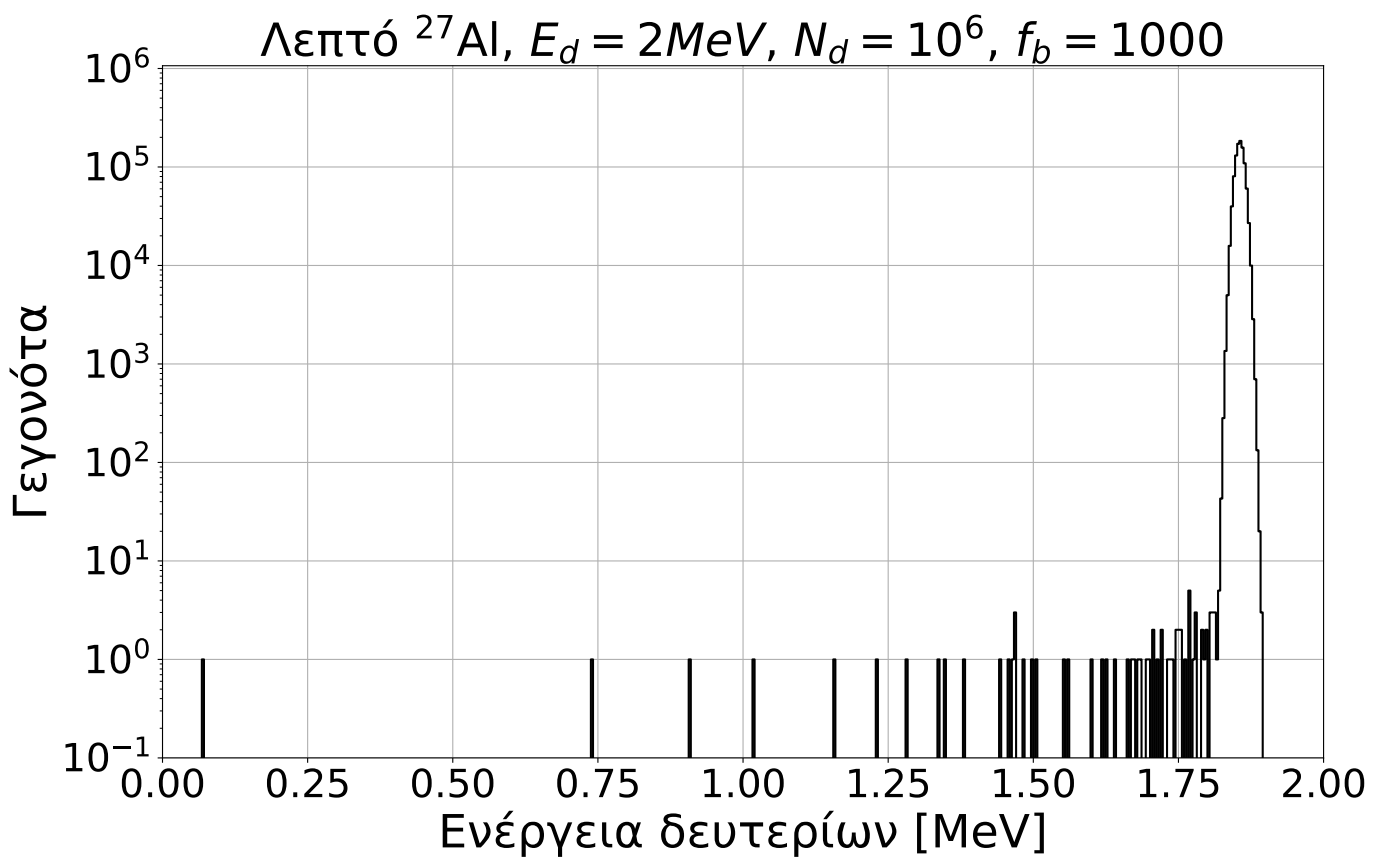
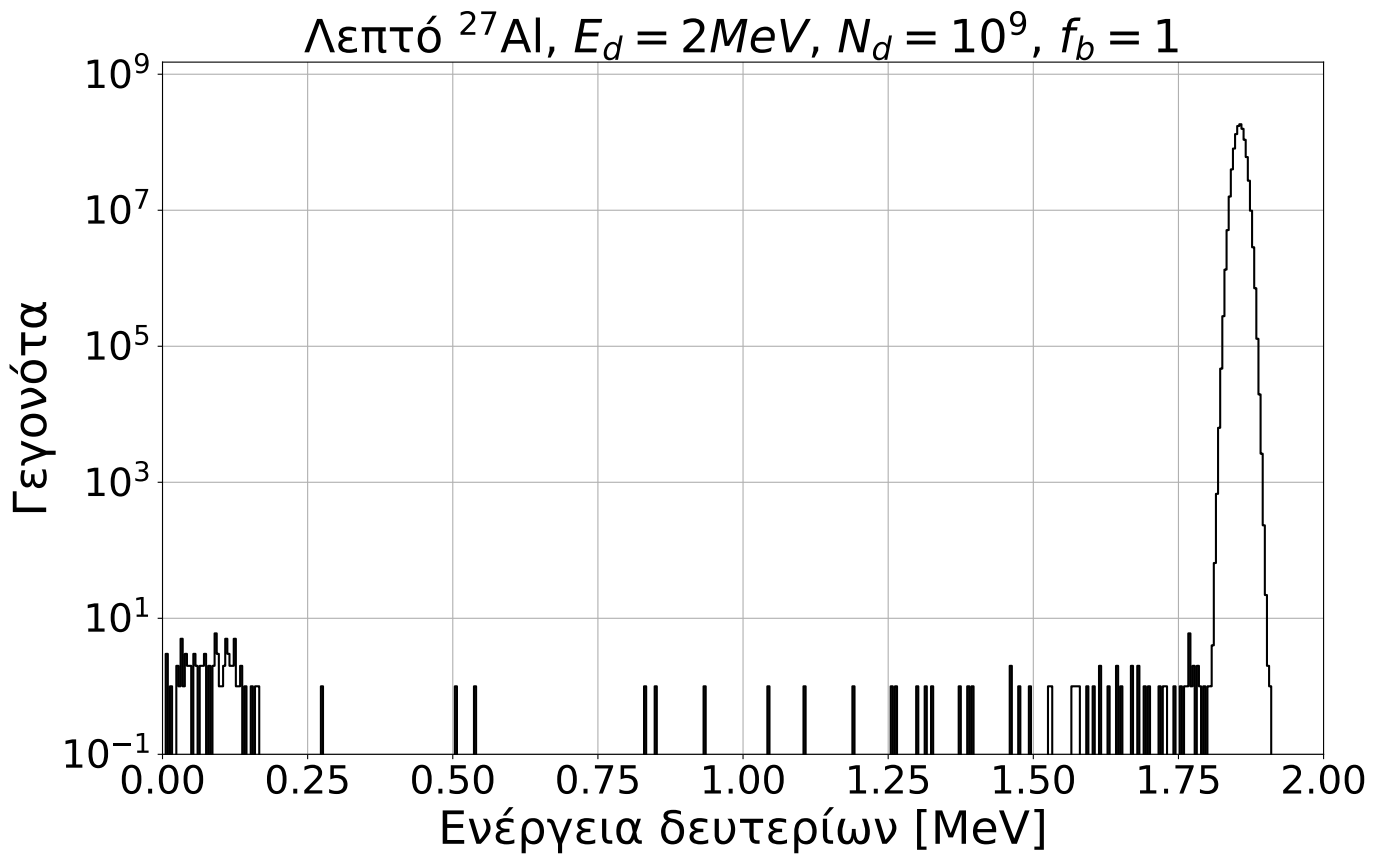
	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.05	1.21
$f_b = 10$	0.94	0.98
$f_b = 100$	1.01	1.00
$f_b = 1000$	1.02	1.01
$f_b = 10000$	1.13	0.95
$f_b = 100000$	1.10	1.30

Πίνακας 3.5: Το ιστόγραμμα έχει χωριστεί σε τρία ίσα μέρη A,B και Γ. Φαίνονται οι λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε f_b .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	1.12	1.23
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	1.03	1.21
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	1.03	1.19
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.93	1.30
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100000}$	0.96	0.93

Πίνακας 3.6: 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 $f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$.

στόχο. Πιο συγκεκριμένα, στον ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε, έγινε η καταγραφή των δευτερίων που διαπερνούν τον στόχο και εισέρχονται σε αυτόν. Ειδικότερα, (Εικόνα 3.8 και 3.9), συγκρίνεται η αναλογική περίπτωση ($N_d = 10^9$ και $f_b = 1$) με την εξαναγκασμένη περίπτωση με $N_d = 10^6$ και $f_b = 1000$:



Εικόνες 3.8 και 3.9: Ροή δευτερίων στον ανιχνευτή για λεπτό στόχο αλουμινίου ($f_b = 1$ και $f_b = 1000$) με αρχική δέσμη δευτερίων 2MeV. Η απώλεια ενέργειας στο στόχο είναι 100keV.

Για να γίνει πιο ευδιάκριτη η ομοιότητα (ή η διαφορά) μεταξύ των δύο περιπτώσεων, κανονικοποιήθηκε η περίπτωση του φάσματος των $N_d = 10^9$ δευτερίων στη περίπτωση με $N_d = 10^6$ δευτερίων και υπολογίστηκε ο λόγος της κύριας κορυφής των δευτερίων (1.8 - 1.9MeV) προς τον λόγο των υπολοίπων (0 - 1.8MeV). Ο λόγος αυτός στην εξαναγκασμένη περίπτωση (biased) με $f_b = 1000$ είναι 2 φορές μεγαλύτερος σε σύγκριση με την αναλογική προσομοίωση (unbiased):

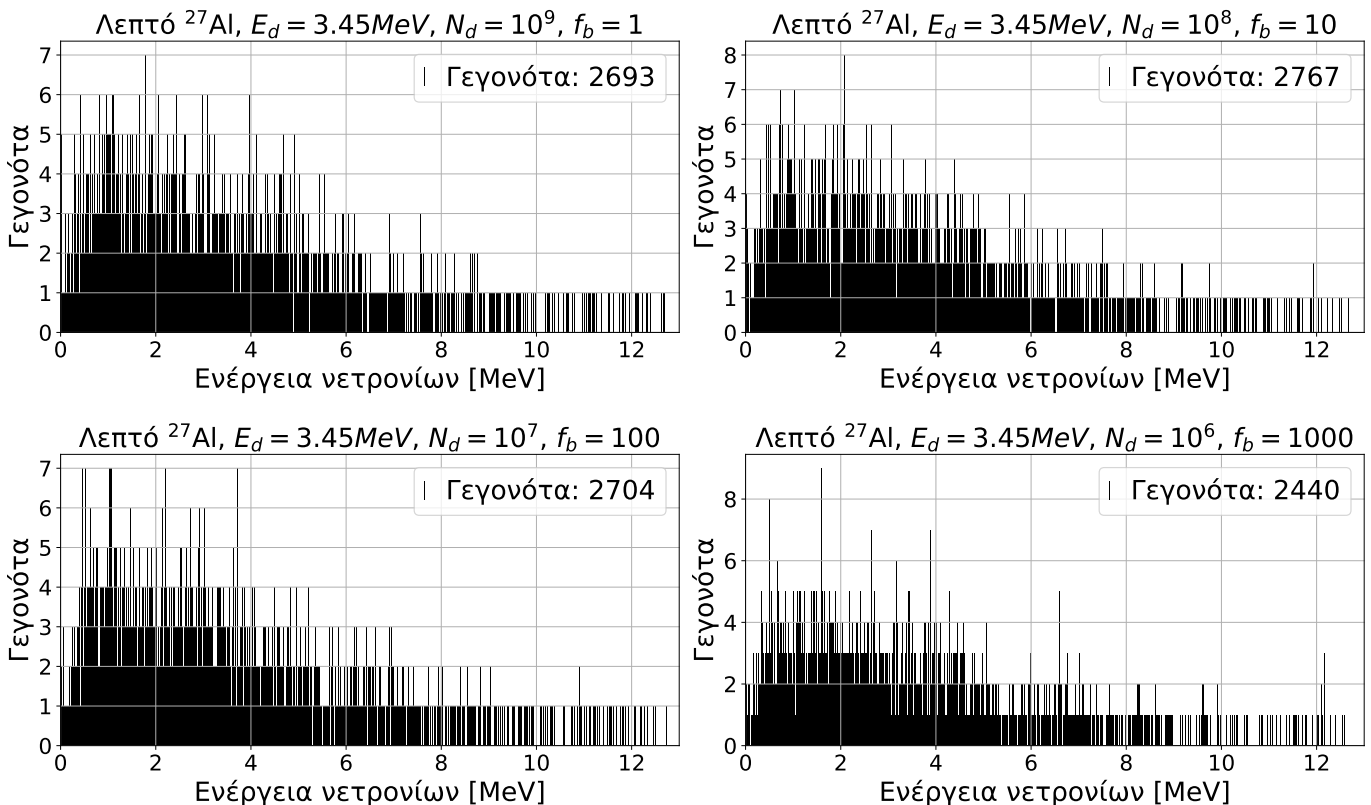
$$R_{unbiased} = 7.4 \cdot 10^6$$

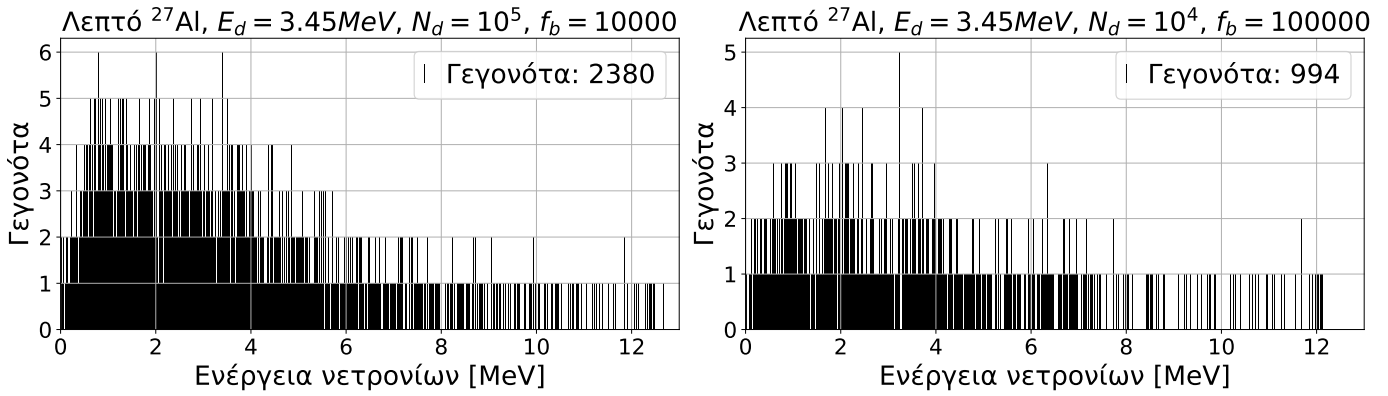
$$R_{biased} = 16.3 \cdot 10^6$$

Συνοψίζοντας, η τιμή $f_b = 1000$ του παράγοντα εξαναγκασμού κρίνεται τελικά ως μη επιτρεπτή.

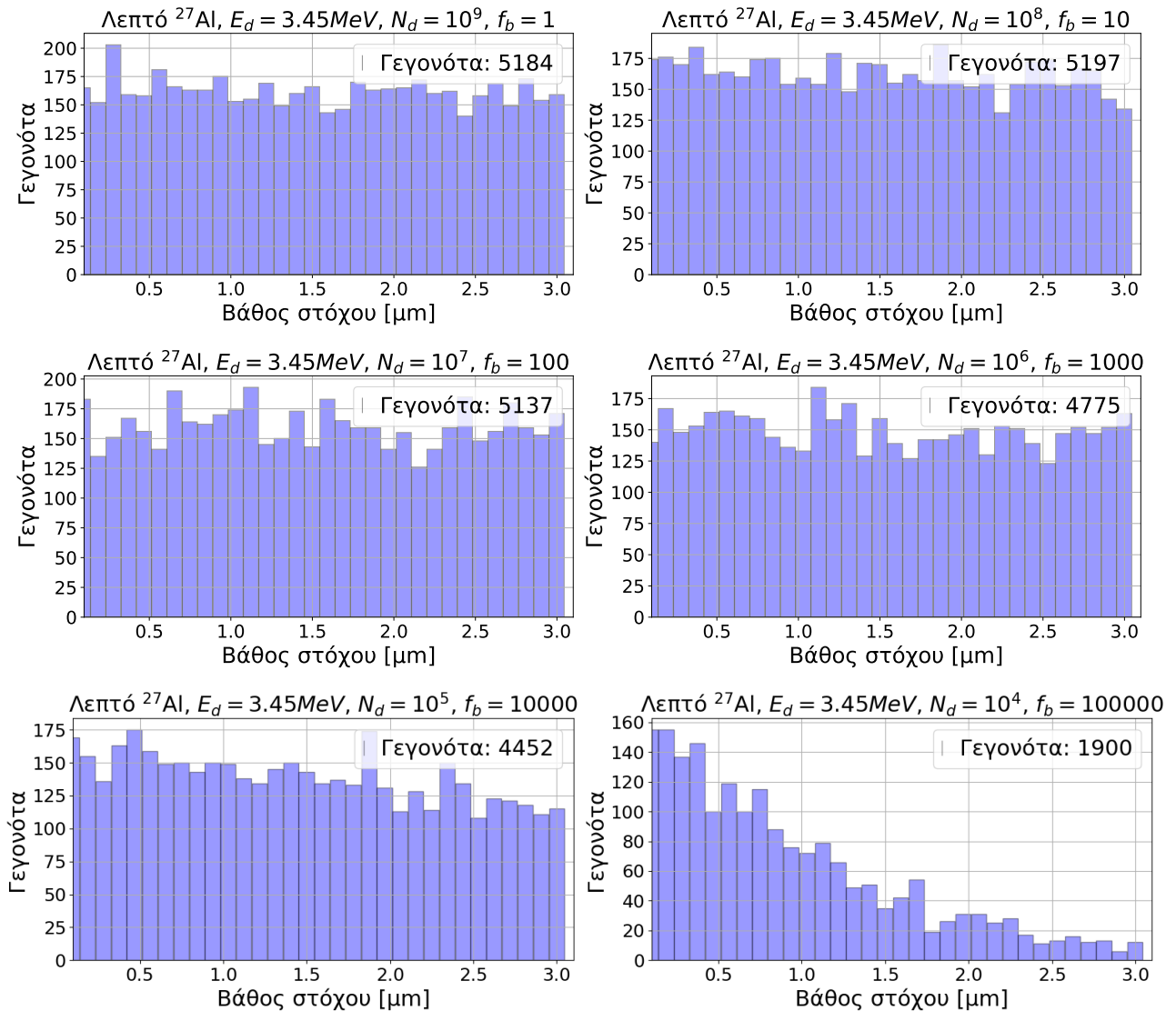
- Για ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 3.45MeV:

Έχοντας μελετηθεί η συμπεριφορά της μεροληπτικής τεχνικής σε λεπτό στόχο αλουμινίου πάχους 3μm για την ενέργεια $E_d = 2\text{MeV}$, το επόμενο βήμα είναι να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της τεχνικής σε στόχο αλουμινίου ίδιου πάχους, αλλά για αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45 MeV. Παρακάτω (Εικόνα 3.10) φαίνεται το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων, έπειτα τα σημεία παραγωγής των νετρονίων μέσα στον στόχο (Εικόνα 3.11) και τέλος οι Πίνακες 3.7 και 3.8 που δίνουν τους λόγους μεταξύ των λόγων των γεγονότων των τριών περιοχών που χωρίστηκαν τα αντίστοιχα ιστογράμματα:





Εικόνα 3.10: Λεπτός στόχος αλουμινίου πάχους $3\mu\text{m}$ με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV . Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).



Εικόνα 3.11: Λεπτός στόχος αλουμινίου πάχους $3\mu\text{m}$ με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV . Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.07	0.88
$f_b = 10$	1.03	0.91
$f_b = 100$	0.98	0.86
$f_b = 1000$	1.11	0.93
$f_b = 10000$	1.08	1.06
$f_b = 100000$	2.42	5.54

Πίνακας 3.7: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε f_b .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	1.04	0.96
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	1.09	1.01
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.96	0.93
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.99	0.83
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100000}$	0.44	0.15

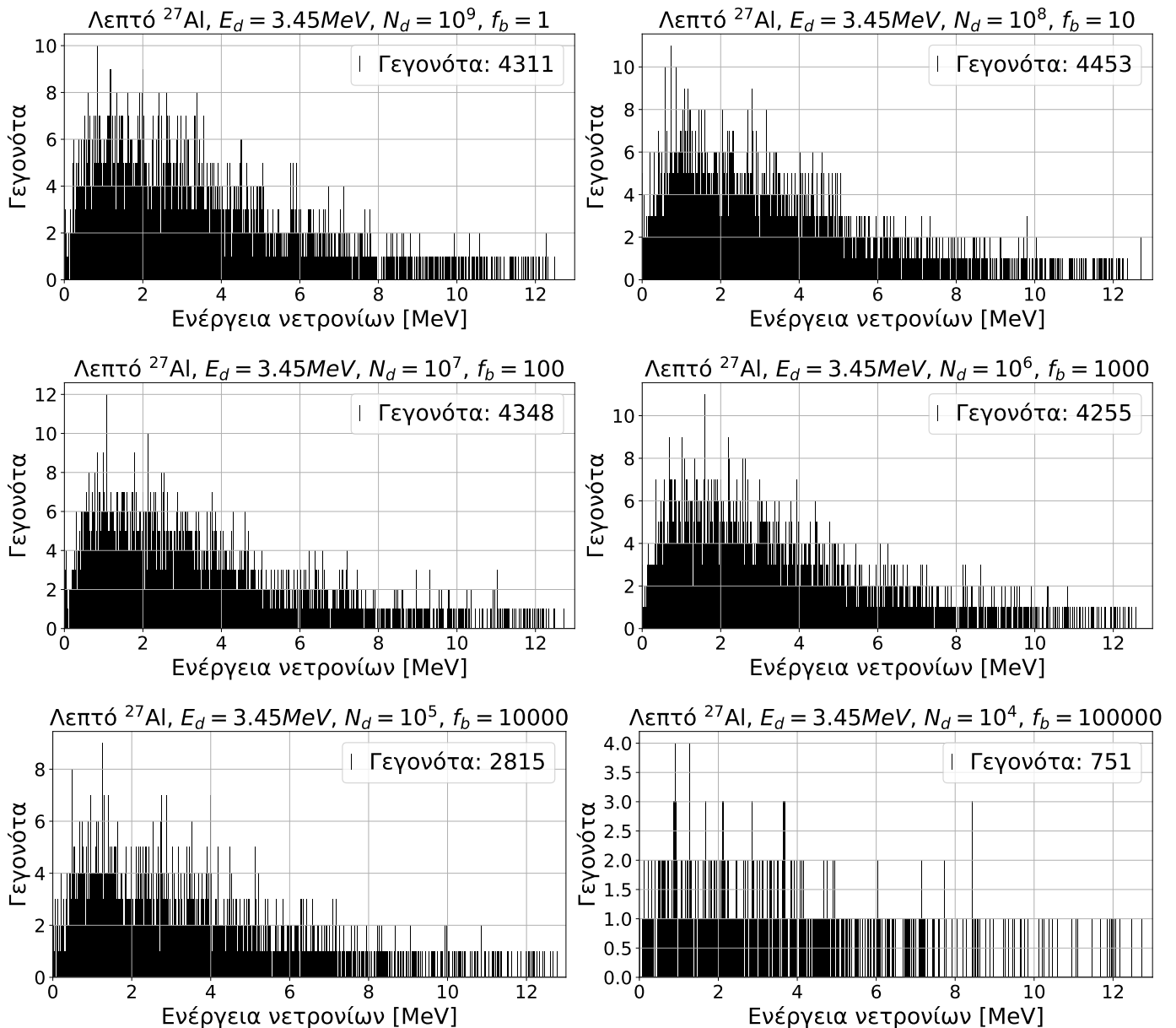
Πίνακας 3.8: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για $f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$.

Θεωρητικά, αναμένεται σε μεγαλύτερες ενέργειες το ενεργειακό εύρος των διαθέσιμων ενεργειών προς αλληλεπίδραση με τον στόχο να είναι μικρότερο λόγω μικρότερης απώλειας ενέργειας της δέσμης μέσα στην ύλη (μικρότερο stopping power). Ωστόσο, συγκρίνοντας τις περιπτώσεις των 2MeV δευτερίων και 3.45MeV δευτερίων για το ίδιο πάχος δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές ως προς την απώλεια ενέργειας στο στόχο. Ενδεικτικά, στην χαμηλή ενέργεια, η απώλεια ενέργειας είναι 93keV, ενώ στην μεγάλη ενέργεια είναι 100keV έχοντας διατηρήσει το ίδιο πάχος (3 μ m).

Ειδικότερα, συγκρίνοντας την παραπάνω περίπτωση (με $E_d = 3.45\text{MeV}$) με την περίπτωση όπου $E_d = 2\text{MeV}$ και με ίδιο πάχος στόχου, φαίνεται ότι στην περίπτωση όπου $E_d = 3.45\text{MeV}$, $f_b = 100000$, η απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση είναι εντονότερη σε σύγκριση με την περίπτωση χαμηλής ενέργειας δευτερίων. Ενώ η ενέργεια της δέσμης δευτερίων είναι μεγαλύτερη, το εύρος των διαθέσιμων ενεργειών προς αλληλεπίδραση με τον στόχο είναι σχεδόν ίδιο (93keV, έναντι των 100keV, στην

περίπτωση όπου $E_d = 2\text{MeV}$). Άρα το τελικό αποτέλεσμα επηρεάζεται μόνο από την μορφή της ενεργού διατομής στο ενεργειακό εύρος των 3.36-3.45MeV, η οποία είναι πιο απότομη (Εικόνα 3.1). Συμπερασματικά, η ενεργός διατομή επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα και όχι το διαθέσιμο εύρος των ενεργειών προς αλληλεπίδραση με τον στόχο.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται στόχος αλουμινίου με ενέργεια δέσμης δευτερίων 3.45MeV και πάχος τέτοιο ώστε η απώλεια ενέργειας της δέσμης να είναι 100keV. Τα αποτελέσματα στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων φαίνονται παρακάτω:

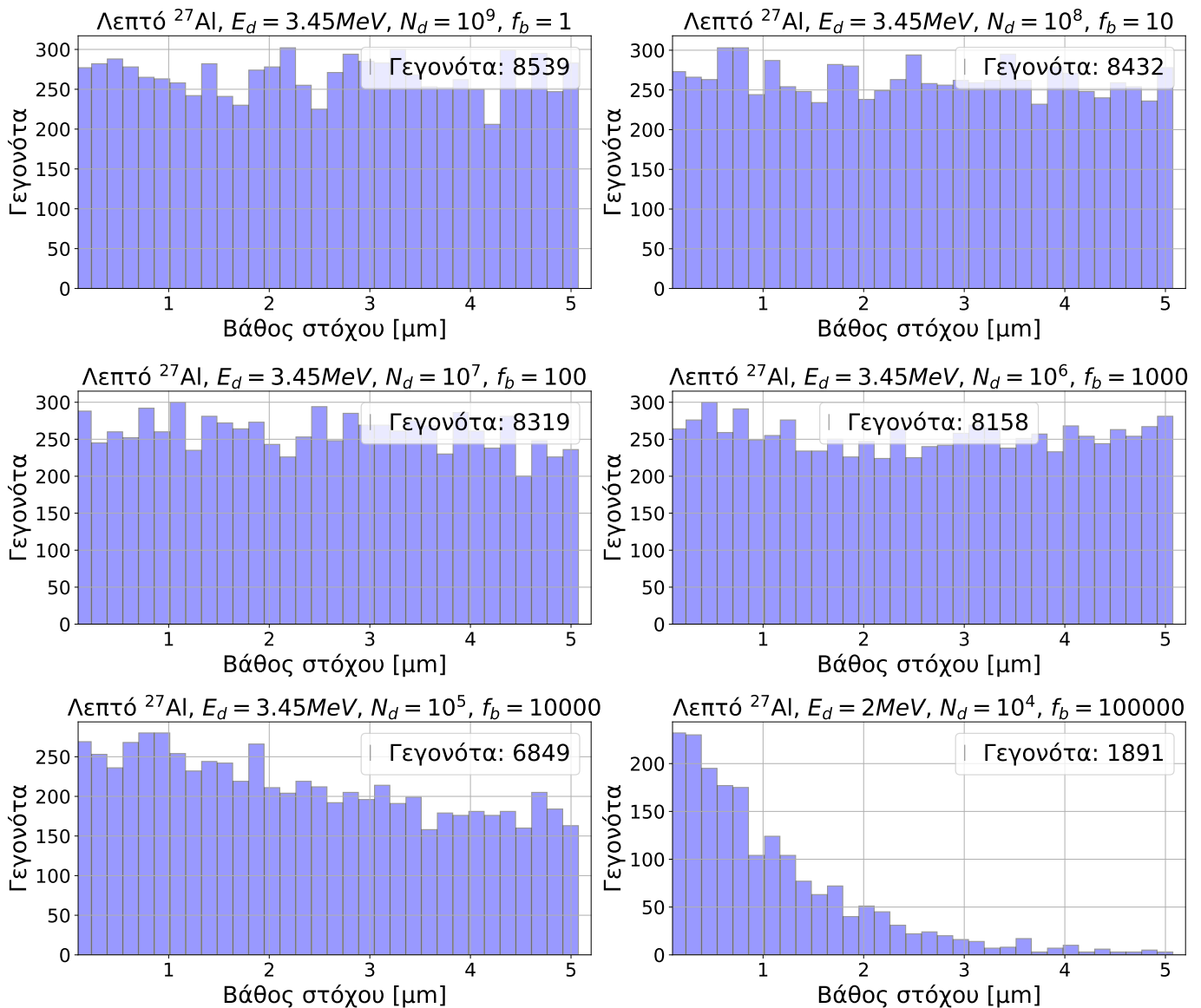


Εικόνα 3.12: Λεπτός στόχος αλουμινίου πάχους 5μm με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Υπάρχει μεγάλη απομάκρυνση από την αναλογικότητα για $f_b = 10000$. Η εφαρ-

μογή της μεραληπτικής τεχνικής σε αυτή τη περίπτωση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα έως $f_b = 1000$, ελέγχοντας την διατήρηση της αναλογικότητας ως προς τον αριθμό των συνολικών γεγονότων των προσομοιώσεων που αφορά το ενεργειακό φάσμα.

Ελέγχοντας επίσης και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων (Εικόνα 3.13), παρατηρείται πολύ καλή συνέπεια μεταξύ της αναλογικής περίπτωσης και της περίπτωσης με $f_b = 1000$:



Εικόνα 3.13: Λεπτός στόχος αλουμινίου πάχους 5μm με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Επιπλέον, παρατηρώντας τους λόγους μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών Α, Β και Γ (Πίνακες 3.9 και 3.10, υπάρχουν αισθητές αλλαγές και αποκλίσεις από την αναλογική περίπτωση για $f_b = 10000, 100000$, διότι ενισχύεται έντονα η παραγωγή νετρονίων σε μικρότερα βάθη καθώς αυξάνεται ο παράγοντας f_b .

