



Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος
Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής
Φυσικής



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών &
Φυσικών Επιστημών
Τομέας Φυσικής

Μεταπτυχιακή εργασία Δ.Π.Μ.Σ
«Φυσική και Τεχνολογικές εφαρμογές»

Υπολογιστική μελέτη της ροής νετρονίων με χρήση της αντίδρασης
 ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_1\text{He}$

Μαραγγούλη Γεωργία

Επιβλέπων

Αναπληρωτής Καθηγητή Ε.Μ.Π.
Κόκκορης Μιχάλης

Αθήνα 2015

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στον τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος».

Ο πρώτος άνθρωπος που θα ήθελα να ευχαριστήσω είναι ο Δρ. Κόκκορης Μιχάλης, ο επιβλέπων της εργασίας αυτής, ο οποίος με βοήθησε να κάνω μια πολύ καλή αρχή στον τομέα της Πυρηνικής Φυσικής και μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με όσο το δυνατόν περισσότερα ακόμη και αν δεν είχαν άμεση σχέση με τη διεκπεραίωση της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Βλαστού Ρόζα και τον κ. Πατρώνη Νικόλαο, δύο καθηγητές που έδειξαν ενδιαφέρον και βοήθησαν με θέληση και όρεξη να βγει όσο το δυνατόν καλύτερη η εργασία αυτή. Ένας ακόμη άνθρωπος, ο κ. Λαγογιάννης Αναστάσιος, που η βοήθεια του ήταν διακριτική αλλά πολύ σημαντική, συγκαταλέγεται σε αυτούς που θα ήθελα να ευχαριστήσω. Είναι ένας ερευνητής που αποτελεί ευχάριστη συνεργασία για τον οποιοδήποτε.

Η κ. Διακάκη Μαίρη, έπαιξε σημαντικό ρόλο για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, μιας και με βοήθησε από την αρχή σε όλες μου τις απορίες κάνοντας συζητήσεις στη συνέχεια, ακόμη και από μακριά για οτιδήποτε προέκυπτε. Η βοήθεια της ήταν καταλυτική και η θέληση της να συνεργαστεί μαζί μου μεγάλη.

Δε θα μπορούσα να ξεχάσω όλα τα παιδιά της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Τομέα Φυσικής, τα οποία με δέχτηκαν με χαμόγελο και όρεξη να με βοηθήσουν, αρχικά να εγκλιματιστώ στο νέο μου περιβάλλον και στη συνέχεια σε οτιδήποτε χρειαζόμουν για την έρευνα και ολοκλήρωση της εργασίας μου. Αναφέρω τα ονόματά τους συνοδευόμενα από το λιγότερο που θα μπορούσα να κάνω για να τους ευχαριστήσω, Πρεκετές Κωνσταντίνος, Παππά Φιλοθέη, Σταματόπουλος Αθανάσιος, Καλαμαρά Αντιγόνη, Πανέτα Βαλεντίνα, Ανδρουλακάκη Φρόσω.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1.....	7
Εισαγωγή.....	7
1.1 Συστήματα ADS για παραγωγή ενέργειας	7
1.2 Ρόλος της Πυρηνικής Φυσικής στα συστήματα ADS	8
1.3 Σκοπός της μελέτης ροής νετρονίων	9
Κεφάλαιο 2.....	10
Πηγές Νετρονίων.....	10
2.1 Πηγές μονοενεργειακών νετρονίων	10
2.1.1 Παραγωγή μονοενεργειακής δέσμης νετρονίων.....	10
2.1.2 Στόχοι	11
2.2 Αντιδράσεις πηγών νετρονίων.....	11
2.2.1 Η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$	11
Κεφάλαιο 3.....	16
Υπολογιστικός προσδιορισμός της ροής νετρονίων από την αντίδραση $12\text{H}(d,n)23\text{He}$	16
3.1 Λειτουργία κώδικα NeuSDesc	16
3.2 Ισχύς ανάσχεσης (Stopping Power).....	18
3.3 Διασκεδασμός (Straggling)	20
3.4 Ο κώδικας SRIM	21
3.5 Υπολογισμός παραγόμενων νετρονίων	21
3.5.1 Νετρόνια από την $12\text{H}(d,n)23\text{He}$	21
3.5.2 Νετρόνια από την $12\text{Hd}, np12\text{H}$	23
3.6 Συνολικός υπολογισμός παραγόμενων νετρονίων	23
3.7 Εφαρμογή του κώδικα NeuSDesc	24
3.7.1 Γεωμετρία.....	24
3.7.2 Αποτελέσματα	25
Κεφάλαιο 4.....	26
Πειραματικός προσδιορισμός ροής νετρονίων και σύγκριση με θεωρητικές προσομοιώσεις	26
4.1 Περιγραφή πειράματος.....	26
4.2 Επιτάχυνση δέσμης	27
4.3 Ανίχνευση θραυσμάτων	28
4.4 Πειραματικές μετρήσεις.....	30
4.5 Ανάλυση δεδομένων-Αποτελέσματα	31
Κεφάλαιο 5.....	38
Σύνοψη και συμπεράσματα.....	38

Βιβλιογραφία..... 39

Περίληψη

Σχεδόν μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων ενεργειακού εύρους 4-10 MeV παραγόμενη από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d,n){}^3_2\text{He}$, χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις ενεργών διατομών στον επιταχυντή 5.5 MeV Tandem του εργαστηρίου του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος». Για ακριβείς μετρήσεις ενεργών διατομών, είναι σημαντικό να είναι πλήρως κατανοητή η απόδοση της πηγής νετρονίων και να έχουν χαρακτηριστεί οι συνθήκες του πειράματος. Το γεγονός της απουσίας γνώσης της πειραματικής ενεργειακής κατανομής των νετρονίων από μια αντίδραση αλλά και του φαινομένου της διάσπασης δευτερίου της δέσμης, οδήγησε στη μελέτη μέσω υπολογιστικών μεθόδων με χρήση του κώδικα NeuSDesc, ένα κώδικα προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας τεχνική Monte Carlo. Με σκοπό την αξιολόγηση των προσομοιώσεων του ενεργειακού φάσματος νετρονίων, πραγματοποιήθηκε πείραμα σχάσης σε ισότοπα ουρανίου γνωστής ενεργού διατομής. Η παραγόμενη δέσμη νετρονίων από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d,n){}^3_2\text{He}$, σε ενέργειες 4-10 MeV προσέπεσαν σε ισότοπα ${}^{238}\text{U}$. Τα θραύσματα σχάσης της αντίδρασης (n,f) ανιχνεύθηκαν από ανιχνευτές MicroMegas και χρησιμοποιώντας τη γνωστή ενεργό διατομή της αντίδρασης ${}^{238}\text{U}(n,f)$, υπολογίστηκε πειραματικά η ροή νετρονίων και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη ροή που προέκυψε από τον κώδικα NeuSDesc.

Το κίνητρο της εργασίας, έγκειται στο γεγονός ότι πρώτη φορά αναπτύχθηκε στο εργαστήριο IRMM του Βελγίου, πρόγραμμα (NeuSDesc) το οποίο υπολογίζει αναλυτικά το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up) στα πλαίσια της παραγωγής νετρονίων μέσω αντίδρασης με δέσμη δευτερίων. Η διάσπαση του δευτερίου μολύνει την κύρια δέσμη με παρασιτικά νετρόνια χαμηλότερης ενέργειας, ανεπιθύμητα για τις εργασίες πειραματικής μελέτης πυρηνικών αντιδράσεων. Επομένως, είναι μεγάλης σημασίας να αξιολογηθεί το πρόγραμμα αυτό και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πειράματα Πυρηνικής Φυσικής που σχετίζονται με τις αντιδράσεις που παρουσιάζουν το φαινόμενο της διάσπασης του δευτερίου.

Αρχικά έγινε ο θεωρητικός υπολογισμός της ροής νετρονίων μεταξύ των ενεργειών 4-10 MeV μέσω του προγράμματος NeuSDesc. Στην συνέχεια, αναλύθηκαν τα δεδομένα από το πείραμα σχάσης και υπολογίστηκε η πειραματική ροή νετρονίων στις ενέργειες νετρονίων 4-10 MeV. Στις χαμηλές ενέργειες, όπου οι αντιδράσεις νετρονίων δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up), έγινε σύγκριση μεταξύ των τιμών ροής νετρονίων που προέκυψαν μέσω προσομοίωσης και μέσω πειράματος, ώστε να καθοριστεί η ακριβής γεωμετρία και η περιγραφή του προβλήματος που υπεισέρχεται στον κώδικα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του κώδικα για χαμηλές ενέργειες νετρονίων πριν την εμφάνιση της διάσπασης δευτερίου έτσι ώστε να προχωρήσει η μελέτη και σε μεγαλύτερες ενέργειες νετρονίων που παρουσιάζεται το φαινόμενο, μέσω προσομοιώσεων. Έτσι, έγινε η αξιολόγηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων του προγράμματος σε όλο το υπό μελέτη εύρος ενεργειών νετρονίων.

Abstract

Quasi-monoenergetic neutron beams, in the energy range 4-10 MeV produced via the ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ reaction, have been used for cross section measurements at the 5.5 MeV tandem T11/25 Accelerator Laboratory of NCSR “Demokritos”. For accurate cross section measurements, it is important that the the performance of neutron source is well understood and that the experimental conditions are well characterized. In absence of experimental knowledge for the energy dependence of the neutron fluence and the number of the neutrons produced from the deuteron break up phenomenon , an investigation has been carried out using the Monte Carlo simulation the NeuSDesc code. In order to verify the simulated neutron energy spectra, fission experiment with Uranium isotopes has been performed. The produced neutron beam from the ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ reaction, has been interacted with the ${}^{238}\text{U}$ isotope. The fission fragments of the (n,f) reaction have been detected from micromegas detectors and using the well-known cross section of the ${}^{238}\text{U}$, the neutron flux has been calculated.

The motivation of this work is that first time appeared program (NeuSDesc) which analytically calculates the decay phenomenon deuterium (break up). For this reason, it is of great significance to evaluate this program and may be used in Nuclear Physics experiments related reactions exhibit the phenomenon of break up.

Initially, the theoretical neutron flux was calculated in the energy range of 4-10 MeV using the code NeuSDesc. Subsequently, the experimental data from the fission run were analyzed and the experimental neutron flux was calculated in this energy range. A comparison between the neutron flux via simulation and experiment has been performed in low energies, where the deuteron break up phenomenon in neutron induced reactions does not exist, in order to determine the exact geometry and the description of the problem involved in the code. In this way, the reliability of the code for low energy neutrons before the appearance of the break up phenomenon has been ensured, in order to advance the study at higher neutron energies where the break up phenomenon is important. In the high energy region, the simulated reaction rates for the neutron induced fission on ${}^{238}\text{U}$, were in good agreement with the experiment ones, thus confirming the validity of the simulations. Thus, the NeuSDesc code has been tested and validated in the whole neutron range from 4 to 10 MeV.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Από τότε που ανακαλύφθηκαν, το 1932, τα νετρόνια έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην θεμελιώδη έρευνα και σε πολλούς τομείς των εφαρμογών της πυρηνικής φυσικής. Ακόμη και πριν οι ιδιότητές τους γίνουν πλήρως κατανοητές, τα νετρόνια ήταν ένα δυνατό εργαλείο για τη μελέτη της πυρηνικής δομής. Η ανακάλυψη το 1938 της πυρηνικής σχάσης οφείλονταν στην έρευνα με νετρόνια. Η σημαντικότητα των νετρονίων παγιώθηκε όταν η επιστημονική κοινότητα συνειδητοποίησε πως οι αλυσιδωτές αντιδράσεις νετρονίων είναι ικανές να οδηγήσουν στην αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας από τη διαδικασία της σχάσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρώτο εργοστάσιο αντιδραστήρα σχάσης έχει χρονολογία εγκατάστασης το 1954 στο Obninsk. Έκτοτε, αντιδραστήρες ισχύος εγκαταστάθηκαν σε αρκετούς σταθμούς παγκοσμίως. Σημαντικές είναι και οι εφαρμογές που έχουν και σε άλλους τομείς έρευνας. Κάποιοι από τους τομείς αυτούς εκτός φυσικά από τον τομέα της φυσικής και της έρευνας, κυρίως για εφαρμογές ενέργειας, είναι και ο τομέας της ιατρικής και της βιολογίας για εφαρμογές διάγνωσης, θεραπείας πολλών ειδών καρκίνου και ραδιοβιολογικές μελέτες και τέλος ο τομέας της βιομηχανίας για εφαρμογές παραγωγής ραδιοϊσότοπων, ραδιογραφία με νετρόνια και χαρακτηρισμό υλικών. Είναι φανερό ότι η μελέτη των πηγών νετρονίων έχει μεγάλο ενδιαφέρον και αποτελεί σημαντική ανάγκη για τομείς που έχουν ανθρωπιστικό και επιστημονικό όφελος. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, ακολουθεί μία μικρή ανάλυση της εφαρμογής των νετρονίων στον τομέα της πυρηνικής φυσικής και πυρηνικής τεχνολογίας έτσι ώστε να δοθεί και ο στόχος της εργασίας.

1.1 Συστήματα ADS για παραγωγή ενέργειας

Η ενεργειακή εκμετάλλευση των αντιδράσεων σχάσης και των καυσίμων που χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό με τη μεγάλη αποδοτικότητα του κύκλου παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, θα μπορούσαν να λύσουν το ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη, με την προϋπόθεση εξασφαλισμένης ασφάλειας λειτουργίας των μονάδων παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Τα αποκαλούμενα «Συστήματα Οδηγούμενα από Επιταχυντή» (ADS), ίσως αποτελέσουν τη λύση στο πρόβλημα αυτό. Πρόκειται για συστήματα παραγωγής ενέργειας που αποτελούνται από έναν επιταχυντή υψηλών ενεργειών, συζευγμένο με έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Μεγάλο μέρος από τα νετρόνια για την παραγωγή ενέργειας μέσω σχάσης, παρέχονται από τον επιταχυντή και τα υπόλοιπα από το σχάσιμο υλικό. Ένα μέρος της παραγόμενης ενέργειας στον αντιδραστήρα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του επιταχυντή, έτσι δημιουργείται ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, εφόσον τα νετρόνια στον πυρήνα του αντιδραστήρα δεν θα παράγονται αποκλειστικά από το σχάσιμο υλικό των καυσίμων, το όλο σύστημα θα μπορεί να είναι μονίμως σε υποκρίσιμη κατάσταση, αποκλείοντας την πιθανότητα να προκύψει ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή αντίδραση προκαλώντας πυρηνικό ατύχημα. Η παραγωγή ενέργειας σε αυτά τα συστήματα θα μπορεί να γίνει τόσο από τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες (U, Pu, Th), όσο και από τα απόβλητα του κύκλου παραγωγής ενέργειας, ώστε να επιτυγχάνεται μεταστοιχείωση των πυρηνικών αποβλήτων. Ο όρος αυτός της μεταστοιχείωσης, αναφέρεται στις διαδικασίες πυρηνικών αντιδράσεων οι οποίες οδηγούν σε μετατροπή των μακρόβιων ραδιενεργών ισοτόπων, που περιέχονται στα πυρηνικά απόβλητα, σε άλλα βραχύβια ισότοπα. Η μεταστοιχείωση όταν πραγματοποιείται μέσω αντιδράσεων σχάσης, μπορεί να συνεισφέρει στην παραγωγή ενέργειας. Αυτός ο μηχανισμός παραγωγής ενέργειας, θα επιτρέπει στα συστήματα ADS, να χρησιμοποιούν τα απόβλητα σαν ωφέλιμη ενέργεια.

1.2 Ρόλος της Πυρηνικής Φυσικής στα συστήματα ADS

Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα τόσο της μεταστοιχείωσης όσο και της παραγωγής ενέργειας σε ένα σύστημα ADS, είναι η μορφή που θα έχει το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Η μορφή του εξαρτάται από το φάσμα νετρονίων που παράγεται από τον επιταχυντή και από την αλληλεπίδραση των νετρονίων του επιταχυντή με τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Στα συστήματα ADS, η παραγωγή νετρονίων από τον επιταχυντή, γίνεται μέσω αντιδράσεων θρυμματισμού που προκαλούνται από ισχυρή δέσμη πρωτονίων που μπορεί να φτάσει σε ενέργεια της τάξης μεγέθους των λίγων GeV. Ανάλογα με το υλικό του στόχου θρυμματισμού, το φάσμα των νετρονίων που παράγεται από τη δέσμη πρωτονίων έχει διαφορετικά ενεργειακά χαρακτηριστικά.

