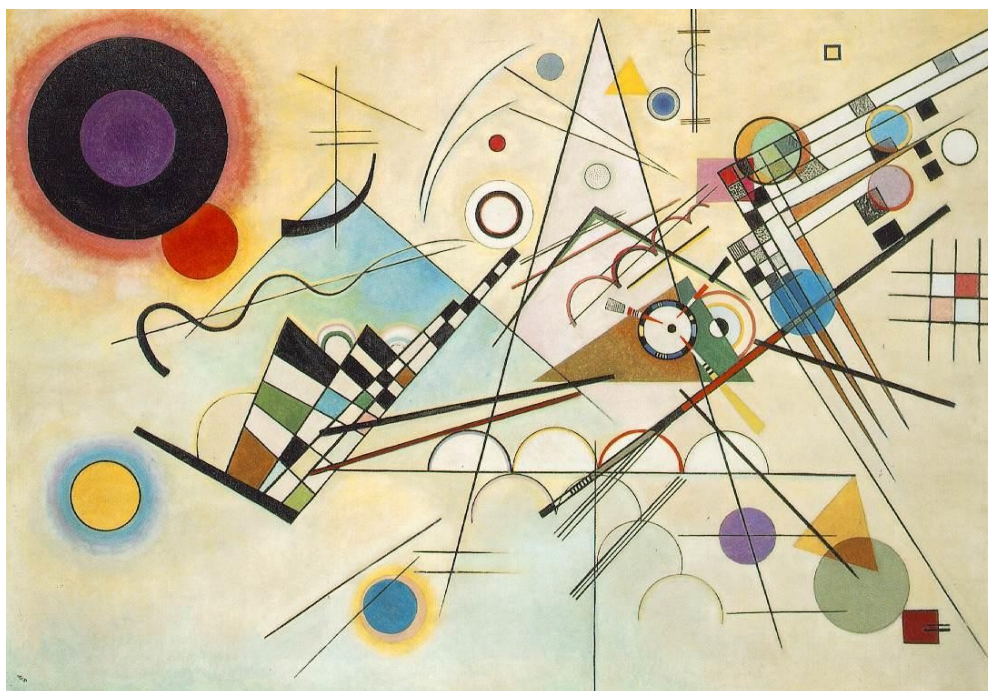




**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗ ^3He ΜΕ MONTE CARLO



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΤΑΜΑΤΗ ΠΕΤΑΛΑ
ΕΠΙΒΛ. ΚΑΘ. : ΜΕΤΑΞΙΑ ΜΑΝΩΛΟΠΟΥΛΟΥ**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2009



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ
ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗ ^3He ΜΕ MONTE CARLO**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΤΑΛΑ ΣΤΑΜΑΤΗ
ΕΠΙΒΛ. ΚΑΘ.: Μ. ΜΑΝΩΛΟΠΟΥΛΟΥ**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2009

στον πατέρα μου Γιάννη,
στη μητέρα μου Μαρία
και στον παππού μου
Απόστολο Βογιατζόγλου

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Το νετρόνιο και οι αλληλεπιδράσεις του με την ύλη

- 1.1. Το νετρόνιο
- 1.2. Πηγές νετρονίων
 - 1.2.1. Νετρόνια από αντιδράσεις (α , n)
 - 1.2.2. Νετρόνια από φωτοδιασπάσεις.
Αντίδραση (γ , n)
 - 1.2.3. Νετρόνια από επιταχυντές πρωτονίων
ή δευτερονίων
 - 1.2.4. Νετρόνια από αντιδραστήρες
- 1.3. Αλληλεπιδράσεις νετρονίων με την ύλη
 - 1.3.1. Αλληλεπιδράσεις βραδέων νετρονίων
 - 1.3.2. Αλληλεπιδράσεις ταχέων νετρονίων

Κεφάλαιο 2

Η ανίχνευση νετρονίων και ο ανιχνευτής He-3

- 2.1. Η ανίχνευση νετρονίων
- 2.2. Ο ανιχνευτής ^3He
 - 2.2.1. Ανίχνευση βραδέων νετρονίων
 - 2.2.2. Ανίχνευση ταχέων νετρονίων

Κεφάλαιο 3

Μελέτη του ανιχνευτή He-3

- 3.1. Εισαγωγικά
- 3.2. Μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης
 - 3.2.1. Η μορφή των φασμάτων
 - 3.2.2. Η κατανομή ελαστικής σκέδασης (recoil)
 - 3.2.3. Η αντίδραση (n,p) και η κορυφή full energy
 - 3.2.4. Η αντίδραση (n,d)

Κεφάλαιο 4

Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με το πείραμα

- 4.1. Τα πειραματικά αποτελέσματα
 - 4.1.1. Η βαθμονόμηση της ενέργειας και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή He-3
 - 4.1.2. Η απόκριση και η απόδοση του ανιχνευτή He-3
- 4.2. Συμπεράσματα