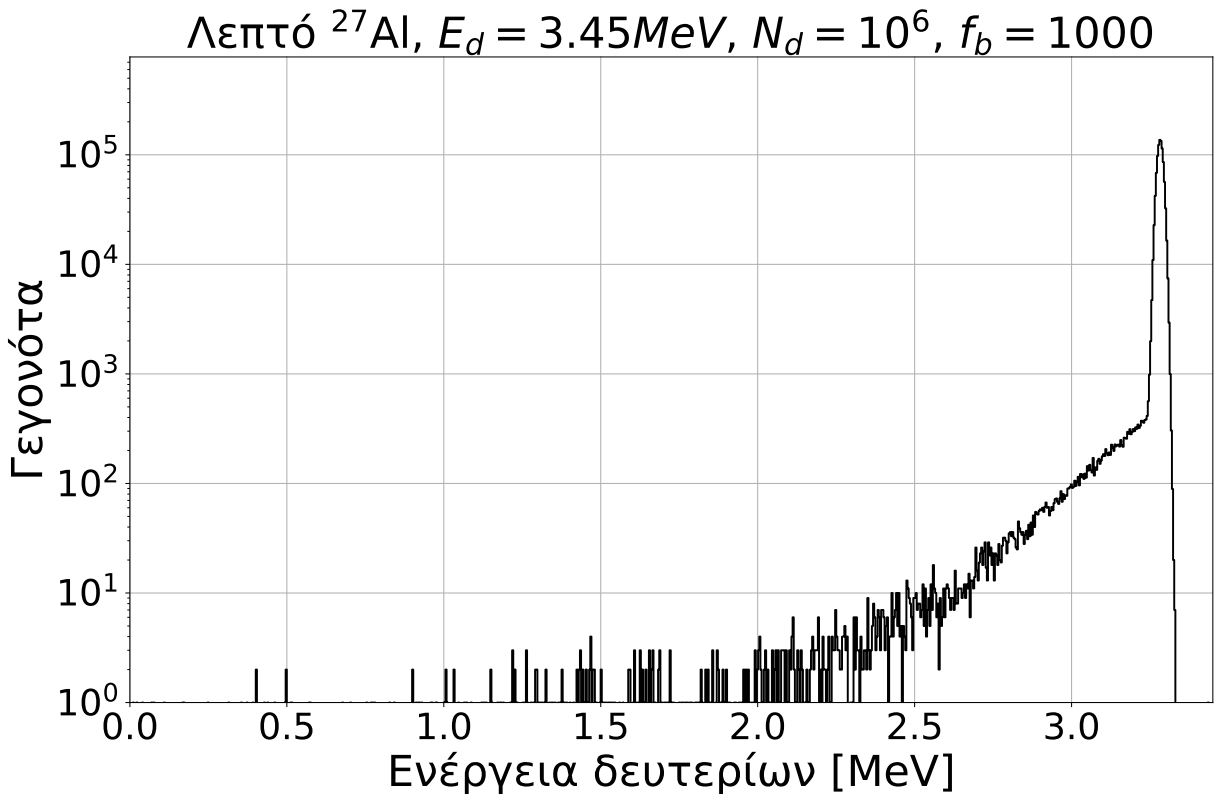
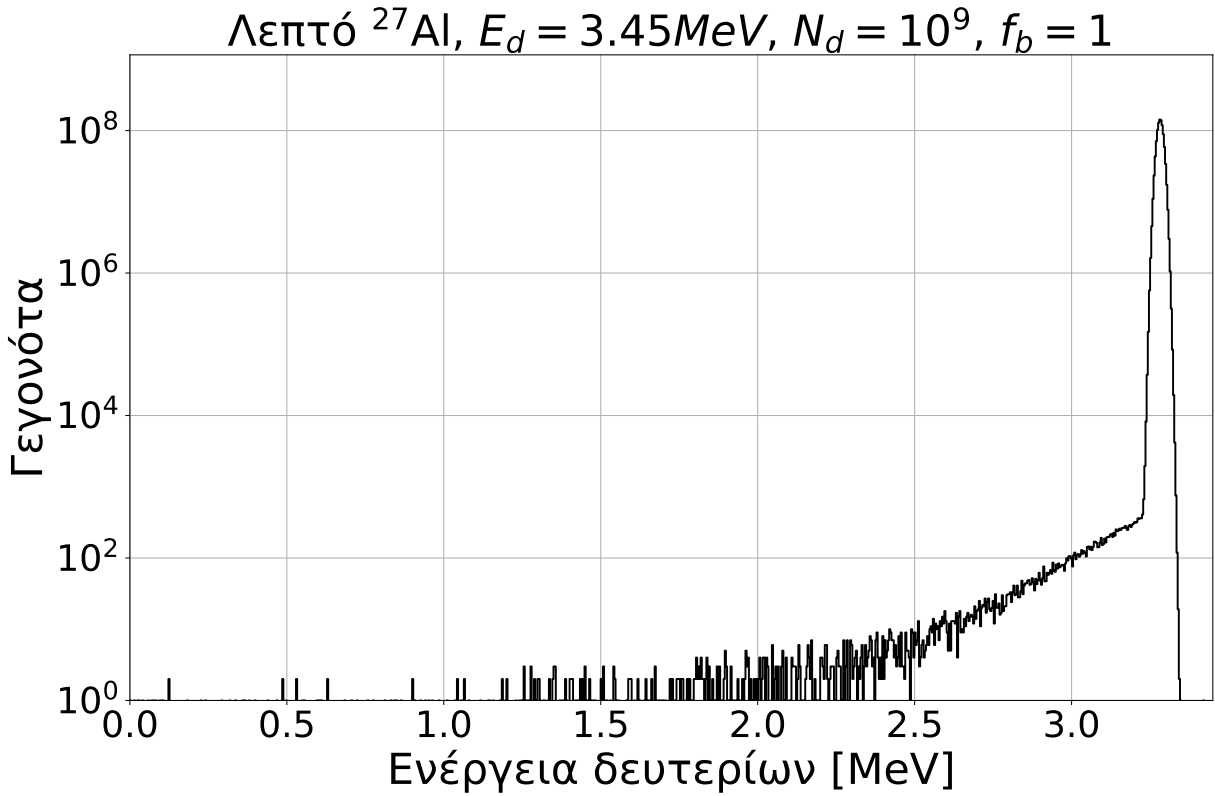
	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.00	0.85
$f_b = 10$	1.01	0.86
$f_b = 100$	1.00	0.89
$f_b = 1000$	1.08	0.86
$f_b = 10000$	1.20	1.19
$f_b = 100000$	4.42	19.75

Πίνακας 3.9: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε biasing factor.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	0.98	0.98
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	0.97	0.95
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.92	0.99
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.83	0.71
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100000}$	0.22	0.22

Πίνακας 3.10: 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 $f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$.

Τέλος, πρέπει να γίνει έλεγχος ξανά και στο ενεργειακό προφίλ της ροής των δευτερίων στον ανιχνευτή, συγκρίνοντας την αναλογική περίπτωση με την περίπτωση όπου $f_b = 1000$:



Εικόνες 3.14 και 3.15: Ροή δευτερίων στον ανιχνευτή για λεπτό στόχο αλουμινίου ($f_b = 1$ και $f_b = 1000$) με αρχική δέσμη δευτερίων 3.45MeV . Η απώλεια ενέργειας στο στόχο είναι 100keV .

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία της περίπτωσης των 2MeV , ο λόγος της κύριας κορυφής των δευτερίων προς τον λόγο των υπολοίπων δευτερίων για την αναλογική

περίπτωση (unbiased) και για την εξαναγκασμένη (biased) είναι:

$$R_{unbiased} = 5.6 \cdot 10^4$$

$$R_{biased} = 5.1 \cdot 10^4$$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν, δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στη μορφή της κατανομής των δευτερίων για τις δύο αυτές περιπτώσεις. Επομένως, κρίνοντας από το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων, τα σημεία παραγωγής των νετρονίων στο στόχο και το ενεργειακό φάσμα των δευτερίων που καταγράφονται στον ανιχνευτή, η επιλογή του παράγοντα $f_b = 1000$ είναι ικανοποιητική.

3.2 Αξιολόγηση της Μεροληπτικής Τεχνικής στα Ισότοπα του Μολυβδαινίου και του Χαλκού

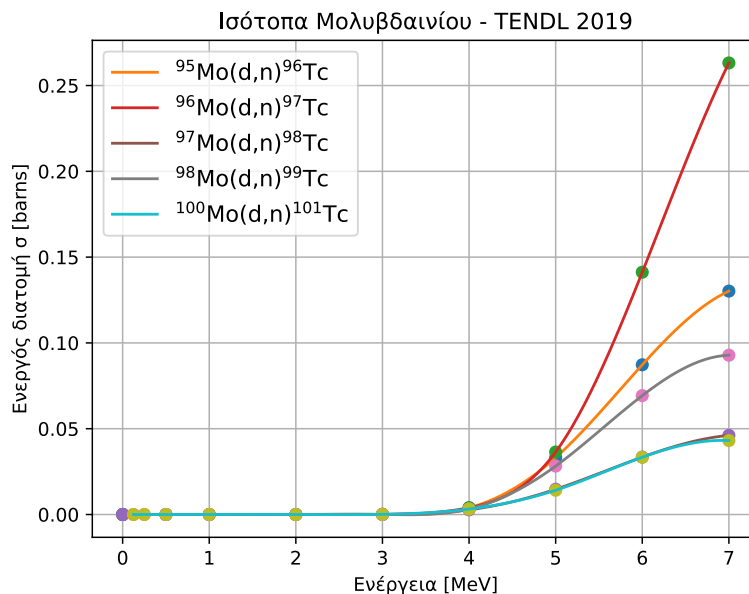
Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για τον έλεγχο της εφαρμογής της μεροληπτικής τεχνικής με βάση τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Η επιλογή των στόχων που χρησιμοποιήθηκαν και των διαστάσεών τους βασίζεται στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των νετρονίων στο εργαστήριο του επιταχυντή του Δημοκρίτου. Όπως ήδη αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η παραγωγή της κύριας δέσμης νετρονίων πραγματοποιείται μέσω της αντίδρασης (d,n) στο ^3H . Η φλάντζα που περιέχει το ^3H αποτελείται από κάποια φύλλα μολυβδαινίου (Mo), τον βασικό στόχο τιτανιωμένου τριτίου (TiT) και ένα παχύ στρώμα χαλκού Cu - αναλυτικότερη περιγραφή της γίνεται στο επόμενο Κεφάλαιο 4. Οι ενέργειες επιλέχθηκαν ώστε να είναι συμβατές με τις αρχικές ενέργειες δευτερίων που χρησιμοποιήθηκαν σε παλαιότερα πειράματα και έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις με βάση την ενέργεια που έχει η δέσμη όταν προσπίπτει σε κάθε διαφορετικό είδος στόχου που μελετήθηκε (Πίνακας 3.11). Η προσομοιωμένη γεωμετρία αποτελείται από τον επιθυμητό στόχο σε κάθε περίπτωση και ανιχνευτή νετρονίων αντίστοιχο με τις προηγούμενες προσομοιώσεις ελέγχου.

3.2.1 Μολυβδαίνιο

Για την αντίδραση (d,n) στα ισότοπα του μολυβδαινίου, οι ενέργειες ενδιαφέροντος είναι οι 2.11MeV, 2.9MeV και 3.45MeV. Το μολυβδαίνιο αποτελεί τον πρώτο στόχο της φλάντζας (πάχους 10um) του τριτίου, άρα η ενέργεια των δευτερίων που εισέρχονται στον στόχο Mo είναι ίδια με την αρχική ενέργεια της δέσμης δευτερίων. Τα δευτέρια χάνουν αρκετή ενέργεια στο μολυβδαίνιο, λόγω έντονης αλληλεπίδρασης με την ύλη.

	Στόχος Mo	Στόχος TiT	Στόχος Cu
Ενέργεια δευτερίων όταν εισέρχονται στον στόχο [MeV] για $E_d = 2.11\text{MeV}$	2.11	0.91	0.19
Ενέργεια δευτερίων όταν εισέρχονται στον στόχο [MeV] για $E_d = 2.9\text{MeV}$	2.90	1.98	1.60
Ενέργεια δευτερίων όταν εισέρχονται στον στόχο [MeV] για $E_d = 3.45\text{MeV}$	3.45	2.64	2.33

Πίνακας 3.11: Η ενέργεια των δευτερίων όταν αυτά εισέρχονται σε κάθε στόχο για τις ενέργειες αρχικής δέσμης ενδιαφέροντος (2.11, 2.90 και 3.45 MeV). Ο υπολογισμός έγινε χρησιμοποιώντας τον κώδικα NeuSDesc.

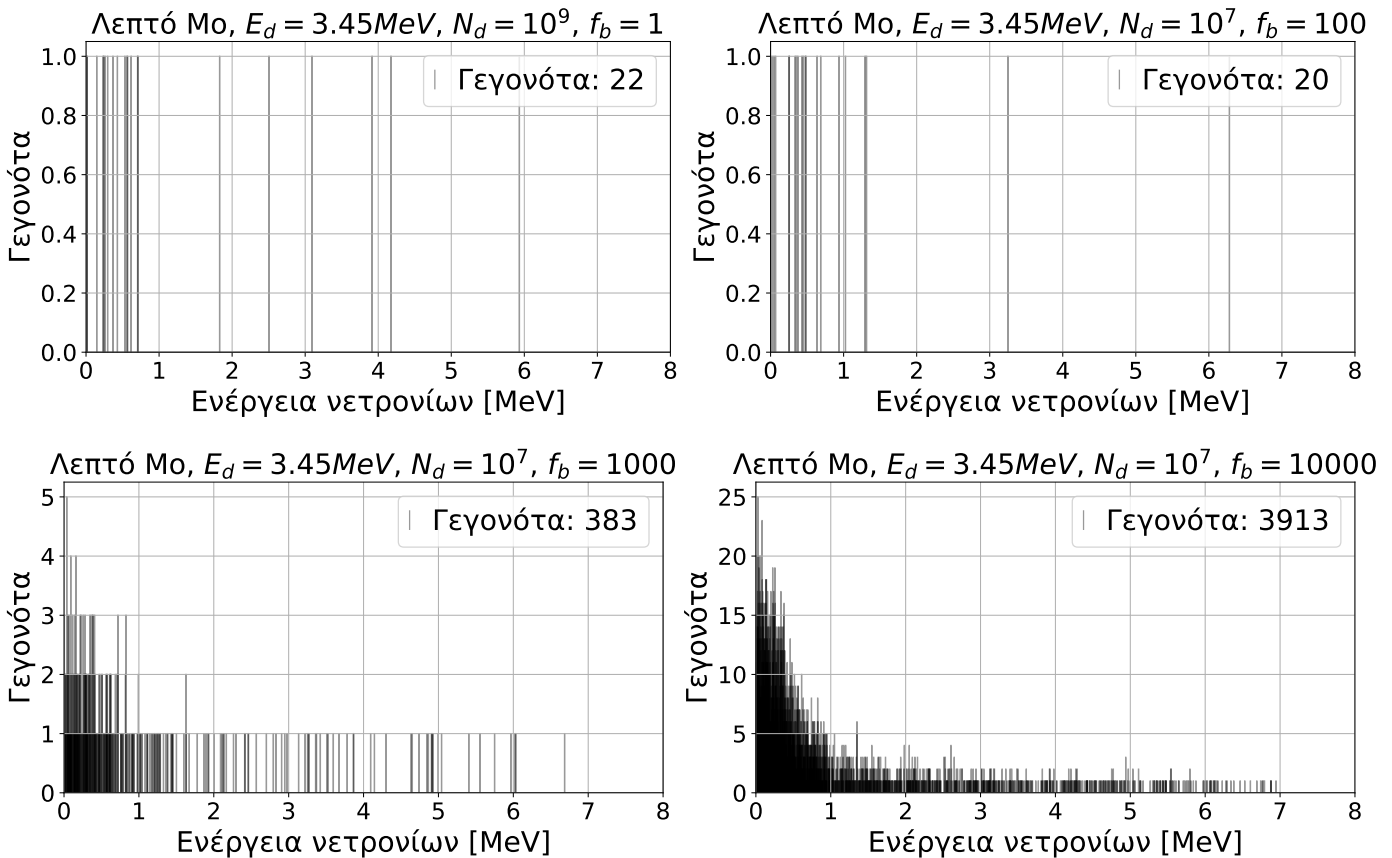


Εικόνα 3.16: Ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στα ισότοπα του μολυβδαινίου. Η ενεργός διατομή είναι κοντά στο μηδέν στο διάστημα ενεργειών 2 - 3.45MeV.

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης (Εικόνα 3.16) για τις ενέργειες 2.11MeV, 2.9MeV είναι μηδενική ενώ για τα 3.45MeV έχει αρκετά χαμηλή τιμή. Εφαρμόστηκε

λοιπόν η μεροληπτική τεχνική για το μολυβδαίνιο μόνο στην υψηλότερη ενέργεια δευτερίων. Ο αρχικός αριθμός δευτερίων είναι ίσος με $N_d = 10^9$ για την αναλογική περίπτωση, ενώ σε όλες τις εξαναγκασμένες προσομοιώσεις παραμένει 10^7 , για κάθε $f_b > 1$.

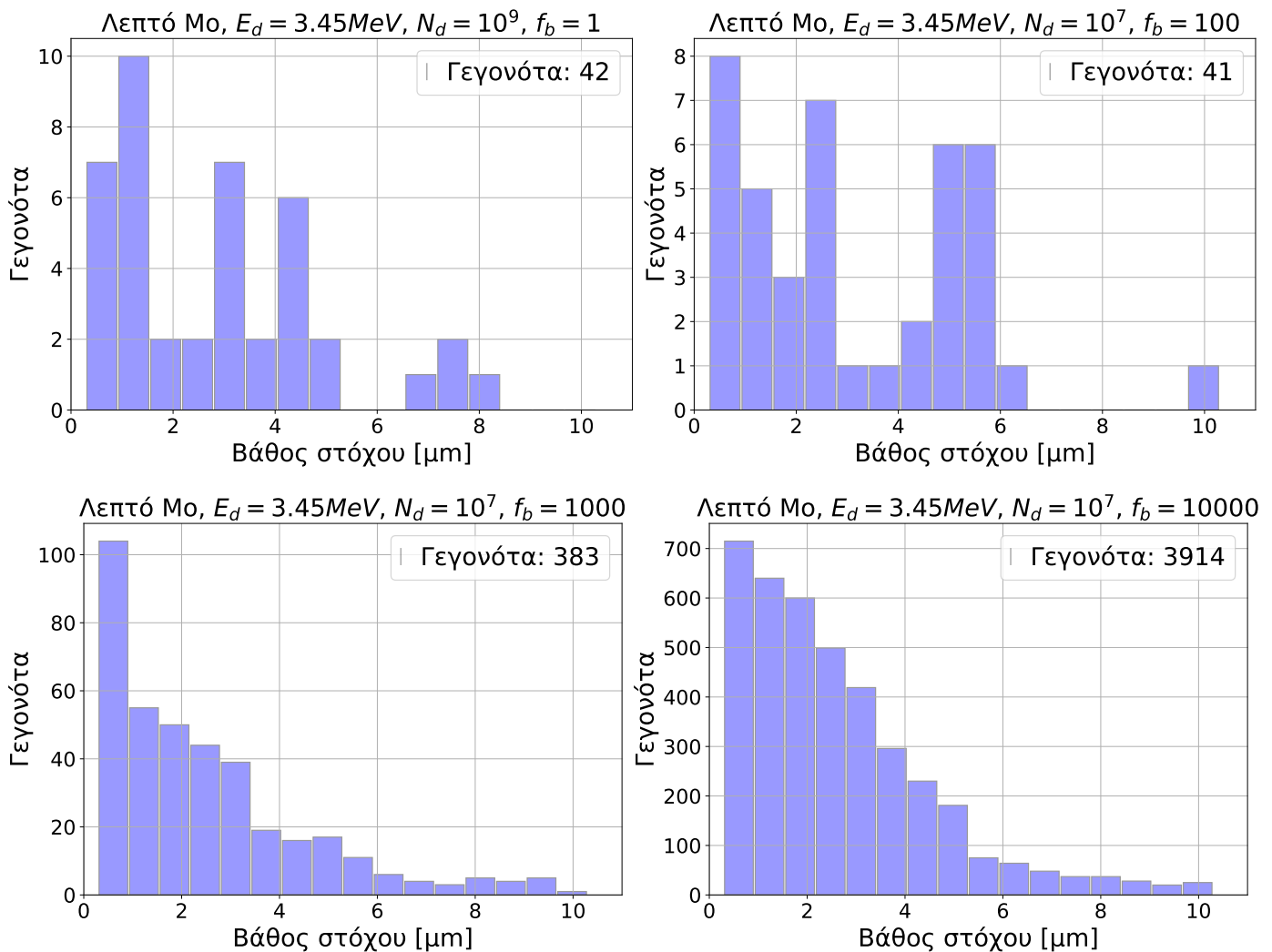
Παρακάτω φαίνεται το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων για τον στόχο του μολυβδαίνιου με την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής:



Εικόνα 3.17: Στόχος μολυβδαίνιου πάχους 10um με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 100, 1000, 10000$ με $N_d = 10^7$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$ με $N_d = 10^9$).

Στην περίπτωση με 10^7 αρχικά δευτέρια, αυξάνοντας τον παράγοντα f_b 10 φορές, τα γεγονότα αυξάνονται επίσης περίπου 10 φορές. Η αναλογικότητα στο φάσμα των νετρονίων διατηρείται και για $f_b = 10000$, ως προς τον συνολικό αριθμό γεγονότων, αλλά τυχόν μεταβολές στη μορφή του ενεργειακού φάσματος δεν μπορούν να εκτιμηθούν ικανοποιητικά λόγω της χαμηλής στατιστικής κατά την περίπτωση της αναλογικής προσομοίωσης.

Ελέγχεται στη συνέχεια και η συμπεριφορά των παραγόμενων νετρονίων στο μολυβδαίνιο με την εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής:



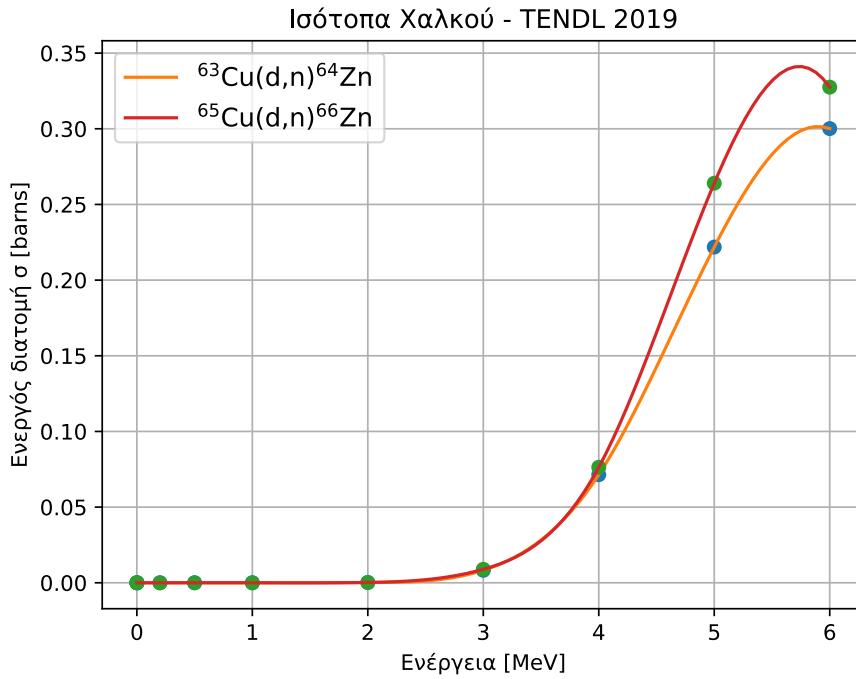
Εικόνα 3.18: Στόχος μολυβδαινίου (βάθους 10μm) με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, \dots$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Συμπερασματικά, εφόσον η ενεργός διατομή είναι χαμηλή και δεν παρουσιάζει μεταβολές, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεγάλου παράγοντα f_b για τον στόχο του μολυβδαινίου.

3.2.2 Χαλκός

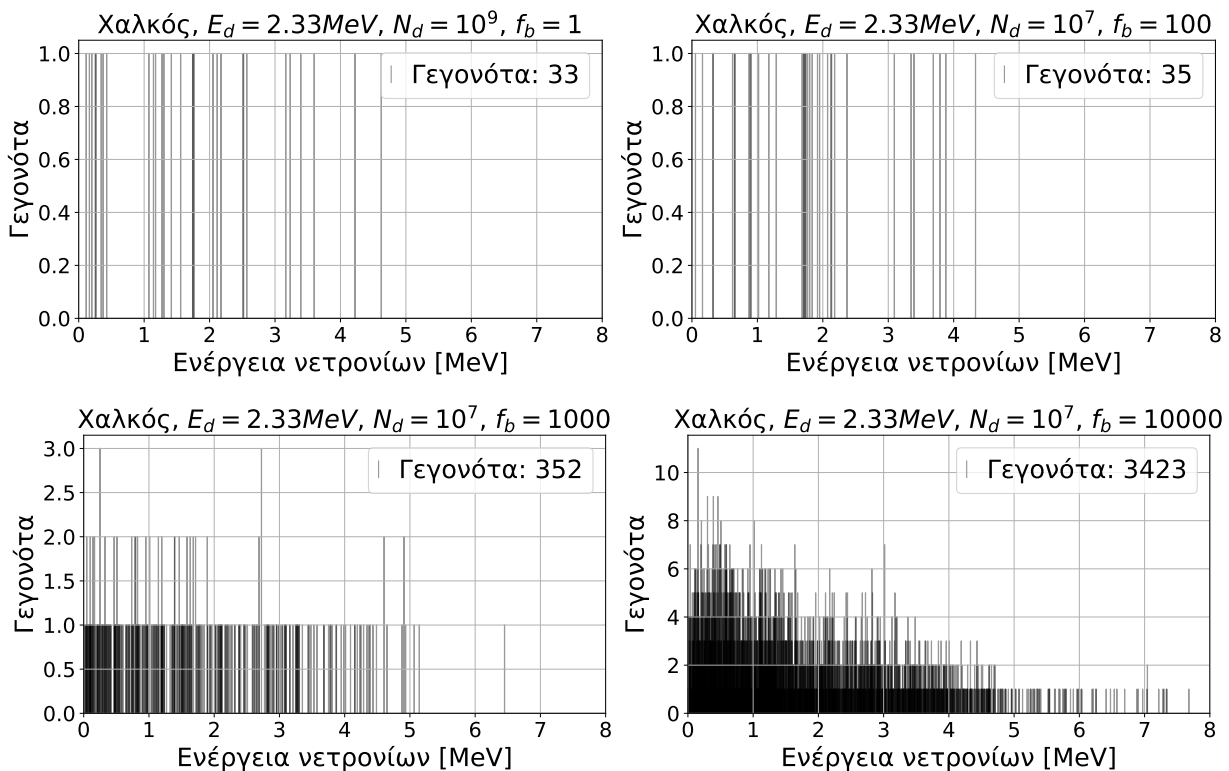
Για την αντίδραση (d,n) στα ισότοπα του χαλκού, η ενέργεια για την οποία θα εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική είναι αυτή που προκύπτει από τη περίπτωση με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV, τα οποία χάνοντας ενέργεια, φτάνουν τελικά στον στόχο του χαλκού με ενέργεια 2.33MeV (βλ. Πίνακας 3.9). Ο στόχος του χαλκού χρησιμοποιείται για την ολική επιβράδυνση των δευτερίων μέσα στο στόχο, και για τον λόγο αυτόν έχει μεγάλο πάχος, ίσο με 0.1cm.

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης (Εικόνα 3.19) είναι αρκετά χαμηλή για ενέργεια δευτερίων 2.33MeV. Όπως και στο μολυβδαίνιο, έτσι και στο χαλκό εφαρμόστηκε η μεροληπτική τεχνική σε περιπτώσεις με 10^7 αρχικά δευτέρια, ενώ η αναλογική περίπτωση έχει 10^9 αρχικά δευτέρια.



Εικόνα 3.19: Ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στα ισότοπα του χαλκού. Η ενεργός διατομή παρουσιάζει μικρή αύξηση στα 2MeV.

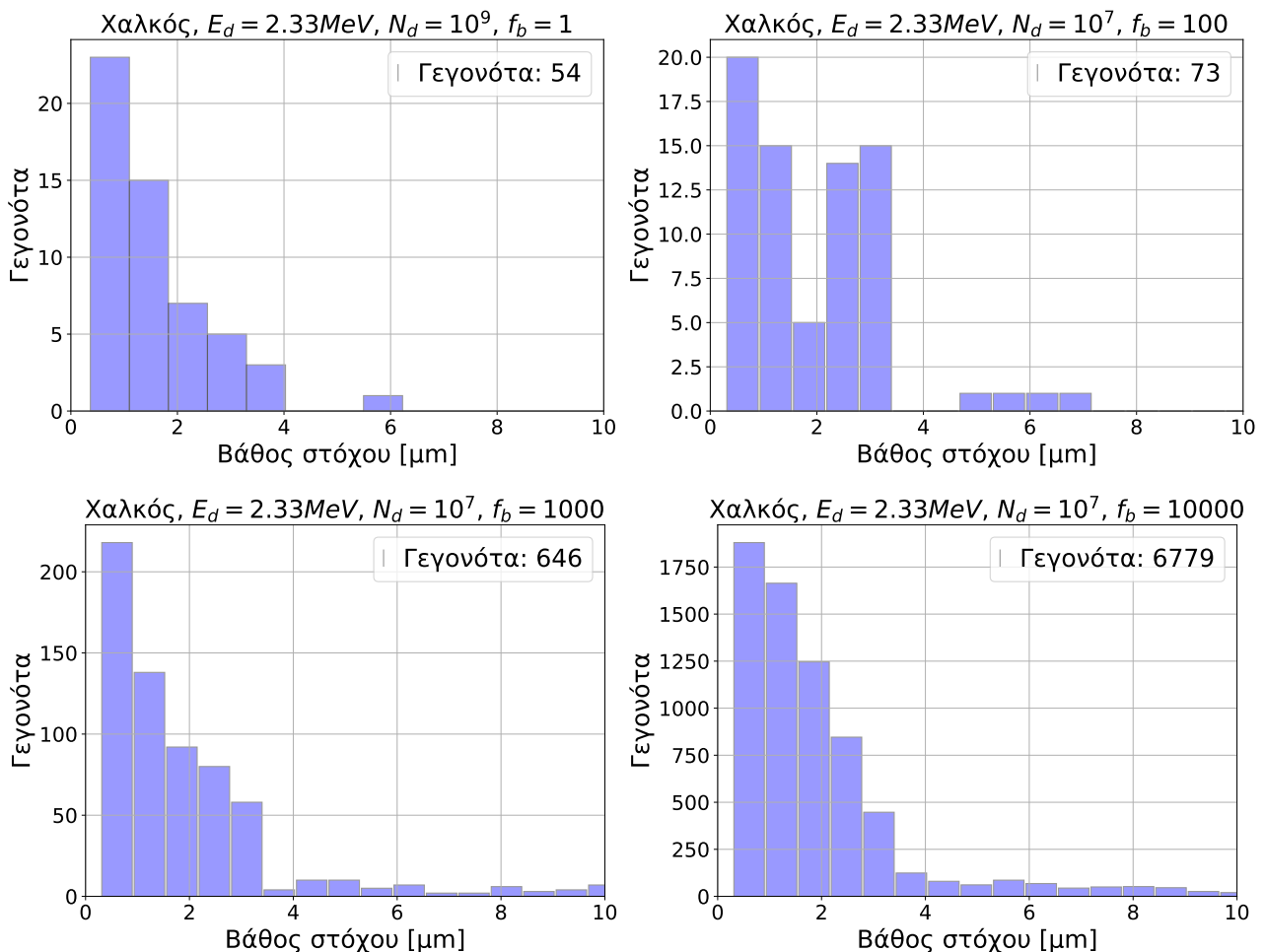
Παρακάτω φαίνεται το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων σε κάθε περίπτωση:



Εικόνα 3.20: Στόχος χαλκού (βάθους 0.1cm) με αρχική ενέργεια δευτερίων 2.33MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 100, 1000, 10000$ με $N_d = 10^7$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$ με $N_d = 10^9$).

Στην αναλογική περίπτωση και στη περίπτωση με $f_b = 100$ η στατιστική δεν είναι επαρκής ώστε να γίνει σύγκριση των προσομοιώσεων με τις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $f_b = 1000$ και 10000 . Όμως, ο αριθμός των γεγονότων αυξάνεται αναλογικά 10 και 100 φορές σε σύγκριση με την αναλογική προσομοίωση, για $f_b = 1000$ και 10000 , αντίστοιχα.

Παρακάτω φαίνονται και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων (Εικόνα 3.20) στον στόχο του χαλκού. Σε βάθος μεγαλύτερο των $10\mu\text{m}$ δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω παραγωγή νετρονίων στον στόχο του χαλκού, διότι τα δευτέρια χάνουν πολύ γρήγορα όλη τους την ενέργεια εντός του στόχου λόγω έντονης απώλειας ενέργειας στην ύλη. Παρατηρείται χαμηλή στατιστική για την αναλογική περίπτωση και την περίπτωση με $f_b = 100$, ενώ στις περιπτώσεις με $f_b = 1000$ και 10000 η κατανομή ακολουθεί καλύτερα τη μορφή της ενεργού διατομής.