Για την περίπτωση των ακτινίδων, η μεταστοιχείωση όλων των ισοτόπων μέσω αντιδράσεων σχάσης ώστε να συντελείται παράλληλα παραγωγή ενέργειας, ευνοείται μόνο όταν τα ενεργειακά φάσμα περιέχει κυρίως ταχέα νετρόνια. Από την άλλη, όταν το ενεργειακό φάσμα περιέχει θερμικά και επιθερμικά νετρόνια, ευνοούνται οι αντιδράσεις (n,γ) , μέσω των οποίων είναι δυνατόν να μεταστοιχειωθούν κυρίως τα ελαφρύτερα προϊόντα της σχάσης. Για να επιτευχθεί ένα τέτοιο φάσμα νετρονίων, σαν στόχος θρυμματισμού στον επιταχυντή χρησιμοποιείται ένας συμπαγής μεταλλικός κύβος από μόλυβδο. Με τη χρήση αυτού του στόχου, το παραγόμενο φάσμα νετρονίων, περιέχει ενέργειες έως και λίγα GeV. Ακολούθως, οι πυρήνες της περιοχής των ακτινίδων, αλληλεπιδρούν με τα ταχέα νετρόνια μέσω διαφόρων πυρηνικών αντιδράσεων. Συνεπώς, για να προσδιοριστούν οι συνθήκες λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, ιδανικά, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η πιθανότητα να πραγματοποιηθούν οι επιμέρους αντιδράσεις, για κάθε εμπλεκόμενο πυρήνα και όλες τις ενέργειες ενδιαφέροντος, ώστε να είναι δυνατό να προσδιοριστούν από τα δεδομένα αυτά, τόσο η απόδοση της μεταστοιχείωσης όσο και το παραγόμενο φάσμα νετρονίων από τις αντιδράσεις αυτές.

Για την Πυρηνική Φυσική, η πιθανότητα αυτή μεταφράζεται ως ο προσδιορισμός των ενεργών διατομών πραγματοποίησης αντιδράσεων (n,xn) και (n,xnf) , που αποτελούν τα κυριότερα κανάλια αλληλεπίδρασης με όλους τους πυρήνες που έχουν ατομικό αριθμό από $Z=90$ έως $Z=96$ και για ενέργειες νετρονίων που φτάνουν τουλάχιστον μέχρι 1 GeV. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να γίνει και ο προσδιορισμός της ενέργειας και της κατανομής των εκπεμπόμενων νετρονίων από τα διάφορα κανάλια αλληλεπίδρασης. Ωστόσο, για τους πυρήνες της περιοχής των ακτινίδων, υπάρχουν λίγα πειραματικά δεδομένα σχετικά με τις ενεργές διατομές των προαναφερθέντων πειραματικών αντιδράσεων εξαιτίας της πολυπλοκότητας των εμπλεκόμενων μηχανισμών αντίδρασης στους πυρήνες αυτούς. Έτσι σε μεγάλο βαθμό, οι υπολογισμοί που σχετίζονται με αυτά τα στοιχεία, στηρίζονται σε θεωρητικά μοντέλα πυρηνικών αντιδράσεων. Με τη σειρά τους, τα θεωρητικά αυτά μοντέλα στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε ημιεμπειρικές παραμέτρους. Η έλλειψη πειραματικών δεδομένων ωστόσο, μειώνει τη δυνατότητα ελέγχου της αξιοπιστίας των παραμέτρων που υπεισέρχονται στους θεωρητικούς υπολογισμούς, καθώς και τον αξιόπιστο προσδιορισμό της ακρίβειας των υπολογιζόμενων ποσοτήτων. Είναι αναγκαία λοιπόν, η πειραματική και θεωρητική διερεύνηση αντιδράσεων (n,xn) και (n,xnf) με πυρήνες της περιοχής ακτινίδων σε ένα μεγάλο ενεργειακό εύρος, ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι παράμετροι των μοντέλων για τους πυρήνες που συμμετέχουν στις αντιδράσεις αυτές και να αυξηθεί η ακρίβεια των θεωρητικών υπολογισμών για όλη την περιοχή ενδιαφέροντος.

1.3 Σκοπός της μελέτης ροής νετρονίων

Στα πλαίσια του σκοπού του προσδιορισμού των ενεργών διατομών αντιδράσεων (n,f), πραγματοποιήθηκε πείραμα σχάσης $^{236}\text{U}(n,f)$ στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτου». Χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση $^2_1\text{H}(d,n)^3_2\text{He}$ για την παραγωγή μονοενεργειακής δέσμης νετρονίων σε ενεργειακό εύρος 4.5-10 MeV. Η δέσμη νετρονίων προσέπεσε σε κατανεμημένους στη σειρά, στόχους ισότοπων ουρανίου με γνωστή ενεργό διατομή και σε ισότοπο ουρανίου με άγνωστη ενεργό διατομή (^{236}U). Γνωρίζοντας την ενεργό διατομή των ισότοπων ουρανίου, μπορεί να υπολογιστεί η ροή παραγόμενων νετρονίων από την αντίδραση $^2_1\text{H}(d,n)^3_2\text{He}$ που προσέπεσε σε αυτά και ακολούθως να υπολογιστεί η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{236}\text{U}(n,f)$ γνωρίζοντας πλέον τη ροή νετρονίων που προσέπεσε στο ισότοπο αυτό. Η τεχνική αυτή είναι πολύ διαδεδομένη για την εύρεση ενεργού διατομής μιας συγκεκριμένης αντίδρασης.

Στον συλλογισμό της παραγράφου 1.2, χρειάζεται να προστεθεί το γεγονός ότι για τη διερεύνηση αντιδράσεων (n,xn) και (n,xnf), αναγκαία χρίζεται η ακριβής περιγραφή της ροής των νετρονίων στο επιθυμητό ενεργειακό εύρος. Η περιγραφή αυτή αντιμετωπίζει δυσκολίες εξαιτίας του γεγονότος ότι τα νετρόνια, ως ηλεκτρικώς ουδέτερα σωματίδια, δεν ιονίζουν την ύλη όταν διέρχονται μέσα από αυτήν και η πορεία τους δεν εκτρέπεται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Συνεπώς, ένα νετρόνιο δύσκολα μπορεί να επιταχυνθεί σε επιθυμητές ενέργειες και να ανιχνευθεί. Εν συνεχεία, δε μπορεί να καθοριστεί πλήρως η ροή μιας δέσμης νετρονίων. Για το λόγο αυτό, ο σκοπός της εργασίας αυτής, σταματά στον πρώτο στόχο του πειράματος που πραγματοποιήθηκε, δηλαδή στον υπολογισμό της παραγόμενης ροής νετρονίων από την αντίδραση D-D που προσέπεσε σε ισότοπο ουρανίου με γνωστή ενεργό διατομή αντίδρασης (n,f). Ο επόμενος στόχος, είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων από το πείραμα με τις προβλέψεις από τον κώδικα προσομοίωσης NeuSDesc που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο IRMM του Βελγίου (1) για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων από συγκεκριμένες αντιδράσεις, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πειράματα Πυρηνικής Φυσικής υπολογίζοντας τα νετρόνια είτε από την κύρια αντίδραση είτε από τυχόν παρασιτικές αντιδράσεις.

Κεφάλαιο 2

Πηγές Νετρονίων

Οι πηγές νετρονίων μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς τρόπους, σύμφωνα με την τεχνική με την οποία παράγονται τα νετρόνια, σύμφωνα με τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται ή σύμφωνα με την ενέργεια που έχουν τα παραγόμενα νετρόνια. Οι τεχνικές με τις οποίες μπορούν να παραχθούν νετρόνια ποικίλουν ενώ η κάθε μία αντιμετωπίζεται διαφορετικά και παράγει νετρόνια διαφορετικής ενέργειας και διαφορετικής έντασης.

2.1 Πηγές μονοενεργειακών νετρονίων

Οι μονοενεργειακές δέσμες νετρονίων σε εύρος από μερικά keV έως 20 MeV παράγονται από ηλεκτροστατικές γεννήτριες ή κυκλοτρόνια και είναι σε μεγάλη χρήση σε πολλά εργαστήρια. Αυτό το ενεργειακό εύρος καλύπτει πολλά από τα απαιτούμενα δεδομένα πυρηνικής φυσικής και για αντιδράσεις σχάσης και για αντιδράσεις σύντηξης. Παρακάτω θα γίνει περιγραφή της παραγωγής μονοενεργειακής δέσμης νετρονίων ακολουθούμενη από μία περιγραφή και χαρακτηρισμό της πηγής αντίδρασης παραγωγής νετρονίων που αποτελεί και εργαλείο της εργασίας αυτής.

2.1.1 Παραγωγή μονοενεργειακής δέσμης νετρονίων

Οι πυρηνικές αντιδράσεις που παράγουν μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων επάγονται από δέσμη φορτισμένων σωματιδίων η οποία επιταχύνεται από ηλεκτροστατικές γεννήτριες ή κυκλοτρόνια πάνω σε κατάλληλους στόχους. Οι στόχοι είναι συνήθως καθαρά στοιχεία ή χημικές ενώσεις σε στερεά κατάσταση, ενώ αέριοι στόχοι χρησιμοποιούνται επίσης. Οι αέριοι στόχοι περιλαμβάνονται από μια κυλινδρική κυψελίδα μέσα στο οποίο το αέριο-στόχος εσωκλείεται από λεπτό παράθυρο στην είσοδο της κυψελίδας, με σκοπό να την απομονώσει από το κενό της εγκατάστασης του επιταχυντή και να επιτρέψει τη μεταφορά της προσπίπτουσας δέσμης φορτισμένων σωματιδίων. Στο πίσω μέρος της κυψελίδας υπάρχει ένα παχύ μεταλλικό φύλλο για να διακόπτει την πορεία της δέσμης. Για δεδομένη πηγή αντίδρασης και ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης στον στόχο, η ενέργεια των νετρονίων ποικίλει σε σχέση με τη γωνία εκπομπής ως προς τη διεύθυνση της δέσμης, έχοντας μέγιστο στις μηδέν μοίρες. Οι μετρήσεις με μονοενεργειακά νετρόνια διεξάγονται κατά προτίμηση στις μηδέν μοίρες επειδή τα εκπεμπόμενα νετρόνια από μια κοινή πηγή αντίδρασης ως επί το πλείστον κορυφώνονται προς τα εμπρός. Για την παραγωγή μονοενεργειακών δεσμών νετρονίων, χρησιμοποιούνται συνήθως αντιδράσεις που το τελικό τους προϊόν δε μπορεί να βρεθεί σε διεγερμένη ενεργειακή στάθμη. Έτσι, εξασφαλίζεται η μονοενεργειακότητα των νετρονίων για καθορισμένη γωνία εκπομπής. Στην πράξη, αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας σαν στόχο ισότοπα υδρογόνου και σαν βλήμα πάλι κάποιο ισότοπο του υδρογόνου, τις περισσότερες φορές πρωτόνια ή δευτέρια. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες αντιδράσεις τέτοιου τύπου, είναι οι ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ (αντίδραση D-D) και η ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ (αντίδραση D-T). Με τις αντιδράσεις αυτές μπορούν να παραχθούν μονοενεργειακές δέσμες νετρονίων με ενέργειες από 4 έως 21 MeV.

Οι πιο σημαντικές ιδιότητες των μονοενεργειακών πηγών νετρονίων είναι η ένταση της ροής των νετρονίων, η ενεργειακή ευκρίνεια και ανάλυση, η ανισοτροπία στην ένταση και στην ενέργεια και ο βαθμός ελευθερίας από μόλυνση νετρονίων υποβάθρου από δευτερεύουσες πηγές. Αυτές οι ιδιότητες εξαρτώνται και από την πηγή αντίδρασης και από το σχήμα και τη δομή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως στόχος. Η ένταση των νετρονίων σε δεδομένη γωνία εκπομπής σε εργαστήριο σχετιζόμενη με την κατεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης, καθορίζεται από τη διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης, το πάχος του στόχου και το μέγιστο ρεύμα δέσμης που προσπίπτει στον στόχο.

2.1.2 Στόχοι

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των αντιδράσεων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νετρονίων και εξαρτώνται από τον στόχο που χρησιμοποιείται, είναι η απόδοση παραγωγής νετρονίων (yield), ο διασκεδασμός της ενέργειας των νετρονίων (energy straggling), η ελάχιστη μόλυνση της δέσμης από νετρόνια που προέρχονται από παρασιτικές αντιδράσεις και τέλος η μεγάλη διάρκεια ζωής των στόχων. Πρακτικά χαρακτηριστικά τα οποία έχουν σημαντική σημασία, είναι το σχήμα του στόχου και η ευκολία να αντικατασταθεί.

Η επιλογή του στόχου καθορίζεται από την επιθυμητή ενέργεια νετρονίων. Οι αντιδράσεις ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ και ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ παρέχουν πηγές μονοενεργειακών νετρονίων στο ενεργειακό εύρος των 2-13 MeV. Η αντίδραση ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ έχει υψηλή ενεργό διατομή και αποτελεί πλεονέκτημα για την παραγωγή δέσμης νετρονίων στις μηδέν μοίρες στο ενεργειακό εύρος 2 έως 5 MeV, ενώ η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ έχει υψηλή ενεργό διατομή για νετρόνια ενέργειας 5 έως 9 MeV. Για ενέργειες νετρονίων 9 έως 13 MeV είναι προτιμητέα η αντίδραση ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ σε πολλές εφαρμογές, παρά το γεγονός της χαμηλής ενεργού διατομής, επειδή μειώνεται το φαινόμενο μόλυνσης από νετρόνια προερχόμενα από τη διάσπαση δευτερίου (break up). Στη συγκεκριμένη εργασία, για την παραγωγή νετρονίων χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$, η τεχνική της οποίας απαιτεί αέριο στόχο αποτελούμενο από δευτέρια σε αέρια μορφή περιβαλλόμενα από κυλινδρική κυψελίδα. Για το λόγο αυτό αναλύονται παρακάτω μόνο οι αέριοι στόχοι

Αέριοι στόχοι

Μία τυπική κυψελίδα αερίου (gas cell) αποτελείται από έναν λεπτού τοιχώματος σωλήνα με μία φλάντζα στο ένα άκρο με το οποίο συνδέεται το παράθυρο εισόδου. Το άλλο άκρο συνήθως κλείνεται και χρησιμοποιείται για να σταματά τη δέσμη. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για το σχεδιασμό ενός τέτοιου στόχου, είναι η επιλογή του υλικού του φύλλου ως παράθυρο εισόδου. Το φύλλο εισόδου πρέπει να είναι λεπτό και να έχει χαμηλό ατομικό αριθμό για να ελαχιστοποιεί την απώλεια ενέργειας, τον ενεργειακό διασκεδασμό και την πολλαπλή σκέδαση μικρής γωνίας της δέσμης δευτερίου, ενώ θα πρέπει να έχει τη μηχανική δύναμη να αντέχει πίεση τουλάχιστον 1 ατμόσφαιρας. Επιπλέον, θα πρέπει να αντέχει ρεύμα δέσμης αρκετών μA και να παραμένει αδιαπέραστο όταν ζεσταίνεται. Τέλος, θα πρέπει να έχει χαμηλή απόδοση παραγωγής (d,n), δηλαδή να μην κάνει αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων. Τα υλικά που εκπληρώνουν αυτές τις απαιτήσεις για δέσμη δευτερίων πάνω από 3 MeV, είναι το μολυβδαίνιο ή το νικέλιο με πάχος περίπου 4 mg/cm^2 . Το φύλλο από μολυβδαίνιο χρησιμοποιείται συνήθως σε υψηλότερες ενέργειες δέσμης επειδή αντέχει σε υψηλότερη πίεση αερίου και έχει χαμηλή απόδοση παραγωγής νετρονίων (d,n), ενώ το φύλλο από νικέλιο είναι συχνά επιθυμητό σε χαμηλότερες ενέργειες προσπίπτουσας δέσμης επειδή μπορεί να έχει λεπτό πάχος.

2.2 Αντιδράσεις πηγών νετρονίων

Οι πιο συνήθεις αντιδράσεις πηγών νετρονίων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μονοενεργειακής δέσμης νετρονίων στο ενεργειακό εύρος από 0.1 έως 20 MeV είναι οι ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ και η ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για κάθε μία από τις αντιδράσεις αυτές είναι, οι κινηματικές ποσότητες, οι συναρτήσεις διέγερσης, η γωνιακή κατανομή και οι ανταγωνιστικές αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων από διάσπαση δευτερίου (break-up). Παρακάτω αναλύεται η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ (D-D) η οποία αποτελεί και αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας καθώς και η ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$ η οποία αποτελεί την ανταγωνιστική της αντίδραση για υψηλότερες ενέργειες δέσμης δευτερίων. (2)

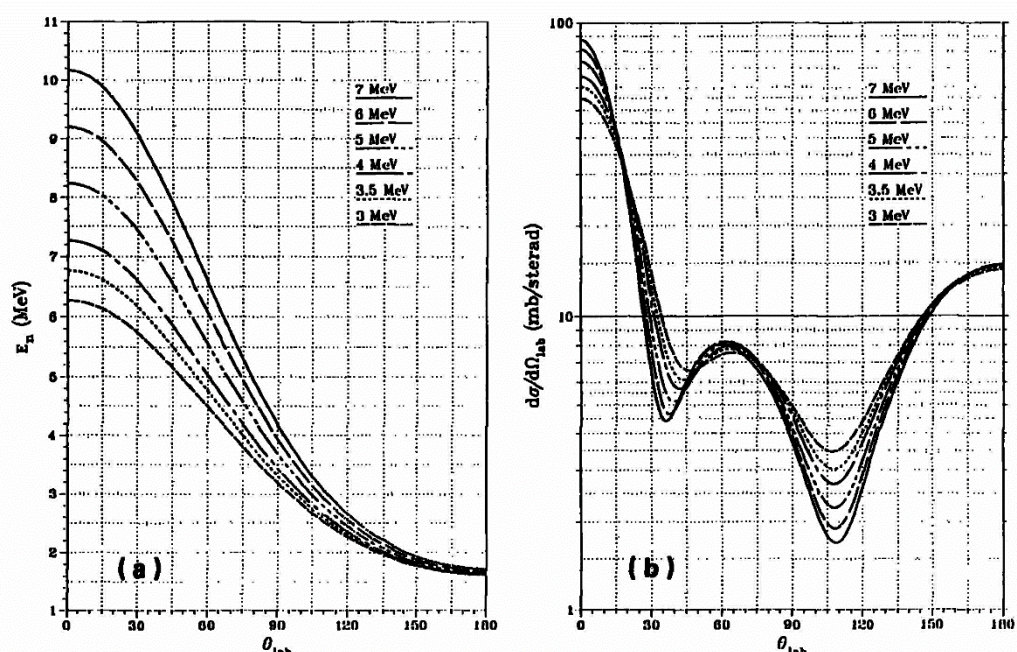
2.2.1 Η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$

Η αντίδραση D-D, ιστορικά ήταν η πρώτη που μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή νετρονίων από επιταχυντές. Η τεχνική που επικράτησε τελικά για την παραγωγή νετρονίων, είναι να χρησιμοποιείται αέριος στόχος δευτερίου, ο οποίος χωρίζεται από το κενό της εγκατάστασης του επιταχυντή με μεταλλικό φύλλο. Η δέσμη δευτερίων από τον

επιταχυντή, αφού διασχίσει το διαχωριστικό παράθυρο, προσπίπτει στους πυρήνες του αερίου δευτερίου και παράγει δέσμη νετρονίων με ισχυρή κινηματική προτίμηση στις εμπρός γωνίες. Με τη χρήση αερίου στόχου, αυξάνεται σημαντικά η παραγόμενη ροή νετρονίων σε σχέση με τους στερεούς στόχους, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω.