Αντί προλόγου

Ας ψάξουμε τον κόσμο μας μες σ' ένα κόκκο άμμου
την ομορφιά του ουρανού μες σ' ένα αγριολούλουδο
Ας κλείσουμε το άπειρο μέσα στα δυο μας χέρια
και την αιωνιότητα μέσα σε δυο στιγμές

Ουίλιαμ Μπλέικ, «Οιωνοί Αθωότητας»

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη ενός αναλογικού απεριθμητή He-3, προκειμένου να διαπιστωθεί αν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ταχέων νετρονίων και επιπλέον να υπολογιστεί η απόκριση και η απόδοσή του σε αυτές τις ενέργειες. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάλυση και την σύγκριση, τόσο της θεωρίας με την προσομοίωση, όσο και της προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα.

Στα πρώτα κεφάλαια γίνεται μια εισαγωγή στην θεωρία της φυσικής των νετρονίων. Κατόπιν, παρουσιάζεται η προσομοίωση της ακτινοβόλησης του ανιχνευτή, που έγινε με μεθόδους Monte Carlo και ελέγχεται η συμφωνία αυτής με την θεωρία. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόκρισης και της απόδοσης του ανιχνευτή. Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν κατά την ακτινοβόληση του ανιχνευτή με μονοενεργειακή δέσμη νετρονίων ενεργειών 230 keV - 7 MeV, στον επιταχυντή Tandem, Van de Graff του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» στην Αθήνα. Μέσω αυτών των πειραματικών δεδομένων γίνεται η βαθμονόμηση της ενέργειας και της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

Εδώ θα ήθελα να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά την διδάσκαλό μου και επιβλέπουσα καθηγήτρια της εργασίας Κα Μανωλοπούλου Μεταξία, για την υπομονή που έδειξε απέναντί μου, τον πλούτο της γνώσης που μου μετέδωσε και την νοοτροπία και το ήθος με τα οποία με δίδαξε να αντιμετωπίζω την επιστήμη, καθώς με καθοδηγούσε στα διάφορα στάδια της εργασίας αυτής. Επίσης, ευχαριστώ θερμά την υπόλοιπη ερευνητική ομάδα του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. και του ερευνητικού κέντρου Δημόκριτος που διεξήγαγε τα πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Απόστολο αλλά και τους συμφοιτητές και τους φίλους που με βοήθησαν με τις προτάσεις τους αλλά και την ηθική τους συμπαράσταση.

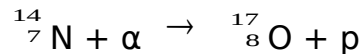
Σταμάτης Πεταλάς
Θεσσαλονίκη, 2009

Κεφάλαιο 1

Το νετρόνιο και οι αλληλεπιδράσεις του με την ύλη

1.1 Το νετρόνιο

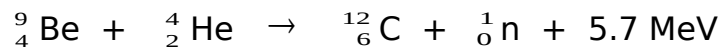
Μετά την ανακάλυψη της πρώτης πυρηνικής αντίδρασης από τον Rutherford το 1919 :



πολλοί ερευνητές έδειξαν ενδιαφέρον στην έρευνα παρόμοιων θεμάτων, με αποτέλεσμα έναν μεγάλο αριθμό ανακαλύψεων στην πυρηνική φυσική αυτή την περίοδο. Έτσι οι Bothe και Becker, το 1930 ανακάλυψαν ότι βομβαρδίζοντας ελαφρά στοιχεία όπως B ή Be με σωματία άλφα, παράγονταν μια πολύ διεισδυτική ακτινοβολία. Παρατήρησαν δε, ότι η ακτινοβολία αυτή δεν αποκλινε μέσα σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο και είχε μικρή ιονιστική ικανότητα. Οι Frederic Joliot και Irene Curie, το 1932, εργαζόμενοι και αυτοί πάνω σε παρόμοια πειράματα, διαπίστωσαν ότι εάν η διεισδυτική ακτινοβολία ήταν ηλεκτρομαγνητικής φύσης θα έπρεπε τα φωτόνιά της να έχουν ενέργεια περίπου 50 MeV (ενέργεια πολύ μεγάλη για να μπορεί να ταυτοποιηθεί η ακτινοβολία αυτή με την γνωστή γάμμα). Επίσης παρατήρησαν την παραγωγή πρωτονίων, τα οποία εκτινάσσονται κατά τον βομβαρδισμό παραφίνης με την ακτινοβολία αυτή. Τα πρωτόνια αυτά τα απέδωσαν στην ανάκρουση κατά τις κρούσεις με τα μεγάλης ενέργειας φωτόνια (ένα είδος φαινομένου Compton) [1].