Εικόνα 3.21: Στόχος χαλκού (βάθους 0.1cm) με αρχική ενέργεια δευτερίων 2.33MeV . Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

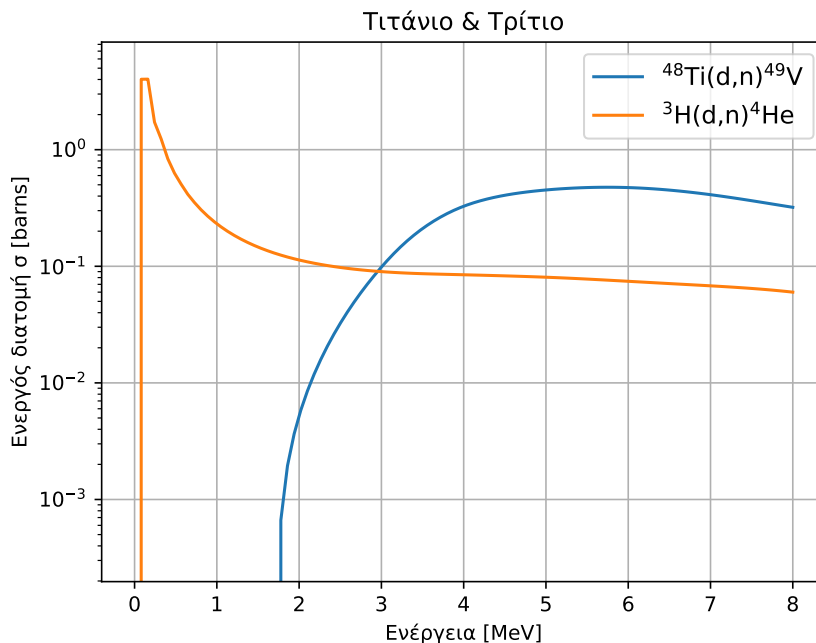
Συμπερασματικά, λόγω χαμηλής ενεργού διατομής, η εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής επηρεάζει ελάχιστα το ενεργειακό φάσμα και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων. Επομένως, είναι δυνατή η επιλογή και μεγάλου f_b για τον στόχο Cu.

3.3 Ο Κύριος Στόχος του Τριτίου

Για την αντίδραση (d,n) στο τιτανιωμένο τρίτιο (TiT), οι ενέργειες ενδιαφέροντος είναι αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 3.11. Χρησιμοποιείται και πάλι η γεωμετρία ανιχνευτή - στόχου (Κεφάλαιο 1 - Εικόνα 1.1) όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

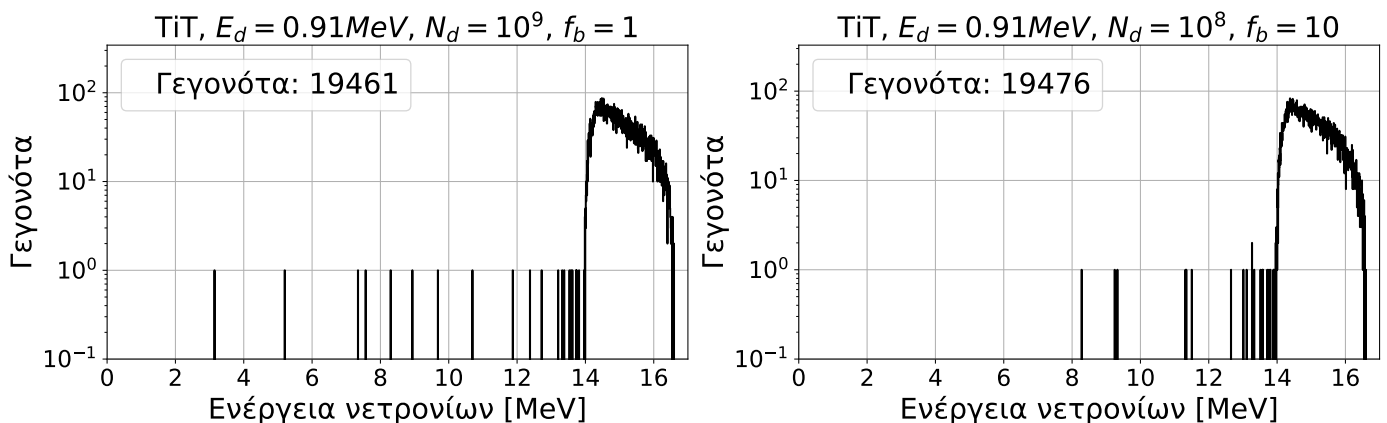
Ειδικότερα, στον Πίνακα 3.11 φαίνονται οι ενέργειες με τις οποίες εισέρχονται σε κάθε στόχο τα δευτέρια, για αρχικές ενέργειες δευτερίων $E_d = 2.11, 2.9$ και 3.45 MeV. Επομένως, θα αξιολογηθεί η μεροληπτική τεχνική για αρχικές ενέργειες δευτερίων 0.91 MeV, 1.98 MeV και 2.64 MeV στον στόχο TiT, λεπτού πάχους $5.7 \mu\text{m}$.

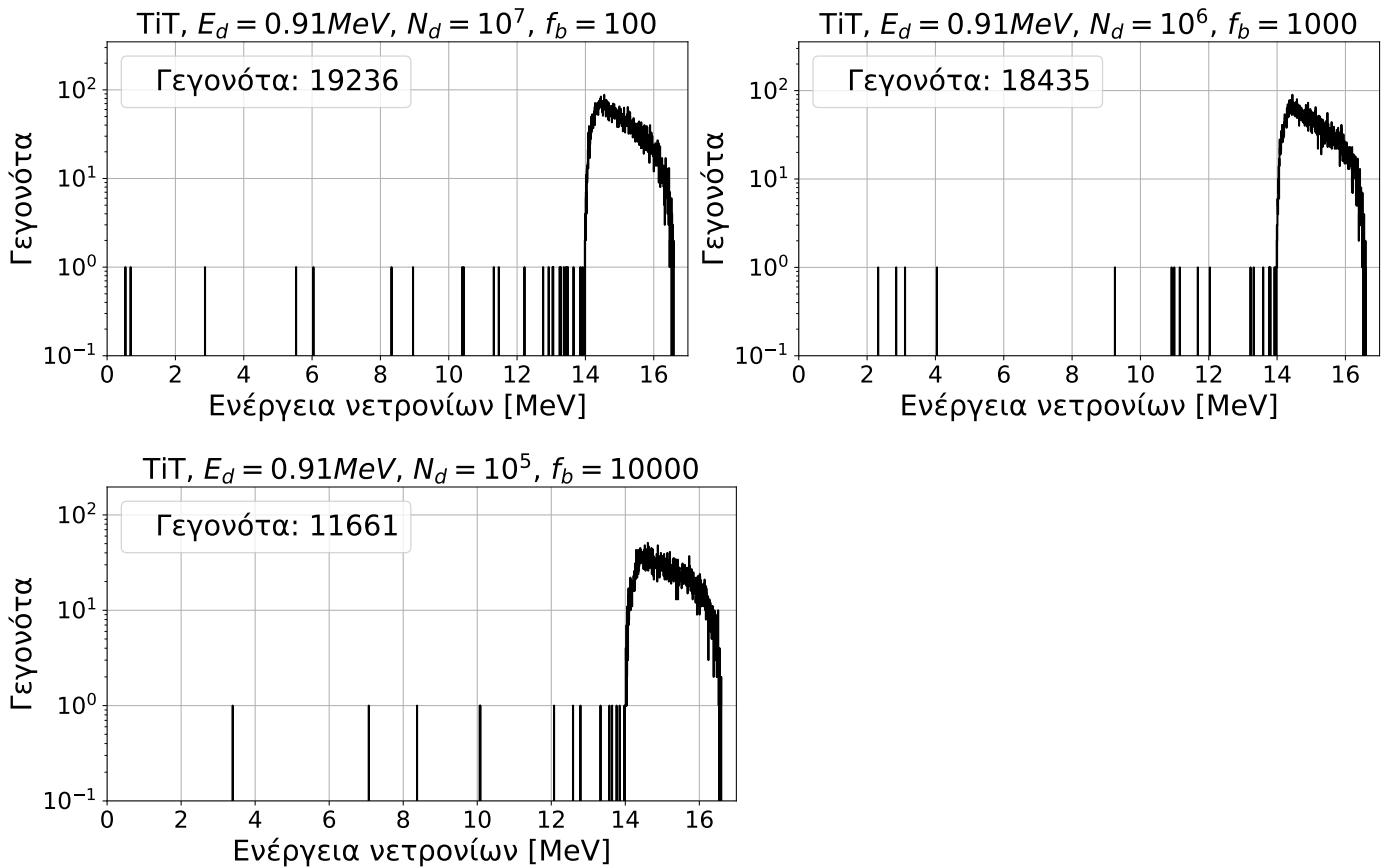
Παρακάτω εμφανίζεται η ενεργός διατομή της αντίδρασης (d,n) στο τιτάνιο και στο τρίτιο (Εικόνα 3.22):



Εικόνα 3.22: Ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στο Τιτάνιο (^{48}Ti) και στο Τρίτιο (^3H).

3.3.1 Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 0.91 MeV

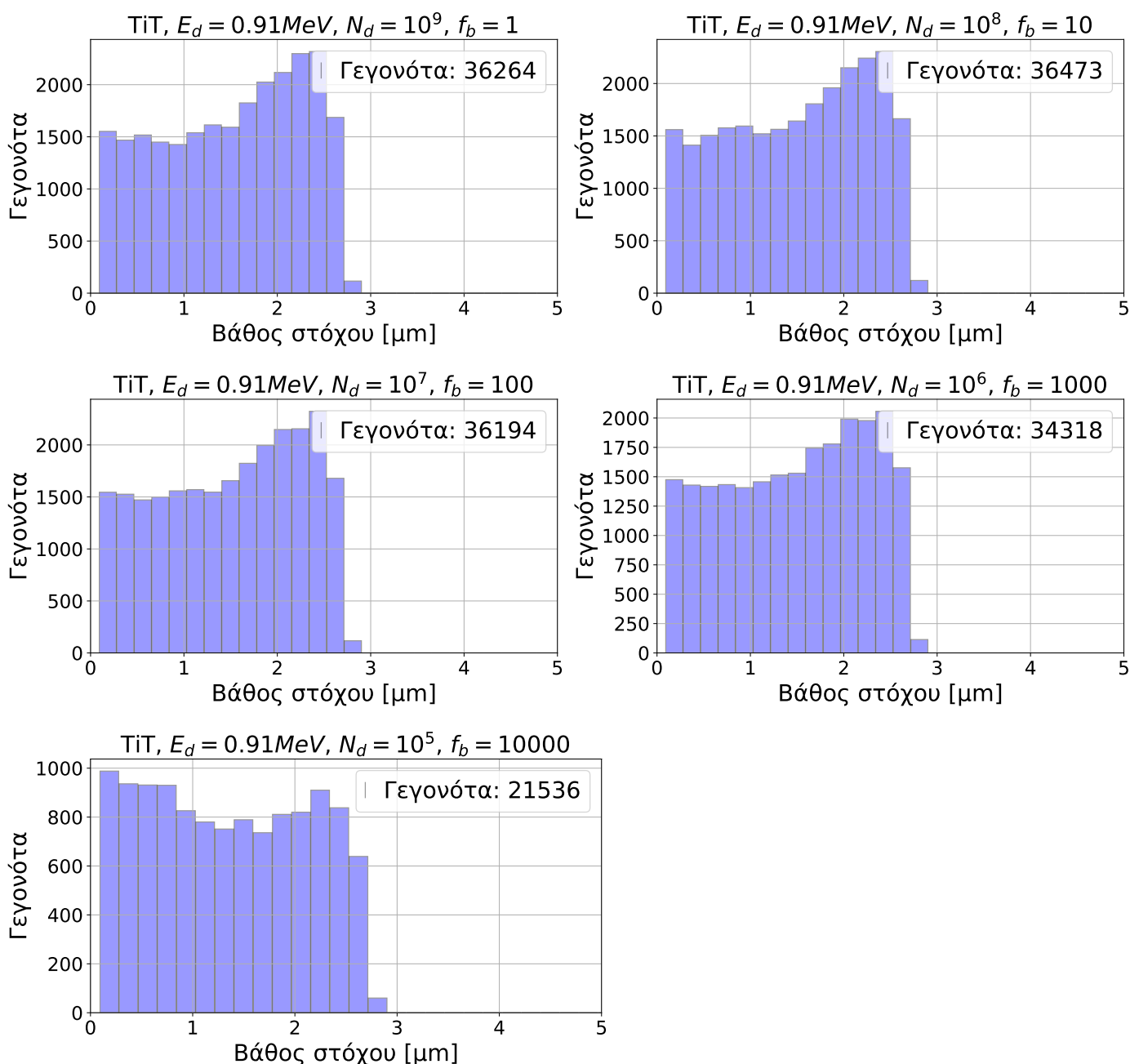




Εικόνα 3.23: Στόχος TiT με αρχική ενέργεια δευτερίων 910keV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 910keV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Στο παραπάνω ενεργειακό φάσμα των νετρονίων (Εικόνα 3.23), παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα για $f_b = 10000$, ενώ για $f_b = 10, 100$ ή 1000 δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες αλλαγές. Η ενεργειακή κατανομή των νετρονίων στη κύρια κορυφή (περίπου 14 - 16MeV) είναι συνεπής με τη μορφή της ενεργού διατομής, καθώς η ενεργός διατομή αυξάνεται απότομα για το ενεργειακό εύρος που καλούνται να αλληλεπιδράσουν τα δευτέρια ($\Delta E = 720\text{keV}$). Αυτός είναι και ο λόγος που παρατηρούνται περισσότερα νετρόνια σε ενέργειες μικρότερες από την μέγιστη ενέργεια των νετρονίων που καταγράφονται στον ανιχνευτή.

Συγκρίνοντας επίσης και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών προσομοιώσεων με την αναλογική περίπτωση, φαίνεται να παρουσιάζεται απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση ως προς τον αριθμό των συνολικών γεγονότων μόνο για $f_b = 10000$. Για τις μικρότερες τιμές του παράγοντα εξαναγκασμού, οι απομακρύνσεις από την αναλογική περίπτωση είναι μικρότερες.



Εικόνα 3.24: Στόχος TiT με αρχική ενέργεια δευτερίων 0.91MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 910keV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Για να γίνουν πιο ευδιάκριτες οι διαφορές μεταξύ των εξαναγκασμένων προσομοιώσεων σε σχέση με την αναλογική περίπτωση, ακολουθήθηκε η ίδια μέθοδος που εφαρμόστηκε και στο αλουμίνιο. Υπολογίστηκε δηλαδή ο αριθμός των γεγονότων κάθε ιστογράμματος σε τρεις περιοχές A, B και Γ, οι οποίες χωρίζουν το κάθε ιστογράμμα σε τρία ίσα μέρη.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	2.23	2.24
$f_b = 10$	2.30	2.30
$f_b = 100$	2.23	2.28
$f_b = 1000$	2.31	2.41
$f_b = 10000$	3.72	4.41

Πίνακας 3.12: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε biasing factor.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	0.97	0.98
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	0.99	0.98
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.96	0.93
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.60	0.51

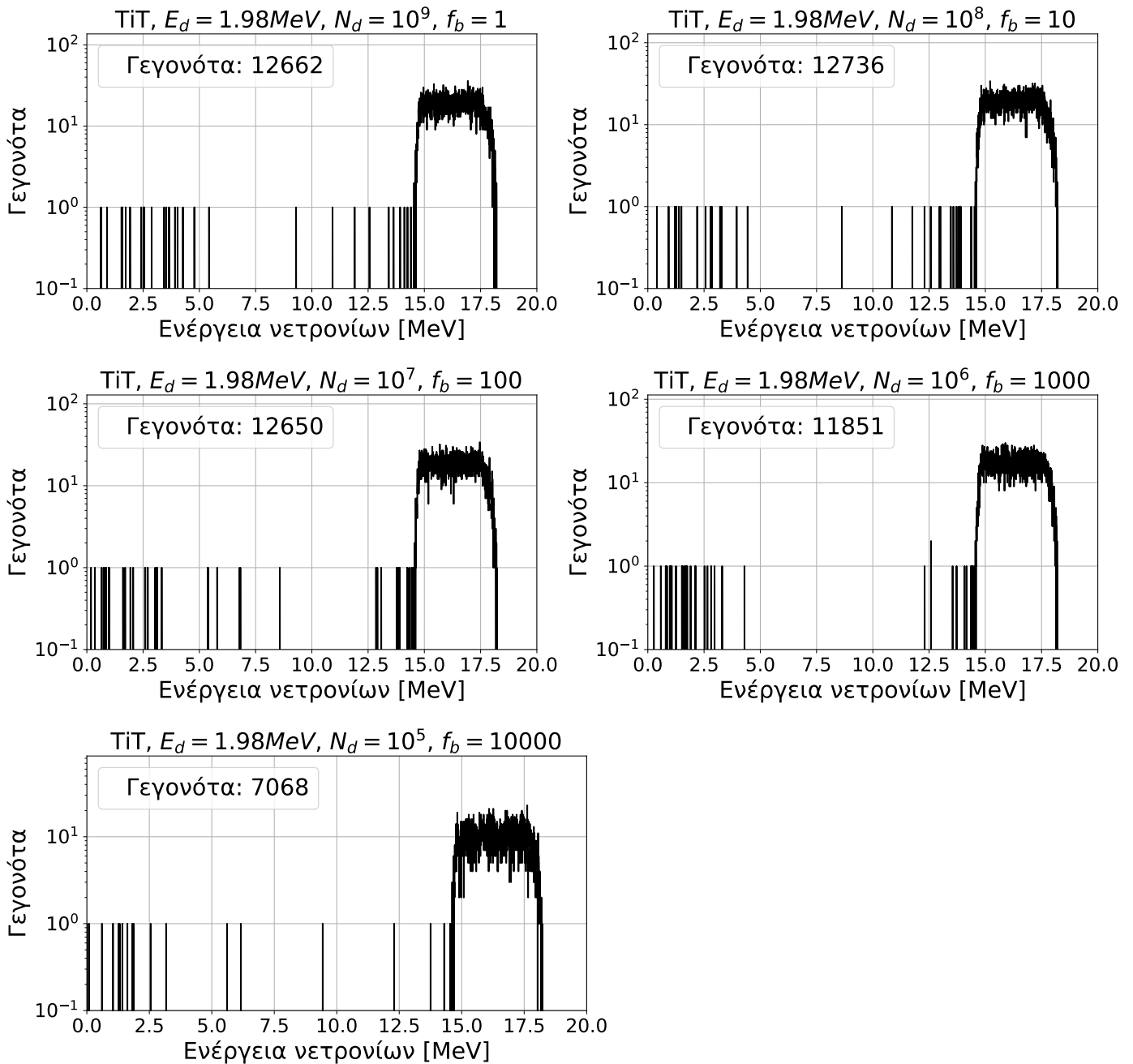
Πίνακας 3.13: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για $f_b = 10, 100, 1000, 10000$.

Για ενέργεια δευτερίων 0.91MeV στον στόχο TiT, η εφαρμογή μεροληπτικής τεχνικής δεν επηρεάζει ούτε το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων, ούτε τα σημεία παραγωγής τους στο στόχο για $f_b = 1000$. Όμως, για $f_b = 10000$, φαίνονται μεγάλες αλλαγές στη στατιστική των νετρονίων και η τιμή αυτή κρίνεται ακατάλληλη.

3.3.2 Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 1.98 MeV

Για αρχική ενέργεια δευτερίων 1.98MeV, το εύρος των διαθέσιμων ενεργειών των δευτερίων προς αλληλεπίδραση είναι 380keV. Επίσης, η μέγιστη ενέργεια των παραγόμενων νετρονίων είναι 18.2MeV. Όσον αφορά το ενεργειακό φάσμα (Εικόνα 3.25), αυτή τη φορά παρατηρούνται και νετρόνια χαμηλότερων ενεργειών (από 0 - 5 MeV) τα οποία προκύπτουν από αντιδράσεις δευτερίων με τους πυρήνες τιτανίου. Αυτό συμβαίνει γιατί στο ενεργειακό εύρος δευτερίων από 1.60 ως 1.98MeV, η ενεργός διατομή επιτρέπει τέτοιες αντιδράσεις (Εικόνα 3.22).

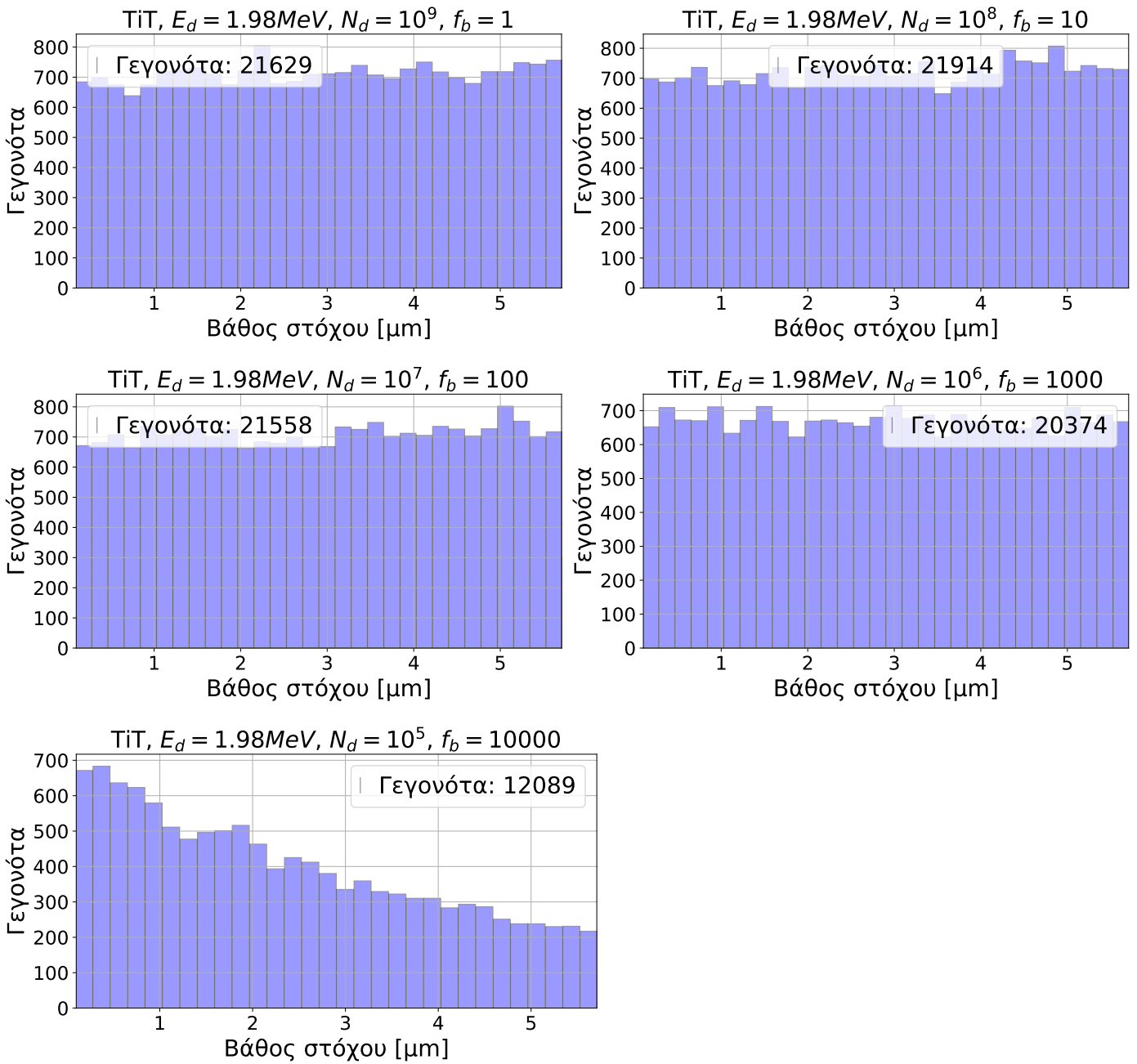
Επιπλέον, για το ίδιο ενεργειακό εύρος, η ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στο τρίτιο δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις. Άρα, στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων δεν παρατηρείται μεταβολή των γεγονότων νετρονίων από 15 ως 18.2MeV.



Εικόνα 3.25: Στόχος TiT με αρχική ενέργεια δευτερίων 2.90MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 1.98MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Κάνοντας σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων με την αναλογική περίπτωση, εμφανίζεται μεγάλη διαφορά στη στατιστική των γεγονότων για $f_b = 10000$, ενώ για $f_b = 10, 100, 1000$ δεν υπάρχει μεγάλη απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση.

Παρακάτω φαίνονται και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων για κάθε περίπτωση:



Εικόνα 3.26: Στόχος TiT με αρχική ενέργεια δευτερίων 1.98MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 1.98keV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Παρουσιάζονται επίσης και οι πίνακες (Πίνακες 3.14 και 3.15) για τις περιοχές A,B και Γ που χωρίζουν τον αριθμό των κελιών σε τρία ίσα μέρη, ώστε να γίνουν πιο ευδιάκριτες οι τυχόν διαφορές στα σημεία παραγωγής των νετρονίων με την αύξηση του f_b :

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.97	1.88
$f_b = 10$	2.00	1.82
$f_b = 100$	1.95	1.84
$f_b = 1000$	2.01	1.95
$f_b = 10000$	3.28	4.10

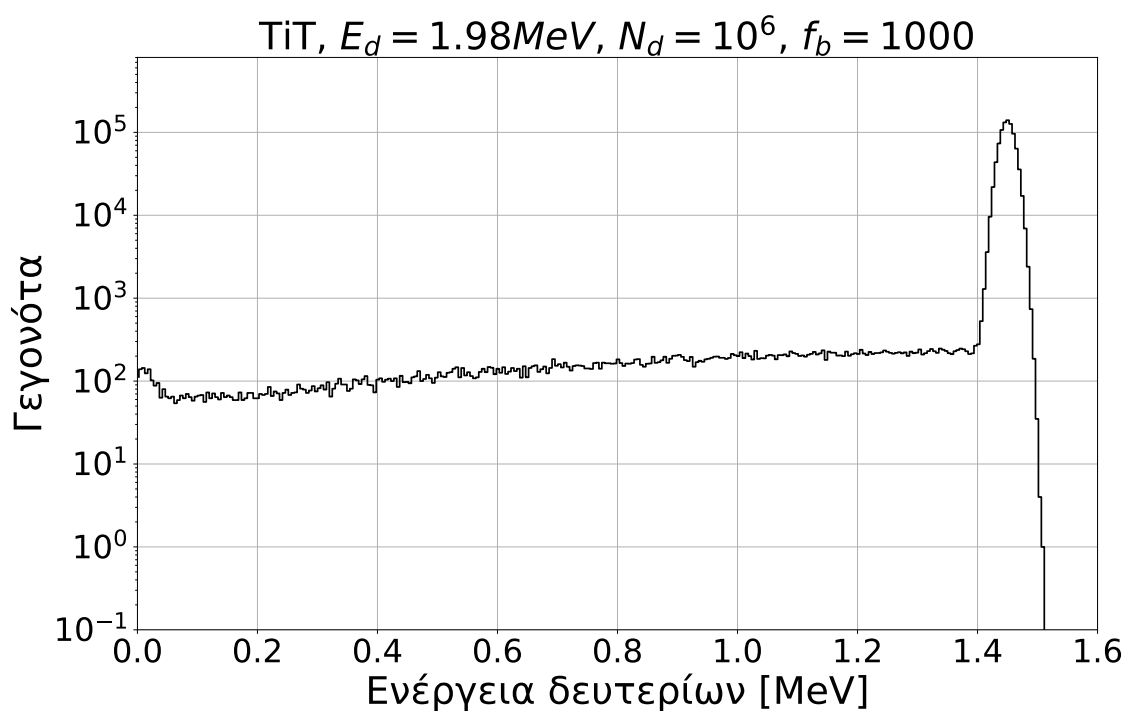
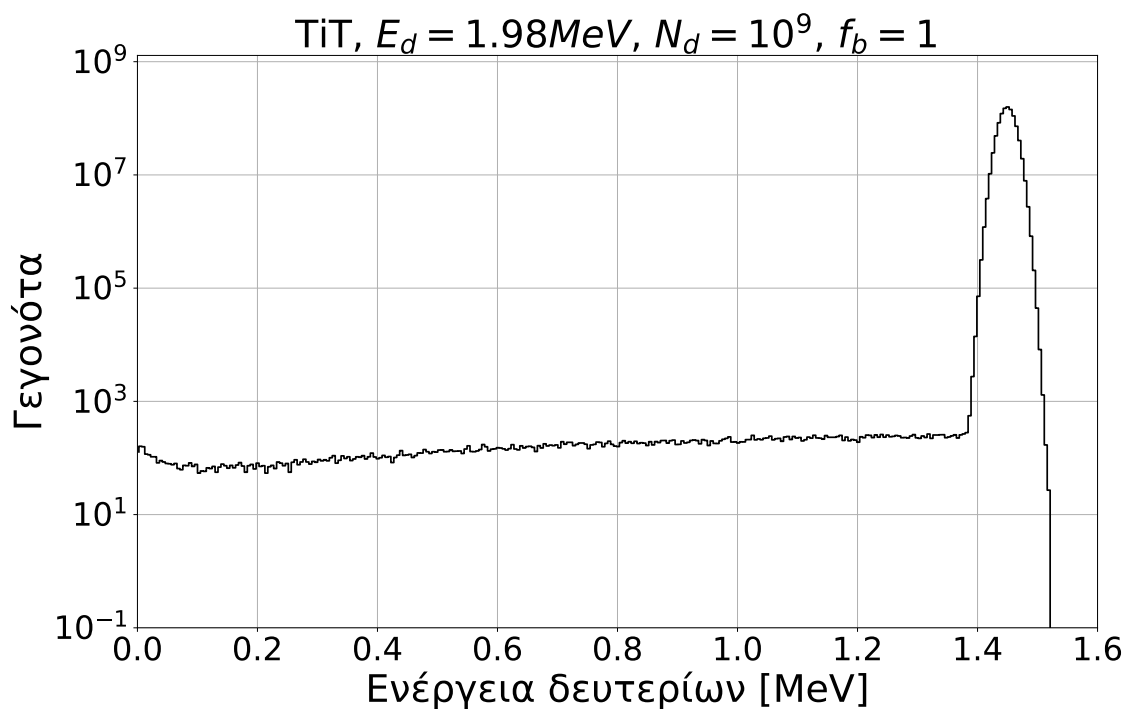
Πίνακας 3.14: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε f_b .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	0.99	1.04
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	1.01	1.02
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.98	0.97
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.60	0.46

Πίνακας 3.15: 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 $f_b = 10, 100, 1000, 10000$.

Υπάρχει μεγάλη απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση για $f_b = 10000$, ενώ για τις άλλες τιμές του παράγοντα μεροληπτικής τεχνικής δεν επηρεάζεται η κατατομή παραγωγής των νετρονίων στον στόχο. Ενδεικτικά, η απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση για $f_b = 10000$ είναι πολύ μεγάλη, ενώ για τις άλλες τιμές των f_b δεν παρουσιάζεται κάποια μεγάλη διαφορά.