Η δυσκολία σε αυτήν την περίπτωση, είναι η μεγαλύτερη ασάφεια στην ενέργεια της δέσμης, καθώς για να εξασφαλιστεί ικανή ποσότητα αερίου δευτερίου μέσα στον αέριο στόχο, πρέπει το μήκος του να είναι μεγάλο. Έτσι, το σημείο πραγματοποίησης της αντίδρασης δεν είναι περιορισμένο σε ένα σημείο και αυτό έχει σαν συνέπεια την ασάφεια στη γωνία εκπομπής των νετρονίων και στη στερεά γωνία ανάμεσα στην πηγή των νετρονίων και στον στόχο που ακτινοβολείται.

Η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ έχει τιμή Q ίση με 3,269 MeV (3) και χρησιμοποιείται για παραγωγή νετρονίων ενέργειας πάνω από 4 MeV. Οι ενέργειες των παραγόμενων νετρονίων για διάφορες γωνίες εκπομπής και για διαφορετικές ενέργειες δέσμης δευτερίων από 3 έως 7 MeV απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1), μαζί με τη διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης.



Σχήμα 2.1: Τιμές ενέργειας νετρονίων ως προς τη γωνία εκπομπής, και Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης D-D, για ενέργειες δέσμης δευτερίων 3-7 MeV (4)

Στην περίπτωση της αντίδρασης ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$, η κυριότερη πηγή παρασιτικών νετρονίων, ειδικά όσο αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης, είναι οι αντιδράσεις διάλυσης του δευτερίου (break-up). Παρακάτω, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των αντιδράσεων και η επίδρασή τους στη μονοενεργειακότητα της παραγόμενης δέσμης νετρονίων.

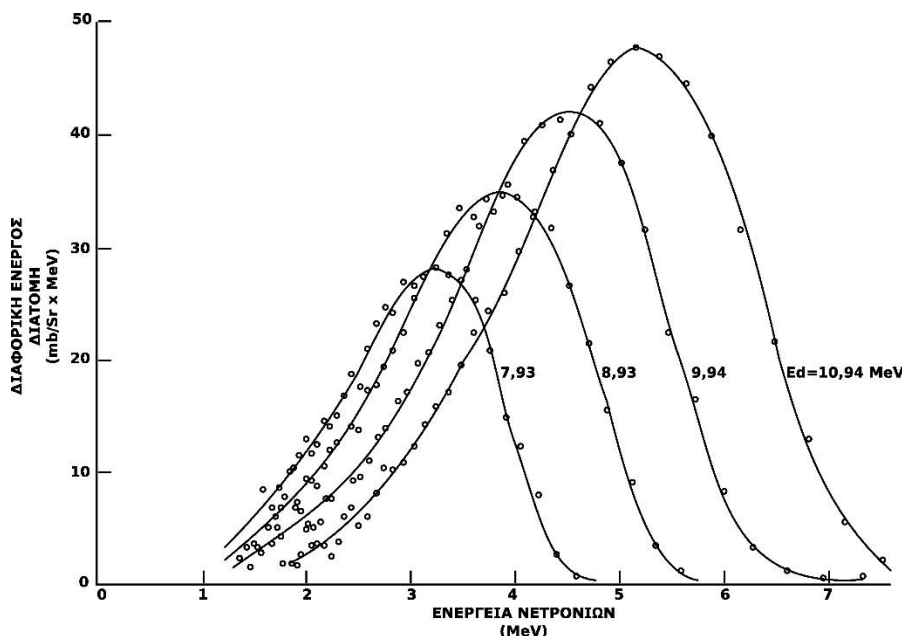
Οι αντιδράσεις ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$ και ${}^2\text{H}(d,2n){}^2\text{H}$

Οι αντιδράσεις διάλυσης του δευτερίου ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$ και ${}^2\text{H}(d,2n){}^2\text{H}$, γίνονται σημαντικές όταν η ενέργεια της δέσμης δευτερίων ξεπεράσει τις ενέργειες των 4.45 MeV και 8.9 MeV αντίστοιχα. Πρόκειται για άμεσες αντιδράσεις των οποίων η κινηματική περιγραφή είναι πολύπλοκη και οι πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή και γωνιακή κατανομή των προϊόντων της αντίδρασης στο χώρο είναι γνωστές από πειραματικά δεδομένα μόνο για την

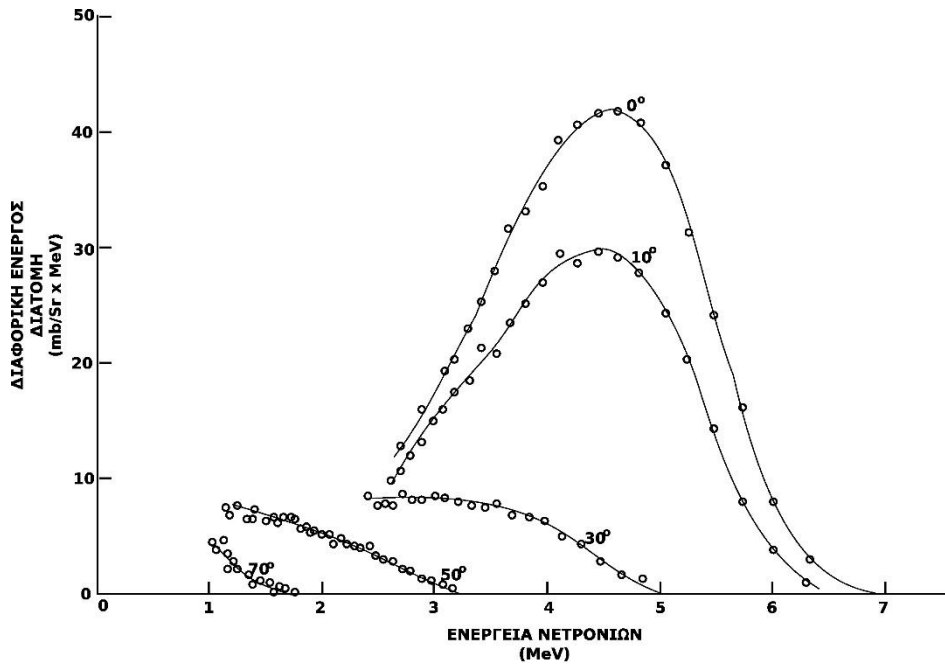
αντίδραση ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$. Μέχρι την ενέργεια δέσμης δευτερίων 9 MeV, η αντίδραση αυτή έχει κυρίαρχη συνεισφορά στην παραγωγή παρασιτικών νετρονίων. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής που οι μετρήσεις έγιναν με ενέργειες δευτερίων έως 7 MeV, γίνεται μελέτη της αντίδρασης ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$.

${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$

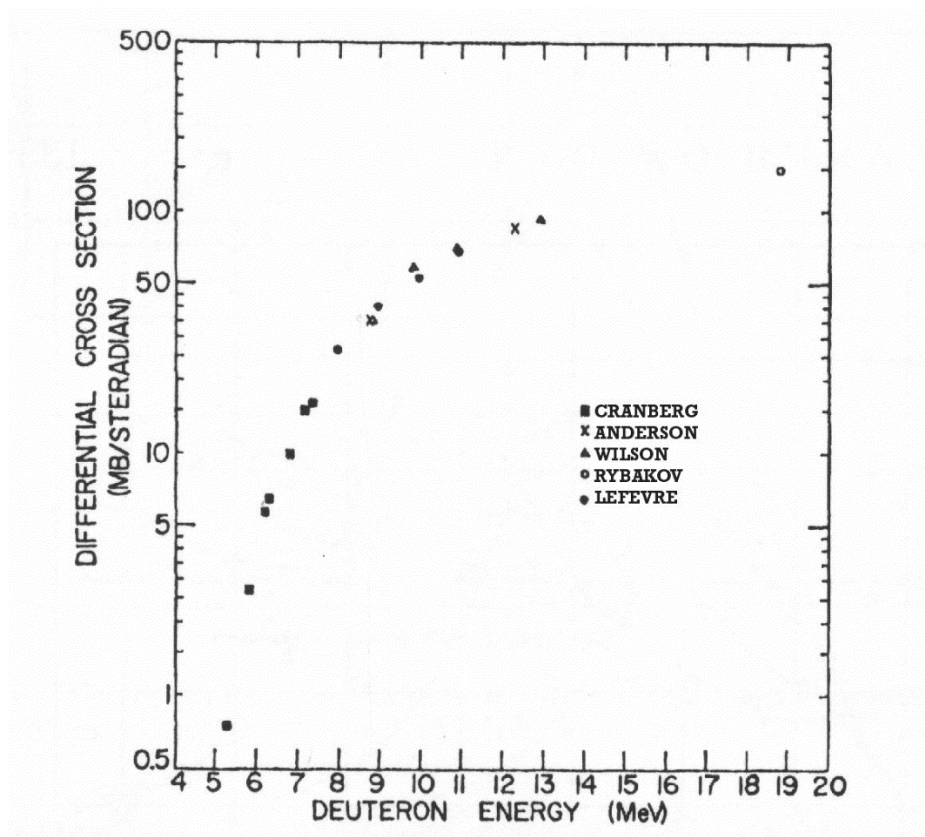
Η αντίδραση ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$ έχει τιμή Q ίση με -2.225 MeV (5). Το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου της δέσμης πιο απλά, είναι προϊόντα της αντίδρασης ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$, που συνεισφέρουν στη δέσμη νετρονίων. Πιο συγκεκριμένα, όταν συμβαίνει η αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d,pn){}^2_1\text{H}$ και η δέσμη δευτερίων ξεπεράσει το κατώφλι της ενέργειας των 4.45 MeV (Ed), τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της διάσπασης δευτερίου, δηλαδή μέσα στην κυψελίδα πραγματοποιείται και η ανταγωνιστική, της ${}^2_1\text{H}(d,n){}^3_2\text{He}$, αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d,np){}^2_1\text{H}$ που δίνει πρωτόνια και νετρόνια σε χαμηλότερες ενέργειες μη επιθυμητές. Όπως είναι σύνηθες στις περιπτώσεις άμεσων αντιδράσεων, η κατανομή των νετρονίων στο χώρο παρουσιάζει έντονη προτίμηση στις εμπρός γωνίες. Παρακάτω, φαίνεται η ενεργειακή (Σχήμα 2.2) και γωνιακή (Σχήμα 2.3) κατανομή των νετρονίων από την αντίδραση ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$ για ενέργεια δέσμης δευτερίων της τάξης των 10 MeV. Η ενεργειακή κατανομή των παραγόμενων νετρονίων για διάφορες ενέργειες δέσμης δευτερίων και για γωνία 0° , φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Το εμβαδόν κάτω από κάθε καμπύλη του σχήματος αυτού, εκφράζει τη διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης $d\sigma/d\Omega$. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, υπάρχει μεγάλη αύξηση της παραγωγής νετρονίων από την αντίδραση διάλυσης όσο αυξάνεται η ενέργεια δέσμης δευτερίων. Επιπλέον, η αύξηση αυτή συνοδεύεται από διεύρυνση του ενεργειακού φάσματος των παραγόμενων νετρονίων και μετακίνηση του κεντροειδούς της ενεργειακής κατανομής τους προς υψηλότερες ενέργειες με παράλληλη πλάτυνση. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης για γωνία εκπομπής 0° , όπου φαίνεται η αύξηση της παραγωγής νετρονίων από διάσπαση δευτερίου στην ενεργειακή περιοχή δέσμης δευτερίων 5-10 MeV.



Σχήμα 2.2 Ενεργειακή κατανομή των παραγόμενων νετρονίων από την αντίδραση ${}^2\text{H}(d,pn){}^2\text{H}$ σε γωνία 0° (6).



Σχήμα 2.3 Γωνιακή κατανομή των παραγόμενων νετρονίων (6).



Σχήμα 2.4 Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^2\text{H}(d, n)^2\text{H}$ για εκπομπή νετρονίων υπό γωνία 0° . (6)

Οι αντιδράσεις $^{nat}\text{Mo}(d,n)$ και $^{nat}\text{Mo}(d,2n)$

Η αλληλεπίδραση της δέσμης με το παράθυρο εισόδου του κυλινδρικής κυψελίδας είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές παρασιτικών νετρονίων. Ένα από τα πλέον συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται σαν παράθυρο είναι το μολυβδαίνιο, το οποίο αντέχει σε μεγάλες τιμές ρεύματος δευτερίων όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Τα διάφορα ισότοπα του μολυβδαινίου αντιδρούν με τα δευτέρια της δέσμης μέσω αντιδράσεων $^{nat}\text{Mo}(d,n)$. Οι αντιδράσεις αυτές αρχίζουν να παράγουν νετρόνια για ενέργειες δέσμης μεγαλύτερες από 4 MeV. Για τα περισσότερα από τα ισότοπα, η συνάρτηση διέγερσης παρουσιάζει μεγάλη αύξηση για ενέργειες από 4 έως 6 MeV, με ακόμη μεγαλύτερη αύξηση σε ενέργειες από 6 έως 10 MeV (7). Η ενεργειακή κατανομή των νετρονίων που παράγονται από τις αντιδράσεις αυτές δεν είναι γνωστές από πειραματικά δεδομένα, ωστόσο η επίδραση των νετρονίων αυτών στις μετρήσεις μπορεί να εκτιμηθεί με μέτρηση αδειάζοντας τον στόχο αερίου από το αέριο δευτερίου. Η τεχνική αυτή πραγματοποιήθηκε και στο πείραμα τα δεδομένα του οποίου συγκρίθηκαν με τους θεωρητικούς υπολογισμούς της εργασίας αυτής.

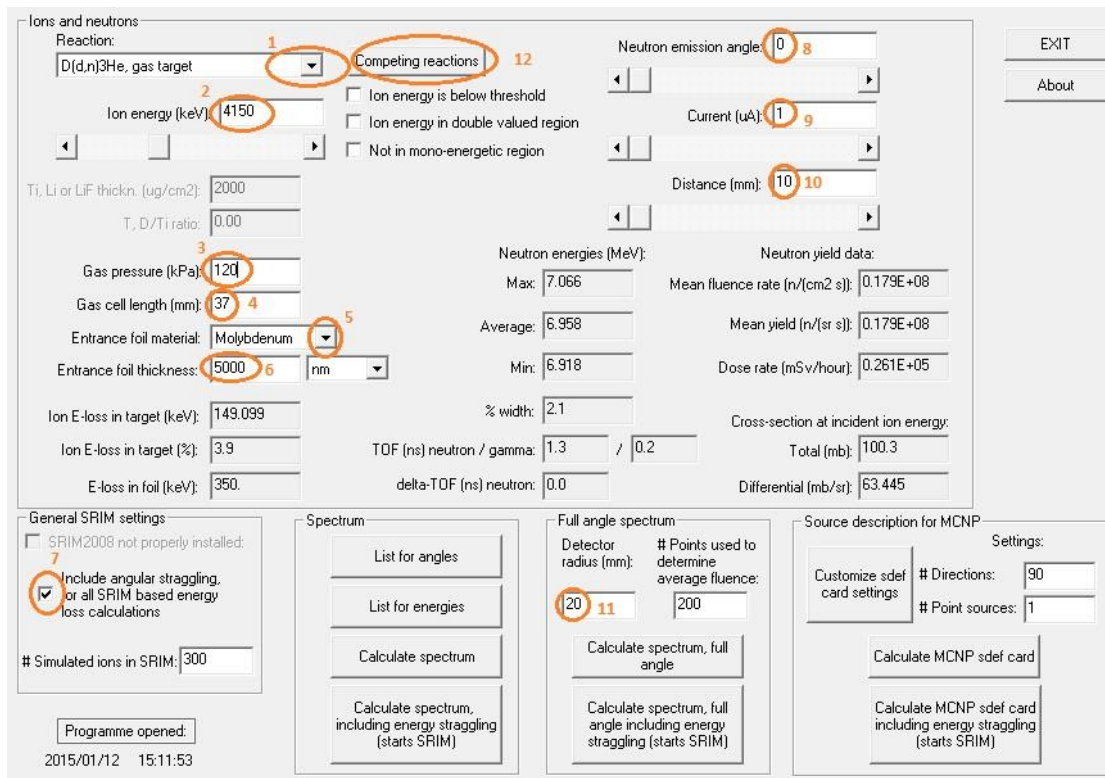
Κεφάλαιο 3

Υπολογιστικός προσδιορισμός της ροής νετρονίων από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$

Στο πρώτο σκέλος της εργασίας αυτής, έγινε ο θεωρητικός υπολογισμός της ροής νετρονίων από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ (D-D), χρησιμοποιώντας τον κώδικα NeuSDesc (Neutron Source Description) του Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM). Είναι ένας κώδικας προσομοιώσεων που αναπτύχθηκε στην ανάγκη του θεωρητικού υπολογισμού των παραγόμενων νετρονίων από πυρηνικές αντιδράσεις. Κάνει γρήγορο υπολογισμό της τάξης των 20 λεπτών και χρησιμοποιείται για απλή γεωμετρία, ενώ για πιο σύνθετη γεωμετρία μπορεί να δώσει κάρτα εισόδου πλήρους περιγραφής πηγής νετρονίων για το πρόγραμμα προσομοιώσεων MCNP. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται η λειτουργία του κώδικα NeuSDesc εξηγώντας τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται βήμα βήμα για την εύρεση της ροής νετρονίων. Επίσης, παρουσιάζεται η γεωμετρία της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή και τέλος δίνονται τα θεωρητικά αποτελέσματα της ροής νετρονίων από την αντίδραση D-D.

3.1 Λειτουργία κώδικα NeuSDesc

Το πρόγραμμα NeuSDesc-Neutron Source Description του Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων παραγόμενα από συγκεκριμένες αντιδράσεις που περιέχει. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το «παράθυρο» που εμφανίζεται στον χρήστη όταν χρησιμοποιήσει τον κώδικα. Το πλεονέκτημά του κώδικα αυτού, είναι το γεγονός ότι κάνει αναλυτικό υπολογισμό της ενέργειας και της ροής των παραγόμενων νετρονίων από μία αντίδραση, αλλά και των νετρονίων που παράγονται από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up). Οι υπολογισμοί του κώδικα για την κύρια δέσμη παραγόμενων νετρονίων βασίζονται στην κινηματική από τις αναφορές (8) και (9). Για τον υπολογισμό των νετρονίων από το φαινόμενο διάλυσης δευτερίου, χρησιμοποιείται μη σχετικιστική κινηματική τριών σωμάτων (10). Η απώλεια ενέργειας των ιόντων της δέσμης υπολογίζεται χωρίζοντας το στόχο αερίου (gas cell) σε 100 διαμερίσεις και υπολογίζοντας την απώλεια ενέργειας σε κάθε διαμέριση, χρησιμοποιώντας δεδομένα της ισχύος ανάσχεσης από τις αναφορές (11) και (12). Επιπλέον, ο ενεργειακός και γωνιακός διασκεδασμός μπορεί να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις του κώδικα SRIM-2008, ο οποίος πραγματοποιεί υπολογισμούς με την τεχνική Monte Carlo (13). Πιο συγκεκριμένα, ο κώδικας χωρίζει την κυψελίδα σε 100 διαμερίσεις και για κάθε διαμέριση υπολογίζει, την ισχύ ανάσχεσης (stopping power), το διασκεδασμό (energy+lateral straggling), τη διαφορική ενεργός διατομή ($d\sigma/d\Omega$) της αντίδρασης και τέλος την απόδοση παραγωγής νετρονίων ($Y=\sum_{d-d} I N_t$), όπου σ_{d-d} είναι η ολική ενεργός διατομή της αντίδρασης D-D, I είναι το ρεύμα της δέσμης δευτερίου και N_t ο αριθμός των σωματιδίων του στόχου. Για την περιγραφή, επομένως, της λειτουργίας του κώδικα NeuSDesc, αναλύονται παρακάτω οι ποσότητες αυτές.



Σχήμα 3. 1: Παράθυρο χρήστη του κώδικα NeuSDesc

Ως εισαγωγικά στοιχεία στο παράθυρο χρήστη δίνονται τα εξής:

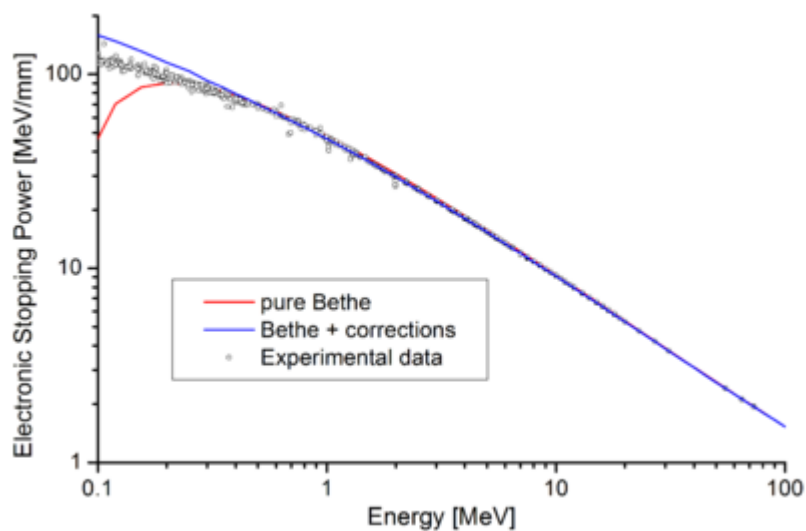
1. Επιλογή πυρηνικής αντίδρασης
2. Επιλογή ενέργειας προσπιπτόντων ιόντων σε keV
3. Πίεση αερίου στην κυψελίδα σε περίπτωση στόχου αερίου σε kPa
4. Μήκος κυψελίδας σε περίπτωση στόχου κυψελίδας σε mm
5. Επιλογή υλικού του παραθύρου εισόδου
6. Πάχος παραθύρου εισόδου σε nm ή $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
7. Επιλογή του κώδικα για να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς του αποτελέσματα και δεδομένα του κώδικα SRIM
8. Γωνία εκπομπής νετρονίων
9. Ρεύμα της δέσμης ιόντων για τον υπολογισμό του φορτίου της δέσμης σε μA
10. Απόσταση μέτρησης ροής νετρονίων σε mm
11. Ακτίνα ανίχνευσης νετρονίων σε mm
12. Επιλογή να συμπεριλάβει τις αντιδράσεις του φαινομένου διάσπασης δευτερίου (break up)

3.2 Ισχύς ανάσχεσης (Stopping Power)

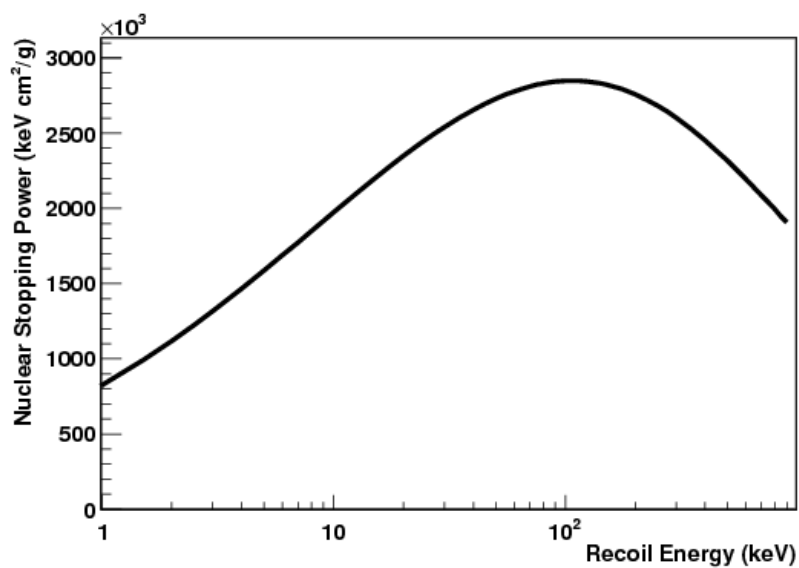
Η φυσική του φαινομένου της απώλειας ενέργειας (energy loss) είναι περίπλοκη, περιλαμβάνοντας πολλά είδη αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στο ιόν του βλήματος, τον πυρήνα του στόχου και τα ηλεκτρόνια του στόχου. Τα πειραματικά δεδομένα της απώλειας ενέργειας ιόντων (ion energy loss) είναι αρκετά σε αριθμό. Μία συλλογή στο διαδίκτυο μπορεί να αποτελείται από πάνω από 25.000 δεδομένα. Υπάρχουν πολλοί ορισμοί που σχετίζονται με την έννοια της απώλειας ενέργειας σωματιδίων που διασχίζουν ένα υλικό. Ως energy loss, αναφέρεται ο μέσος όρος απώλειας κινητικής ενέργειας ΔE του σωματιδίου διερχομένου από ύλη και έχει μονάδες eV, keV, MeV, κτλ. Η ποσότητα αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό του σωματιδίου. Το φαινόμενο της ισχύος ανάσχεσης (stopping power), ορίζεται ως το ποσό απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους ($\Delta E/\Delta x$) και έχει μονάδες MeV/mm, eV/ μm , κτλ. Η ποσότητα αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό του μέσου. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει η συσχέτιση του ορισμού του energy loss με τον ορισμό του stopping power.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διανύει ένα υλικό, είναι πιο πιθανό να συγκρουστεί με ηλεκτρόνιο ενός ατόμου του υλικού, παρά με τον πυρήνα. Αυτό συμβαίνει γιατί το σωματίδιο δε «βλέπει» τον πυρήνα του ατόμου λόγω των ηλεκτρονίων που περιστρέφονται γύρω του, δίνοντας μια εικόνα *θωράκισης* του πυρήνα στο σωματίδιο. Το φαινόμενο αυτό ορίζει και την ποσότητα του effective charge. Έτσι, κυρίαρχος μηχανισμός όταν το σωματίδιο διασχίζει ένα υλικό, είναι η σκέδαση Coulomb ηλεκτρονίου ατόμου.

Η σπουδαιότητα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο ιόν του βλήματος και το μέσο του στόχου, εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα και το φορτίο του ιόντος και από τα άτομα του στόχου. Στις ταχύτητες που είναι χαμηλότερες από την ταχύτητα ηλεκτρονίου του Bohr (v_0), το ιόν τείνει να πραγματοποιήσει ηλεκτρονική σύλληψη. Στις πολύ χαμηλές ενέργειες, κυριαρχεί το φαινόμενο της πυρηνικής ισχύος ανάσχεσης (nuclear energy loss) όπου πραγματοποιείται ελαστική σύγκρουση με τον πυρήνα του στόχου. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ιόντος, το φαινόμενο της πυρηνικής ισχύος ανάσχεσης μειώνεται κατά έναν παράγοντα $1/E$. Ταυτόχρονα, η ηλεκτρονιακή ισχύς ανάσχεσης (electronic energy loss) γίνεται κύριο φαινόμενο στο οποίο πραγματοποιείται ανελαστική σύγκρουση με τα ηλεκτρόνια του ατόμου (14) (15). Η ολική ισχύς ανάσχεσης ισούται με το άθροισμα της πυρηνικής και ηλεκτρονιακής συμβολής. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η μορφή που η ηλεκτρονιακή ισχύς ανάσχεσης σε σχέση με την ενέργεια του βλήματος. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η πυρηνική ισχύς ανάσχεσης.

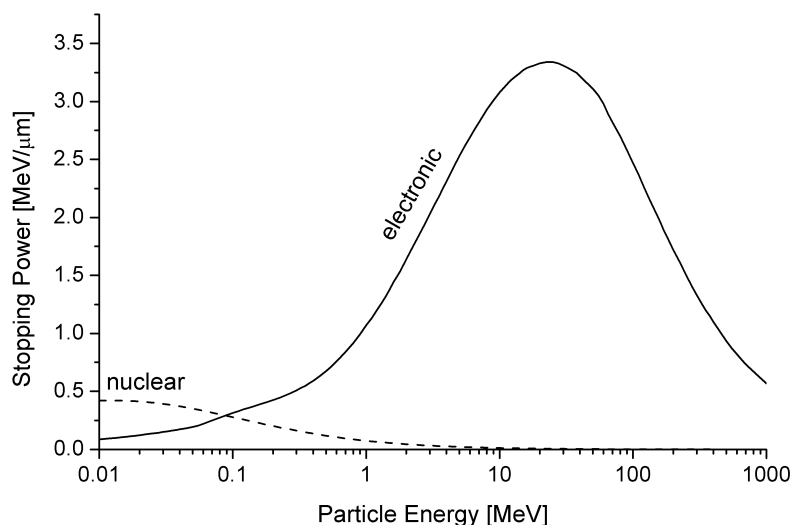


Σχήμα 3.2 Ηλεκτρονική ισχύς ανάσχεσης: (16)



Σχήμα 3.3: Πυρηνική ισχύς ανάσχεσης (17)

Στο παρακάτω Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η ολική ισχύς ανάσχεσης σε μέσο αλουμινίου. Η πυρηνική ισχύς ανάσχεσης είναι μεγαλύτερη από τη ηλεκτρονική σε χαμηλή ενέργεια. Για πολύ ελαφρά ιόντα σε βαριά υλικά, η πυρηνική ισχύς ανάσχεσης είναι ασθενέστερη από την ηλεκτρονική σε όλες τις ενέργειες.



Εικόνα 3.4: Ολική ισχύς ανάσχεσης σε μέσο αλουμινίου. (18)

Τα πειραματικά δεδομένα της ισχύος ανάσχεσης είναι αρκετά σε αριθμό. Αυτά τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί σε έναν αριθμό από βάσεις δεδομένων και έχουν χρησιμοποιηθεί για κώδικες υπολογισμού της ισχύος ανάσχεσης. Πολλά από τα προγράμματα αυτά στηρίζονται σε ημιεμπειρικές προσεγγίσεις υπολογισμού της ποσότητας αυτής. Ο πιο διαδεδομένος κώδικας υπολογισμού της ολικής ισχύος ανάσχεσης είναι αυτός των Ziegler, Biersack και Littmark εφαρμοσμένος σε διάφορες εκδοχές του προγράμματος TRIM/SRIM. Το SRIM βασίζεται στη προσαρμογή των παραμέτρων της σχέσης Bethe-Bloch σε πειραματικά δεδομένα.

3.3 Διασκεδασμός (Straggling)

Η ισχύς ανάσχεσης (stopping power) σχετίζεται με το φαινόμενο του διασκεδασμού (straggling). Όταν μία δέσμη από φορτισμένα σωματίδια εισχωρήσει σε ύλη, η επιβράδυνσή της σχετίζεται με τη διάδοση της ενεργειακής διάχυσης. Αυτό το φαινόμενο καλείται ενεργειακός διασκεδασμός (energy straggling). Η ισχύς ανάσχεσης της δέσμης δεν έχει μια συγκεκριμένη τιμή. Αν όλη η δέσμη χάνει κάποιο ποσοστό ενέργειας, τότε δε χάνουν το ίδιο ποσοστό όλα τα σωματίδια της δέσμης. Όταν η ενέργεια μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια του στόχου στην ατομική σύγκρουση, το ενεργειακό εύρος της ισχύος ανάσχεσης πλησιάζει σε κατανομή Gauss. Δηλαδή, η ενέργεια των σωματιδίων διαχέεται έτσι ώστε να φτιάχνει η κατανομή της μία κατανομή Gauss, με μέγιστο, το ποσό της ενέργειας που έμεινε στο συγκεκριμένο πάχος του υλικού. Η εξάπλωση της ενέργειας εξαιτίας του διασκεδασμού, αυξάνεται με το βάθος μέχρι η χαμηλότερη ενέργεια των ιόντων να φτάσει την ενέργεια της μέγιστης ισχύος ανάσχεσης.

Εκτός από τον ενεργειακό διασκεδασμό που επιδέχονται τα σωματίδια της δέσμης, υπάρχει και το φαινόμενο του χωρικού διασκεδασμού (lateral straggling). Δηλαδή, η δέσμη γίνεται πιο πλατιά όσο προχωρά μέσα σε ένα μέσο εξαιτίας των σκεδάσεων σε συνδυασμό με την απώλεια ενέργειας της δέσμης. Όσο μεγαλύτερη γίνεται η ενέργεια της δέσμης, τόσο πιο οξεία γίνεται η κατανομή του ενεργειακού διασκεδασμού και τόσο μειώνεται ο χωρικός διασκεδασμός. (15)

Γίνεται φανερό, πως ο υπολογισμός της ισχύος ανάσχεσης μίας δέσμης (stopping power) σε έναν στόχο, γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τον υπολογισμό του ενεργειακού και χωρικού διασκεδασμού της δέσμης. Ο διασκεδασμός της δέσμης σε ένα υλικό, αποτελεί στατιστικό φαινόμενο όπως και οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων της δέσμης και του υλικού. Στο σημείο αυτό, του υπολογισμού που κάνει ο κώδικας NeuSDesc, χρησιμοποιεί των κώδικα TRIM/SRIM, για να πάρει το ποσό της ενέργειας που χάνουν τα δευτέρια σε κάθε διαμέριση της κυψελίδας συμπεριλαμβανομένης και της πληροφορίας του ενεργειακού και χωρικού διασκεδασμού για τους κινηματικούς υπολογισμούς των νετρονίων.