Τέλος, για την τιμή $f_b = 1000$ πρέπει να γίνει και έλεγχος του ενεργειακού προφίλ της δέσμης των δευτερίων στον ανιχνευτή (Εικόνες 3.27 και 3.28). Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει αλλοίωση του φάσματος των δευτερίων για την ως ανώ τιμή του παράγοντα μεροληπτικής τεχνικής. Το πρώτο φάσμα αφορά την αναλογική περίπτωση ενώ το δεύτερο φάσμα είναι η εξαναγκασμένη περίπτωση:

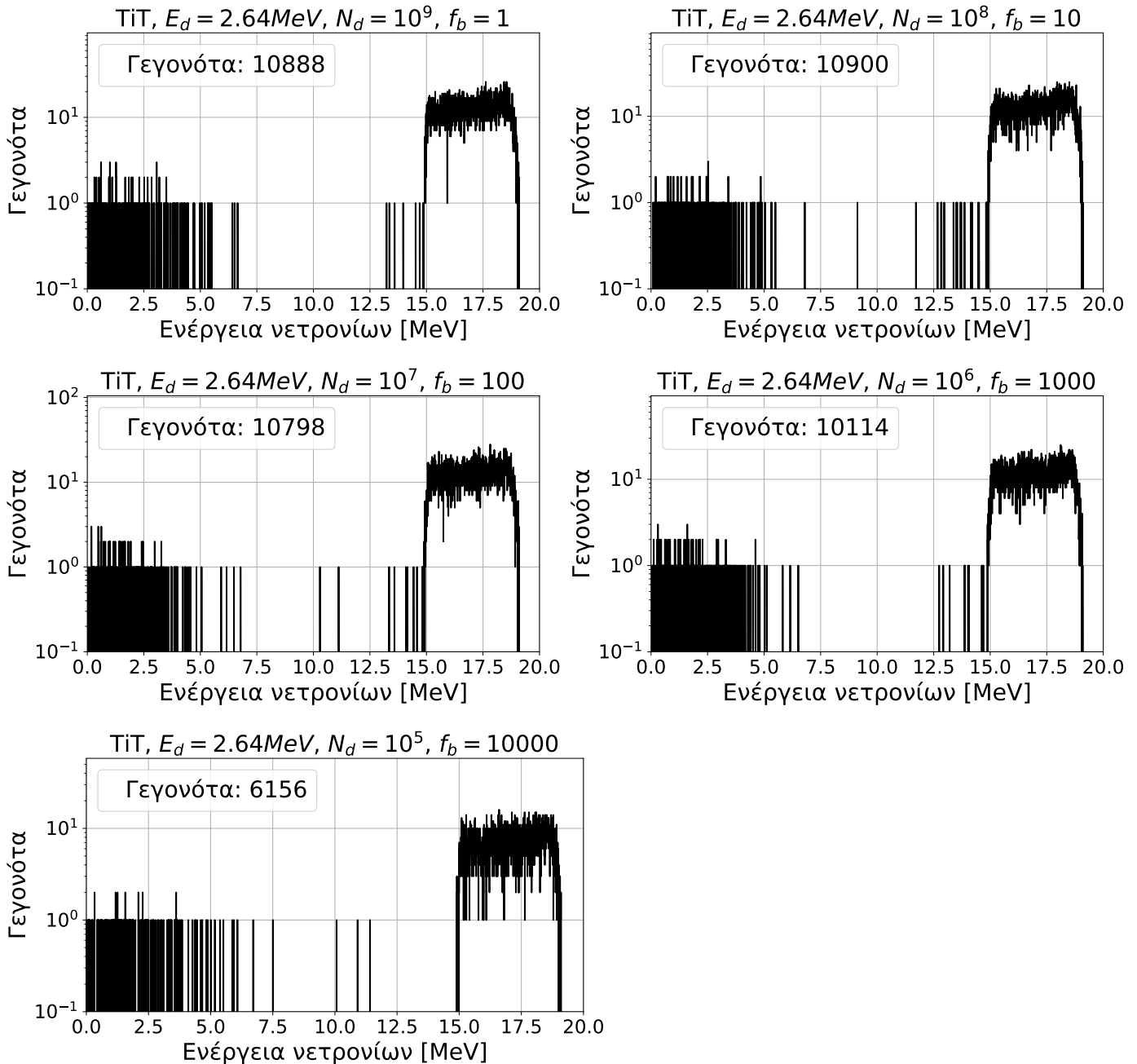


Εικόνες 3.27 και 3.28: Ροή δευτερίων στον ανιχνευτή για τον στόχο TiT ($f_b = 1$ και $f_b = 1000$) με αρχική δέσμη δευτερίων 1.98MeV. Η απώλεια ενέργειας στο στόχο είναι 380keV.

Συνοψίζοντας, για αρχική ενέργεια δέσμης δευτερίων 1.98 MeV στον στόχο TiT, η αλλοίωση της φυσικής της αντίδρασης είναι αναπόφευκτη για την τιμή $f_b = 10000$. Τέλος, για τις τιμές $f_b = 10$, 100 ή 1000 δεν παρουσιάζονται αλλαγές στη στατιστική των γεγονότων στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων και στα σημεία παραγωγής τους, όπως φαίνεται στη σύγκριση των δύο κατανομών των εξερχόμενων δευτερίων στον ανιχνευτή (στις Εικόνες 3.27 και 3.28). Ειδικότερα, δεν υπάρχει αλλοίωση στο ενεργειακό εύρος της κύριας κορυφής για τις δύο περιπτώσεις.

3.3.3 Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.64 MeV

Για αρχική ενέργεια δέσμης δευτερίων 2.64MeV, το ενεργειακό εύρος δευτερίων προς αλληλεπίδραση στον στόχο του ^3H είναι $\Delta E = 310\text{keV}$. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων στις εξαναγκασμένες περιπτώσεις και συγκρίνεται με την αναλογική περίπτωση:

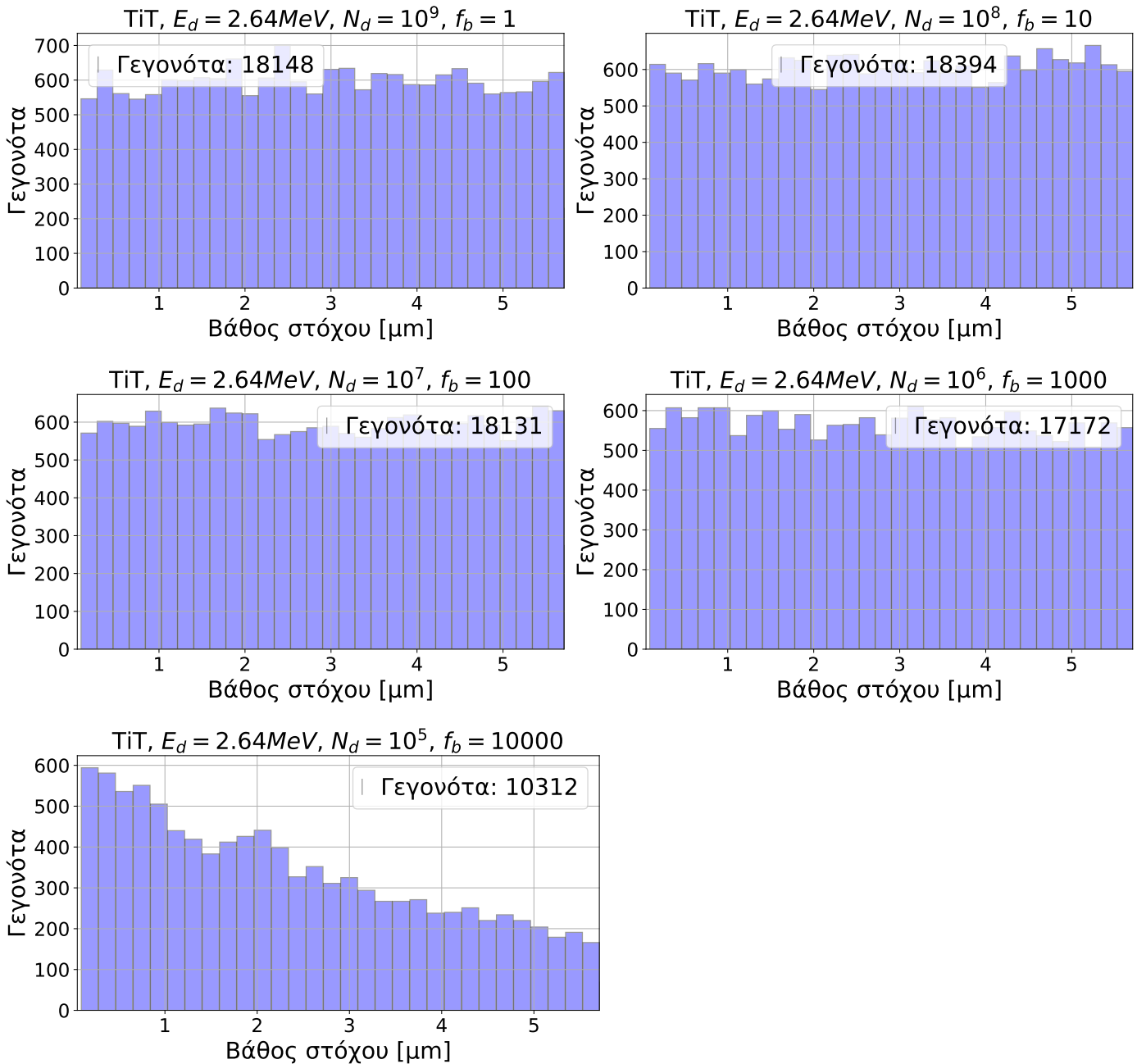


Εικόνα 3.29: Στόχος TiT με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 2.64MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Παρατηρείται αλλοίωση της στατιστικής για $f_b = 10000$ ενώ για $f = 10, 100$ και 1000 υπάρχει μικρή απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση ως προς τον

συνολικό αριθμό των γεγονότων.

Παρακάτω παρουσιάζονται και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων μέσα στον στόχο. Οι σχεδόν μηδενικές διακυμάνσεις των γεγονότων ανά κελί οφείλονται στη σταθερότητα της ενεργού διατομής για τις ενέργειες δευτερίων (από 2.33 ως 2.64MeV) που καλούνται να αλληλεπιδράσουν με τον στόχο:



Εικόνα 3.30: Στόχος TiT με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 2.64keV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με τις προηγούμενες περιπτώσεις, για να γίνουν πιο καθαρές οι διαφορές μεταξύ των σημείων παραγωγής των νετρονίων με την αύξηση του f_b εξάγονται και οι αντίστοιχοι πίνακες που δίνουν τον λόγο

των γεγονότων μεταξύ των τριών περιοχών A,B και Γ (A/B και A/Γ), καθώς και τον λόγο των λόγων των γεγονότων των εξαναγκασμένων περιπτώσεων προς την αναλογική περίπτωση:

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.99	1.94
$f_b = 10$	2.03	1.86
$f_b = 100$	2.05	1.89
$f_b = 1000$	2.03	2.04
$f_b = 10000$	3.33	4.27

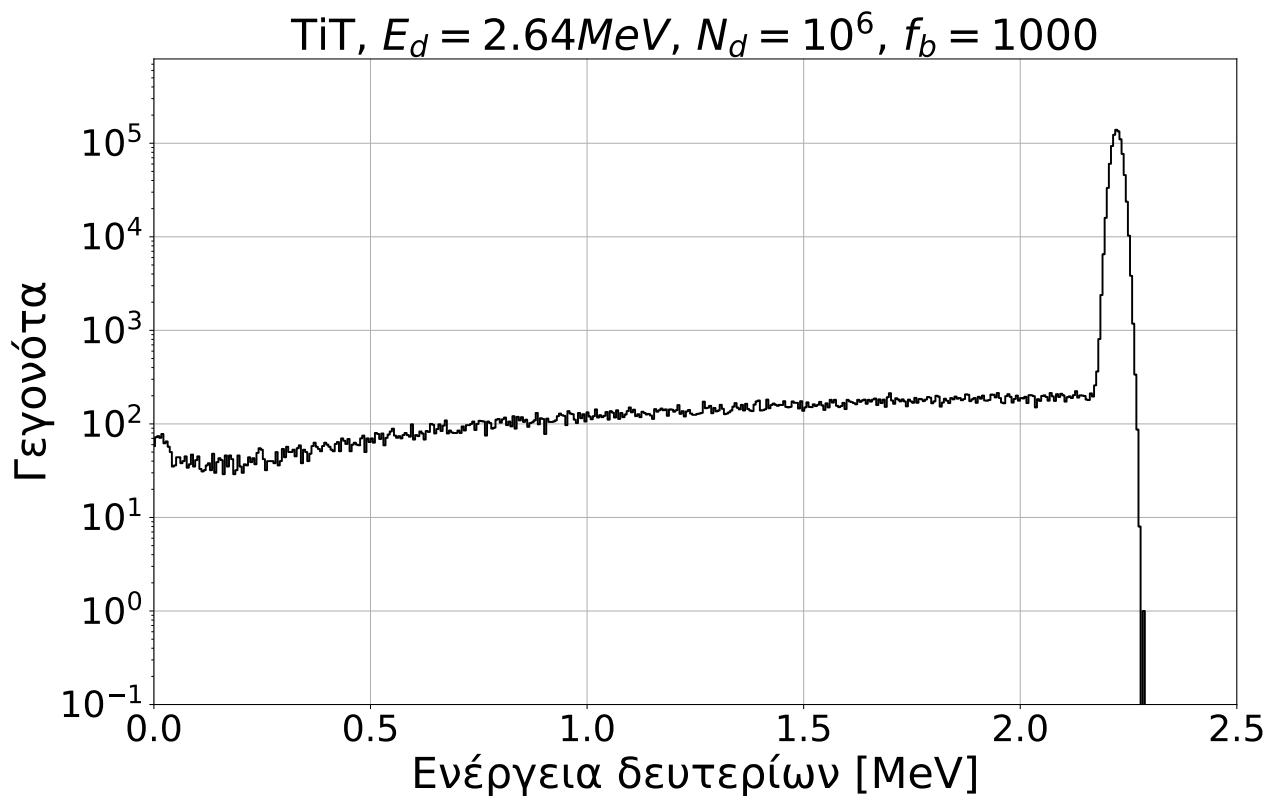
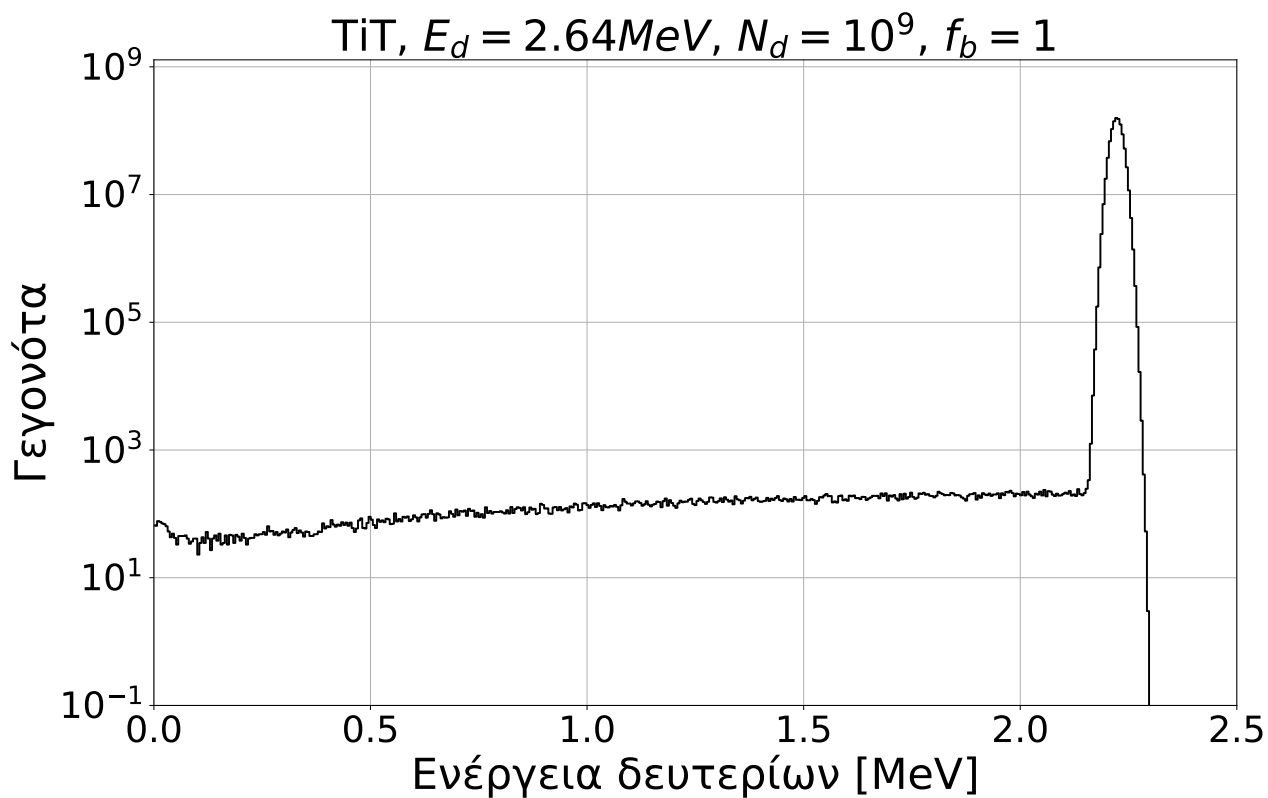
Πίνακας 3.16: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε biasing factor.

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	0.99	1.04
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	0.98	1.02
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.98	0.95
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	0.60	0.45

Πίνακας 3.17: 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 $f_b = 10, 100, 1000, 10000$.

Για την τιμή του παράγοντα εξαναγκασμού 10000, υπάρχουν ευδιάκριτες αλλοιώσεις ως προς την κατανομή των γεγονότων νετρονίων ως συνάρτηση του βάθους οι οποίες δεν είναι συμβατές με την μορφή της ενεργού διατομής για το ^3H . Ωστόσο, για την τιμή $f_b = 1000$ η στατιστική των συνολικών γεγονότων και των σημείων παραγωγής των νετρονίων δεν αποκλίνει σημαντικά από την αναλογική περίπτωση.

Για την ως άνω ιδανική τιμή $f_b = 1000$ που επιλέχθηκε, πρέπει να ελεγχθεί και η ενεργειακή κατανομή των δευτερίων στον ανιχνευτή αφού έχουν χάσει ενέργεια 310keV (Εικόνες 3.31 και 3.32). Μεταξύ της αναλογικής προσομοίωσης και της προσομοίωσης με $f_b = 1000$ δεν παρατηρούνται αλλοιώσεις στη μορφή της κατανομής των δευτερίων στον ανιχνευτή. Ειδικότερα, ως προς τον λόγο της κύριας κορυφής των γεγονότων δευτερίων προς τα υπόλοιπα γεγονότα, στην εξαναγκασμένη περίπτωση παρατηρείται απόκλιση περίπου 5% σε σχέση με την αναλογική περίπτωση.

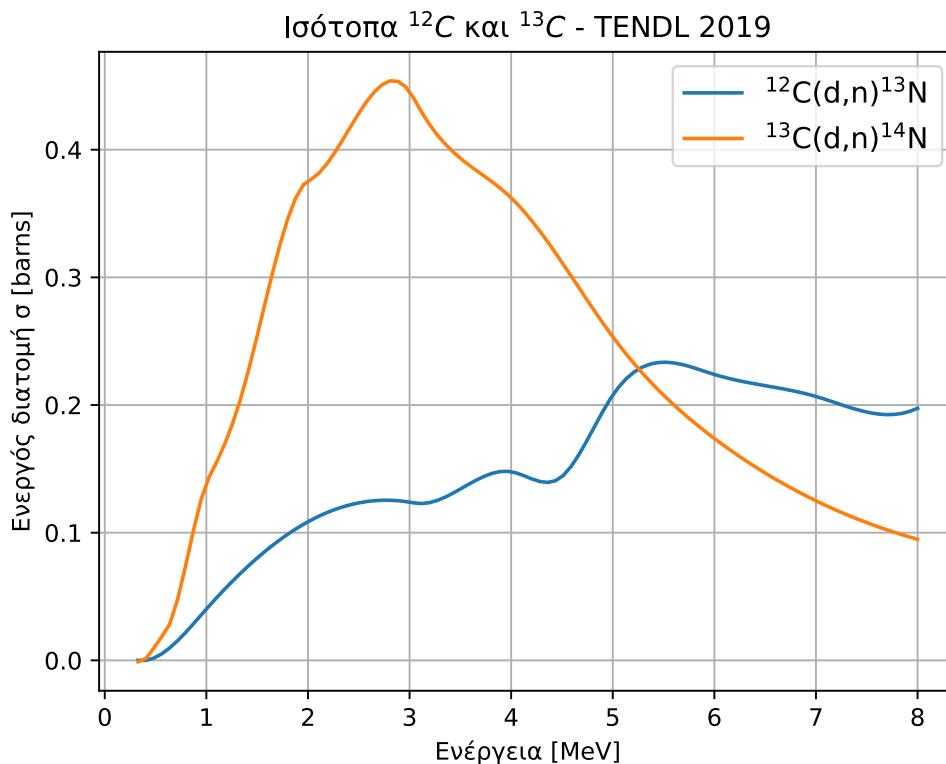


Εικόνες 3.31 και 3.32: Ροή δευτερίων στον ανιχνευτή για λεπτό στόχο αλουμινίου ($f_b = 1$ και $f_b = 1000$) με αρχική δέσμη δευτερίων 3.45MeV . Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο TiT με ενέργεια 2.64MeV . Η απώλεια ενέργειας στο στόχο είναι 300keV .

3.4 Αξιολόγηση της Μεροληπτικής Τεχνικής στον Άνθρακα - $E_d = 3.45\text{MeV}$

Στην πειραματική διάταξη του Δημόκριτου υπάρχει συσσώρευση άνθρακα σε ορισμένα στοιχεία της πειραματικής διάταξης. Τα στοιχεία πάνω στα οποία προσπίπτει η πειραματική αρχική δέσμη δευτερίων και μπορεί να περιέχουν ένα λεπτό στρώμα άνθρακα είναι ο ευθυγραμμιστής και η φλάντζα. Επομένως, είναι αναγκαίο να μελετηθεί η εκ νέου επιμόλυνση της κύριας δέσμης λόγω του άνθρακα που υπάρχει στην πειραματική διάταξη.

Είναι αναγκαία λοιπόν η αξιολόγηση της μεροληπτικής τεχνικής σε στόχο φυσικού άνθρακα καθώς παρουσιάζει χαμηλή στατιστική (λόγω σχετικά χαμηλής ενεργού διατομής - Εικόνα 3.33) η αναλογική προσομοίωση. Έτσι, γίνονται κάποιои έλεγχοι της μεροληπτικής τεχνικής σε παχύ στόχο άνθρακα πάχους τέτοιου, ώστε τα δευτέρια να χάνουν όλη τους την ενέργεια μέσα στον στόχο. Στη συνέχεια, επιλέγεται ένα πολύ λεπτός στόχος άνθρακα πάχους 30nm, ώστε η απώλεια ενέργειας της δέσμης δευτερίων να είναι αμελητέα και να μην επηρεάζει σχεδόν καθόλου το ενεργειακό προφίλ της αρχικής δέσμης δευτερίων.



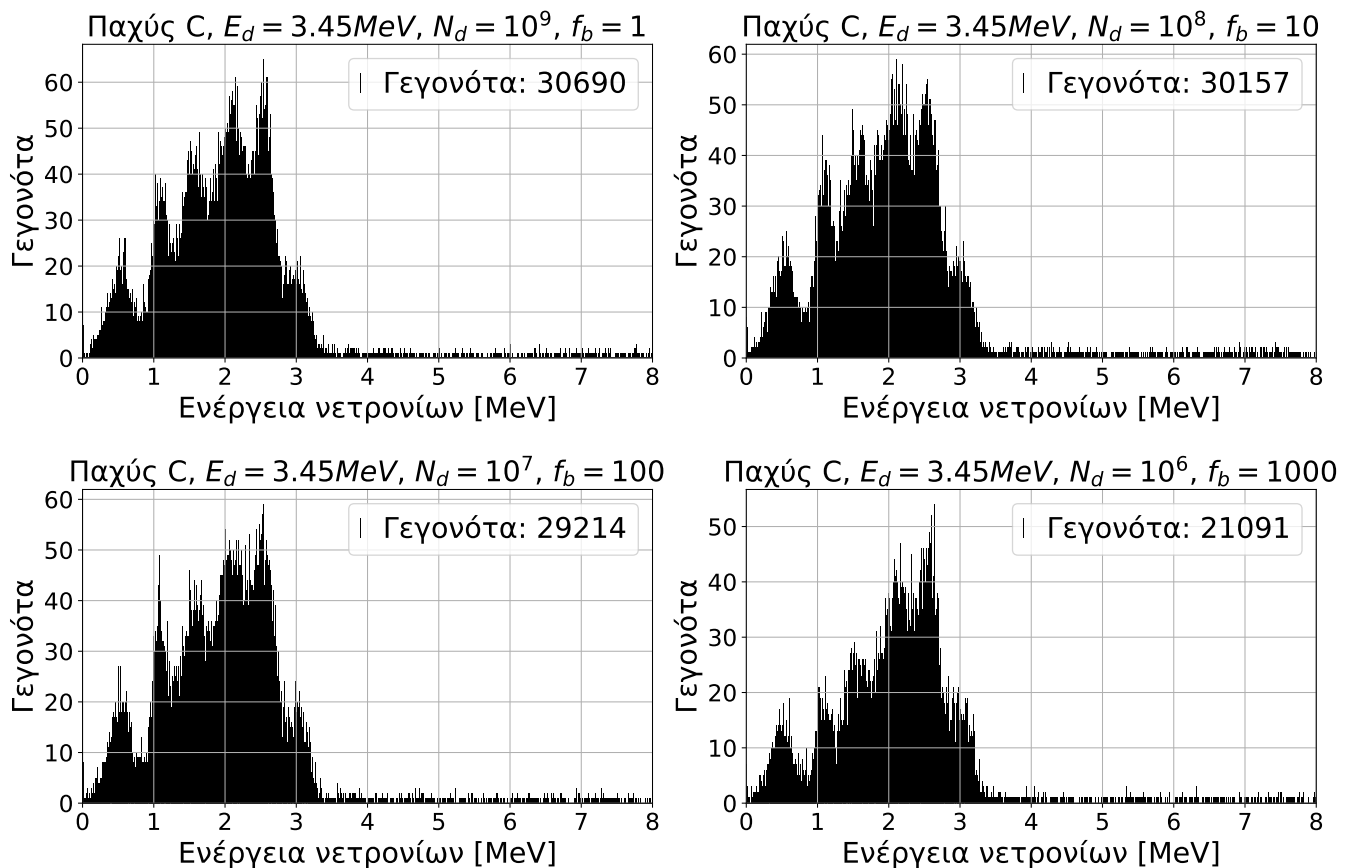
Εικόνα 3.33: Ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στα ισότοπα ^{12}C και ^{13}C .

3.4.1 Παχύς στόχος Άνθρακα

Επιλέχθηκε στόχος φυσικού άνθρακα πάχους 0.1mm και αρχική δέσμη δευτερίων ενέργειας $E_d = 3.45\text{MeV}$. Σε αντίθεση με όλες τις άλλες αντιδράσεις, η αντίδραση $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$ είναι ενδόθερμη με $Q_{value} = -0.28\text{MeV}$ και ενέργεια κατωφλιού

$E_{threshold} = 0.33\text{MeV}$ ⁵. Αυτό σημαίνει ότι το διαθέσιμο εύρος ενεργειών προς αλληλεπίδραση είναι $\Delta E = E_d - E_{threshold} = 3.12\text{MeV}$, και τα δευτέρια με ενέργειες μικρότερες των 0.30MeV δεν αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες του άνθρακα μέσω του καναλιού (d,n).

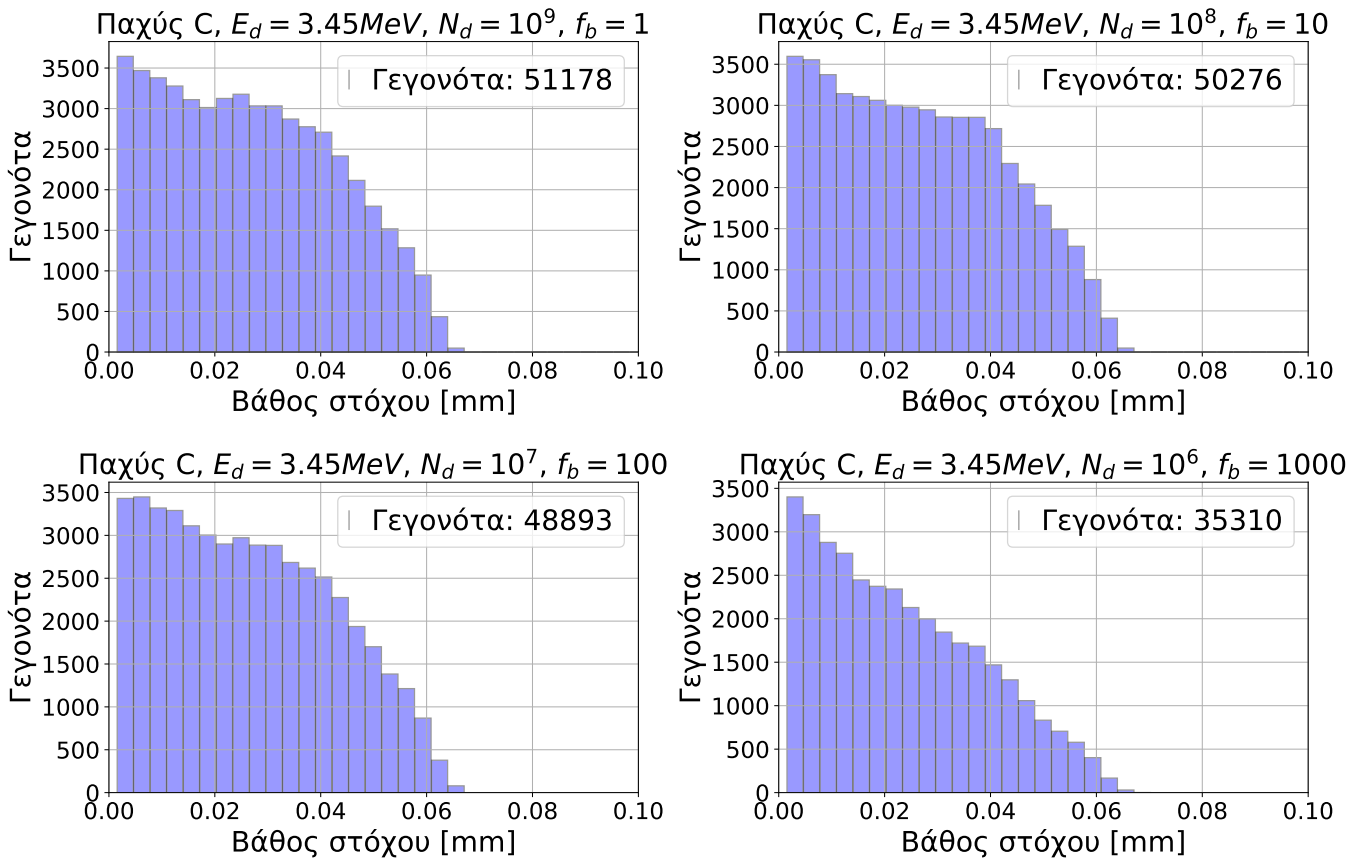
Στις Εικόνες 3.34 και 3.35 παρουσιάζονται οι ενεργειακές κατανομές των νετρονίων που προκύπτουν με την εφαρμογή μεροληπτικής τεχνικής και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων κατά μήκος του στόχου, από την αντίδραση (d,n) στον άνθρακα, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.34: Παχύς στόχος φυσικού άνθρακα με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV . Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο με ενέργεια 3.45MeV . Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Στο ενεργειακό φάσμα (Εικόνα 3.34), γίνονται ευδιάκριτες έξι ενεργειακές κορυφές νετρονίων, οι οποίες μέσω της κινηματικής των αντιδράσεων δίνουν τις ενεργειακές στάθμες του άνθρακα. Ειδικότερα, οι στάθμες του άνθρακα υπολογίζονται βρίσκοντας την μέγιστη ενέργεια των εξερχόμενων νετρονίων και αφαιρώντας από αυτήν κάθε ενεργειακή κορυφή που εμφανίζεται στο ιστόγραμμα.