3.4 Ο κώδικας SRIM

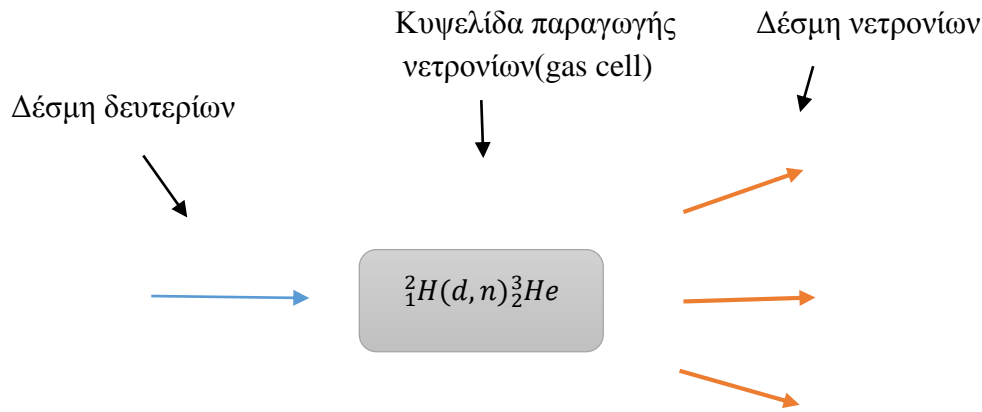
Ο κώδικας **SRIM** (*The Stopping and Range of Ions in Solids*) αποτελείται από μία ομάδα προγραμμάτων που υπολογίζουν την απώλεια και το εύρος ενέργειας (έως 2 GeV/amu) μέσα σε υλικό χρησιμοποιώντας υπολογισμούς κβαντικής μηχανικής συγκρούσεων ιόντων-ατόμων (θεωρώντας το κινούμενο άτομο ως ιόν και το άτομο-στόχο ως άτομο). Ο υπολογισμός αυτός γίνεται πολύ αποτελεσματικός με τη χρήση των στατιστικών αλγορίθμων που επιτρέπουν στο ιόν να κάνει άλματα μεταξύ των υπολογιζόμενων συγκρούσεων και κατόπιν να παίρνει το μέσο όρο των αποτελεσμάτων των συγκρούσεων για το ενδιάμεσο χάσμα. Ο πυρήνας του SRIM είναι το πρόγραμμα TRIM (Transport of ions in matter). Είναι ένα διαδεδομένο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από τους James F. Ziegler and Jochen P. Biersack το 1983 και κάθε πέντε έτη αναβαθμίζεται. Ο κώδικας SRIM βασίζεται στη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo των παραμέτρων της σχέσης Bethe-Bloch σε πειραματικά δεδομένα. Ως εισαγωγικές παραμέτρους δέχεται το είδος του ιόντος δέσμης, την ενέργεια του και το υλικό του στόχου. Ως αποτελέσματα δημιουργεί λίστα ή γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων. Ο κώδικας SRIM ανήκει στην κατηγορία προσομοιώσεων BCA (binary collision approximation) (13). Σε αυτές τις μεθόδους, η μετακίνηση των ιόντων που εμφυτεύονται στο δείγμα αντιμετωπίζεται ως μία διαδοχή επιμέρους συγκρούσεων μεταξύ του ιόντος ανάκρουσης και των ατόμων του δείγματος. Για κάθε επιμέρους σύγκρουση, το ολοκλήρωμα της κλασικής σκέδασης επιλύεται με αριθμητική ολοκλήρωση. Τα ιόντα πρόσκρουσης είναι συνήθως λιγότερα σε αριθμό απ' όσα χρησιμοποιούνται σε ένα πείραμα. Οπότε, η μέθοδος του κώδικα SRIM, που χρησιμοποιεί ο κώδικας NeuSDesc, περιορίζεται στον αριθμό ατόμων της δέσμης δευτερίου.

3.5 Υπολογισμός παραγόμενων νετρονίων

Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθούν οι αντιδράσεις ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ και ${}^2_1\text{H}(d, np){}^2_1\text{H}$ κινηματικά για να περιγραφούν οι υπολογισμοί του κώδικα όσον αφορά την ενέργεια, τη γωνία και τη διαφορική ενεργό διατομή των παραγόμενων νετρονίων όσο από την πρώτη αντίδραση τόσο και από τη δεύτερη, την ανταγωνιστική της.

3.5.1 Νετρόνια από την ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$

Δέσμη δευτερίων κατάλληλης ενέργειας (πειραματικά, εξερχόμενη από επιταχυντικό σύστημα) διοχετεύεται στην κυψελίδα που περιέχει δευτέριο (gas cell). Στην κυψελίδα πραγματοποιείται η αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ και εξέρχονται νετρόνια που πλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως νέα δέσμη (νετρονίων) σε καινούργιο στόχο. Ένα απλοποιημένο σχήμα της διάταξης φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της αντίδρασης ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$.

Η διατήρηση της ολικής ενέργειας στην αντίδραση αυτή δίνει:

$$m_x c^2 + T_x + m_a c^2 + T_a = m_y c^2 + T_y + m_b c^2 + T_b \quad (3.1)$$

όπου, $x = {}^2_1\text{H}$, $a = d$, $Y = {}^3_2\text{He}$, $b = n$,

T είναι οι κινητικές ενέργειες και m οι μάζες ηρεμίας.

Ορίζεται η ποσότητα Q (Q value) η οποία υπολογίζεται :

$$Q = (m_{\text{initial}} - m_{\text{final}}) c^2 = (m_x + m_a + m_y + m_b) c^2 \quad (3.2)$$

$$= 3,269 \text{ MeV}$$

η οποία είναι ίδια με τα ακρότατα της κινητικής ενέργειας των τελικών προϊόντων

$$Q = T_{\text{initial}} - T_{\text{final}} = T_x + T_a + T_y + T_b \quad (3.3)$$

Η διατήρηση της ορμής της αντίδρασης δίνει:

$$p_a = p_b \cos \theta + p_y \cos \xi \quad (3.4\alpha)$$

$$0 = p_b \sin \theta - p_y \sin \xi \quad (3.4\beta)$$

όπου, θ η γωνία εκπομπής του σωματιδίου b σε σχέση με την κατεύθυνση της δέσμης και ξ η αντίστοιχη γωνία εκπομπής του σωματιδίου Y

Θεωρώντας ως γνωστή την ποσότητα Q , ως ελεγχόμενη την ποσότητα T_a (p_a), οι εξισώσεις 3.3 και 3.4 μπορούν να δώσουν αποτέλεσμα για τις ποσότητες T_b (E_n) και θ , μη παρατηρώντας το σωματίδιο Y και απαλείφοντας τις ποσότητες ξ και T_y (14).

Για τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής κάθε σωματιδίου που παρακολουθεί για κάθε ενέργεια ο κώδικας, λαμβάνει υπ' όψη τον τύπο από την αναφορά (1):

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(\theta) = \frac{\sigma_{\text{tot}}}{4\pi \cdot A_0} \cdot \sum_i A_i P_i(\cos \theta)$$

Σε αυτό το σημείο, ο κώδικας καλεί τη βοήθεια της αναφοράς (19), από την οποία παίρνει την πληροφορία αυτή και υπολογίζεται η σ_{tot} με γραμμική προσαρμογή και

ολοκληρώνοντας στη στερεά γωνία που δίνεται ως δεδομένο. Επίσης, οι παράμετροι A_i υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο από την αναφορά.

3.5.2 Νετρόνια από την ${}^2_1H(d, np){}^2_1H$

Ο κώδικας υπολογίζει την ενέργεια E και τη γωνία εκπομπής θ των νετρονίων από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up) και τη διαφορική ενεργό διατομή της ${}^2_1H(d, np){}^2_1H$ στις 0° σύμφωνα με τους Kagalenko και Kornicov στην αναφορά (10). Παρακάτω, περιγράφονται λεπτομερώς οι υπολογισμοί αυτοί (10). Για την αντίδραση ${}^2_1H(d, np){}^2_1H$ δίνεται:

$$E^c = E - 2\sqrt{E\varepsilon_0}\cos\theta + \varepsilon_0$$

$$\cos\theta^c = \frac{\sqrt{E}\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{E^c}}$$

όπου

$$\varepsilon_0 = \frac{m_n m_d}{(2m_d)^2} E_d$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega^c} = 7.218 * (1 - \exp(-0.910 * a)) * a \quad \left(\frac{mb}{sr}\right)$$

όπου

$$a = \frac{(E_d - 4.45)^2}{E_d} \quad (MeV)$$

Ο δείκτης c υποδηλώνει το κέντρο μάζας του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης ${}^2_1H(d, np){}^2_1H$ και η ενέργεια των παραγόμενων από το break up, νετρονίων. Για τη ροή νετρονίων από το φαινόμενο αυτό στις μηδέν μοίρες, παίρνει την τιμή που δίνεται στον πίνακα της αναφοράς (10).

3.6 Συνολικός υπολογισμός παραγόμενων νετρονίων

Η απόδοση παραγωγής νετρονίων (neutron yield) και από τις δύο αντιδράσεις, μπορεί τώρα να υπολογιστεί έχοντας όλες τις πληροφορίες.

$Y = \sum_E \sigma(E) \cdot I \cdot N_t$, όπου η ποσότητα I αποτελεί το ρυθμό των εισερχομένων δευτερίων και υπολογίζεται από το ρεύμα που δίνεται ως δεδομένο στον κώδικα και η ποσότητα N_t αποτελεί τον αριθμό των ατόμων του στόχου δευτερίου που υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση χρησιμοποιώντας το μήκος της κυψελίδας που δίνεται ως δεδομένο στον κώδικα

Μετά από αυτή τη διαδικασία, υπολογίζεται η ροή των νετρονίων στη ζητούμενη απόσταση (d) από τον τύπο:

$$F = \frac{Y}{d^2} \left(\frac{neutrons}{cm^2 \cdot s}\right) \quad (1)$$

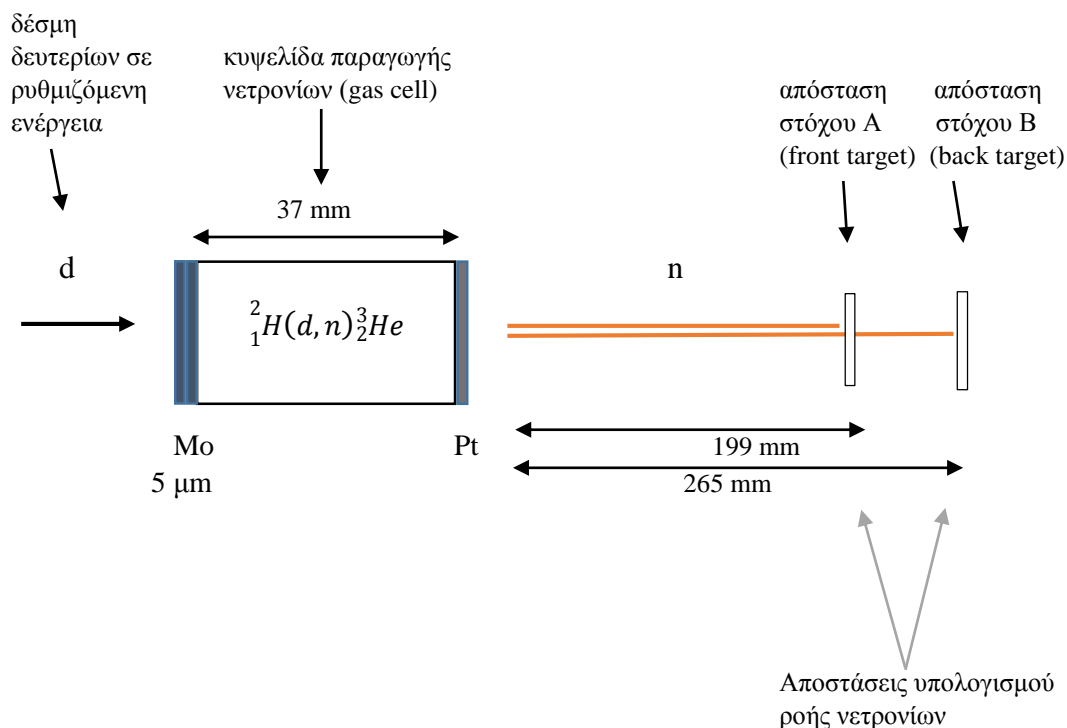
Σαν αποτέλεσμα, αυτό που παίρνουμε είναι ένα φάσμα ενέργειας νετρονίων και ροής νετρονίων με μέγιστο ανάλογα με την ενέργεια της δέσμης δευτερίων. Με ολοκλήρωση του φάσματος αυτού, υπολογίζεται η αντίστοιχη ροή νετρονίων στη ζητούμενη απόσταση.

3.7 Εφαρμογή του κώδικα NeuSDesc

Η εφαρμογή του κώδικα NeuSDesc, έγινε πάνω σε πείραμα σχάσης που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτου». Στο πείραμα αυτό, ροή νετρονίων εξήλθε από αντίδραση ${}^2_1H(d, n){}^3_2He$ και προσέπεσε σε στόχους ουρανίου γνωστής ενεργού διατομής σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από την κυψελίδα. Τα θραύσματα σχάσης ανιχνεύθηκαν από ανιχνευτές MicroMegas και αναλύοντας τα φάσματα υπολογίστηκε η ροή νετρονίων που εξήλθε από την πυρηνική αντίδραση και προσέπεσε στους στόχους. Η αναλυτική περιγραφή του πειράματος γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, περιγράφεται η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις για τον υπολογισμό των παραγομένων νετρονίων από την αντίδραση D-D καθώς και τα θεωρητικά αποτελέσματα.

3.7.1 Γεωμετρία

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις του κώδικα, είναι η ίδια με αυτή του πειράματος που πραγματοποιήθηκε και περιεγράφηκε παραπάνω. Δηλαδή, η πίεση αερίου στην κυψελίδα παραγωγής νετρονίων δόθηκε 120 kPa, το μήκος κυψελίδας 37mm, η διάμετρος δέσμης δευτερίων 20mm και οι αποστάσεις υπολογισμού ροής νετρονίων 199mm και 265mm. Ως παράθυρο εισόδου χρησιμοποιήθηκε μολυβδαίνιο 5 μm και ως ρεύμα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των δεδομένων του πειράματος για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα. Τέλος, ως ενέργεια δέσμης δευτερίων, δόθηκαν οι ενέργειες εξίσου που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Στο παρακάτω Σχήμα 3.6 φαίνεται λεπτομερώς η πειραματική γεωμετρία.



Σχήμα 3.6: Γεωμετρία προσομοιώσεων του κώδικα NeuSDesc

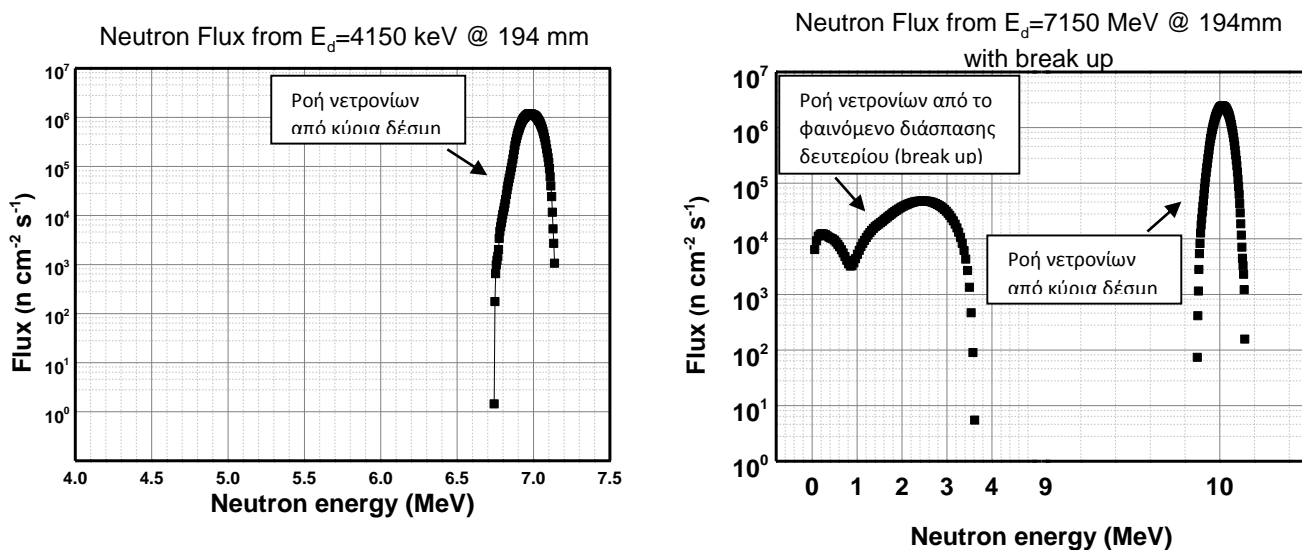
3.7.2 Αποτελέσματα

Τα θεωρητικά αποτελέσματα που προήλθαν από τις προσομοιώσεις υπολογισμού της ροής νετρονίων σε αποστάσεις 199mm και 265mm, από την άκρη της κυλινδρικής κυψελίδας (gas cell), παραθέτονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1).

Ed (MeV)	En (MeV)	Fluence (n/cm ² s) στα 199mm	Fluence (n/cm ² s) στα 265mm
2040	4.5	9749	5807
2410	5	15061	8959
2820	5.5	31363	18607
3250	6	36214	21583
3700	6.5	33348	19887
4150	7	54135	32180
6650	9.5	119125	70978
7150	10	139559	82951

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων NeuSDesc

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο κώδικας NeuSDesc έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να πραγματοποιεί προσομοιώσεις μόνο μέχρι τα 7 MeV ενέργεια δέσμης δευτερίων. Για το λόγο αυτό, έγινε προσθήκη, μεγαλύτερων ενεργειών και αντίστοιχων ενεργών διατομών και πολωνύμων Legendre στο αρχείο δεδομένων της αντίδρασης D-D για να γίνει η προσομοίωση της τελευταίας ενέργειας του Πίνακα 3.1. Ακολούθως, παραθέτονται δύο ενδεικτικά γραφήματα (Σχήμα 3.7) που προήλθαν από τη γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του κώδικα προσομοιώσεων. Τα δύο γραφήματα αποτελούν αποτελέσματα για δύο διαφορετικές ενέργειες δέσμης δευτερίων, μία ενέργεια πιο μικρή στην οποία δεν εμφανίζεται το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου και μία ενέργεια δέσμης μεγαλύτερη όπου εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό και συμβάλουν στο γράφημα παρασιτικά νετρόνια από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, np){}^2_1\text{H}$. Στο δεύτερο γράφημα ($E_n=10$ MeV) φαίνεται η συμβολή των παρασιτικών νετρονίων σχηματίζοντας μία μορφή στα αριστερά της κύριας δέσμης νετρονίων ενώ στο πρώτο γράφημα όπου δεν υφίσταται το φαινόμενο της διάσπασης δευτερίου φαίνεται μόνο η κύρια δέσμη νετρονίων.



Σχήμα 3.7: Ροή νετρονίων από προσομοίωση του κώδικα NeuSDesc σε ενέργειες νετρονίων 7 και 10 MeV αντίστοιχα.

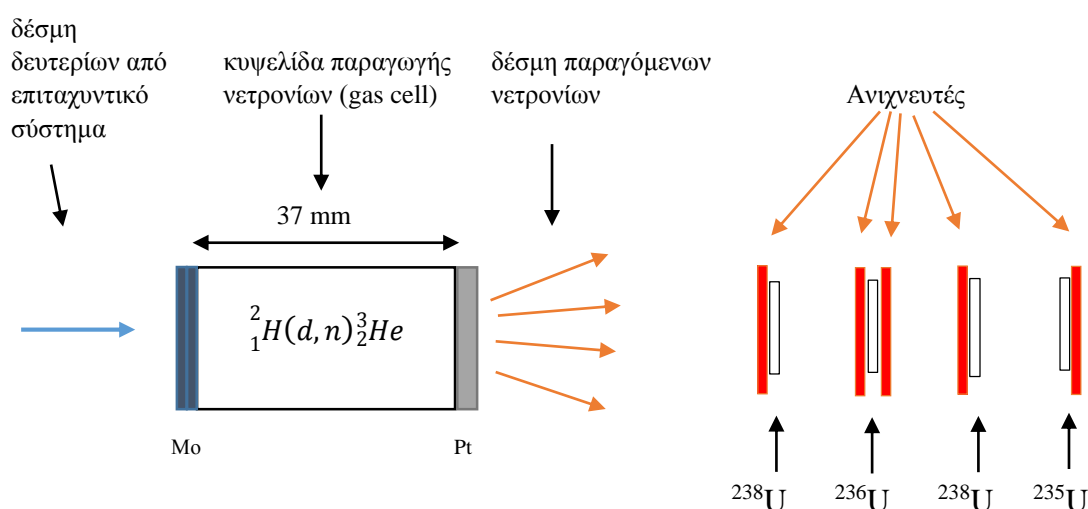
Κεφάλαιο 4

Πειραματικός προσδιορισμός ροής νετρονίων και σύγκριση με θεωρητικές προσομοιώσεις

Τα αποτελέσματα προερχόμενα από προσομοιώσεις, δεν έχουν καμία υπόσταση αν δεν συγκριθούν με πειραματικά δεδομένα και δεν αξιολογηθεί ο εκάστοτε κώδικας που αναπαράγει αυτές τις προσομοιώσεις αυτές. Έχοντας, λοιπόν, αναλύσει στο Κεφάλαιο 3 τη λειτουργία του κώδικα προσομοιώσεων NeuSDesc και έχοντας παρουσιάσει αποτελέσματά του, μπορεί ακόλουθως να γίνει η αξιολόγησή του από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με αντίστοιχο πείραμα. Για το σκοπό αυτό, στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το πείραμα που πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και του πειράματος.

4.1 Περιγραφή πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής φυσικής στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος στην Αθήνα. Η μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από την αντίδραση ${}^2_1H(d,n){}^3_2He$ χρησιμοποιώντας στόχο δευτερίου σε αέρια μορφή, όπως τη θεωρητική ανάλυση στο 1^ο μέρος. Για την επιτάχυνση της δέσμης δευτερίων χρησιμοποιήθηκε ο επιταχυντής TANDEM του εργαστηρίου. Η παραγόμενη δέσμη νετρονίων προσέπεσε σε στόχους ουρανίου (${}^{235}U$, ${}^{236}U$, ${}^{238}U$) δημιουργώντας νετρόνια από σχάση. Τα θραύσματα σχάσης ανιχνεύθηκαν από ανιχνευτές MicroMegas τοποθετημένοι ανάμεσα στους στόχους και από την ανάλυση των δεδομένων εκτιμήθηκε η ροή των νετρονίων που εξήλθε από την κυψελίδα και προσέπεσε στους στόχους. Το σχήμα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1). Ο απώτερος σκοπός του πειράματος είναι να βρεθεί η ενεργός διατομή της αντίδρασης ${}^{236}U(n,f)$ υπολογίζοντας πρώτα τη ροή νετρονίων που εξήλθε από την κυψελίδα. Ο σκοπός, όμως, της εργασίας αυτής σταματά στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων του πειράματος, στον υπολογισμό της ροής νετρονίων από την αντίδραση D-D στην κυλινδρική κυψελίδα.



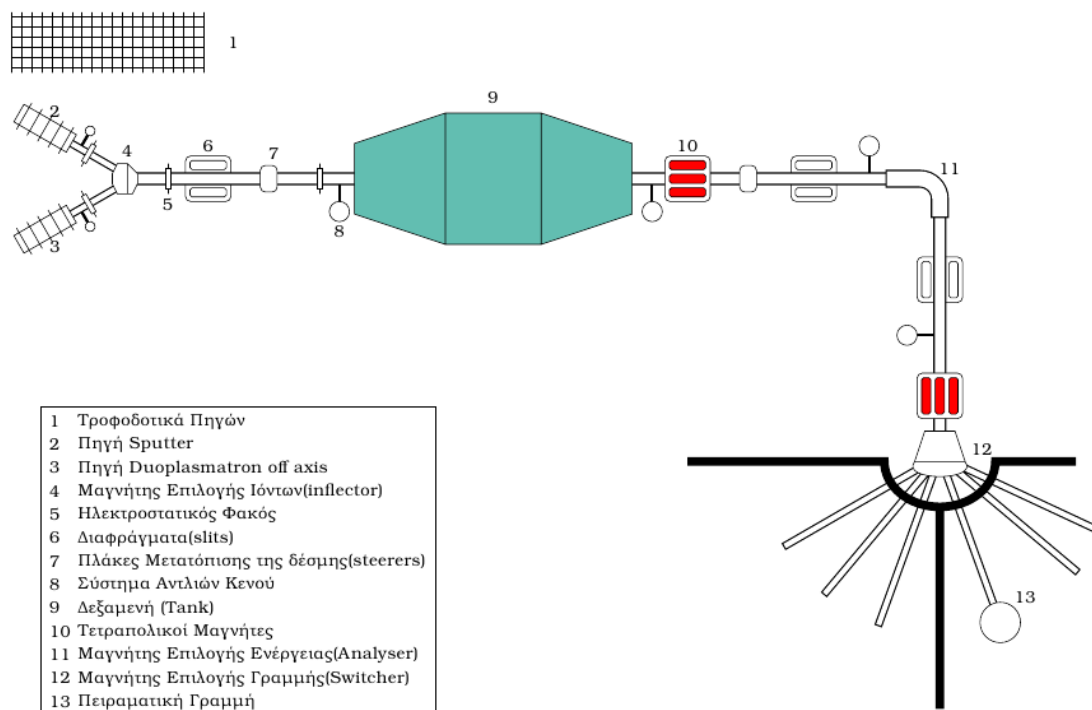
Σχήμα 4.1: Πειραματική διάταξη

Ως παράθυρο εισόδου και εξόδου χρησιμοποιούνται αντίστοιχα μολυβδαίνιο και πλατίνα. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το μολυβδαίνιο στην είσοδο της δέσμης οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό του παραθύρου θα πρέπει να είναι μεσοβαρής πυρήνας έτσι ώστε να επιτρέπει στη δέσμη να διαπερνά και να μην προκαλούνται αντιδράσεις (d,n) από αλληλεπίδραση με το υλικό, θα πρέπει να αντέχει σε υψηλές πιέσεις και σε υψηλό ρεύμα της τάξης των μA και τέλος θα πρέπει να μπορεί να τεντωθεί χωρίς να δημιουργούνται οπές. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε πλατίνα σαν παράθυρο έξοδο είναι για να σταματήσει τη δέσμη δευτερίων. Τα ισότοπα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση είναι τα δύο ^{238}U σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Ο λόγος αυτού, το γεγονός ότι είναι πλήρως γνωστή η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{238}\text{U}(n,f)$ και έτσι μπορεί να υπολογιστεί η ροή νετρονίων που εξήλθε από την κυψελίδα και προσέπεσε στους δύο αυτούς στόχους.

4.2 Επιτάχυνση δέσμης

Η επιτάχυνση της δέσμης επιτεύχθηκε από τον ηλεκτροστατικό επιταχυντή Tandem 5.5MeV. Τα βασικά μέρη του επιταχυντή φαίνονται στο Σχήμα 4.2 και είναι τα εξής:

- ❖ Πηγές ιόντων και αντίστοιχα τροφοδοτικά
- ❖ Μαγνήτες κατάλληλοι για κατεύθυνση και εστίαση της δέσμης καθώς και για την επιλογή των καταλλήλων ιόντων
- ❖ Ηλεκτροστατικοί φακοί και κατάλληλα διαφράγματα
- ❖ Κύρια δεξαμενή του επιταχυντή
- ❖ Συστήματα κενού
- ❖ Πειραματικές γραμμές
- ❖ Οι δύο πειραματικές αίθουσες



Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση του επιταχυντή Tandem στο Ε.Κ.Ε. Φ.Ε "Δημόκριτος" (20)

Όπως φαίνεται στην εικόνα, ο επιταχυντής Tandem είναι ένας ηλεκτροστατικός επιταχυντής του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη γεννήτρια Van Der Graaf. Πιο συγκεκριμένα, τα ιόντα παράγονται, ανάλογα με το είδος τους, σε μία από τις δύο πηγές, sputter ή duoplasmatron off axis. Στην sputter παράγονται τα βαρέα ιόντα, όπως οξυγόνο, άνθρακας κλπ, ενώ στην duoplasmatron παράγονται τα ελαφρά ιόντα, όπως υδρογόνο, δευτέριο κλπ. Και οι δύο πηγές παράγουν αρνητικά ιόντα με φορτίο $-e$. (21) Μετά από την παραγωγή τους, τα ιόντα οδηγούνται στον προ-επιταχυντικό σωλήνα από μία διαφορά δυναμικού της τάξης των 50keV για να εισέλθουν στη συνέχεια στον κύριο επιταχυντικό σωλήνα, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται εγκατεστημένη μία διπλή γεννήτρια σε τάση 5.5 MeV. Στο πρώτο τμήμα αυτής, τα αρνητικά ιόντα επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο τα έλκει. Στη συνέχεια, διέρχονται από φύλλα άνθρακα τα οποία απογυμνώνουν από ηλεκτρόνια τα αρνητικά ιόντα και τα μετατρέπουν σε θετικά. Τη στιγμή αυτή, το ηλεκτρικό πεδίο έλκυε τα ιόντα, τώρα τα απωθεί επιταχύνοντάς τα περαιτέρω. Όλη αυτή η διαδικασία οδηγεί στη δημιουργία μιας μονοενεργειακής δέσμης. Η επιλογή της κατάλληλης ενέργειας πραγματοποιείται κάνοντας χρήση ενός μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο μαγνήτης επιλογής ενέργειας (analyzer). Τέλος, η δέσμη ιόντων με κατάλληλη πλέον ενέργεια, οδηγείται μέσω ενός μαγνήτη επιλογής γραμμής στην κατάλληλη πειραματική γραμμή. Σε όλη τη γραμμή, από την έξοδο των πηγών μέχρι τους στόχους, διατηρείται υψηλό κενό (10^{-6} mbar) για να ελαχιστοποιούνται οι συγκρούσεις των ιόντων με τα μόρια του αέρα που δημιουργούν εξασθένιση της δέσμης, δηλαδή μείωση της ενέργειάς της. (20)

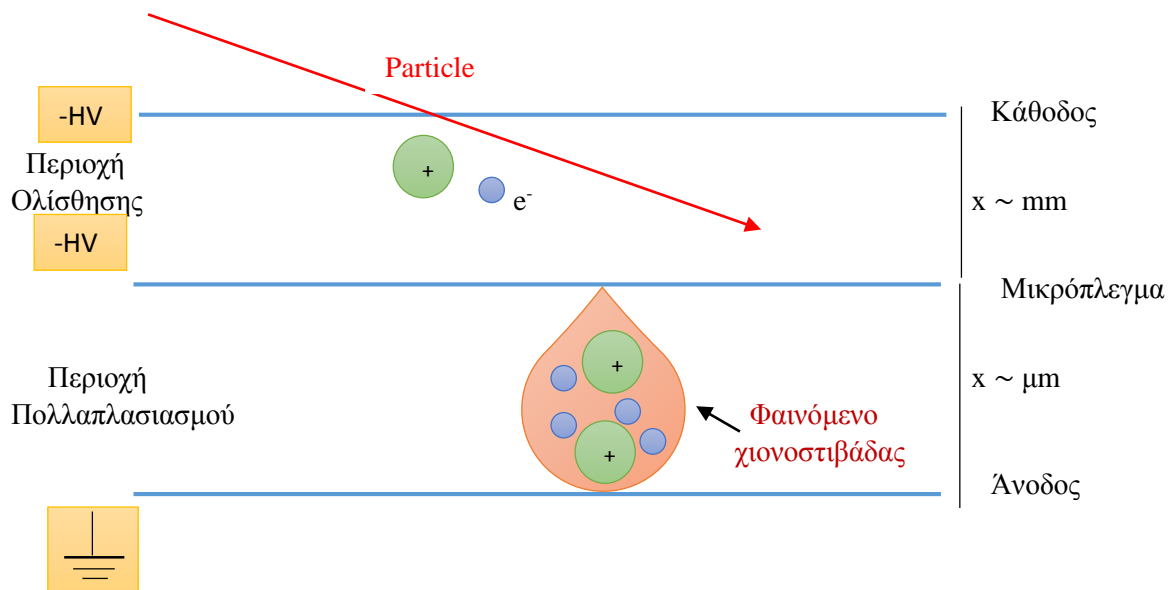
4.3 Ανίχνευση θραυσμάτων

Τα θραύσματα σχάσης ανιχνεύθηκαν από ανιχνευτές MicroMegs (Micro Mesh Gaseous Structure). Ανήκουν στην κατηγορία των ανιχνευτών αερίου και συγκεκριμένα στους MPGDs (Micro Pattern Gaseous Detectors). Η ιδιαιτερότητά του οφείλεται στο ότι ο κατασκευαστής του χρησιμοποίησε μικρές αποστάσεις μεταξύ των τμημάτων του ανιχνευτή για να έχει μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο και όχι τόσο μεγάλες τάσεις ($E=\Delta V/x$). Ο ανιχνευτής αυτός αποτελείται από δύο κύριες περιοχές, την περιοχή ολίσθησης (Drift Region) και την περιοχή πολλαπλασιασμού (Amplification Gap) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στην περιοχή ολίσθησης γίνεται η τεχνητή μετακίνηση των ηλεκτρονίων που έχουν προκύψει από ιονισμό. Στην περιοχή πολλαπλασιασμού, μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου, πραγματοποιείται το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, δηλαδή, τα ηλεκτρόνια από την περιοχή ολίσθησης προκαλούν περαιτέρω ιονισμό με αποτέλεσμα να πολλαπλασιάζονται τα ηλεκτρόνια και να οδηγούνται στην άνοδο. Το φαινόμενο της χιονοστιβάδας (Σχήμα 4.4) έχει μεγάλη σημασία για το σχηματισμό μετρήσιμου και επεξεργάσιμου σήματος από τον ανιχνευτή.