⁵ $E_{threshold,minimum} = -Q_{value} \cdot \frac{m_{(13N)} + m_{(n)}}{m_{(13N)} + m_{(n)} - m_{(d)}}$ για την αντίδραση $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$



Εικόνα 3.35: Παχύς στόχος φυσικού άνθρακα με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο με ενέργεια 3.45MeV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Με την εφαρμογή μεροληπτικών τεχνικών στον παχύ στόχο άνθρακα, παρατηρείται απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση για $f_b = 1000$, η οποία φαίνεται μέσω της αλλοιωμένης κατανομής στην παραγωγή νετρονίων στον στόχο (Εικόνα 3.36 - $f_b = 1000$), καθώς και στους Πίνακες 3.14 και 3.15:

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.15	2.81
$f_b = 10$	1.17	2.86
$f_b = 100$	1.20	2.96
$f_b = 1000$	1.60	5.10

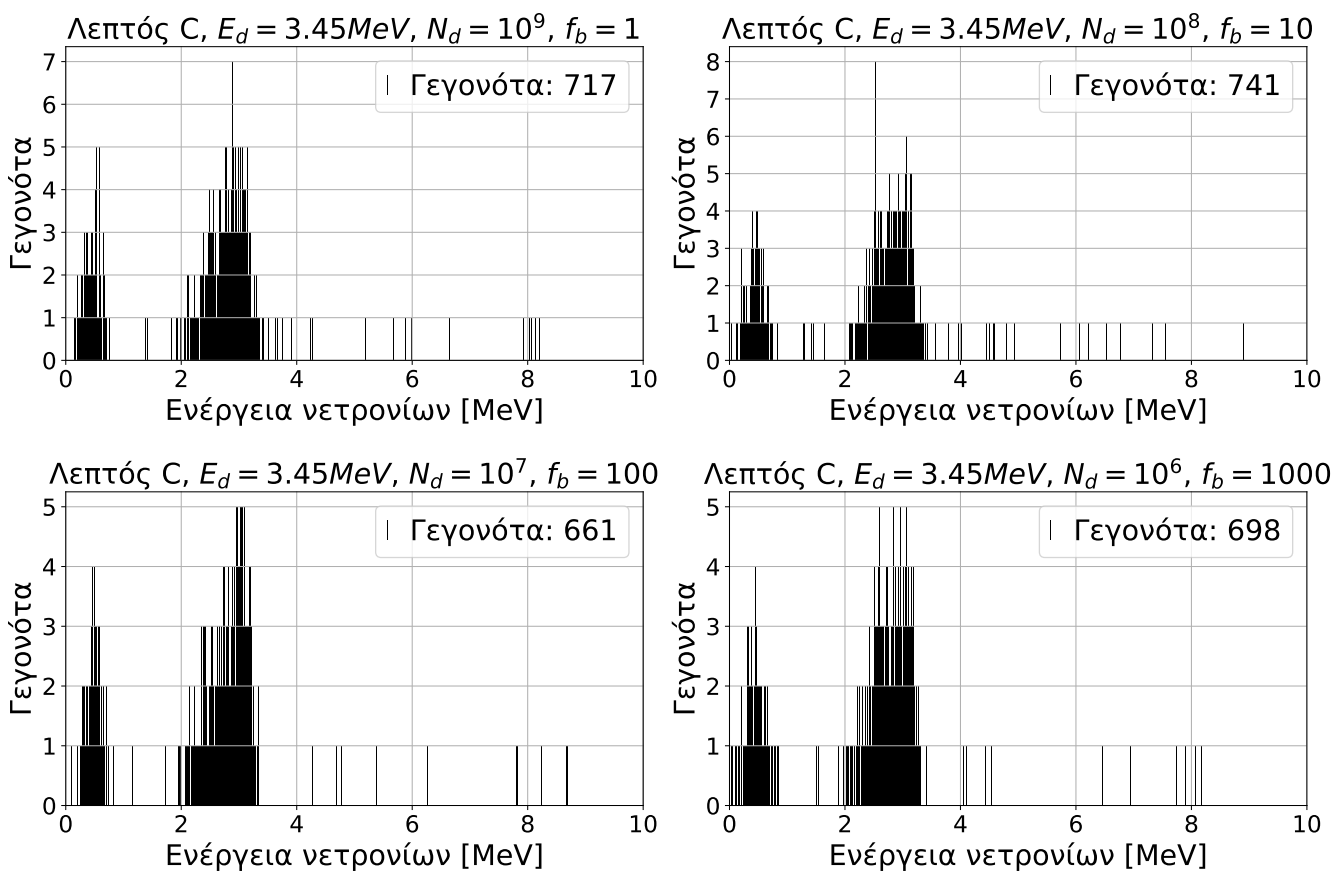
Πίνακας 3.18: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε biasing factor.

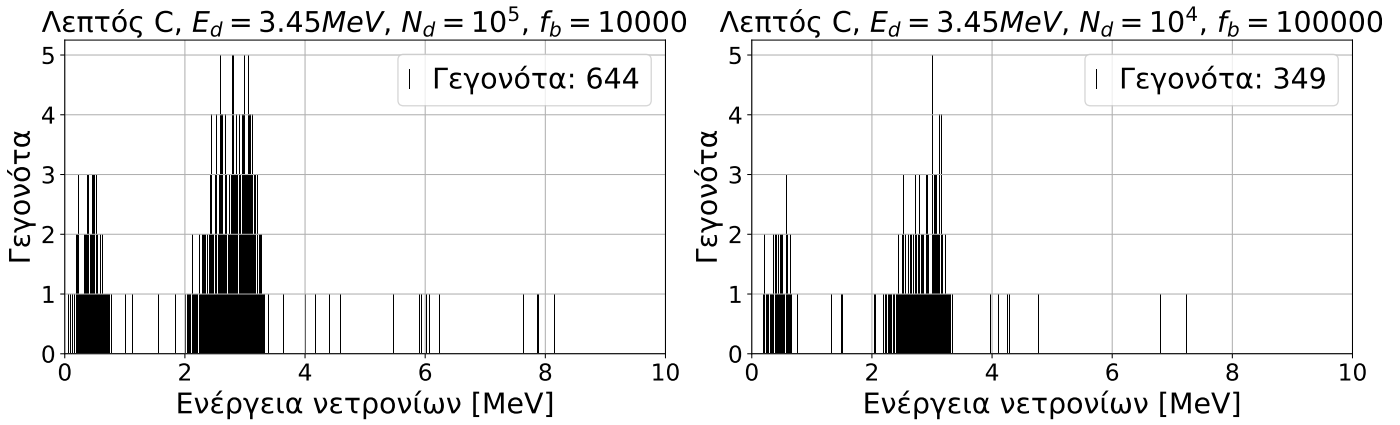
	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	0.98	0.98
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	0.96	0.95
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	0.72	0.55

Πίνακας 3.19: 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 $f_b = 10, 100, 1000$.

3.4.2 Λεπτός στόχος Άνθρακα

Επιλέχθηκε στόχος φυσικού άνθρακα πάχους 30nm με σκοπό την μελέτη των παρασιτικών νετρονίων που προκύπτουν από αντιδράσεις της δέσμης των δευτερίων με επικαλύψεις λαδιού της πειραματικής διάταξης. Το κίνητρο σε αυτή την υποενοότητα είναι η αξιολόγηση της μεροληπτικής τεχνικής στον λεπτό στόχο του άνθρακα, και άρα η επιλογή του κατάλληλου παράγοντα f_b στα τελικά αποτελέσματα που περιέχεται η συνεισφορά παρασιτικών νετρονίων από τον άνθρακα στη διάταξη (Κεφάλαιο 4.6).

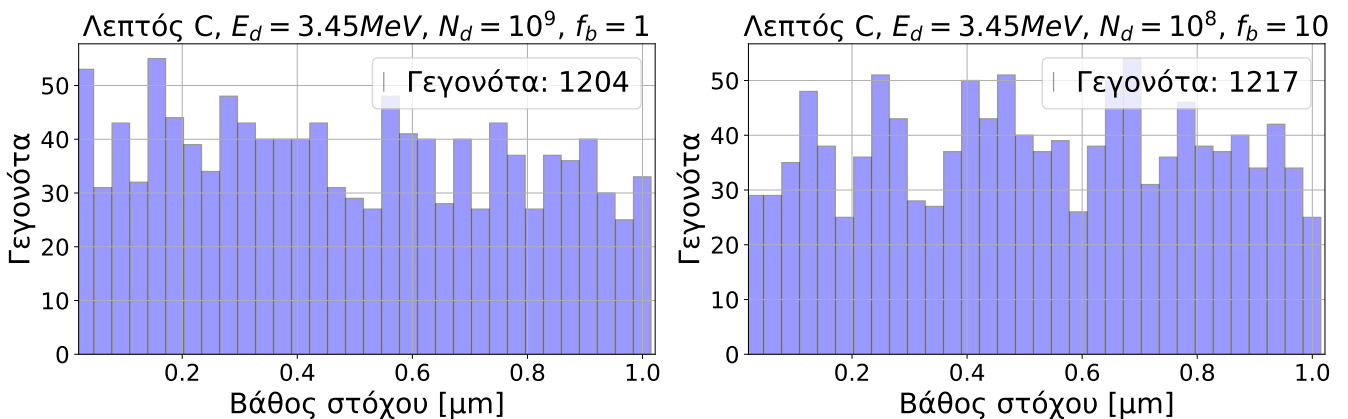


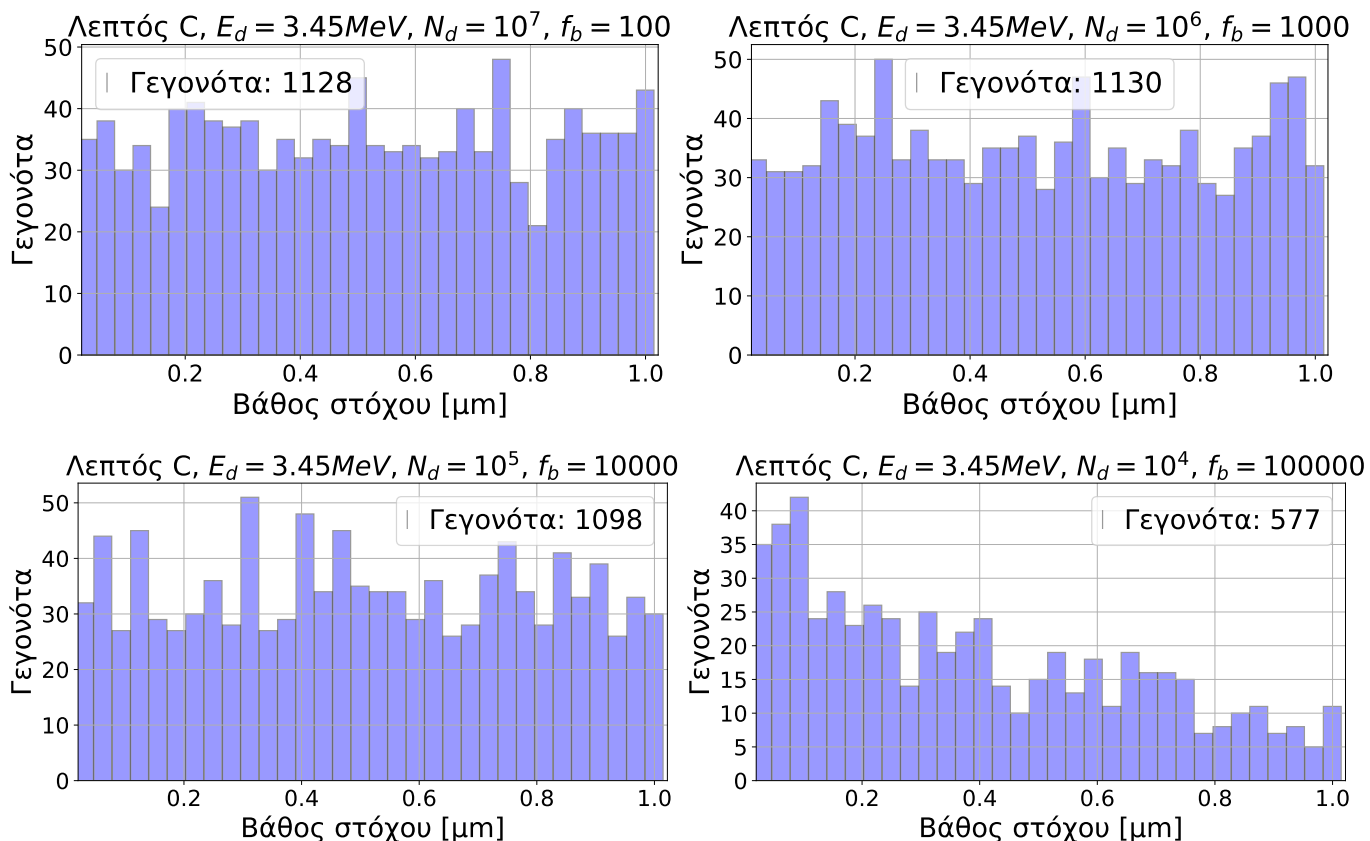


Εικόνα 3.36: Λεπτός στόχος φυσικού άνθρακα με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο με ενέργεια 3.45MeV. Σύγκριση των ενεργειακών κατανομών των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

Από την Εικόνα 3.36 βεβαιώνεται η ύπαρξη χαμηλής στατιστικής στο ενεργειακό φάσμα των νετρονίων, επομένως κρίνεται αναγκαία η χρήση μεροληπτικών τεχνικών ώστε να γίνουν διακριτές τυχόν συνεισφορές παρασιτικών νετρονίων από τον άνθρακα της πειραματικής διάταξης. Παρατηρείται ότι η αντίδραση (d,n) στον άνθρακα εμφανίζει δύο ενεργειακές κορυφές (περίπου 0.5MeV και 2.6MeV), των οποίων οι αναλογίες των μεγίστων γεγονότων τους διατηρούνται σταθερές ακόμα και για $f_b = 10000$ και υπάρχει μικρή αλλοίωση των γεγονότων σε σχέση με την αναλογική περίπτωση.

Ως προς τα σημεία παραγωγής των νετρονίων κατά μήκος του στόχου (Εικόνα 3.37) φαίνεται μεγάλη απομάκρυνση για $f_b = 100000$ (όπως φαίνεται και στους Πίνακες 3.14 και 3.15), ενώ για $f_b = 10000$ δεν υπάρχει σημαντική αλλοίωση ως προς τα γεγονότα νετρονίων και τη μορφή της κατανομής.





Εικόνα 3.37: Λεπτός στόχος φυσικού άνθρακα με αρχική ενέργεια δευτερίων 3.45MeV. Τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο με ενέργεια 3.45MeV. Σύγκριση των σημείων παραγωγής των νετρονίων των μη αναλογικών περιπτώσεων ($f = 10, 100, 1000, 10000, 100000$) με την αναλογική περίπτωση ($f_b = 1$).

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
Analog ($f_b = 1$)	1.11	1.05
$f_b = 10$	0.93	0.78
$f_b = 100$	1.032	0.83
$f_b = 1000$	1.07	0.87
$f_b = 10000$	1.00	0.88
$f_b = 100000$	1.70	2.10

Πίνακας 3.20: Λόγοι των ολοκληρωμάτων (γεγονότων) A/B και A/Γ για τις τρεις περιοχές για κάθε f_b .

	Περιοχή A/B	Περιοχή A/Γ
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10}$	1.19	1.35
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100}$	1.08	1.27
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=1000}$	1.04	1.20
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=10000}$	1.12	1.19
$\frac{Analog(f_b=1)}{f_b=100000}$	0.66	0.50

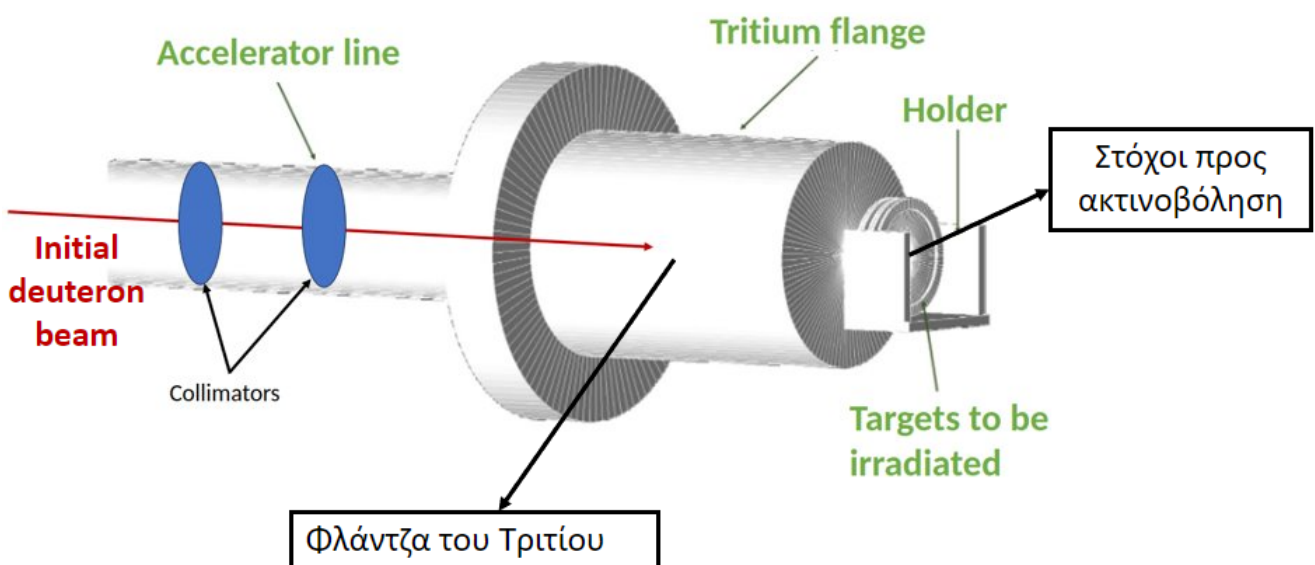
Πίνακας 3.21: Οι λόγοι μεταξύ των λόγων των γεγονότων των περιοχών A/B και A/Γ της αναλογικής περίπτωσης ως προς τους λόγους των γεγονότων των ίδιων περιοχών που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για $f_b = 10, 100, 1000, 10000, 100000$.

Τελικά, η τιμή που έχει επιλεχθεί και έχει χρησιμοποιηθεί στα τελικά αποτελέσματα (Κεφάλαιο 4.5) είναι $f_b = 1000$ σε λεπτό στόχο φυσικού άνθρακα.

4 Χαρακτηρισμός της ροής των νετρονίων για την πειραματική διάταξη

Στο παρόν Κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική αναφορά στη προσομοιωμένη διάταξη (Κεφάλαιο 4.1) η οποία βασίζεται στη πειραματική διάταξη του επιταχυντή TAN-DEM στον Δημόκριτο. Αφού έχει γίνει αξιολόγηση της μεροληπτικής τεχνικής στα στοιχεία της φλάντζας (Κεφάλαιο 3), θα χρησιμοποιηθεί εκ νέου η τεχνική και στα τελικά αποτελέσματα (Κεφάλαιο 4.2), με σκοπό την ποσοτικοποίηση παρασιτικών νετρονίων που επιμολύνουν την δέσμη της κύριας αντίδρασης ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$. Στην αρχή γίνεται σύγκριση της προσομοίωσης του GEANT4 με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση των κωδίκων MCNP NeuSDesc για τις τρεις ενέργειες ενδιαφέροντος (Κεφάλαιο 4.4) και στη συνέχεια εφαρμόζονται κάποιες αλλαγές στη διάταξη (Κεφάλαιο 4.5): (α) προσθήκη δέσμης δευτερίων με χωρική διασπορά και (β) προσθήκη της συνεισφοράς παρασιτικών νετρονίων μέσω αντιδράσεων (d,n) στον φυσικό άνθρακα.

4.1 Γεωμετρία της Πειραματικής Διάταξης



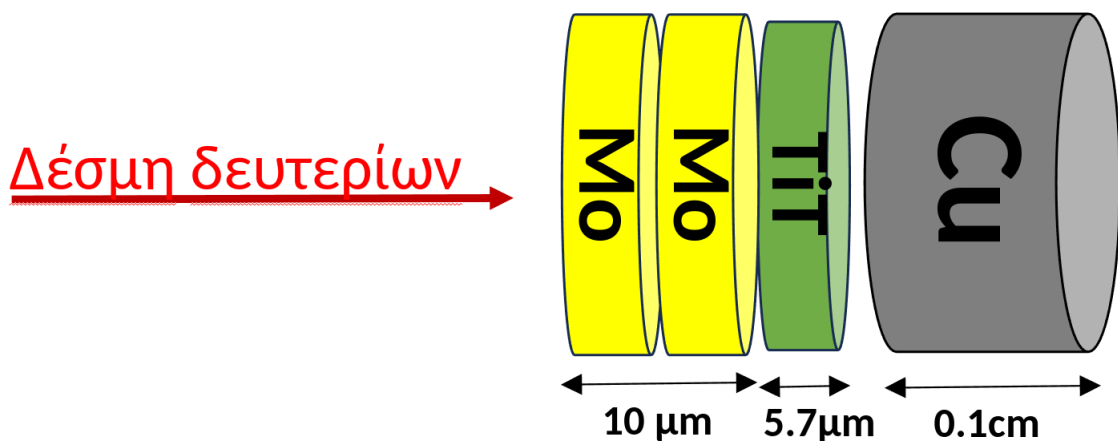
Εικόνα 4.1: Οπτικοποίηση της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης του Δημόκριτου μέσω του GEANT4. Η αρχική δέσμη δευτερίων (Initial deuteron beam) εικονίζεται με κόκκινο χρώμα, στη συνέχεια φαίνεται η επιταχυντική γραμμή (accelerator line), οι δύο ευθυγραμμιστές (collimators), η φλάντζα του τριτίου (tritium flange) και οι στόχοι προς ακτινοβολήση (Targets to be irradiated) που βρίσκονται πάνω σε μία βάση (holder).

Η γεωμετρία της πειραματικής διάταξης που έχει ορισθεί μέσω του GEANT4 (Εικόνα 4.1) αποτελείται από:

1. Σημειακή πηγή δευτερίων: Τα δευτέρια προέρχονται από μία σημειακή πηγή η οποία έχει τοποθετηθεί 130cm μακριά από τη φλάντζα του κύριου στόχου και δεν παρουσιάζει καμία χωρική ή ενεργειακή διασπορά. Οι ενέργειες δευτερίων που μελετήθηκαν στη προσομοίωση είναι 2.11, 2.9 και 3.45 MeV, και είναι

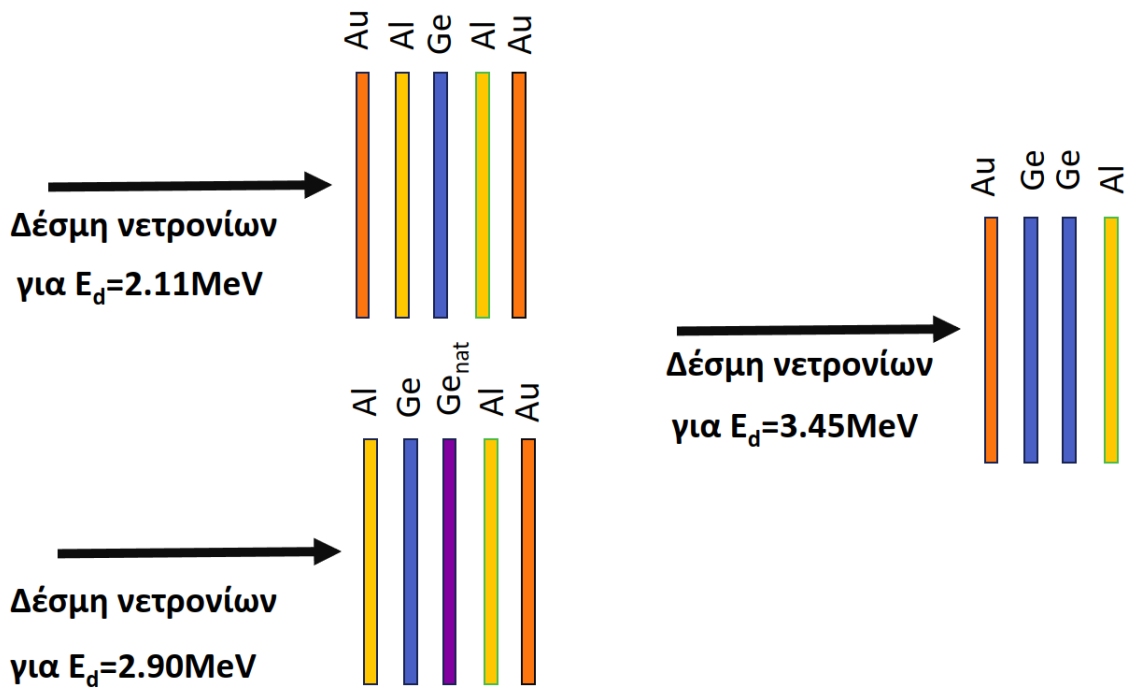
ίδιες με αυτές του πραγματικού πειράματος που έγινε στο Ερευνητικό Κέντρο Φυσικών Επιστημών "Δημόκριτος", στον επιταχυντή TANDEM.

2. Επιταχυντική γραμμή: Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η οπτικοποίηση της επιταχυντικής γραμμής μέσω του GEANT4. Η επιταχυντική γραμμή αποτελείται από τον επιταχυντικό σωλήνα, τον οποίον διασχίζουν τα δευτέρια και είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ασάλι. Στη γραμμή περιλαμβάνονται δύο ευθυγραμμιστές (collimators) οι οποίοι τοποθετούνται πάνω σε μία διατρητή βάση από αλουμίνιο και απέχουν μεταξύ τους 40cm.
3. Φλάντζα του τριτίου (Εικόνα 4.1): Η φλάντζα αποτελείται από δύο λεπτά φύλλα μολυβδαινίου (Mo), τον στόχο του τριτίου (TiT) και έναν παχύ στόχο χαλκού (Cu). Τα δύο φύλλα του στόχου Mo έχουν πάχος 5 μ m (το καθένα) και ακτίνα 1.425cm. Ο κύριος στόχος του τριτίου έχει πάχος 5.7 μ m και ακτίνα 1.27cm και αποτελείται από τρίτιο (42.8%), τιτάνιο (39.3%) και από ^3He (17.9%), λόγω της αποδιέγερσης του τριτίου. Τέλος, ο στόχος του χαλκού έχει πάχος 0.1cm και ακτίνα 1.425cm. Επιλέγεται να είναι παχύς έτσι ώστε τα δευτέρια να χάνουν όλη την ενέργεια τους εντός του στόχου.



Εικόνα 4.2: Τα υλικά από τα οποία αποτελείται η φλάντζα του τριτίου.

4. Στόχοι προς ακτινοβόληση: Για κάθε ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων έχουν προστεθεί μέσω του GEANT4 διαφορετικοί στόχοι ακτινοβόλησης, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.3. Οι κυλινδρικοί αυτοί στόχοι αυτοί βρίσκονται πάνω σε μία βάση (holder) που αποτελείται από αλουμίνιο και σίδηρο. Τέλος, έχει προστεθεί ερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (mylar) στους δακτύλιους των στόχων.



Εικόνα 4.3: Στόχοι προς ακτινοβόληση για τις τρεις ενέργειες ενδιαφέροντος.

Στην Εικόνα 4.1, οι στόχοι αυτοί τοποθετούνται πάνω σε μία βάση (holder) από σίδηρο, η οποία βρίσκεται σε απόσταση 3.4cm από το τέλος της φλάντζας για ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.11 MeV, και σε απόσταση 2.3cm για τις άλλες ενέργειες δευτερίων. Ο κάθε κυλινδρικός στόχος (target) έχει διαφορετικό πάχος, και τοποθετούνται αλουμινένια ή σιδερένια δακτυλίδια (rings) εσωτερικής ακτίνας 2.43cm και εξωτερικής ακτίνας 2.98cm. Επιπλέον, ο κάθε στόχος περιλαμβάνεται και από έναν κυλινδρικό όγκο που αποτελείται από πολυστυρένιο (mylar) εσωτερικής ακτίνας 0cm και εξωτερικής ακτίνας 2.43cm. Στο Παράρτημα φαίνεται αναλυτικότερα το πως έχουν ορισθεί στο GEANT4 οι όγκοι, οι γεωμετρίες και τα στοιχεία που βρίσκονται αμέσως μετά τη φλάντζα.

4.2 Επιλογή του κατάλληλου f_b

Στο Κεφάλαιο 3 εξετάστηκε η απομάκρυνση από την αναλογική περίπτωση υπό την εφαρμογή μεροληπτικών τεχνικών. Έχει επιλεχθεί παρακάτω η κατάλληλη τιμή για τον παράγοντα εξαναγκασμού f_b για κάθε στοιχείο της φλάντζας:

1. Στόχος Mo:

- Δέσμη δευτερίων $E_d = 2.11$ και 2.90 MeV: Στην ενέργεια αυτή παρατηρείται σχεδόν μηδενική ενεργός διατομή για την αντίδραση (d,n) στο Mo και επομένως δεν κρίνεται απαραίτητο να εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική. Συγκεκριμένα, έγιναν προσομοιώσεις με μεγάλους παράγοντες εξαναγκασμού σε αυτές τις ενέργειες και δεν υπήρξε παραγωγή νετρονίων.
- Δέσμη δευτερίων $E_d = 3.45$ MeV: Η ενεργός διατομή είναι χαμηλή, ωστόσο με την εφαρμογή μεροληπτικής τεχνικής στον στόχο μολυβδαινίου υπήρχαν

γεγονότα νετρονίων τα οποία δεν μπορούν να αγνοηθούν. Παρατηρήθηκε επιπλέον ότι ακόμα και για μεγάλες τιμές του παράγοντα f_b δεν υπάρχουν μεγάλες αλλοιώσεις ως προς την παραγωγή των νετρονίων στον στόχο. Για αυτόν τον λόγο, στην ενέργεια αυτή εφαρμόστηκε $f_b = 1000$ για τον στόχο του μολυβδαινίου.

2. Στόχος TiT:

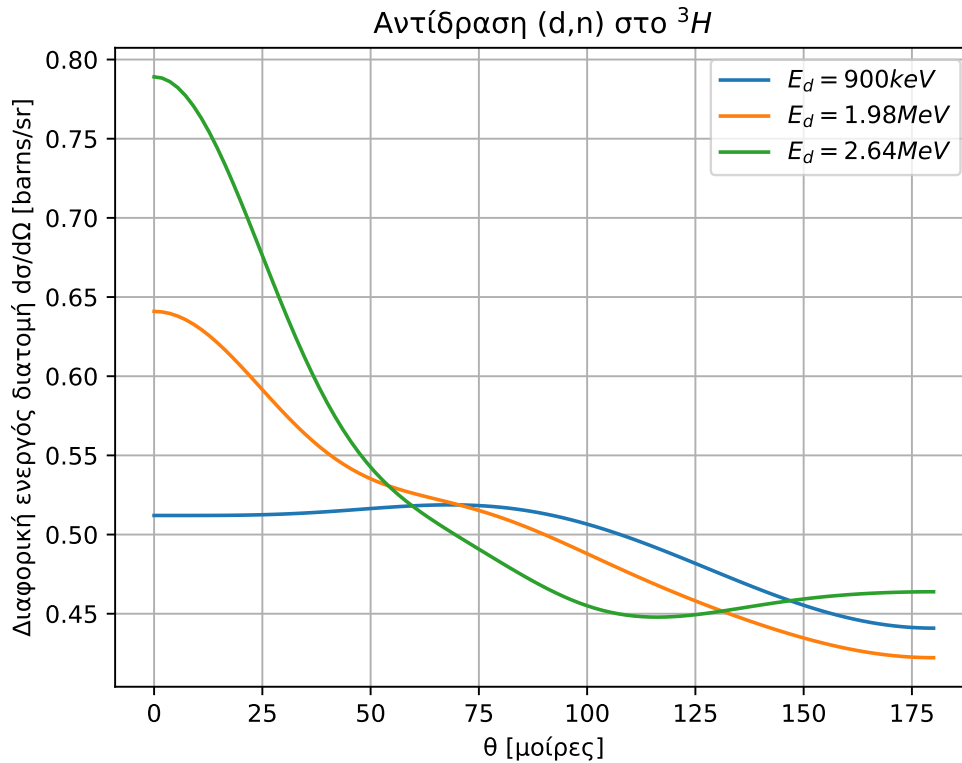
- Για όλες τις ενέργειες αρχικής δέσμης δευτερίων, κρίθηκε ακατάλληλη η επιλογή $f_b = 10000$ εξετάζοντας το ενεργειακό φάσμα και τα σημεία παραγωγής των νετρονίων στον στόχο. Ωστόσο, για $f_b = 1000$, δεν υπάρχει ιδιαίτερη αλλοίωση της φυσικής της αντίδρασης. Για αυτόν τον λόγο, επιλέχθηκε η τιμή 1000 στον στόχο TiT σε όλες τις τελικές προσομοιώσεις.