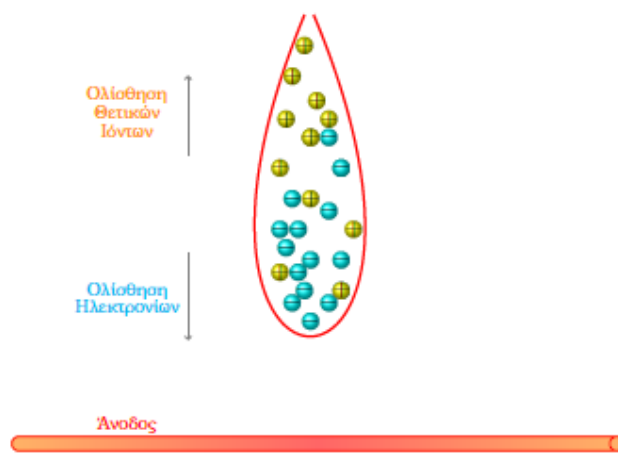
Τα επιμέρους βασικά τμήματα του ανιχνευτή MicroMEGAS είναι τα εξής:

- ❖ Η κάθοδος (Drift plane)
- ❖ Το μικρόπλεγμα (Micro-mesh)
- ❖ Η άνοδος (Red-out Strips)

Στη μεταλλική κάθοδο εφαρμόζεται υψηλή αρνητική τάση, ώστε να απωθήσει τα ηλεκτρόνια και να τα οδηγήσει προς το θετικότερο (ως προς το δυναμικό) μικρόπλεγμα. Στη συνέχεια, λόγω του μεγάλου ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται μεταξύ μικροπλέγματος και ανόδου, τα δευτερογενή ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο με αποτέλεσμα τη δημιουργία σήματος στον ανιχνευτή. (22)



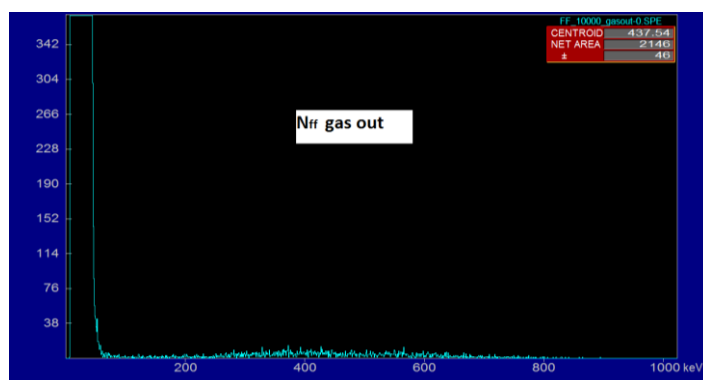
Σχήμα 4.3: Βασική δομή Ανιχνευτή MicroMegas



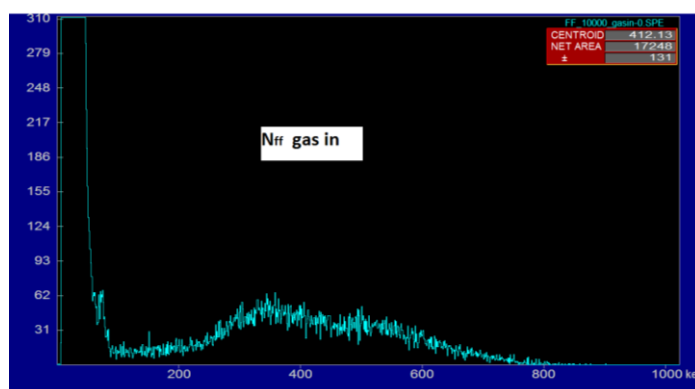
Σχήμα 4.4: Φαινόμενο χιονοστιβάδας (22)

4.4 Πειραματικές μετρήσεις

Πολύ συχνά, είναι δυνατό σε κάποιες ενέργειες της δέσμης δευτερίου, να παράγονται νετρόνια από αντιδράσεις με τα υλικά κατασκευής των κατευθυντήρων, του παραθύρου ή και του ίδιου του υποστρώματος του στόχου. Σε αυτές τις παρασιτικές αντιδράσεις θα πρέπει να συμπεριληφθεί η διάλυση του δευτερίου σε πρωτόνιο και νετρόνιο λόγω της αλληλεπίδρασης της δέσμης δευτερίων με τα κατευθυντήρια διαφράγματα του επιταχυντή. Η συνεισφορά τέτοιων διαδικασιών στη μόλυνση της δέσμης νετρονίων μπορεί να γίνει πολύ σημαντική για δεδομένες ενέργειες δέσμης και κάποια υλικά. Ωστόσο, μπορεί να εκτιμηθεί αφαιρώντας το υλικό του στόχου (ή το αέριο) και μετρώντας την παρασιτική ροή που παράγεται. Πιο λεπτομερώς, στην τεχνική αυτή για κάθε ενέργεια δέσμης δευτερίου γίνονται δύο μετρήσεις, μία με άδεια την κυψελίδα (gas out) στην οποία παράγονται μόνο νετρόνια από τις παρασιτικές αντιδράσεις και μία με γεμάτη την κυψελίδα (gas in) στην οποία παράγονται κανονικά νετρόνια από την αντίδραση D-D αλλά και από τις παρασιτικές αντιδράσεις. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στη μέτρηση με άδεια την κυψελίδα παράγονται μόνο παρασιτικά νετρόνια από αντιδράσεις με τα υλικά της διάταξης και με το οξυγόνο του αέρα και όχι νετρόνια από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου. Τα νετρόνια από το φαινόμενο αυτό, περιέχονται μόνο στη μέτρηση με γεμάτη την κυψελίδα, εφόσον ξεπεράσει η δέσμη δευτερίου το κατώφλι των 4.125 MeV. Στο Σχήμα 4.5 φαίνονται δύο ενδεικτικά φάσματα από έναν ανιχνευτή MicroMegas όπου το πρώτο αντιπροσωπεύει μία μέτρηση με άδεια την κυψελίδα και το δεύτερο μία μέτρηση με γεμάτη την κυψελίδα. Παρατηρείται ότι, στο πρώτο φάσμα τα θραύσματα σχάσης είναι σε μικρότερο αριθμό από το δεύτερο φάσμα, μιας και περιέχει θραύσματα μόνο από αντιδράσεις με νετρόνια παρασιτικών αντιδράσεων με τα υλικά.



Σχήμα 4.5 (α): Φάσμα από μέτρηση με άδεια την κυψελίδα (gas out).



Σχήμα 4.5 (β): Φάσμα από μέτρηση με γεμάτη την κυψελίδα (gas in).

4.5 Ανάλυση δεδομένων-Αποτελέσματα

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος, έγινε μόνο για τους δύο στόχους του ^{238}U γιατί γνωρίζοντας την ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{238}\text{U}(n,f)$ μπορεί να υπολογιστεί η ροή νετρονίων που προσέπεσε στους δύο αυτούς στόχους και εξήλθε της κυψελίδας (Σχήμα 4.1). Ακολούθως, περιγράφεται η λογική του υπολογισμού ροής νετρονίων επάνω στο στόχο.

Η σχέση που δίνει τη **ροή των νετρονίων** είναι:

$$\Phi \left(\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right) = \frac{N_{ff}}{\sigma_{(^{238}\text{U}(n,f))} \cdot N_t \cdot eff} \quad (1)$$

όπου,

- N_{ff} : ο αριθμός θραυσμάτων σχάσης ανά δευτερόλεπτο.
- $\sigma_{(^{238}\text{U}(n,f))}$: η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{238}\text{U}(n,f)$ η οποία είναι γνωστή από τις επιστημονικές βιβλιοθήκες και εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων.
- N_t : ο αριθμός των ατόμων του στόχου ο οποίος υπολογίζεται από τη μάζα του στόχου.
- eff : ο αριθμός των θραυσμάτων σχάσης που γεννήθηκαν και βγήκαν από το στόχο.

Για τον υπολογισμό του αριθμού N_{ff} για κάθε ενέργεια δέσμης, αρχικά αναλύθηκαν τα φάσματα των μετρήσεων gas in και gas out με το πρόγραμμα SPECTRW (αριθμός $N_{ff \text{ gas in}}$ και $N_{ff \text{ gas out}}$) και βρέθηκε από αυτά ο ενεργός χρόνος κάθε μέτρησης gas in (live time-LT). Ακόμη, υπολογίστηκε από τα δεδομένα των φασμάτων το συνολικό ρεύμα της δέσμης κάθε μέτρησης (current integrator-CI). Όπως αναφέρθηκε, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συμβολή των παρασιτικών νετρονίων που παράγονται από αντιδράσεις εκτός του φαινομένου διάσπασης δευτερίου, στη δέσμη νετρονίων που πέφτει στο στόχο. Αυτό επιτυγχάνεται αφαιρώντας τη μέτρηση gas out που έγινε από τη μέτρηση gas in. Έτσι, προκύπτει ο *καθαρός* αριθμός γεγονότων N_{ff} που αποτελείται από προϊόντα αντίδρασης σχάσης μόνο από νετρόνια της αντίδρασης D-D μέσα στην κυψελίδα (gas cell). Ο αριθμός αυτός υπολογίστηκε ως εξής:

$$N_{ff} \text{ (προς αφαίρεση από gas in)} = \frac{N_{ff \text{ gas out}} \times Q_{\text{gas in}}}{Q_{\text{gas out}}}$$

$$N_{ff \text{ καθαρά}} = N_{ff \text{ gas in}} - N_{ff} \text{ (προς αφαίρεση από gas in)}$$

$$\frac{N_{ff \text{ καθαρά}}}{s} = \frac{N_{ff \text{ καθαρά}}}{LT_{\text{gas in}}} \quad \left(\frac{\text{counts}}{s} \right)$$

Στη συνέχεια, για την εύρεση της πειραματικής ροής νετρονίων που έπεσε στους δύο στόχους, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (1) έχοντας μόνο άγνωστη ποσότητα τη ροή. Με αυτόν τον τρόπο, βρέθηκε η πειραματική ροή νετρονίων για κάθε ενέργεια δέσμης δευτερίων. Τα αποτελέσματα αυτά παραθέτονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1 μαζί με τα θεωρητικά αποτελέσματα του κώδικα NeuSDesc.

E_d (keV)	E_n (MeV)	$\Phi \left(\frac{n}{cm^2 \cdot s} \right)$ (NeuSDesc) (θεωρητική)	$\Phi \left(\frac{n}{cm^2 \cdot s} \right)$ (Πειραματική)	Απόσταση στόχου (mm)
2040	4.5	9749	7360	199
2410	5	15061	5760	199
2820	5.5	31363	25900	199
3250	6	36214	38120	199
3250	6 (2 ^η μέτρηση)	36214	37850	199
3700	6.5	33348	16030	199
4150	7	54135	40510	199
6650	9.5	184996	114770	199
6650	9.5 (2 ^η μέτρηση)	119125	113100	199
7150	10	139559	211150	199
2040	4.5	5807	3997	263
2410	5	8959	3425	263
2820	5.5	18607	13715	263
3250	6	21583	21550	263
3250	6 (2 ^η μέτρηση)	21583	21215	263
3700	6.5	19887	9153	263
4150	7	32180	22240	263
6650	9.5	110227	64600	263
6650	9.5 (2 ^η μέτρηση)	70978	58810	263
7150	10	82951	87070	263

Πίνακας 4.1

Για τη σύγκριση των προσομοιώσεων με τα πειραματικά αποτελέσματα δόθηκε έμφαση στο λόγο της ροής νετρονίων από δύο διαφορετικούς ανιχνευτές. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο λόγος του μπροστινού στόχου (199 mm) με τον πίσω στόχο (263 mm), για κάθε ενέργεια. Αν αυτός ο λόγος ($\frac{\Phi(199\text{ mm})}{\Phi(263\text{ mm})}$) είναι ίδιος, για τα θεωρητικά δεδομένα και τα πειραματικά αντίστοιχα, τότε τα αποτελέσματα είναι επιθυμητά. Ακόμη περισσότερο, αν ο

λόγος των δύο παραπάνω λόγων ($\frac{\frac{\Phi(199\text{ mm})}{\Phi(263\text{ mm})}(\text{NeuSDesc})}{\frac{\Phi(199\text{ mm})}{\Phi(263\text{ mm})}(\text{πειραματικός})}$) είναι ίσος με τη μονάδα τότε η

μελέτη βρίσκεται σε καλό σημείο. Να σημειωθεί ότι ο γεωμετρικός λόγος της διάταξης είναι 1.74, ο οποίος θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή των λόγων μπροστινού στόχου με τον πίσω στόχο. Με τη σύγκριση λόγων ροής νετρονίων και όχι απόλυτων τιμών, επιτυγχάνεται η απαλοιφή οποιουδήποτε συστηματικού σφάλματος υπήρξε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2.

E _d (keV)	$\frac{\Phi (199 \text{ mm})}{\Phi (263 \text{ mm})}$	$\frac{\Phi (199 \text{ mm})}{\Phi (263 \text{ mm})}$	Απόκλιση %	$\frac{\Phi (199 \text{ mm})}{\Phi (263 \text{ mm})}$
	(πειραματικός)	(NeuSDesc)		(NeuSDesc)
2040	1.84	1.68	-9.52	0.91
2410	1.68	1.68	0.00	0.99
2820	1.89	1.68	-12.50	0.89
3250	1.77	1.68	-5.36	0.95
3250	1.78	1.68	-5.95	0.94
3700	1.75	1.68	-4.17	0.96
4150	1.82	1.68	-8.33	0.92
6650	1.78	1.68	-5.95	0.95
6650	1.92	1.68	-14.29	0.87
7150	2.42	1.68	-44.05	0.69

Πίνακας 4.2

Η μελέτη και σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με αυτά των προσομοιώσεων, χωρίστηκε εν συνεχεία σε δύο σκέλη. Στο πρώτο σκέλος έγινε σύγκριση δεδομένων μέχρι την ενέργεια δέσμης δευτερίου 4150 keV, πριν αρχίσει δηλαδή να εμφανίζεται το φαινόμενο της διάσπασης δευτερίου της δέσμης (break up). Ο λόγος αυτού, για να αξιολογηθεί ο κώδικας NeuSDesc στην υπό μελέτη αντίδραση στην πιο απλή μορφή της, ούτως ώστε να προχωρήσει η μελέτη και σε μεγαλύτερες ενέργειες όπου η αντίδραση D-D γίνεται πιο σύνθετη λόγω του φαινομένου της διάσπασης δευτερίου. Στη συνέχεια, περιγράφεται η σύγκριση και η εφαρμογή των πειραματικών δεδομένων.

1^ο Μέρος εφαρμογής πειραματικών δεδομένων: Διόρθωση αποστάσεων των στόχων από την κυψελίδα στην πειραματική διάταξη.

Παρατηρώντας κάποιες διαφορές στους λόγους του Πίνακα 4.2, αποφασίστηκε να υπολογιστούν ξανά οι θεωρητικές τιμές των ροών νετρονίων από τον κώδικα NeuSDesc μέχρι την ενέργεια δευτερίων πριν εμφανιστεί το φαινόμενο διάσπασης του δευτερίου (break up), διορθώνοντας τις αποστάσεις των στόχων της πειραματικής διάταξης, οι οποίες μετρήθηκαν από τους συμμετέχοντες με μέτρο. Με τη λογική αυτή, τα θεωρητικά δεδομένα πλησιάζουν τα πειραματικά, σταθεροποιώντας ταυτόχρονα τη γεωμετρία του πειράματος. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.3 με τις διορθωμένες αποστάσεις.

E_d (keV)	E_n (MeV)	$\Phi \left(\frac{n}{cm^2 \cdot s} \right)$ (NeuSDesc)	$\Phi \left(\frac{n}{cm^2 \cdot s} \right)$ (Πειραματική)	Απόσταση στόχου (mm)
2040	4.5	10183	7360	194
2410	5	15710	5760	194
2820	5.5	32767	25900	194
3250	6	37916	38120	194
3250	6 (2 ^η μέτρηση)	37916	37850	194
3700	6.5	34964	16030	194
4150	7	56541	40510	194
6650	9.5	193475	114770	194
6650	9.5 (2 ^η μέτρηση)	124585	113100	194
7150	10	146285	211150	194
2040	4.5	5726	3997	265
2410	5	8829	3425	265
2820	5.5	18349	13715	265
3250	6	21291	21550	265
3250	6 (2 ^η μέτρηση)	21291	21215	265
3700	6.5	19604	9153	265
4150	7	31879	22240	265
6650	9.5	108685	64600	265
6650	9.5 (2 ^η μέτρηση)	69986	58810	265
7150	10	81830	87070	265

Πίνακας 4.3

Ο αντίστοιχος πίνακας με τους λόγους των τιμών ροής νετρονίων από δύο διαφορετικούς ανιχνευτές σε διαφορετικές αποστάσεις είναι ο παρακάτω (Πίνακας 4.4).