3. Στόχος Cu:

- Αντίστοιχα, όπως στο μολυβδάνιο, δεν υπάρχουν στον χαλκό γεγονότα νετρονίων για αρχικές ενέργειες δευτερίων 2.11 και 2.90 MeV, ενώ για την υψηλότερη ενέργεια (3.45MeV) παρατηρούνται γεγονότα νετρονίων και η ενεργός διατομή είναι μη μηδενική. Στην ενέργεια αυτή και μόνο, εφαρμόστηκε $f_b = 100$ για τον στόχο του χαλκού.

4.3 Ανελαστικές σκεδάσεις (n,xn) για τους στόχους Mo, Cu και το ισότοπο ^{48}Ti του στόχου TiT

Οι προσομοιώσεις για τον στόχο του ^3H του Κεφαλαίου 3 έγιναν χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή πολύ μεγάλης ακτίνας (30cm) σε απόσταση 1cm μακριά από τον στόχο, καλύπτοντας έτσι στερεά γωνία ανίχνευσης 2π . Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να παρατηρηθούν στα ενεργειακά φάσματα γεγονότα νετρονίων από την αντίδραση (d,n) στο τρίτιο σε γωνίες ανίχνευσης $0 < \theta < 90^\circ$. Όμως, υπάρχει και μεγάλη πιθανότητα να προκύψουν νετρόνια και σε γωνίες $\theta > 90^\circ$. Παρακάτω (Εικόνα 4.4) φαίνεται η εξάρτηση διαφορικής ενεργού διατομής της αντίδρασης από την γωνία θ εκπομπής των νετρονίων, για ενέργειες δευτερίων 0.91, 1.98 και 2.64 MeV. Αυτές είναι οι ενέργειες με τις οποίες εισέρχονται τα δευτέρια στον στόχο του τρίτιου για τις τρεις ενέργειες ενδιαφέροντος (Πίνακας 3.11).

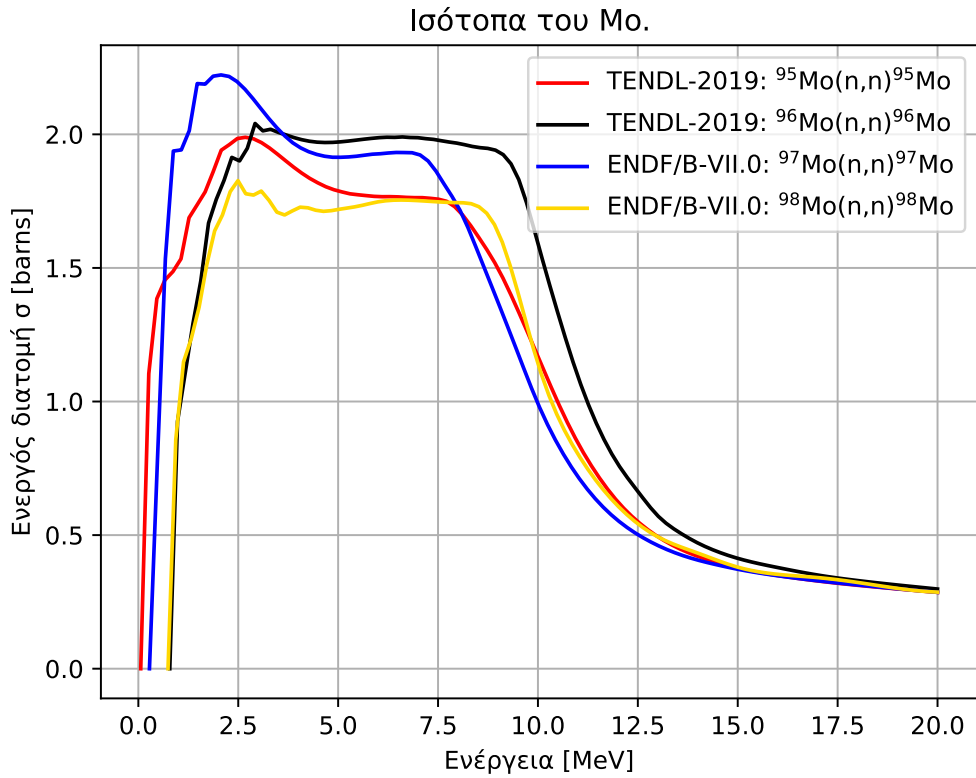


Εικόνα 4.4: Εξάρτηση της διαφορικής ενεργού διατομής από την γωνία θ εκπομπής των νετρονίων για την αντίδραση (d,n) στο τρίτιο χρησιμοποιώντας τα πολυώνυμα Legendre από τη βιβλιοθήκη της ENDF για τις ενέργειες $E_d = 0.91, 1.98, 2.64$ MeV. Η διαφορική ενεργός διατομή είναι κανονικοποιημένη στη μονάδα.

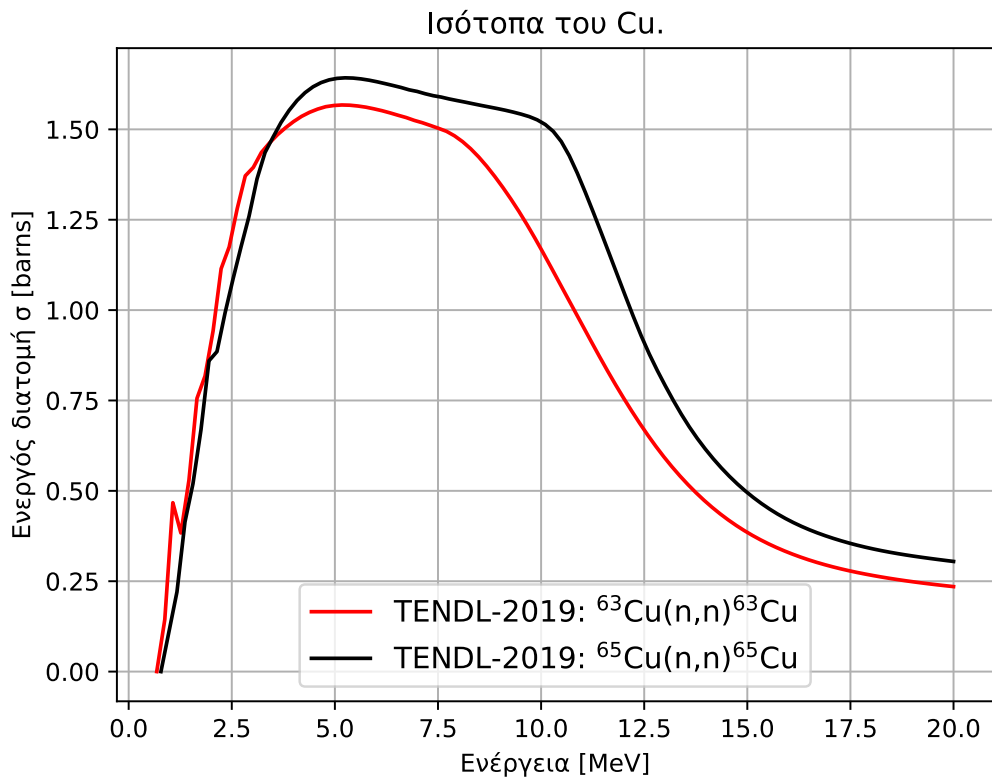
Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ευνοείται η παραγωγή νετρονίων σε μεγάλες γωνίες και είναι συχνότερη στην χαμηλότερη ενέργεια δευτερίων. Πράγματι, υπάρχει έντονη σκέδαση νετρονίων σε γωνίες $\theta > 90^\circ$, τα οποία αλληλεπιδρούν ανελαστικά με τους πυρήνες του μολυβδαινίου και σκεδάζονται εκ νέου σε μεγάλες γωνίες, οπότε και επιμολύνουν την κύρια κορυφή της αντίδρασης $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$. Από την παραπάνω εικόνα, είναι εύκολα παρατηρήσιμο πως, για χαμηλότερες ενέργειες δευτερίων, η παραγωγή των νετρονίων σε γωνίες $\theta > 90^\circ$ ευνοείται, καθώς η διαφορική ενεργός διατομή γίνεται συγκρίσιμη με την αντίστοιχη τιμή της για την γωνία των μηδέν μοιρών. Το γεγονός αυτό, φέρει ως αποτέλεσμα την παρατήρηση αυξημένου αριθμού νετρονίων που παράγονται σε μεγάλες γωνίες από τη βασική αντίδραση, τα οποία στη συνέχεια, καθώς σκεδάζονται ανελαστικά με τα στοιχεία της φλάντζας, αυξάνουν αντίστοιχα και τον αριθμό των νετρονίων που καταγράφονται στο φάσμα του ανιχνευτή για ενέργειες χαμηλότερες αυτών της κύριας κορυφής. Τα νετρόνια που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία έχουν συμπεριληφθεί επαρκώς στα τελικά αποτελέσματα.

Εκτός από το μολυβδαίνιο, ανελαστικές σκεδάσεις συμβαίνουν με μεγάλη πιθανότητα με τους πυρήνες χαλκού, τιτανίου και τα υπόλοιπα στοιχεία της πειραματικής διάταξης (ταντάλιο, αλουμίνιο) στο ενεργειακό εύρος νετρονίων 0 - 15 MeV.

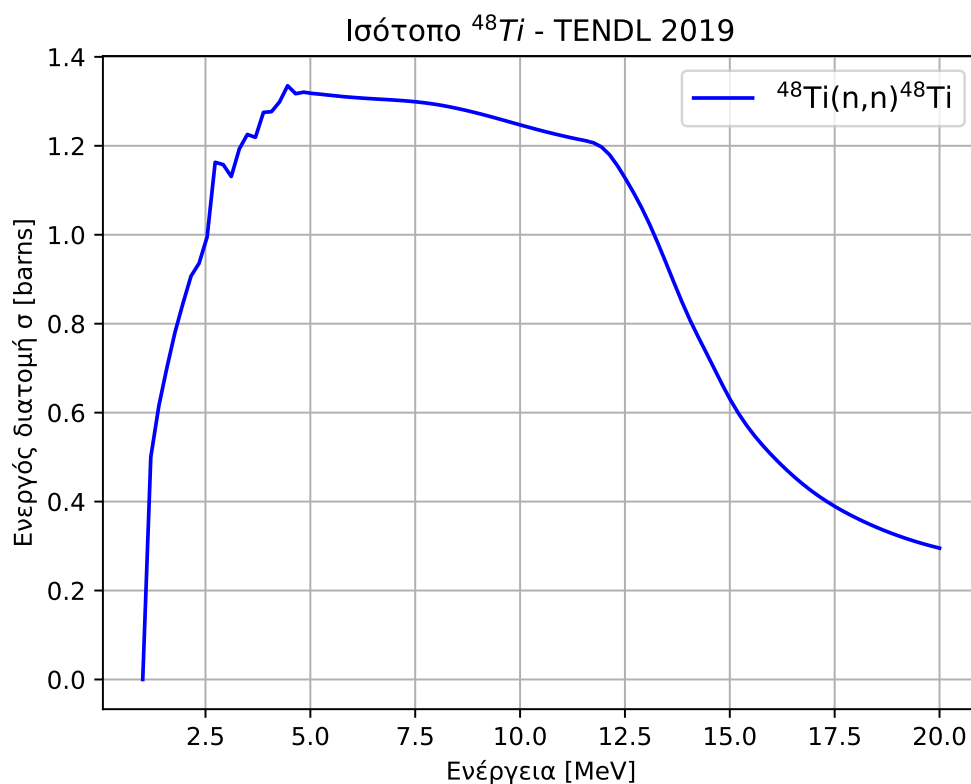
Παρακάτω παρατίθενται οι ενεργές διατομές για τις ανελαστικές σκεδάσεις των νετρονίων στο μολυβδαίνιο, στον χαλκό και στο τιτάνιο από 0 - 20 MeV:



Εικόνα 4.5: Ενεργός διατομή για το κανάλι (n,n') στα ισότοπα του μολυβδαίνιου.



Εικόνα 4.6: Ενεργός διατομή για το κανάλι (n,n') στα ισότοπα του χαλκού.



Εικόνα 4.7: Ενεργός διατομή για το κανάλι (n,n') στο τιτάνιο.

4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

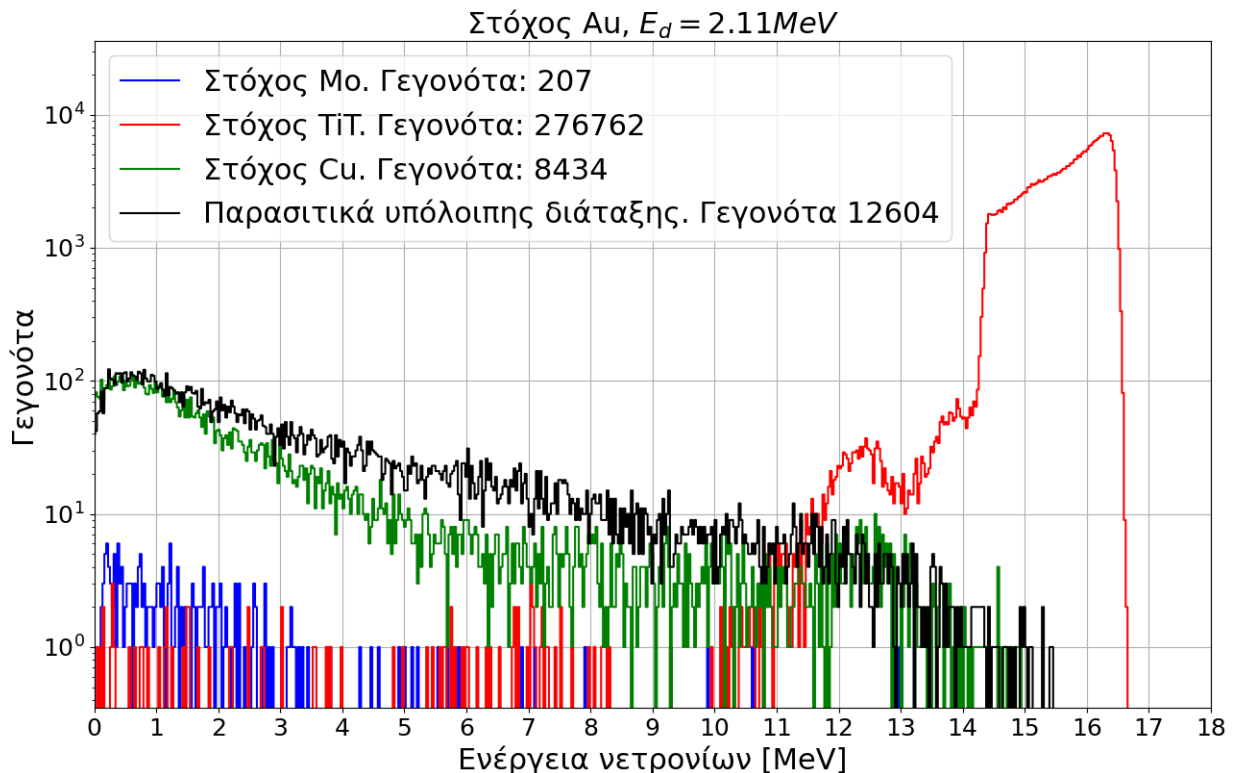
Στις τρεις ενέργειες ενδιαφέροντος δευτεριών (με $N_d = 10^9$ γεγονότα) έχει καταγραφεί μέσω του κώδικα GEANT4 η ροή των νετρονίων τα οποία εισέρχονται σε κάθε στόχο της βάσης (holder). Στα παρακάτω αποτελέσματα, θα παρουσιαστεί η ροή για την περίπτωση καταγραφής γεγονότων μόνο για τον πρώτο στόχο και για κάθε ενέργεια με γραμμική κατανομή κελιών για το εκάστοτε ιστόγραμμα. Στα ιστογράμματα των προσομοιώσεων θα παρουσιαστεί επίσης η συνεισφορά των νετρονίων από κάθε όγκο της γεωμετρίας της φλάντζας χωριστά (σύμφωνα με το GEANT4). Έπειτα, θα γίνει σύγκριση της ροής των συνολικών γεγονότων νετρονίων με την αντίστοιχη προσομοίωση της ροής των νετρονίων από τον κώδικα MCNP σε συνδυασμό με το κώδικα NeuSDesc. Το ολοκλήρωμα της ροής που προκύπτει από το MCNP έχει κανονικοποιηθεί ως προς το ολοκλήρωμα των γεγονότων όπως προκύπτει από το GEANT4 για την διευκόλυνση της ποιοτικής σύγκρισης μεταξύ τους.

Οι όγκοι που συνεισφέρουν στην συνολική ροή είναι ο στόχος του μολυβδαινίου, ο στόχος του τιτανιωμένου τριτίου, ο στόχος του χαλκού καθώς επίσης και τα παρασιτικά νετρόνια της υπόλοιπης διάταξης (φλάντζας αλουμινίου και λοιπά στοιχεία της πειραματικής γραμμής). Όπως ήδη αναφέρθηκε, εξαιτίας της χαμηλής ενεργού διατομής της αντίδρασης (d,n) στο μολυβδαίνιο και στο χαλκό, η μεγαλύτερη συνεισφορά των νετρονίων από αυτούς τους στόχους, οφείλεται στις ανελαστικές

σχεδιάσεις των νετρονίων της κύριας αντίδρασης του τριτίου μέσα σε αυτούς.

4.4.1 Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.11 MeV

Η αρχική δέσμη δευτερίων έχει ενέργεια 2.11MeV. Η συνεισφορά στα γεγονότα νετρονίων από τον κάθε όγκο της πειραματικής διάταξης χωριστά φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



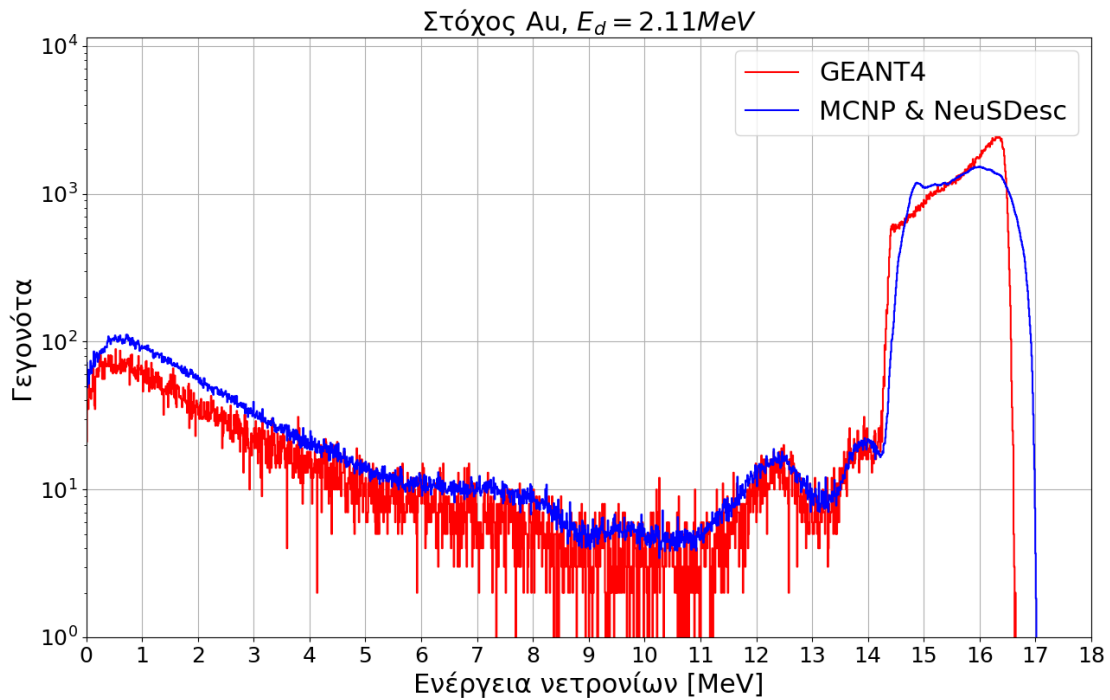
Εικόνα 4.8: Κατανομή των νετρονίων που εισέρχονται στον πρώτο στόχο της βάσης (Au) όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT4 για ενέργεια δευτερίων $E_d = 2.11\text{MeV}$. Φαίνεται η συνεισφορά των νετρονίων που προέρχονται από τους στόχους Μολυβδαινίου, Τριτίου - Τιτανίου, Χαλκού και των υπόλοιπων παρασιτικών νετρονίων.

Από τους στόχους Mo και Cu δεν παρατηρούνται γεγονότα νετρονίων από αντιδράσεις (d,n) στους εκάστοτε στόχους λόγω της χαμηλής ενεργού διατομής των αντιδράσεων αυτών. Ωστόσο, στον στόχο του Cu υπάρχει μεγάλη συνεισφορά από ανελαστικές (n,xn) αντιδράσεις, δηλαδή με νετρόνια που παράχθηκαν από τη (d,n) στο τρίτιο και σκεδάστηκαν ανελαστικά στον στόχο του Cu. Τέλος, η συνεισφορά των παρασιτικών νετρονίων από την υπόλοιπη διάταξη αφορούν ανελαστικές σκεδάσεις νετρονίων, κυρίως στο αλουμινένιο περίβλημα της φλάντζας και στους στόχους της βάσης (αυτή η συνεισφορά παρασιτικών νετρονίων παρατηρείται επίσης και στις άλλες δύο ενέργειες ενδιαφέροντος παρακάτω).

Στον στόχο TiT, εμφανίζεται η κύρια κορυφή νετρονίων μέσω της κύριας αντίδρασης ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$, με μέση ενέργεια 16.36 MeV και μέγιστη ενέργεια νετρονίων

στα 16.63 MeV. Επιπλέον, παρατηρούνται δύο ενεργειακές κορυφές νετρονίων στα 12.4 MeV και στα 13.93 MeV οι οποίες προέρχονται από ελαστικές σκεδάσεις των νετρονίων της κύριας κορυφής με τους πυρήνες του τιτανίου, του τριτίου και του ^3He που περιέχονται στον στόχο του TiT.

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 4.9) φαίνεται η αθροιστική κατανομή των νετρονίων και συγκρίνεται με τη ροή νετρονίων της προσομοίωσης MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc:

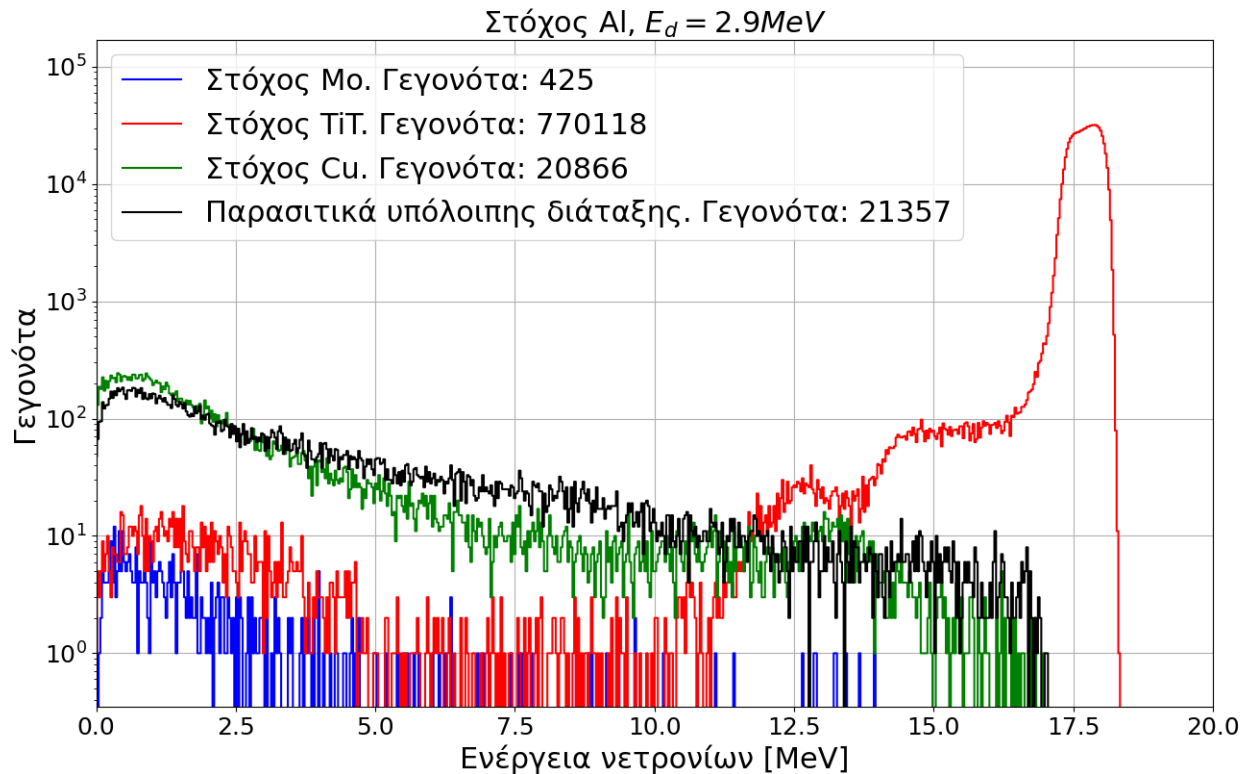


Εικόνα 4.9: Σύγκριση της συνολικής κατανομής των νετρονίων που εισέρχονται στον πρώτο στόχο της βάσης (Au) όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT4 και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc για ενέργεια δευτερίων $E_d = 2.11$ MeV.

Συγκρίνοντας στην παραπάνω εικόνα την ροή του MCNP & NeuSDesc με αυτή του GEANT4, η κύρια κορυφή του MCNP είναι μέσης ενέργειας στα 16.10 MeV και μέγιστης ενέργειας νετρονίων 17.06 MeV, ενώ του GEANT4 είναι 16.36 MeV και 16.63 MeV αντίστοιχα. Επιπλέον, η διαφορά στην μορφή των ενεργειακών κατανομών των κύριων κορυφών τους οφείλεται στο γεγονός ότι στο MCNP ο στόχος TiT ακτινοβολείται με πηγή νετρονίων (μέσω του κώδικα NeuSDesc), επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα απώλειας ενέργειας (χωρική και διαμήκης) των δευτερίων μέσα στον στόχο του τριτίου. Παρόλα αυτά, τα ενεργειακά εύρη της κύριας κορυφής (όπως και η μέση ενέργεια) είναι σε καλή συμφωνία. Δηλαδή, η απόκλιση του του ενεργειακού εύρους της κύριας κορυφής του GEANT4 προς το MCNP είναι περίπου 15%.

4.4.2 Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 2.9 MeV

Η αρχική δέσμη δευτερίων έχει ενέργεια 2.9 MeV. Η συνεισφορά στα γεγονότα νετρονίων από τον κάθε όγκο της πειραματικής διάταξης χωριστά φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

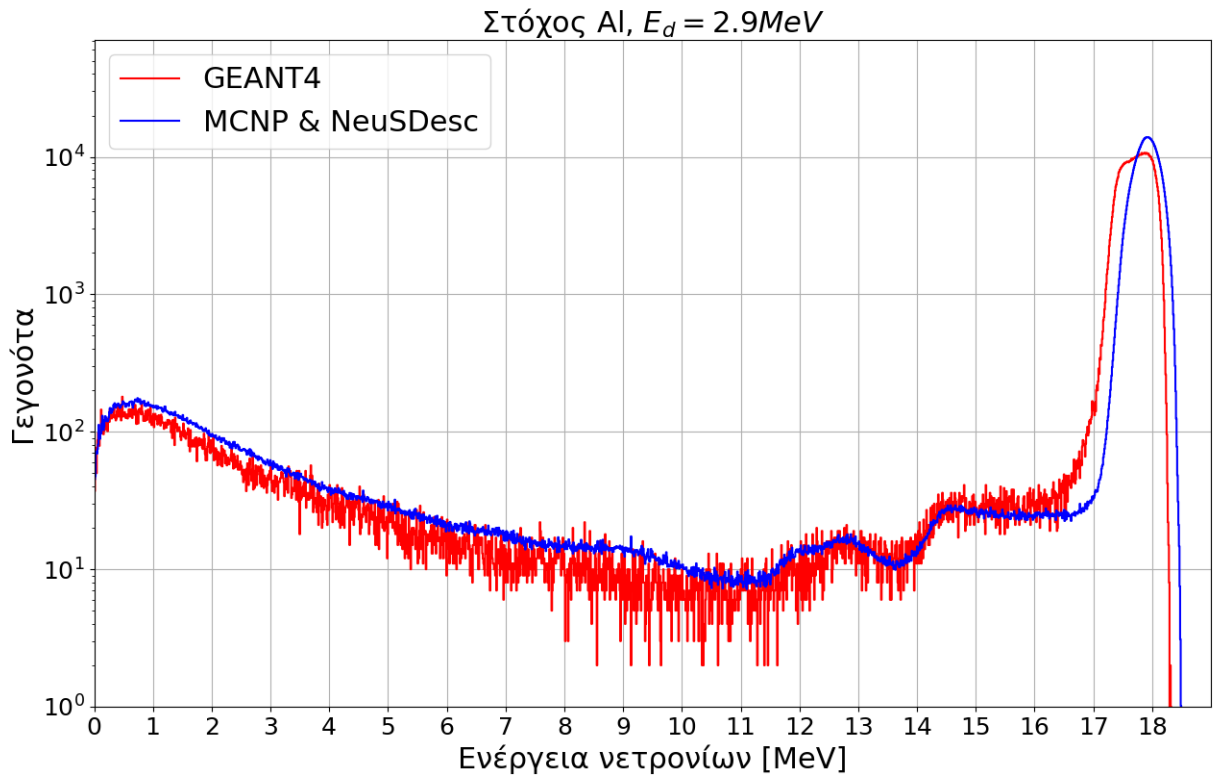


Εικόνα 4.10: Κατανομή των νετρονίων που εισέρχονται στον πρώτο στόχο της βάσης (Al) όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT4 για ενέργεια δευτερίων $E_d = 2.9\text{MeV}$. Φαίνεται η συνεισφορά των νετρονίων που προέρχονται από τους στόχους Μολυβδαίνιου, Τριτίου - Τιτανίου, Χαλκού και των υπόλοιπων παρασιτικών νετρονίων.

Όπως και στα 2.11 MeV, έτσι και στη περίπτωση αρχικής δέσμης 2.9 MeV δεν υπάρχει παραγωγή νετρονίων μέσω της αντίδρασης (d,n) στους στόχους Mo και Cu λόγω χαμηλής ενεργού διατομής των αντιδράσεων αυτών. Όμως, υπάρχει παραγωγή νετρονίων μέσω αντιδράσεων (n,xn) μέσω νετρονίων που παραχθήκαν αρχικά στον στόχο TiT.

Στο φάσμα νετρονίων που προέρχονται από τον στόχο του TiT, παρατηρούνται επιπλέον παραγόμενα γεγονότα μέσω αντιδράσεων (d,n) στο Ti. Επίσης, στον στόχο αυτόν εμφανίζεται η κύρια κορυφή νετρονίων με μέση ενέργεια 17.92 MeV και μέγιστη ενέργεια νετρονίων στα 18.33 MeV. Παρατηρείται επίσης ότι η κύρια κορυφή είναι στενότερη διότι η δέσμη των δευτερίων δεν παρουσιάζει μεγάλη χωρική διασπορά (υπάρχει μικρότερη απώλεια ενέργειας των δευτερίων μέσα στον στόχο σε σχέση με την ενέργεια ενδιαφέροντος 2.11 MeV).

Παρακάτω φαίνεται το άθροισμα των συνεισφορών των γεγονότων νετρονίων από κάθε όγκο - στόχο της πειραματικής διάταξης (συνολική ροή νετρονίων), τα οποία εισέρχονται στον πρώτο στόχο (Al) της βάσης (holder) και η σύγκριση της με την αντίστοιχη ροή του MCNP:



Εικόνα 4.11: Σύγκριση της συνολικής κατανομής των νετρονίων που εισέρχονται στον πρώτο στόχο της βάσης (Al) όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT4 και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc για ενέργεια δευτερίων $E_d = 2.9\text{ MeV}$.