E_d (keV)	$\frac{\Phi (194 \text{ mm})}{\Phi (265 \text{ mm})}$ (πειραματικός)	$\frac{\Phi (194 \text{ mm})}{\Phi (265 \text{ mm})}$ (NeuSDesc)	Απόκλιση %	$\frac{\Phi (194 \text{ mm})}{\Phi (265 \text{ mm})}$ (NeuSDesc) / $\frac{\Phi (194 \text{ mm})}{\Phi (265 \text{ mm})}$ (πειραματικός)
2040	1.84	1.78	-3.37	0.97
2410	1.68	1.78	5.62	1.05
2820	1.88	1.78	-5.62	0.95
3250	1.77	1.78	0.56	1.00
3250	1.78	1.78	0.00	1.00
3700	1.75	1.78	1.69	1.02
4150	1.82	1.78	-2.25	0.97

Πίνακας 4.4

Όπως φαίνεται, οι προσομοιώσεις του υπολογισμού ροής νετρονίων με τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής, παρουσιάζουν μία καλή συμφωνία με μέγιστη απόκλιση 5 %. Επίσης, ο μέσος όρος των λόγων της τέταρτης στήλης, ισούται με τη μονάδα, γεγονός που μας επιτρέπει να εμπιστευτούμε τον κώδικα NeuSDesc και να προχωρήσουμε τη μελέτη σε υψηλότερες ενέργειας δέσμης δευτερίων όπου εμφανίζεται το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου.

2^ο Μέρος εφαρμογής πειρατικών δεδομένων: Αναπαραγωγή πειραματικών δεδομένων σε ενέργειες δέσμης που περιέχουν αντιδράσεις break up.

Ο σκοπός αυτού του μέρους είναι η αξιολόγηση του κώδικα NeuSDesc για ενέργειες δέσμης δευτερίων που προκαλούν το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου στην αντίδραση D-D και ο υπολογισμός του ποσοστού των νετρονίων από το φαινόμενο αυτό για κάθε ενέργεια.

Στη μελέτη αυτή, έγινε υπολογισμός και σύγκριση του αριθμού απόδοσης παραγωγής νετρονίων της αντίδρασης (yield) για δύο ενέργειες δέσμης δευτερίων (6650 keV και 7150 keV). Ο αριθμός αυτός για τα πειραματικά δεδομένα είναι ο αριθμός του N_{ff} καθαρά που υπολογίστηκε στην αρχή της ανάλυσης της παραγράφου 4.5 και για τα θεωρητικά δεδομένα του κώδικα NeuSDesc, ο αριθμός αυτός υπολογίστηκε από τον εξής τύπο:

$$N_{ff (NeuSDesc)} = \sum_i (\Phi_i \cdot \sigma_i) \times N_t \times \varepsilon$$

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων περιέχουν το φάσμα ενέργειας παραγόμενων νετρονίων και της αντίστοιχης ροής για τις δύο αποστάσεις των στόχων (194 mm και 265 mm). Για κάθε ενέργεια νετρονίων από τα αποτελέσματα, βρέθηκε η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{238}\text{U}(n,f)$ με γραμμική προσαρμογή των ήδη υπάρχουσων δεδομένων (23). Έτσι, βρέθηκε ο αριθμός $N_{ff (NeuSDesc)}$ για τις δύο ενέργειες και για τις δύο αποστάσεις (Πίνακας 4.5).

E_d (keV)	E_n (keV)	N_{ff} (NeuSDesc)	N_{ff} (πειραματικό)	Απόσταση στόχου (mm)
6650	9.5	823.64	3086.77	194
6650 (2 ^η μέτρηση)	9.5	530.37	3520.19	194
7150	10	609.67	13627.26	194
6650	9.5	418.30	1584.35	265
6650 (2 ^η μέτρηση)	9.5	269.36	1669.13	265
7150	10	362.06	6995.24	265

Πίνακας 4.5

Ο αντίστοιχος πίνακας με τους λόγους των τιμών ροής νετρονίων από δύο διαφορετικούς ανιχνευτές σε διαφορετικές αποστάσεις είναι ο παρακάτω (Πίνακας 4.6).

E_d (keV)	E_n (MeV)	$\frac{N_{ff} (194 \text{ mm})}{N_{ff} (265 \text{ mm})}$ (πειραματικός)	$\frac{N_{ff} (194 \text{ mm})}{N_{ff} (265 \text{ mm})}$ (NeuSDesc)	Απόκλιση (%)
6650	9.5	2.03	1.97	-3.04 %
7150	10	1.95	1.68	-10.17 %

Πίνακας 4.6

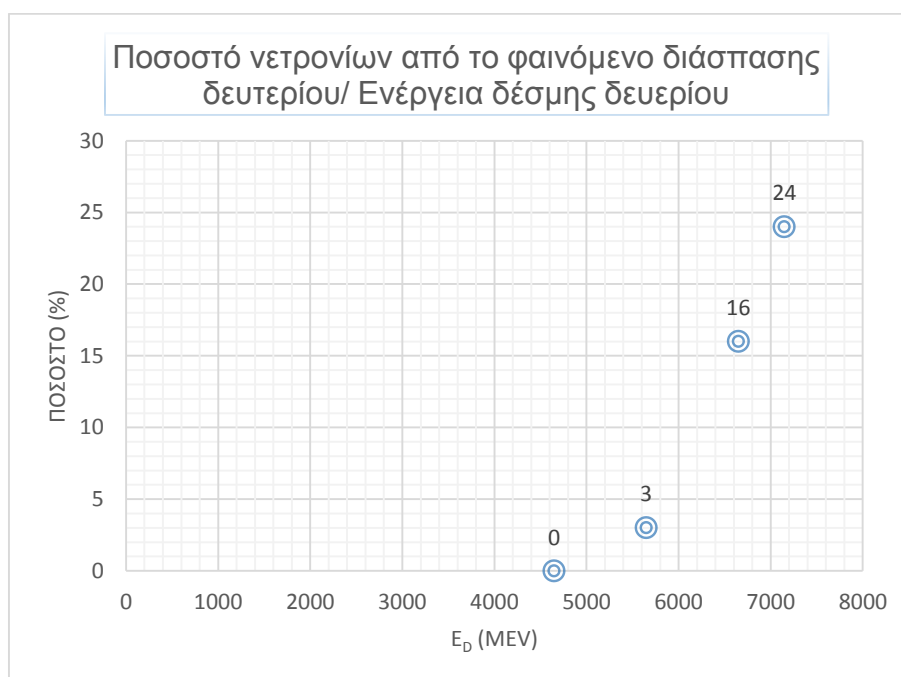
Παρατηρείται ότι στην ενέργεια δέσμης δευτερίων 6650 keV η απόκλιση προδίδει μία καλή συμφωνία του πειράματος και των προσομοιώσεων με μία απόκλιση 3 %. Να σημειωθεί ότι για την ενέργεια των 6650 keV, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των δύο μετρήσεων. Παράλληλα, η απόκλιση που εμφανίζεται στην τελευταία ενέργεια και

αποκλίνει από αυτή της προηγούμενης ενέργειας κατά 10 %, εξηγείται και δικαιολογείται από δύο λόγους:

Πρώτον, η αναφορά του Kagalenco και Kornilov (10) δίνει ένα σφάλμα μέχρι 8 % για τα παραγόμενα νετρόνια από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up). Οπότε για την ενέργεια δέσμης δευτερίων 7150 keV στην αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$, όπου η συμβολή των παρασιτικών νετρονίων από το φαινόμενο αυτό είναι περίπου 30 % (Σχήμα 4.6), μπορεί να δοθεί ένα σφάλμα 8 % στη σύγκριση του κώδικα και του πειράματος. Επομένως μπορεί να δικαιολογηθεί κατά ένα πολύ μεγάλο μέρος η απόκλιση 10 %.

Δεύτερον, ο κώδικας δε συμπεριλαμβάνει τα νετρόνια που παράγονται από την αντίδραση της δέσμης δευτερίου με τα δευτέρια που έχουν εμφυτευτεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του πειράματος στην πλατίνα στο τέλος της κυψελίδας. Τα νετρόνια αυτά δε μπορούν να αφαιρεθούν με τη μέτρηση gas out στο πείραμα, γιατί στη μέτρηση gas in η δέσμη δευτερίων δεν εισχωρεί τόσο βαθιά στην πλατίνα όσο στη μέτρηση gas out λόγω περισσότερων αλληλεπιδράσεων με τα δευτέρια του στόχου. Επίσης, η συνεισφορά των επιπλέον αυτών νετρονίων αυξάνεται στην τελευταία ενέργεια μιας και πραγματοποιήθηκε στο τέλος του πειράματος και τα εμφυτευμένα δευτέρια στην πλατίνα της κυψελίδας είχαν αυξηθεί.

Κρίνοντας, λοιπόν, από τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής η αξιολόγηση του κώδικα NeuSDesc μέχρι τα $E_d=7200$ keV ενέργεια δέσμης δευτερίων στην αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$. Το αποτέλεσμα αυτού, συνεπάγεται ότι μπορεί να γίνει χρήση του κώδικα όταν υπάρχει απλή γεωμετρία ή και για πιο σύνθετη γεωμετρία, ο κώδικας μπορεί να δώσει κάρτα εισόδου πλήρους περιγραφής της πηγής νετρονίων για το πρόγραμμα προσομοίωσης MCNP. Τέλος, μπορεί να εγκριθεί η χρήση του κώδικα για τον υπολογισμό των νετρονίων από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up) μέχρι το μελετημένο ενεργειακό εύρος νετρονίων (4.5-10MeV), συμπέρασμα που αποτελούσε και κίνητρο της εργασίας αυτής. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 4.7), φαίνεται το ποσοστό των νετρονίων από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου της δέσμης (break up), σε σχέση με τα παραγόμενα νετρόνια από την αντίδραση D-D, ανά ενέργεια δέσμης δευτερίων.



Σχήμα 4.6: Ποσοστό νετρονίων από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up) σε σχέση με την ολική δέσμη παραγόμενων νετρονίων από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6, η συμβολή των νετρονίων παραγόμενα από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου στην ολική δέσμη παραγομένων νετρονίων από την αντίδραση D-D, γίνεται σημαντική μετά 6 keV ενέργεια δέσμης δευτερίων. Στην τελευταία υπό μελέτη ενέργεια δευτερίων, το ποσοστό των παρασιτικών αυτών νετρονίων στην ολική δέσμη αγγίζει το 30 %.

Κεφάλαιο 5

Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις υπολογισμού ροής νετρονίων από την αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ με χρήση του κώδικα NeuSDesc-Neutron Source Description του Institute for reference Materials and Measurements (IRMM). Ο σκοπός της εργασίας αυτής, ήταν να αξιολογηθεί η χρήση του κώδικα αυτού ούτως ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό ροής νετρονίων από την αντίδραση D-D σε πειράματα Πυρηνικής Φυσικής. Το κίνητρο βέβαια για την μελέτη της αξιοπιστίας του κώδικα, έγκειται στο γεγονός ότι ο κώδικας αυτός πραγματοποιεί αναλυτικό υπολογισμό των νετρονίων που παράγονται από το φαινόμενο της διάσπασης δευτερίου της δέσμης. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντική συνεισφορά στις προσομοιώσεις που γίνονται σε πειράματα για την εκτίμηση της συμβολής των παρασιτικών αυτών νετρονίων. Επομένως, κρίθηκε αναγκαίο να αξιολογηθούν αυτοί οι υπολογισμοί που πραγματοποιεί ο κώδικας NeuSDesc. Για την επίτευξη της αξιολόγησης αυτής, πραγματοποιήθηκε πείραμα σχάσης στο εργαστήριο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτου». Στο πείραμα αυτό, ροή νετρονίων εξήλθε από αντίδραση ${}^2_1\text{H}(d, n){}^3_2\text{He}$ και προσέπεσε σε στόχους ${}^{238}\text{U}$ σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από την κυψελίδα παραγωγής νετρονίων. Τα θραύσματα σχάσης που προήλθαν από τις αντιδράσεις των νετρονίων με τους στόχους ${}^{238}\text{U}$, ανιχνεύθηκαν από ανιχνευτές MicroMegas. Γνωρίζοντας την ενεργό διατομή της αντίδρασης ${}^{238}\text{U}(n, f)$ και αναλύοντας τα φάσματα από τους ανιχνευτές, υπολογίστηκε η πειραματική ροή νετρονίων που εξήλθε από την κυψελίδα και προσέπεσε στους στόχους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του κώδικα NeuSDesc και αυτά του πειράματος, ακολούθησαν μία καλή συμφωνία κρίνοντας έγκυρη τη χρήση του κώδικα στο υπό μελέτη ενεργειακό εύρος νετρονίων, δηλαδή 4-10 MeV ενέργεια νετρονίων και αντίστοιχα $E_d=2040-7150$ keV ενέργεια δέσμης δευτερίων. Να σημειωθεί ότι έγινε επέκταση του κώδικα για τις προσομοιώσεις μετά τα 7000 keV ενέργεια δέσμης δευτερίων, μιας και ο κώδικας έχει αναπτυχθεί να αναπαράγει αποτελέσματα μόνο μέχρι αυτή την ενέργεια της δέσμης. Η επιτυχής αξιολόγηση των προσομοιώσεων, συνεπάγεται ότι μπορεί να γίνει χρήση του κώδικα όταν υπάρχει απλή γεωμετρία πειράματος ή και για πιο σύνθετη γεωμετρία, ο κώδικας μπορεί να δώσει κάρτα εισόδου πλήρους περιγραφής της πηγής νετρονίων για το πρόγραμμα προσομοίωσης MCNP. Τέλος, ο κώδικας NeuSDesc μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των νετρονίων από το φαινόμενο διάσπασης δευτερίου (break up) μέχρι το μελετημένο ενεργειακό εύρος νετρονίων (4.5-10MeV).

Βιβλιογραφία

- 1. Evert Birgesson and Goran Lovestam**, *Software Manual, NeuSDesc-Neutron Sources Description*. IRMM, 2007.
- 2. S.Cierjacks**. *Neutron Sources For Basic Physics and Applications*. Tarrytown, New York : Pergamon Press, 1983.
- 3. Γεώργιος Περδικάκης**, Μελέτη αντιδράσεων νετρονίων (n,2n) σε πυρήνες της περιοχής των ακτινιδών, Διδακτορική Διατριβή.
- 4. IAEA**. *Handbook on Nuclear Activation Data*. Vienna : IAEA, 1987. Technical Report 273.
- 5. Andrea L Richard**,. Measurement of the Breakup Cross Section of the D(d,np)D Reaction at 6.94 MeV for the Active Interrogation of Hidden Fissile Materials. Ohio University, 2014, Master of Science.
- 6. R. R. Borchers and C. H. Poppe H.W. Lefevre**, 1962. *Physical Review* 128, 1328.
- 7. Z. Randa and K. Zvoboda**. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 38 (1976), 2289.
- 8. J.Monahan**. *Fast Neutron Physics, Part I*, p 49. New York : Interscience Publishers, 1960.
- 9. H.Horstman and H.Liskien**, *Relativistic calculations in kinematic parameters for nuclear reactions*. s.l. : CBNM EURATOM, 1968. report EUR 3668 e.
- 10. A.B. Kagalenko and N.V. Kornilov**, *The differential neutron production cross-section in the D(d,np) reaction*, IAEA-tecdoc-410, International Atomic Energy Agency, 1980. 115-119.
- 11. H.H Andersen and J.F. Ziegler**, *Hydrogen Stopping Powers and Ranges in all elements*. New York : Pergamon Press, 1977.
- 12. J.F. Ziegler**, *Helium Stopping Powers and Ranges in all elements*. New York : Pergamon Press, 1977.
- 13. SRIM**. www.srim.org.
- 14. Kenneth S. Krane**, *Introductory Nuclear Physics*. Chapter 7.
- 15. Yongqiang Wang and Michael Nastasi**, *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis*. Chapter 2.
- 16.** http://en.wikipedia.org/wiki/Bethe_formula#/media/File:StoppingHinAlBethe.png.
- 17.** <http://inspirehep.net/record/1094565/plots>.
- 18.**
[http://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_\(particle_radiation\)#/media/File:Electronic_nuclear_stopping_Al_in_Al.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_(particle_radiation)#/media/File:Electronic_nuclear_stopping_Al_in_Al.png).
- 19. H. Liskien and A. Paulsen**, *Neutron production cross sections and energies for the reactions T(p,n)3He, D(d,n)3He, and T(d,n)4He*. s.l. : Nuclear Data Tables, 1973. vol.11, No. 7.
- 20. Αθανάσιος Σταματόπουλος**, Έλεγχος Αξιοπιστίας Διαφορικών Ενεργών Διατομών Ελαστικής Σκέδασης Πρωτονίων σε στόχο Φυσικού Βορίου. Μεταπτυχιακή Εργασία. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΣΕΜΦΕ, 2014.

21. Μαρία Διακάκη, *Εγχειρίδιο εισαγωγής στις βασικές έννοιες λειτουργίας του επιταχυντή.*
Αθήνα

22. Αθανάσιος Σταματόπουλος, *Μελέτη Ανιχνευτή MicroMEGAS.* Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο, ΣΕΜΦΕ, 2012. Διπλωματική Εργασία.

23. ENDF: Evaluated Nuclear Data File. <https://www-nds.iaea.org/endl/>