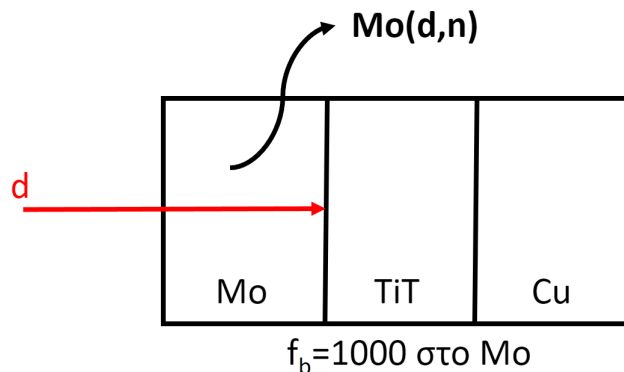
Σε σύγκριση με τον κώδικα MCNP & NeuSDesc, η κύρια κορυφή του κώδικα GEANT4 παρουσιάζει μεγαλύτερη ενεργειακή διασπορά. Ωστόσο, η διαφορά στη διασπορά είναι μικρή λόγω της μικρής απώλειας ενέργειας δευτερίων στον κύριο στόχο του τρίτου. Σε σχέση με τη περίπτωση των 2.11 MeV υπάρχει καλύτερη σύγκλιση των δύο κορυφών, αφού λόγω μικρής απώλειας ενέργειας των δευτερίων δεν προκαλούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των δύο προσομοιώσεων. Αν δηλαδή υπήρχε μεγάλη απώλεια ενέργειας των δευτερίων, τότε θα υπήρχαν αποκλίσεις μιας και το MCNP δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα απώλειας ενέργειας της δέσμης δευτερίων μέσα στον στόχο. Ενδεικτικά, η μέση ενέργεια της κύριας κορυφής του κώδικα MCNP είναι 17.94 MeV (έναντι των 17.92 MeV του GEANT4), η μέγιστη ενέργεια εξερχόμενων νετρονίων είναι 18.50 MeV (έναντι των 18.33 MeV του GEANT4) και απόκλιση του ενεργειακού εύρους του GEANT4 ως προς το MCNP είναι περίπου 2%.

4.4.3 Ενέργεια αρχικής δέσμης δευτερίων 3.45 MeV

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση αρχικής δέσμης δευτερίων 3.45 MeV εφαρμόστηκαν διαφορετικοί παράγοντες εξαναγκασμού στον κάθε στόχο και έγιναν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις με εφαρμογή της μεροληπτικής τεχνικής σε κάθε στόχο χωριστά (μία για το Mo με $f_b = 1000$, μία για το TiT με $f_b = 1000$ και μία για τον Cu με $f_b = 100$). Έπειτα, προστέθηκαν κατάλληλα τα τρία αντίστοιχα ιστογράμματα που δίνουν τα συνολικά γεγονότα. Για τον στόχο Cu έγινε κανονικοποίηση στα γεγονότα νετρονίων του TiT (κατά τον παράγοντα 10), λόγω της δεκαπλάσιας τιμής του παράγοντα f_b για τον στόχο του TiT.

Ο κώδικας προσαρμόστηκε έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν και τα γεγονότα νετρονίων από ανελαστικές σκεδάσεις (n,xn) με τα νετρόνια που προέρχονται από το κανάλι (d,n) στον στόχο του TiT. Παρακάτω περιγράφεται η πληροφορία που εξάχθηκε από τις τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις (runs), τα οποία και προστέθηκαν για τη λήψη του τελικού φάσματος:

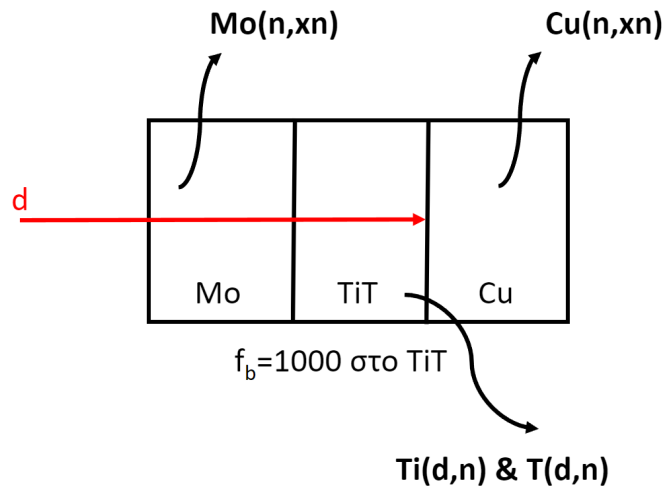
1. Πρώτο run: Εφαρμόστηκε $f_b = 1000$ στο στόχο μολυβδαινίου και προσαρμόστηκε ο κώδικας έτσι ώστε κάθε δευτέριο που φθάνει στο τέλος του στόχου Mo να πάψει να παρακολουθείται⁶. Έτσι, λαμβάνονται τα γεγονότα που προέρχονται από την (d,n) στο Μολυβδαίνιο.



Εικόνα 4.12: Περιγραφή του πρώτου run που έγινε για αρχική δέσμη δευτερίων 3.45 MeV και $f_b = 1000$ στο Mo. Η δέσμη δευτερίων (κόκκινο χρώμα) διαγράφεται αφού φτάσει στο τέλος του στόχου Mo.

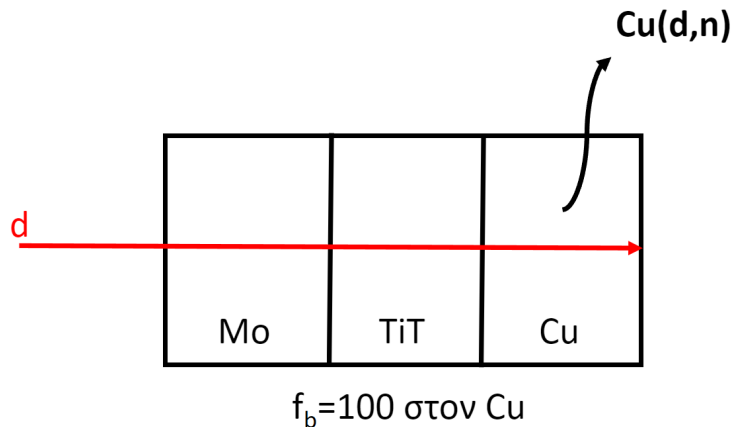
2. Δεύτερο run: Εφαρμόστηκε $f_b = 1000$ στο στόχο του τριτίου, ενώ παράλληλα για τους στόχο του Mo εξαιρέθηκε η εμφάνιση νετρονίων που προέρχονται από ανελαστικές αντιδράσεις δευτερίων (d,x), με $x \neq d$. Έπειτα, όταν τα δευτέρια φτάσουν στο τέλος του στόχου του τριτίου, σταματούν και διαγράφονται. Από τη διαδικασία αυτή τελικά λαμβάνονται γεγονότα από αντιδράσεις (d,x) στο τρίτιο (συμπεριλαμβανομένης της T(d,n)) και από (n,xn) στους στόχους Mo και Cu.

⁶Έγινε χρήση της εντολής fStopAndKill η οποία σταματάει (stop) και "σκοτώνει" (kill) τα δευτέρια στον όγκο που επιθυμεί ο χρήστης. Περισσότερες πληροφορίες στον σύνδεσμο: https://apc.uparis.fr/~franco/g4doxy/html/G4TrackStatus_8hh.html



Εικόνα 4.13: Περιγραφή του δεύτερου run που έγινε για αρχική δέσμη δευτερίων 3.45MeV και $f_b = 1000$ στο TiT. Η δέσμη δευτερίων (κόκκινο χρώμα) διαγράφεται αφού φτάσει στο τέλος του στόχου TiT.

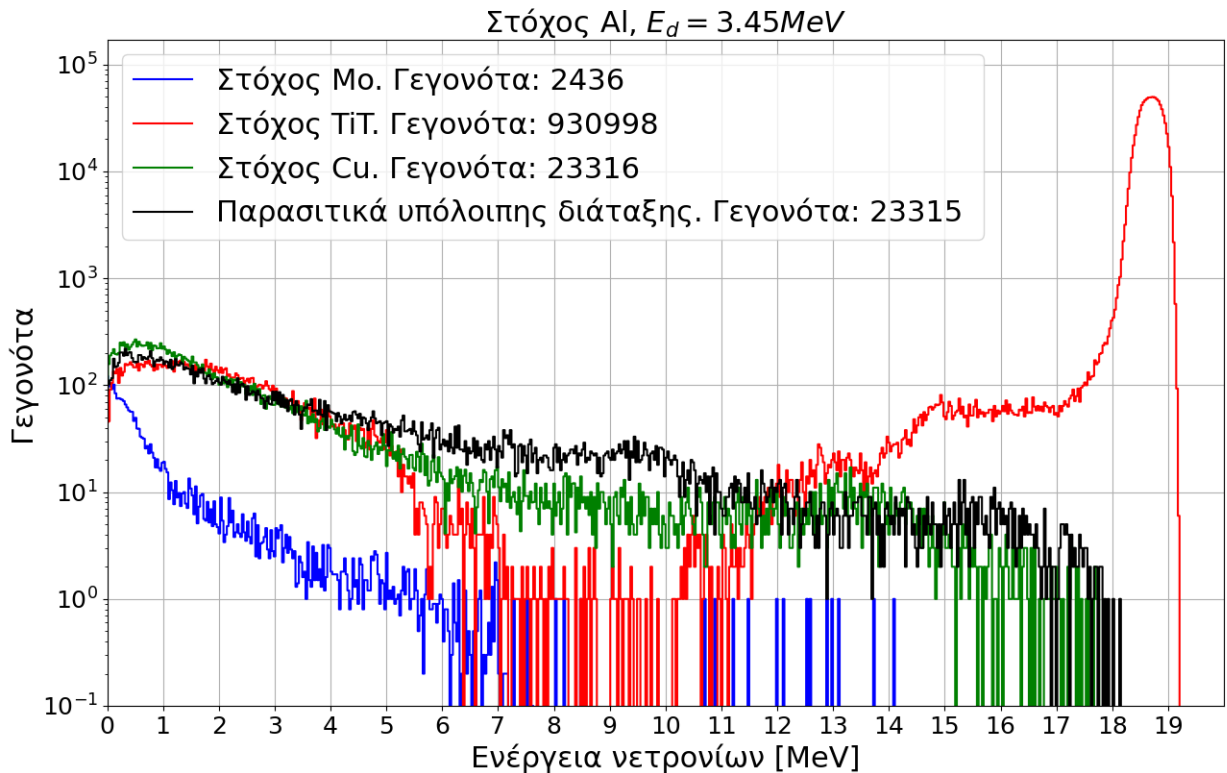
3. Τρίτο run: Η μόνη συνεισφορά γεγονότων νετρονίων είναι από το κανάλι (d,n) στον στόχο του χαλκού. Έτσι, αφού εφαρμόστηκε $f_b = 100$ στον στόχο του χαλκού, προσαρμόστηκε ο κώδικας ώστε να δίνει γεγονότα που προέρχονται μόνο από την αντίδραση Cu(d,n).



Εικόνα 4.14: Περιγραφή του τρίτου run που έγινε για αρχική δέσμη δευτερίων 3.45MeV και $f_b = 100$ στον Cu. Η δέσμη δευτερίων (κόκκινο χρώμα) διαγράφεται αφού φτάσει στο τέλος του στόχου Cu. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι αντιδράσεις (d,x), $x \neq d$, στους στόχους Mo και TiT.

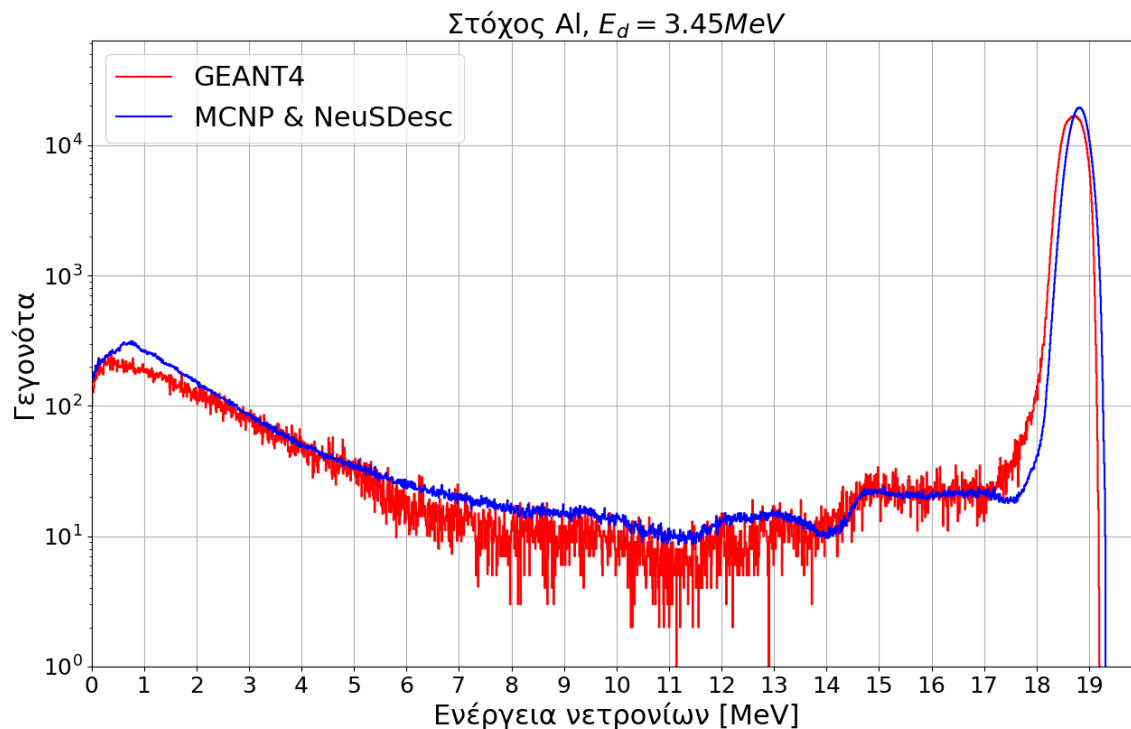
Όσον αφορά τα τελικά αποτελέσματα, στην περίπτωση ενέργειας αρχικής δέσμης $E_d = 3.45\text{MeV}$, η συνεισφορά νετρονίων σε όλο το ενεργειακό εύρος από τις αντιδράσεις στο κανάλι (d,n) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις προηγούμενες ενέργειες αρχικής δέσμης δευτερίων (2.11 και 2.9 MeV). Επιπλέον, εμφανίζονται πάλι πολλά γεγονότα από σκεδάσεις (n,xn) στο Mo και στον Cu από νετρόνια που προήλθαν από την αντίδραση (d,n) στο TiT.

Η συνεισφορά στα γεγονότα νετρονίων από τον κάθε όγκο της πειραματικής διάταξης χωριστά φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



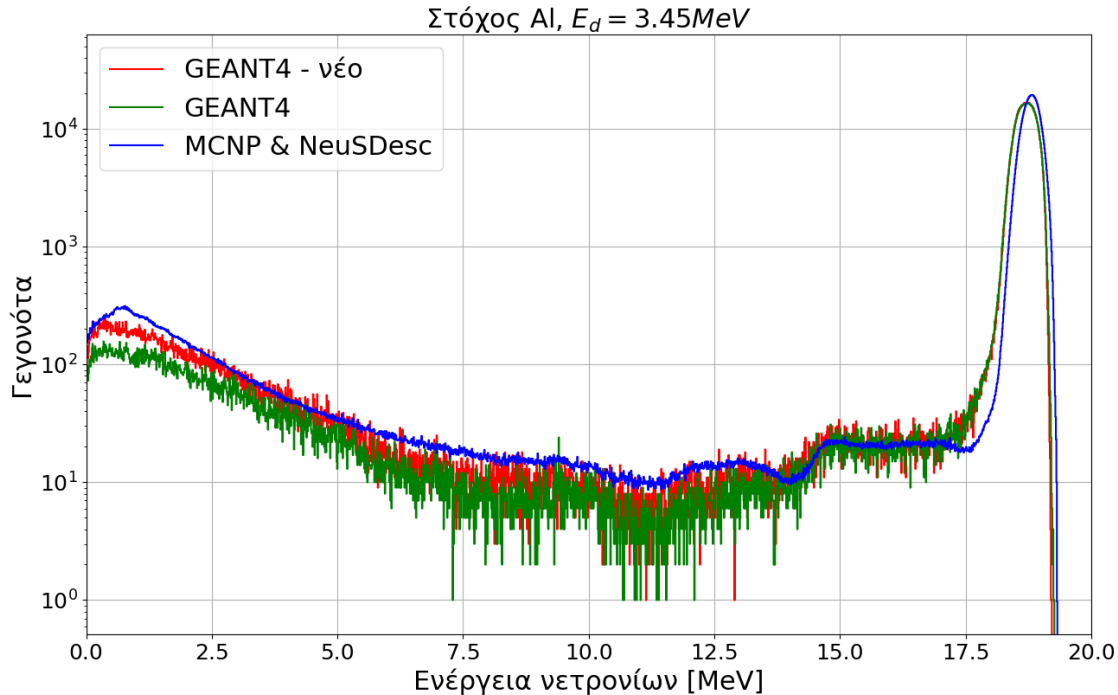
Εικόνα 4.15: Κατανομή των νετρονίων που εισέρχονται στον πρώτο στόχο της βάσης (Al) όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT4 για ενέργεια δευτερίων $E_d = 3.45\text{MeV}$. Φαίνεται η συνεισφορά των νετρονίων που προέρχονται από τους στόχους Μολυβδαινίου, Τριτίου - Τιτανίου, Χαλκού και των υπόλοιπων παρασιτικών νετρονίων.

Παρακάτω (Εικόνα 4.16) φαίνεται και το άθροισμα των συνεισφορών των γεγονότων νετρονίων από κάθε όγκο - στόχο της πειραματικής διάταξης (συνολική ροή νετρονίων), τα οποία εισέρχονται στον πρώτο στόχο (Al) της βάσης (holder) και η σύγκριση της με την αντίστοιχη ροή του MCNP. Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των ενεργειακών κορυφών των δύο προσομοιώσεων, λόγω της της μικρής απώλειας ενέργειας των δευτερίων μέσα στον στόχο του τριτίου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ενδεικτικά, η ενεργειακή κορυφή στη προσομοίωση του κώδικα GEANT4 παρουσιάζει μέση ενέργεια στα 18.71 MeV (έναντι του MCNP, στα 18.84 MeV), η μέγιστη ενέργεια των παραγόμενων νετρονίων είναι 19.22 MeV (έναντι του MCNP, στα 19.33 MeV) και η απόκλιση του ενεργειακού εύρους του GEANT4 ως προς το ενεργειακό εύρος του MCNP είναι περίπου 1%.



Εικόνα 4.16: Σύγκριση της συνολικής κατανομής των νετρονίων που εισέρχονται στον πρώτο στόχο της βάσης (Al) όπως προκύπτει από την προσομοίωση με το GEANT4 και της προσομοίωσης με το MCNP σε συνδυασμό με το NeuSDesc για ενέργεια δευτερίων $E_d = 3.45\text{ MeV}$.

Τέλος, το σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για την περίπτωση δέσμης δευτερίων ενέργειας 3.45 MeV , η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της ροής των νετρονίων ήταν αρχικά διαφορετική. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.17) φαίνεται με πράσινο χρώμα η αρχική ροή στην οποία είχαν εκτελεστεί τρεις προσομοιώσεις εφαρμόζοντας στην κάθε μία τον κατάλληλο f_b για κάθε έναν από τους τρεις στόχους. Έπειτα, προστέθηκαν οι συνεισφορές από τους εκάστοτε στόχους. Παρατηρείται ότι μέσω αυτής της τεχνικής υπάρχουν μεγάλες διαφορές της ροής των νετρονίων του GEANT4 (πράσινο χρώμα) σε σχέση με την ροή του κώδικα MCNP (μπλέ χρώμα). Έτσι, εφαρμόζοντας την μέθοδο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η βελτιστοποιημένη ροή των νετρονίων (κόκκινο χρώμα) συγκλίνει καλύτερα στην ροή του κώδικα MCNP ενώ η απλή πρόσθεση των τριών ιστογραμμάτων είναι ακατάλληλη, καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη οι (n, xn) σκεδάσεις στους στόχους του μολυβδαινίου και του χαλκού.



Εικόνα 4.17: Στην ροή νετρονίων με κόκκινο χρώμα έχει εφαρμοστεί η μεροληπτική τεχνική με τον τρόπο που περιγράφηκε στην αρχή της Ενότητας 4.4.3. Η ροή νετρονίων με πράσινο χρώμα προκύπτει από την πρόσθεση των νετρονίων που προέρχονται από κάθε στόχο στον οποίο εφαρμόστηκε η μεροληπτική τεχνική. Καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων (κόκκινο χρώμα) στη σύγκριση μεταξύ της προσομοίωσης GEANT4 και MCNP & NeuSDesc.

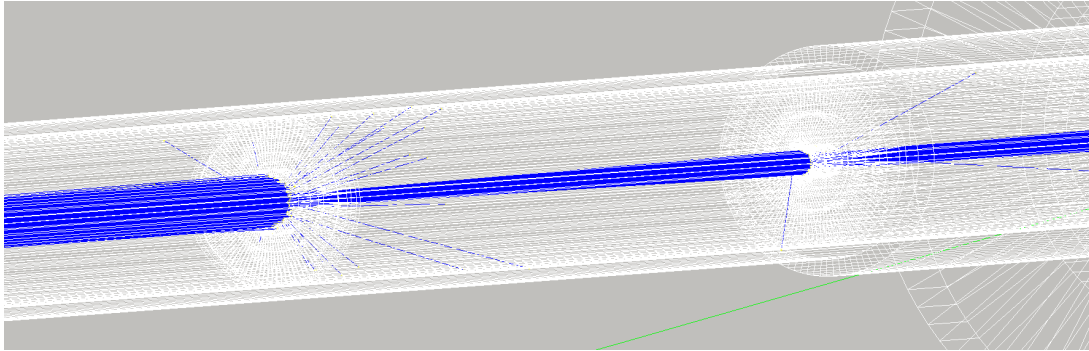
4.4.4 Παρατηρήσεις

Συνοψίζοντας, στην χαμηλότερη ενέργεια δέσμης δευτερίων (2.11 MeV) παρουσιάζονται έντονες διαφορές μεταξύ των δύο προς σύγκριση προσομοιώσεων ως προς την κύρια κορυφή των νετρονίων λόγω του διαφορετικού τρόπου ακτινοβόλησης της διάταξης στην κάθε προσομοίωση, επομένως δεν λαμβάνονται φαινόμενα απώλειας ενέργειας των δευτερίων στον στόχο του τριτίου στην προσομοίωση του κώδικα MCNP. Ειδικότερα, στην ενέργεια $E_d = 2.11\text{ MeV}$ τα δευτέρια εισέρχονται στον στόχο του τριτίου με ενέργεια 0.91 MeV και χάνουν όλη την ενέργεια εντός του στόχου, γι'αυτό και η κύρια κορυφή παρουσιάζει τόσο μεγάλη διαφορά σε σύγκριση με αυτή του κώδικα MCNP. Επιπλέον, στις άλλες ενέργειες ενδιαφέροντος η απώλεια είναι μικρότερη και υπάρχει καλύτερη σύγκλιση μεταξύ των κύριων κορυφών των εκάστοτε προσομοιώσεων.

Τέλος, σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα η δέσμη δευτερίων είναι σημειακή (pen-cil) και άρα, καθώς διαδίδεται, δεν παρουσιάζει καμία χωρική διασπορά πριν εισέλθει στους στόχους της φλάντζας. Στην επόμενη ενότητα έχει ορισθεί και περιγραφεί η δέσμη δευτερίων έτσι, ώστε να παρουσιάζει χωρική διασπορά (Κεφάλαιο 4.5).

4.5 Νέα Γεωμετρία της Πειραματικής Διάταξης

4.5.1 Ορισμός δέσμης δευτερίων με χωρική διασπορά



Εικόνα 4.18: Δέσμη δευτερίων με χωρική διασπορά. Στην περίπτωση αυτή, η δέσμη δευτερίων αλληλεπιδρά με τα τοιχώματα του ευθυγραμμιστή (collimator). Ο πρώτος κυλινδρικός όγκος (αριστερά) είναι ο ευθυγραμμιστής και δεξιά είναι ο οπισθοσχεδαστής.

Η δέσμη των δευτερίων (Εικόνα 4.18) έχει ορισθεί χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη GeneralParticleSource του κώδικα GEANT4. Μέσω ενός macro αρχείου έχουν ορισθεί όλα τα χαρακτηριστικά της νέας δέσμης δευτερίων. Ειδικότερα, η δέσμη που ορίσθηκε στη περίπτωση αυτή παρουσιάζει γκαουσιανή ενεργειακή κατανομή με αρχική ενέργεια 3.45 MeV, της οποίας η διασπορά είναι 1keV. Τέλος, η διασπορά της θέσης των σωματιδίων έχει ορισθεί να έχει ακτίνα 1.5 mm, ώστε να προσπίπτει στον ευθυγραμμιστή, και η διασπορά στην ακτίνα είναι 1 μοίρα.

Παρατηρείται επίσης ότι με τον ορισμό της νέας δέσμης υπάρχουν πολλές περιπτώσεις δευτερίων που σχεδάζονται ελαστικά με τον ευθυγραμμιστή, και προσπίπτουν στα τοιχώματα του επιταχυντή πραγματοποιώντας επιπλέον αντιδράσεις οι οποίες μπορεί συνεισφέρουν στη παραγωγή εκ νέου παρασιτικών νετρονίων.

Στο παράρτημα⁷ φαίνεται στο macro αρχείο πώς έγινε ο ορισμός της δέσμης αναλυτικότερα.

4.5.2 Έλεγχος του φάσματος με προσθήκη γκαουσιανής (Gaussian) δέσμης και φυσικού άνθρακα για την ενέργεια ενδιαφέροντος $E_d = 3.45\text{MeV}$

Στον παρακάτω έλεγχο (Εικόνα 4.19) έχει προστεθεί μπροστά από τον στόχο του Μολυβδαινίου, του ευθυγραμμιστή και του οπισθοσχεδαστή από ένα στρώμα άνθρακα πάχους 20μm έκαστο. Παρακάτω φαίνεται η ροή των νετρονίων στην περίπτωση ύπαρξης των στρωμάτων φυσικού άνθρακα και Gaussian δέσμης (μαύρο χρώμα), και συγκρίνεται με την αντίστοιχη της Ενότητας 4.4.3. Το ιστόγραμμα της ροής των νετρονίων με την νέα δέσμη έχει κανονικοποιηθεί στο αντίστοιχο με την σημειακή δέσμη ώστε να γίνουν ευδιάκριτες οι διαφορές που προκύπτουν εισάγοντας την νέα δέσμη στον κώδικα. Παρατηρείται ότι οι διαφορές αυτές είναι στατιστικές,

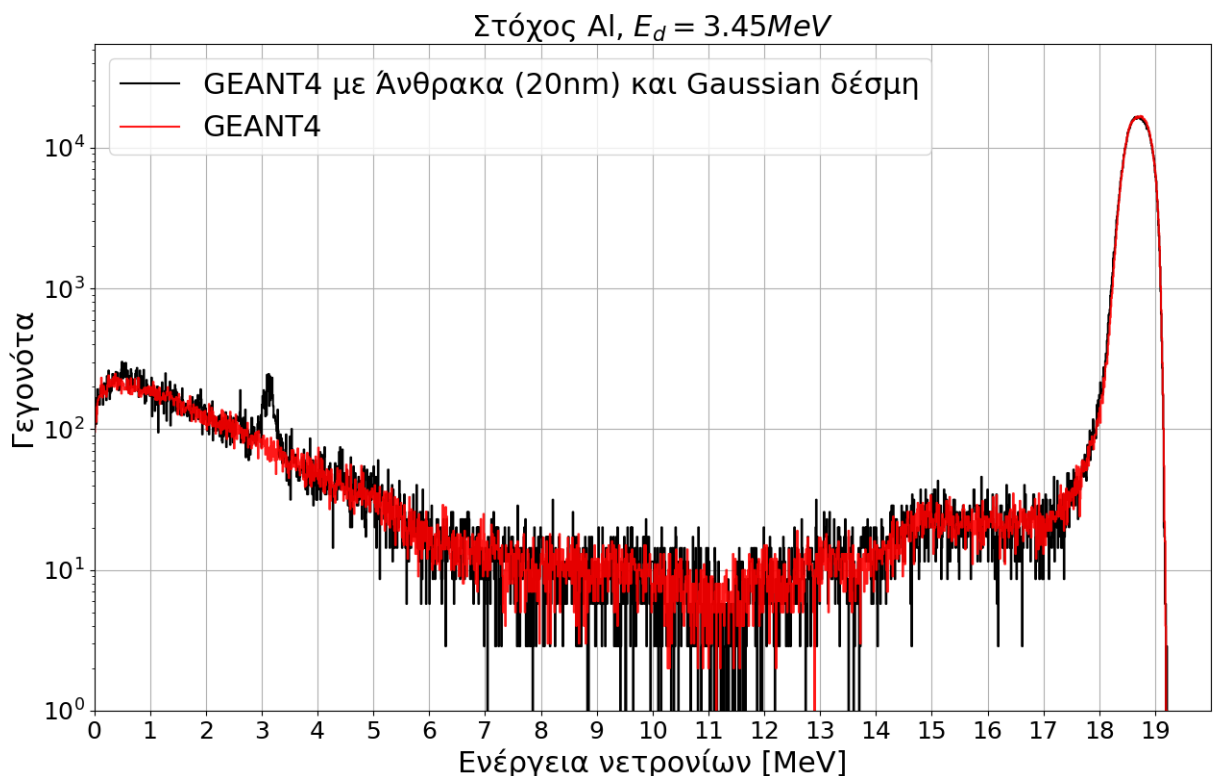
⁷βλ. Κεφάλαιο 6.2

καθώς η ροή των νετρονίων με τη νέα δέσμη (μαύρο χρώμα) παρουσιάζει χαμηλότερη στατιστική σε σχέση με την αρχική ροή των νετρονίων, ωστόσο η μορφή της δεν περιέχει καμία αλλοίωση.

Με την προσθήκη του φυσικού άνθρακα στην διάταξη παρατηρείται μία ενεργειακή κορυφή στα 3.11 MeV η οποία προέρχεται από την ενδόθερμη αντίδραση $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$. Η κορυφή αυτή ήταν η αναμενόμενη, διότι η ενέργεια κατωφλιού της αντίδρασης είναι $E_{\text{threshold}} = 0.33 \text{ MeV}$, άρα η μέγιστη ενέργεια των εκπεμπόμενων νετρονίων είναι:

$$E_{n,max} = E_d - E_{\text{threshold}} = 3.45\text{MeV} - 0.33\text{MeV} = 3.12\text{MeV}.$$

Ωστόσο, αφού γίναν εκτενείς έλεγχοι με διαφορετικά πάχη των στόχων φυσικού άνθρακα στους collimators παρατηρήθηκε ελάχιστη συνεισφορά νετρονίων λόγω του φυσικού άνθρακα από την αντίδραση (d,n). Έτσι, η ύπαρξη άνθρακα στους collimators δεν εμφάνισε κάποια ευδιάκριτη αλλαγή στο ενεργειακό φάσμα, ενώ η ύπαρξη άνθρακα μπροστά από τον στόχο του μολυβδαινίου εμφάνισε την ενεργειακή κορυφή στα 3.11 MeV.



Εικόνα 4.19: Δέσμη δευτερίων με χωρική διασπορά και προσθήκη φυσικού άνθρακα (πάχους 20nm) στη πειραματική διάταξη. Γίνεται ευδιάκριτη στις χαμηλές ενέργειες η συνεισφορά παρασιτικών νετρονίων που προέρχονται από αντιδράσεις (d,n) στον φυσικό άνθρακα.

5 Συμπεράσματα - Προοπτικές

Το κίνητρο της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η μελέτη των παρασιτικών νετρονίων που προκύπτουν από την αντίδραση (d,n) και είναι βασισμένη στην πειραματική διάταξη του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "Δημόκριτος" η οποία χρησιμοποιείται για πειράματα σχάσης και νετρονικής ενεργοποίησης.

Για τον σκοπό αυτόν, προσομοιώθηκε όλη η διάταξη του πειράματος μέσω του κώδικα GEANT4 και εφαρμόστηκε στην αρχική δέσμη η μεροληπτική τεχνική για την επίτευξη ικανοποιητικής στατιστικής σε μικρούς υπολογιστικούς χρόνους. Συγκεκριμένα, στο πρώτο στάδιο της μελέτης έγινε αξιολόγηση της μεροληπτικής τεχνικής στους βασικούς στόχους της πειραματικής διάταξης, σε διαφορετικές ενέργειες και με διαφορετικούς παράγοντες εξαναγκασμού f_b . Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ήταν ενθαρρυντικά, καθώς η εφαρμογή μεροληπτικών τεχνικών στους στόχους δεν επέφερε αλλοίωση των φυσικών διεργασιών.

Έπειτα, στο τελευταίο κεφάλαιο, προσομοιώθηκε η πειραματική διάταξη, και για κάθε ενέργεια ενδιαφέροντος σημειακής δέσμης δευτερίων μελετήθηκε η ροή των νετρονίων που προσπίπτουν στους στόχους προς ακτινοβόληση. Παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση χαμηλής ενέργειας δέσμης δευτερίων (2.11 MeV) υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ της κύριας ενεργειακής κορυφής της προσομοίωσης του GEANT4 με την αντίστοιχη του κώδικα MCNP & NeuSDesc, λόγω της αδυναμίας συμπερίληψης της απώλειας ενέργειας των δευτερίων στον στόχο του τρίτου στην περίπτωση του κώδικα MCNP⁸. Στις άλλες ενέργειες ενδιαφέροντος υπήρχε καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων ως προς τα γεγονότα της κύριας κορυφής των νετρονίων. Τα γεγονότα νετρονίων πέραν της κύριας κορυφής (παρασιτικά νετρόνια) της προσομοίωσης του κώδικα GEANT4 είναι σε καλή συμφωνία με του κώδικα MCNP. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα παρατήρησης παραπάνω παρασιτικών νετρονίων λόγω πολύ χαμηλής ενεργού διατομής στα στοιχεία της πειραματικής διάταξης που βρίσκονται μπροστά από τη φλάντζα.

Εκτός από τις προσομοιώσεις με σημειακή δέσμη, έγινε χρήση δέσμης δευτερίων με χωρική διασπορά και δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς τη κατανομή των νετρονίων σε όλο το ενεργειακό φάσμα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη και την παρουσία φυσικού άνθρακα στη πειραματική διάταξη, έγινε μία προσομοίωση ελέγχου με φυσικό άνθρακα όπου προσομοιώθηκε και ταυτοποιήθηκε η κορυφή που προκύπτει από την αντίδραση (d,n) στο βασικό του ισότοπο.

Μελλοντικά, είναι αναγκαίο να γίνουν παραπάνω έλεγχοι με διαφορετικά πάχη του στρώματος άνθρακα ώστε να εκτιμηθεί και να συγκριθεί η ενεργειακή κορυφή του φυσικού άνθρακα με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα [12]. Επίσης, αποτελεί μελλοντικό σκοπό:

⁸Ο κώδικας MCNP χρησιμοποιεί δέσμη νετρονίων η οποία έχει παραχθεί μέσω του κώδικα NeuSDesc, έναντι αυτής του GEANT4, που είναι δέσμη δευτερίων

1. η μοντελοποίηση της δέσμης δευτερίων έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο συμβατή με την πειραματική δέσμη,
2. η μελέτη πιθανής οξείδωσης υλικών στα στοιχεία της πειραματικής διάταξης και η συνεισφορά παρασιτικών νετρονίων λόγω αντιδράσεων (d,n) στο οξυγόνο και
3. η μελέτη αντιδράσεων ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ καθώς και η ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των νετρονίων που προκύπτουν από αυτή. Ειδικότερα, η εμφύτευση δευτερίων στα στοιχεία της φλάντζας είναι πιθανή, λόγω της επαναλαμβανόμενης ακτινοβόλησης του στόχου για τις ανάγκες των διαφόρων πειραμάτων.

6 Παράρτημα

6.1 GEANT4 - Γεωμετρία των στόχων προς ακτινοβόληση

Γίνεται μία σύντομη παρουσίαση του κώδικα που προστέθηκε (σχετικά με τη γεωμετρία της βάσης) για την ενέργεια ενδιαφέροντος δευτερίων 2.11MeV. Ορίζονται αρχικά τα στοιχεία της διάταξης, έπειτα ορίζεται η βάση (holder) και στη συνέχεια οι όγκοι που τοποθετούνται πάνω στη βάση.

```
//INITIAL DEUTERON BEAM WITH ENERGY 2.11MeV:
//MATERIALS DEFINITION:

//Determine new materials:
//We need: aluminum, hydrogen, oxygen, carbon, iron, gold, germanium, thallium:
/**Aluminum foil is determined in the first part**
G4Material *iron      = nist->FindOrBuildMaterial("G4_Fe");
G4Material *hydrogen  = nist->FindOrBuildMaterial("G4_H");
G4Material *oxygen    = nist->FindOrBuildMaterial("G4_O");
G4Material *carbon    = nist->FindOrBuildMaterial("G4_C");
G4Material *gold      = nist->FindOrBuildMaterial("G4_Au");
G4Material *germanium = nist->FindOrBuildMaterial("G4_Ge");
G4Material *thallium  = nist->FindOrBuildMaterial("G4_Tl");

//DETERMINE SPECIAL MATERIALS:
//WE NEED: mylar_mat, Ge76_mat.
//Densities:
G4double density_mylar = 1.40 * g / cm3; //mylar
G4double density_Ge76  = 3.04 * g / cm3; //Ge76
//Determination of the mylar material which consists of hydrogen, carbon and oxygen
:
G4Material *mylar_mat = new G4Material("mylar", density_mylar, 3);
//Add the consistency of the materials inside the mylar_mat:
mylar_mat->AddMaterial(hydrogen, 0.041959);
mylar_mat->AddMaterial(carbon,   0.625017);
mylar_mat->AddMaterial(oxygen,   0.333025);
//Determination of the Ge76 material which consists of oxygen and the isotopes Ge
-70, Ge-72, Ge-73, Ge-74, Ge-76.
//Isotopes of Ge:
G4Isotope *isGe70 = new G4Isotope("isGe-70", 32, 70, 69.92424900 * g / mole);
G4Isotope *isGe72 = new G4Isotope("isGe-72", 32, 72, 71.92207580 * g / mole);
G4Isotope *isGe73 = new G4Isotope("isGe-73", 32, 73, 72.92345900 * g / mole);
G4Isotope *isGe74 = new G4Isotope("isGe-74", 32, 74, 73.92117776 * g / mole);
G4Isotope *isGe76 = new G4Isotope("isGe-76", 32, 76, 75.92140270 * g / mole);
//Determination of all the isotopes as elements:
G4Element *Ge70E1 = new G4Element("Ge70_Element", "Ge70", 1);
G4Element *Ge72E1 = new G4Element("Ge72_Element", "Ge72", 1);
G4Element *Ge73E1 = new G4Element("Ge73_Element", "Ge73", 1);
G4Element *Ge74E1 = new G4Element("Ge74_Element", "Ge74", 1);
G4Element *Ge76E1 = new G4Element("Ge76_Element", "Ge76", 1);
Ge70E1->AddIsotope(isGe70, 100. * perCent);
Ge72E1->AddIsotope(isGe72, 100. * perCent);
Ge73E1->AddIsotope(isGe73, 100. * perCent);
Ge74E1->AddIsotope(isGe74, 100. * perCent);
Ge76E1->AddIsotope(isGe76, 100. * perCent);
//Add the consistency of the materials inside the Ge76_mat:
G4Material *Ge76_mat = new G4Material("Ge76", density_Ge76, 6);
Ge76_mat->AddElement(Ge70E1, 0.000422132532509 * 100. * perCent);
Ge76_mat->AddElement(Ge72E1, 0.000633198798763 * 100. * perCent);
Ge76_mat->AddElement(Ge73E1, 0.000422132532509 * 100. * perCent);
Ge76_mat->AddElement(Ge74E1, 0.079712693222053 * 100. * perCent);
```

```

Ge76_mat->AddElement(Ge76El, 0.622364063761943 * 100. * perCent);
Ge76_mat->AddMaterial(oxygen, 0.29644577915223 * 100. * perCent);

//TARGET HOLDERS: There are three target holders which hold the five foils.
//They consist of iron and they are three rectangular parallelepipeds: the
    target_holder_bottom (#1),
//the target_holder_left (#2) and the target_holder_right (#3).
//We determine, in general, the base and the height of the holder in the (x,y,z)
    system having in mind that the center (0,0,0)
//is the center of the target foils. Also, we determine the distance between the
    end of the flange and the left
//corner of the holder and so, the distance between the end of the flange and the
    center of holder.

//Outer radius of the rings:
G4double r_out = 2.983 * cm;
//Bases and heights of each holder:
//Bottom:
G4double b_bottom = 7.000 * cm; //base
G4double h_bottom = 0.500 * cm; //height
//Left:
G4double b_left = 0.515 * cm; //base
G4double h_left = 4.500 * cm; //height
//Right:
G4double b_right = 0.515 * cm; //base
G4double h_right = 4.500 * cm; //height

//TARGET HOLDER BOTTOM:
//Variables:
//x-axis and y-axis centers:
G4double center_bottom_x = 0; //x axis center
G4double center_bottom_y = -(r_out + h_bottom / 2); //y axis center
//depth of bottom holder (in z axis):
G4double l_bottom = 4.0 * cm;
//Distance between the end of the flange and the left corner of the bottom holder:
G4double d_flange_holder_bottom = 3.4 * cm;
//z-axis position of the center of the bottom target holder:
G4double center_bottom_z = endOfFlange + d_flange_holder_bottom + l_bottom * 0.5;
//Position in (x,y,z) for the center of the bottom holder:
G4ThreeVector pos_bottom_holder = G4ThreeVector(center_bottom_x, center_bottom_y,
    center_bottom_z);

//Starting the construction of the geometry:
//Target holder bottom:
G4Box *bottom_holder = new G4Box("target_holder_bottom",
    b_bottom / 2,
    h_bottom / 2,
    l_bottom / 2);

G4LogicalVolume *logic_bottom_holder = new G4LogicalVolume(bottom_holder,
    iron,
    "bottom_holder_logic");

new G4PVPlacement(
    0,
    pos_bottom_holder,
    logic_bottom_holder,
    "bottom_holder_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//TARGET HOLDER RIGHT:
//Variables:

```

```

//x-axis and y-axis centers:
G4double center_right_x = r_out + b_right / 2; //x axis center
G4double center_right_y = -(r_out - h_right / 2); //y axis center
//depth of right holder (in z axis):
G4double l_right = 3.7 * cm;
//Distance between the end of the flange and the left corner of the right holder:
G4double d_flange_holder_right = 3.4 * cm;
//z-axis position of the center of the right target holder:
G4double center_right_z = endOfFlange + d_flange_holder_right + l_right * 0.5;
//Position in (x,y,z) for the center of the right holder:
G4ThreeVector pos_right_holder = G4ThreeVector(center_right_x, center_right_y,
        center_right_z);

//Starting the construction of the geometry:
//Target holder right:
G4Box *right_holder = new G4Box("target_holder_right",
        b_right / 2,
        h_right / 2,
        l_right / 2);

G4LogicalVolume *logic_right_holder = new G4LogicalVolume(right_holder,
        iron,
        "right_holder_logic");

new G4PVPlacement(
        0,
        pos_right_holder,
        logic_right_holder,
        "right_holder_phys",
        logicWorld,
        false,
        0,
        true);

//TARGET HOLDER LEFT:
//Variables:
//x-axis and y-axis centers:
G4double center_left_x = -(r_out + b_left / 2); //x axis center
G4double center_left_y = -(r_out - h_left / 2); //y axis center
//depth of left holder (in z axis):
G4double l_left = 3.7 * cm;
//Distance between the end of the flange and the left corner of the left holder:
G4double d_flange_holder_left = 3.4 * cm;
//z-axis position of the center of the left target holder:
G4double center_left_z = endOfFlange + d_flange_holder_left + l_left * 0.5;
//Position in (x,y,z) for the center of the left holder:
G4ThreeVector pos_left_holder = G4ThreeVector(center_left_x, center_left_y,
        center_left_z);

//Starting the construction of the geometry:
//Target holder left:
G4Box *left_holder = new G4Box("target_holder_left",
        b_left / 2,
        h_left / 2,
        l_left / 2);

G4LogicalVolume *logic_left_holder = new G4LogicalVolume(left_holder,
        iron,
        "left_holder_logic");

new G4PVPlacement(
        0,
        pos_left_holder,
        logic_left_holder,
        "left_holder_phys",
        logicWorld,

```

```

        false,
        0,
        true);

//FIRST FOIL: Name: 'Au11_Tl1'
//Consists of the 'target_Au11', 'target_Tl1', 'ring_Au11_Tl1', 'mylar_Au11_Tl1'.
//We need to set (a) the distance between the end of flange and the left corner of
    every 'subfoil',
// (b) the center of every 'subfoil', (c) the depth of each and (d) the radius of
    each.
//Variables:
//Distances between the end of flange and the left corner of every 'subfoil':
G4double d_flange_target_Au11    = 3.573 * cm;
G4double d_flange_target_Tl1    = 3.600 * cm;
G4double d_flange_ring_Au11_Tl1 = 3.600 * cm;
G4double d_flange_mylar_Au11_Tl1 = 3.600 * cm;
//Depths for every 'subfoil':
G4double l_target_Au11          = 0.027 * cm;
G4double l_target_Tl1          = 0.203 * cm;
G4double l_ring_Au11_Tl1       = 0.140 * cm;
G4double l_mylar_Au11_Tl1      = 0.140 * cm;
//Radiuses:
G4double r_target_Au11          = 0.670 * cm;
G4double r_target_Tl1          = 0.650 * cm;
G4double r_ring_min_Au11_Tl1   = 2.431 * cm;
G4double r_ring_max_Au11_Tl1   = 2.983 * cm;
G4double r_mylar_min_Au11_Tl1  = 0.670 * cm;
G4double r_mylar_max_Au11_Tl1  = 2.431 * cm;
//z-axis position of the left corners of the 'subfoils':
G4double z_flange_target_Au11   = endOfFlange + d_flange_target_Au11;
G4double z_flange_target_Tl1   = endOfFlange + d_flange_target_Tl1;
G4double z_flange_ring_Au11_Tl1 = endOfFlange + d_flange_ring_Au11_Tl1;
G4double z_flange_mylar_Au11_Tl1 = endOfFlange + d_flange_mylar_Au11_Tl1;
//z-axis positions in the centers of the 'subfoils':
G4double center_target_Au11     = z_flange_target_Au11 + l_target_Au11 * 0.5;
G4double center_target_Tl1     = z_flange_target_Tl1 + l_target_Tl1 * 0.5;
G4double center_ring_Au11_Tl1  = z_flange_ring_Au11_Tl1 + l_ring_Au11_Tl1 * 0.5;
G4double center_mylar_Au11_Tl1 = z_flange_mylar_Au11_Tl1 + l_mylar_Au11_Tl1 * 0.5;
//Starting the construction of the geometry:
//Au11-target. Material = G4_Au.
G4Tubs *target_Au11 = new G4Tubs("target-Au11",
                                0,
                                r_target_Au11,
                                l_target_Au11 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_target_Au11 = new G4LogicalVolume(target_Au11,
                                                         gold,
                                                         "logical_target_Au11");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_target_Au11),
    logic_target_Au11,
    "Au11_target_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//Tl1-target. Material = G4_Tl.
G4Tubs *target_Tl1 = new G4Tubs("target-Tl1",
                                0,
                                r_target_Tl1,
                                l_target_Tl1 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

```



```

                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_target_Tl1 = new G4LogicalVolume(target_Tl1,
                                                        thallium,
                                                        "logical_target_Tl1");

new G4PVPlacement(
                                0,
                                G4ThreeVector(0., 0., center_target_Tl1),
                                logic_target_Tl1,
                                "Tl1_target_phys",
                                logicWorld,
                                false,
                                0,
                                true);

//Au11-Tl1-ring. Material = G4_Fe.
G4Tubs *ring_Au11_Tl1 = new G4Tubs("ring-Au11-Tl1",
                                   r_ring_min_Au11_Tl1,
                                   r_ring_max_Au11_Tl1,
                                   l_ring_Au11_Tl1 / 2,
                                   0. * deg,
                                   360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_ring_Au11_Tl1 = new G4LogicalVolume(ring_Au11_Tl1,
                                                            iron,
                                                            "logical_ring_Au11_Tl1");

new G4PVPlacement(
                                0,
                                G4ThreeVector(0., 0., center_ring_Au11_Tl1),
                                logic_ring_Au11_Tl1,
                                "Au11_Tl1_ring_phys",
                                logicWorld,
                                false,
                                0,
                                true);

//Au11-Tl1-mylar.
G4Tubs *mylar_Au11_Tl1 = new G4Tubs("mylar-Au11-Tl1",
                                   r_mylar_min_Au11_Tl1,
                                   r_mylar_max_Au11_Tl1,
                                   l_mylar_Au11_Tl1 / 2,
                                   0. * deg,
                                   360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_mylar_Au11_Tl1 = new G4LogicalVolume(mylar_Au11_Tl1,
                                                            mylar_mat,
                                                            "logical_mylar_Au11_Tl1");

new G4PVPlacement(
                                0,
                                G4ThreeVector(0., 0., center_mylar_Au11_Tl1),
                                logic_mylar_Au11_Tl1,
                                "Au11_Tl1_mylar_phys",
                                logicWorld,
                                false,
                                0,
                                true);

//SECOND FOIL: Name: 'Al6'
//Consists of the 'target_Al6', 'ring_Al6', 'mylar_Al6'.
//We need to set (a) the distance between the end of flange and the left corner of
//every 'subfoil',
//(b) the center of every 'subfoil', (c) the depth of each and (d) the radius of
//each.
//Variables:
//Distances between the end of flange and the left corner of every 'subfoil':
G4double d_flange_target_Al6 = 4.00 * cm;

```

```

G4double d_flange_ring_A16    = 4.00 * cm;
G4double d_flange_mylar_A16   = 4.00 * cm;
//Depths for every 'subfoil':
G4double l_target_A16         = 0.050 * cm;
G4double l_ring_A16           = 0.140 * cm;
G4double l_mylar_A16          = 0.140 * cm;
//Radiuses:
G4double r_target_A16         = 1.000 * cm;
G4double r_ring_min_A16       = 2.431 * cm;
G4double r_ring_max_A16       = 2.983 * cm;
G4double r_mylar_min_A16      = 1.000 * cm;
G4double r_mylar_max_A16      = 2.431 * cm;
//z-axis position of the left corners of the 'subfoils':
G4double z_flange_target_A16   = endOfFlange + d_flange_target_A16;
G4double z_flange_ring_A16     = endOfFlange + d_flange_ring_A16;
G4double z_flange_mylar_A16    = endOfFlange + d_flange_mylar_A16;
//z-axis positions in the centers of the 'subfoils':
G4double center_target_A16     = z_flange_target_A16 + l_target_A16 * 0.5;
G4double center_ring_A16       = z_flange_ring_A16   + l_ring_A16   * 0.5;
G4double center_mylar_A16      = z_flange_mylar_A16  + l_mylar_A16  * 0.5;

//Starting the construction of the geometry:
//A16-target. Material = aluminum.
G4Tubs *target_A16 = new G4Tubs("target-A16",
                                0,
                                r_target_A16,
                                l_target_A16 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_target_A16 = new G4LogicalVolume(target_A16,
                                                         aluminum,
                                                         "logical_target_A16");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_target_A16),
    logic_target_A16,
    "A16_target_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//A16-ring. Material = iron.
G4Tubs *ring_A16 = new G4Tubs("ring-A16",
                              r_ring_min_A16,
                              r_ring_max_A16,
                              l_ring_A16 / 2,
                              0. * deg,
                              360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_ring_A16 = new G4LogicalVolume(ring_A16,
                                                       iron,
                                                       "logical_ring_A16");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_ring_A16),
    logic_ring_A16,
    "A16_ring_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//A16-mylar. Material = mylar_mat.

```

```

G4Tubs *mylar_A16 = new G4Tubs( "mylar-A16",
                                r_mylar_min_A16,
                                r_mylar_max_A16,
                                l_mylar_A16 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_mylar_A16 = new G4LogicalVolume(mylar_A16,
                                                       mylar_mat,
                                                       "logical_mylar_A16");

new G4PVPlacement(
                                0,
                                G4ThreeVector(0., 0., center_mylar_A16),
                                logic_mylar_A16,
                                "A16_mylar_phys",
                                logicWorld,
                                false,
                                0,
                                true);

//THIRD FOIL: Name: 'Ge76'
//Consists of the 'target_Ge76', 'ring_Ge76', 'mylar_Ge76'.
//We need to set (a) the distance between the end of flange and the left corner of
//every 'subfoil',
//(b) the center of every 'subfoil', (c) the depth of each and (d) the radius of
//each.
//Variables:
//Distances between the end of flange and the left corner of every 'subfoil':
G4double d_flange_target_Ge76 = 4.20 * cm;
G4double d_flange_ring_Ge76   = 4.20 * cm;
G4double d_flange_mylar_Ge76  = 4.20 * cm;
//Depths for every 'subfoil':
G4double l_target_Ge76 = 0.238 * cm;
G4double l_ring_Ge76   = 0.140 * cm;
G4double l_mylar_Ge76  = 0.140 * cm;
//Radiuses:
G4double r_target_Ge76   = 1.000 * cm;
G4double r_ring_min_Ge76 = 2.431 * cm;
G4double r_ring_max_Ge76 = 2.983 * cm;
G4double r_mylar_min_Ge76 = 1.000 * cm;
G4double r_mylar_max_Ge76 = 2.431 * cm;
//z-axis position of the left corners of the 'subfoils':
G4double z_flange_target_Ge76 = endOfFlange + d_flange_target_Ge76;
G4double z_flange_ring_Ge76   = endOfFlange + d_flange_ring_Ge76;
G4double z_flange_mylar_Ge76  = endOfFlange + d_flange_mylar_Ge76;
//z-axis positions in the centers of the 'subfoils':
G4double center_target_Ge76 = z_flange_target_Ge76 + l_target_Ge76 * 0.5;
G4double center_ring_Ge76   = z_flange_ring_Ge76   + l_ring_Ge76   * 0.5;
G4double center_mylar_Ge76  = z_flange_mylar_Ge76  + l_mylar_Ge76  * 0.5;
//Starting the construction of the geometry:
//Ge76-target. Material = Ge76_mat.
G4Tubs *target_Ge76 = new G4Tubs("target-Ge76",
                                0,
                                r_target_Ge76,
                                l_target_Ge76 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_target_Ge76 = new G4LogicalVolume(target_Ge76,
                                                         Ge76_mat,
                                                         "logical_target_Ge76");

new G4PVPlacement(
                                0,
                                G4ThreeVector(0., 0., center_target_Ge76),
                                logic_target_Ge76,

```

```

        "Ge76_target_phys",
        logicWorld,
        false,
        0,
        true);

//Ge76-ring. Material = aluminum.
G4Tubs *ring_Ge76 = new G4Tubs("ring-Ge76",
    r_ring_min_Ge76,
    r_ring_max_Ge76,
    l_ring_Ge76 / 2,
    0. * deg,
    360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_ring_Ge76 = new G4LogicalVolume(ring_Ge76,
    aluminum,
    "logical_ring_Ge76");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_ring_Ge76),
    logic_ring_Ge76,
    "Ge76_ring_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//Ge76-mylar.
G4Tubs *mylar_Ge76 = new G4Tubs("mylar-Ge76",
    r_mylar_min_Ge76,
    r_mylar_max_Ge76,
    l_mylar_Ge76 / 2,
    0. * deg,
    360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_mylar_Ge76 = new G4LogicalVolume(mylar_Ge76,
    mylar_mat,
    "logical_mylar_Ge76");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_mylar_Ge76),
    logic_mylar_Ge76,
    "Ge76_mylar_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//FORTH FOIL: Name: 'Al7'
//Consists of the 'target_Al7', 'ring_Al7', 'mylar_Al7'.
//We need to set (a) the distance between the end of flange and the left corner of
//every 'subfoil',
//(b) the center of every 'subfoil', (c) the depth of each and (d) the radius of
//each.
//Variables:
//Distances between the end of flange and the left corner of every 'subfoil':
G4double d_flange_target_Al7 = 4.69 * cm;
G4double d_flange_ring_Al7 = 4.60 * cm;
G4double d_flange_mylar_Al7 = 4.60 * cm;
//Depths for every 'subfoil':
G4double l_target_Al7 = 0.05 * cm;
G4double l_ring_Al7 = 0.14 * cm;
G4double l_mylar_Al7 = 0.09 * cm;
//Radiuses:
G4double r_target_Al7 = 1.000 * cm;

```

```

G4double r_ring_min_A17 = 2.431 * cm;
G4double r_ring_max_A17 = 2.983 * cm;
G4double r_mylar_A17 = 2.431 * cm;
//z-axis position of the left corners of the 'subfoils':
G4double z_flange_target_A17 = endOfFlange + d_flange_target_A17;
G4double z_flange_ring_A17 = endOfFlange + d_flange_ring_A17;
G4double z_flange_mylar_A17 = endOfFlange + d_flange_mylar_A17;
//z-axis positions in the centers of the 'subfoils':
G4double center_target_A17 = z_flange_target_A17 + l_target_A17 * 0.5;
G4double center_ring_A17 = z_flange_ring_A17 + l_ring_A17 * 0.5;
G4double center_mylar_A17 = z_flange_mylar_A17 + l_mylar_A17 * 0.5;
//Starting the construction of the geometry:
//A17-target. Material = aluminum.
G4Tubs *target_A17 = new G4Tubs("target-A17",
                                0,
                                r_target_A17,
                                l_target_A17 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_target_A17 = new G4LogicalVolume(target_A17,
                                                         aluminum,
                                                         "logical_target_A17");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_target_A17),
    logic_target_A17,
    "A17_target_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//A17-ring. Material = iron.
G4Tubs *ring_A17 = new G4Tubs("ring-A17",
                              r_ring_min_A17,
                              r_ring_max_A17,
                              l_ring_A17 / 2,
                              0. * deg,
                              360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_ring_A17 = new G4LogicalVolume(ring_A17,
                                                         aluminum,
                                                         "logical_ring_A17");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_ring_A17),
    logic_ring_A17,
    "A17_ring_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//A17-mylar.
G4Tubs *mylar_A17 = new G4Tubs("mylar-A17",
                                0,
                                r_mylar_A17,
                                l_mylar_A17 / 2,
                                0. * deg,
                                360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_mylar_A17 = new G4LogicalVolume(mylar_A17,
                                                         mylar_mat,
                                                         "logical_mylar_A17");

```

```

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_mylar_A17),
    logic_mylar_A17,
    "A17_mylar_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//FIFTH FOIL: Name: 'AuX'
//Consists of the 'target_AuX', 'ring_AuX', 'mylar_AuX'.
//We need to set (a) the distance between the end of flange and the left corner of
    every 'subfoil',
// (b) the center of every 'subfoil', (c) the depth of each and (d) the radius of
    each.
//Variables:
//Distances between the end of flange and the left corner of every 'subfoil':
G4double d_flange_target_AuX = 4.88 * cm;
G4double d_flange_ring_AuX   = 4.80 * cm;
G4double d_flange_mylar_AuX  = 4.80 * cm;
//Depths for every 'subfoil':
G4double l_target_AuX = 0.06 * cm;
G4double l_ring_AuX   = 0.14 * cm;
G4double l_mylar_AuX  = 0.08 * cm;
//Radiuses:
G4double r_target_AuX   = 1.000 * cm;
G4double r_ring_min_AuX = 2.431 * cm;
G4double r_ring_max_AuX = 2.983 * cm;
G4double r_mylar_AuX    = 2.431 * cm;
//z-axis position of the left corners of the 'subfoils':
G4double z_flange_target_AuX = endOfFlange + d_flange_target_AuX;
G4double z_flange_ring_AuX   = endOfFlange + d_flange_ring_AuX;
G4double z_flange_mylar_AuX  = endOfFlange + d_flange_mylar_AuX;
//z-axis positions in the centers of the 'subfoils':
G4double center_target_AuX = z_flange_target_AuX + l_target_AuX * 0.5;
G4double center_ring_AuX   = z_flange_ring_AuX   + l_ring_AuX   * 0.5;
G4double center_mylar_AuX  = z_flange_mylar_AuX  + l_mylar_AuX  * 0.5;
//Starting the construction of the geometry:
//AuX-target. Material = G4_Au.
G4Tubs *target_AuX = new G4Tubs("target-AuX",
    0,
    r_target_AuX,
    l_target_AuX / 2,
    0. * deg,
    360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_target_AuX = new G4LogicalVolume(target_AuX,
    gold,
    "logical_target_AuX");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_target_AuX),
    logic_target_AuX,
    "AuX_target_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//AuX-ring. Material = iron.
G4Tubs *ring_AuX = new G4Tubs("ring-AuX",
    r_ring_min_AuX,
    r_ring_max_AuX,
    l_ring_AuX / 2,
    0. * deg,
    360. * deg);

```

```

        360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_ring_AuX = new G4LogicalVolume(ring_AuX,
                                                    iron,
                                                    "logical_ring_AuX");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_ring_AuX),
    logic_ring_AuX,
    "AuX_ring_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//AuX-mylar.
G4Tubs *mylar_AuX = new G4Tubs( "mylar-AuX",
    0,
    r_mylar_AuX,
    l_mylar_AuX / 2,
    0. * deg,
    360. * deg);

G4LogicalVolume *logic_mylar_AuX = new G4LogicalVolume(mylar_AuX,
                                                    mylar_mat,
                                                    "logical_mylar_AuX");

new G4PVPlacement(
    0,
    G4ThreeVector(0., 0., center_mylar_AuX),
    logic_mylar_AuX,
    "AuX_mylar_phys",
    logicWorld,
    false,
    0,
    true);

//End of the geometry.

```

Η γεωμετρία για τις υπόλοιπες ενέργειες (2.9MeV και 3.45MeV) βρίσκεται στον σύνδεσμο:

https://github.com/Giannistsrb/geant4_thesis

6.2 GEANT4 - Macro αρχείο για τον ορισμό της νέας δέσμης

```

# Macro file for the gaussian deuteron beam:

/gps/particle deuteron
/gps/ene/type Gauss
/gps/ene/mono 3.45 MeV
/gps/ene/sigma 1. keV
/gps/pos/type Beam
/gps/pos/centre 0. 0. -139. cm
/gps/pos/sigma_r 1.5 mm
/gps/ang/type beam1d
/gps/ang/sigma_r .1 deg
/gps/ang/rot1 1. 0. 0.
/gps/ang/rot2 0. -1. 0.

```

Βιβλιογραφία

- [1] Book for Application Developers. Book For Application Developers 11.1 documentation. (n.d.).
<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html>
- [2] “Los Alamos National Laboratory: MCNP Home Page.
<https://mcnp.lanl.gov/>.
- [3] Birgersson, E. (n.d.). NeuSDeSc-Neutron Source Description Software Manual. JRC Publications Repository.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC51437>
- [4] TENDL-2021 Nuclear Data Library.
https://tendl.web.psi.ch/tendl_2021/tendl2021.html
- [5] JENDL.
<https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/jendl.html>
- [6] JEFF Nuclear Data Library - NEA.
<https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/>
- [7] ENDF: Evaluated Nuclear Data File.
<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- [8] “Tandem Laboratory/Institute of Nuclear Physics/NCSR Demokritos.”
[http://tandem.inp.demokritos.gr/..](http://tandem.inp.demokritos.gr/)
- [9] Hendricks, J. S., Swinhoe, M. T., Favalli, A. (2022). Monte Carlo N-Particle simulations for nuclear detection and safeguards: An Examples-Based Guide for Students and Practitioners. Springer Nature.
- [10] Ζιαγκοβά Αναστασία. “Μελέτη των παρασιτικών νετρονίων στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος” με χρήση του κώδικα Monte Carlo GEANT4.”
<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/55577>
- [11] Event Biasing Techniques — Book For Application Developers 11.1 Documentation.
<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html>
- [12] Fessler, A H, et al. “Neutron Activation Cross-Section Measurements from 16 to 20 MeV for Isotopes of F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, Ti, v, Mn, Fe, Nb, Sn, and Ba.” Nuclear Science and Engineering, vol. 134, no. 2, 1 Feb. 2000, pp. 171–200, <https://doi.org/10.13182/nse99-14>. Accessed 23 Sept. 2023.