Το 1932 ο Chadwick πρότεινε ότι η άγνωστη αυτή ακτινοβολία ήταν ένα νέο στοιχειώδες σωματίο, το **νετρόνιο**. Ο Chadwick απέδειξε με λογισμό, πως αν η διεισδυτική ακτινοβολία από τον βομβαρδισμό του Be με σωματία άλφα θεωρηθεί ότι συνίσταται από

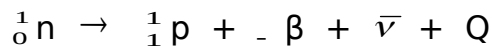
ουδέτερα σωματίδια, τα νετρόνια, και τα οποία έχουν μάζα περίπου ίση με την μάζα των πρωτονίων, τότε οι παρατηρήσεις των ανακρουόμενων πρωτονίων ή των ανακρουόμενων ελαφρών στοιχείων, εξηγούνται μονοσήμαντα με βάση τις ελαστικές συγκρούσεις νετρονίου - πυρήνα. Έτσι η αντίδραση των Bothe - Becker, είναι η :



Η αντίδραση αυτή είναι εξώθερμη. Παρόλα αυτά απαιτείται ισχυρή πηγή σωματίων άλφα για να προκύψουν παρατηρήσιμα γεγονότα (περίπου 1 προς 10^5 από τα σωματίδια άλφα υπερνικούν το φράγμα δυναμικού του πυρήνα Be για να δώσουν τελικά την παραπάνω εξίσωση).

Σήμερα γνωρίζουμε ότι το νετρόνιο είναι ένα αυτούσιο σωματίο και συστατικό μέρος του πυρήνα του ατόμου :

- **Έχει φορτίο μηδέν**, πράγμα που το καθιστά ιδιαίτερα διεισδυτικό, π.χ. μπορεί να διατρέξει πολλά μέτρα αέρα χωρίς να παράγει ούτε ένα ζεύγος ιόντων. Αυτό του επιτρέπει να εισέρχεται στον πυρήνα έστω και με μηδενική σχεδόν κινητική ενέργεια, αφού δεν έχει να υπερνικήσει κάποιο φράγμα δυναμικού. Μπορεί επίσης να συλληφθεί εύκολα, με πυρηνικές δυνάμεις, από τον πυρήνα, σύλληψη που μπορεί να οδηγήσει σε ενεργοποίηση ή και σχάση του πυρήνα.
- **Η μάζα του**, που μπορεί να μετρηθεί μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, είναι σχεδόν **ίση με τη μάζα του πρωτονίου** (το νετρόνιο είναι βαρύτερο κατά 0.00139 amu).
- **Έχει σπίν** $\frac{1}{2} \hbar$ και μεγάλη μαγνητική ροπή, που είναι συνέπεια του σπίν και μιας εσωτερικής συγκρότησης φορτίων. Δηλαδή, το νετρόνιο παρόλο που έχει ολικό φορτίο μηδέν, παρουσιάζει μια εσωτερική ακτινική κατανομή, θετικού φορτίου κοντά στο κέντρο του και αρνητικού στην περιφέρεια.
- Τέλος, σε ελεύθερη κατάσταση, **είναι β^- ραδιενεργό** με μέση ζωή περίπου 15,5 λεπτά. Η διάσπασή του, δίνει :



Πίνακας 1. Ενεργειακή ταξινόμηση νετρονίων. Οι πρώτες τέσσερις κατηγορίες ονομάζονται και βραδέα νετρόνια [1].

Ονομασία νετρονίων	Ενέργεια
ψυχρά	$0 - 2 \times 10^{-3} \text{ eV}$
θερμικά	$10^{-3} - 0.025 \text{ eV}$
επιθερμικά	$\geq 0.5 \text{ eV}$
συντονισμού	$1 - 100 \text{ eV}$
ενδιάμεσης ενέργειας	$10 - 500 \text{ KeV}$
ταχεία	$500 \text{ KeV} - 10 \text{ MeV}$
πολύ ταχεία	$10 - 50 \text{ MeV}$
υπερταχεία	$50 \text{ MeV} - 10 \text{ GeV}$
ρελατιβιστικά	$> 10 \text{ GeV}$

1.2 Πηγές νετρονίων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής νετρονίων, εδώ θα περιγράψουμε μερικούς από αυτούς. Οι ενέργειες των παραγόμενων νετρονίων εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, και κατά κύριο λόγο από τη μέθοδο παραγωγής. Ως προς την ενέργεια, τα νετρόνια διακρίνονται όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Από τα βραδέα νετρόνια, αυτά που αναφέρονται συχνότερα είναι τα λεγόμενα **θερμικά νετρόνια**. Αν θεωρήσουμε ότι ενεργειακά νετρόνια βρίσκονται μέσα σε υλικό που τα απορροφά ασθενώς, τότε αυτά, από την πρώτη στιγμή θα αρχίσουν να χάνουν την ενέργειά τους, μετατρέπόμενα σε θερμικά. Οι κινητικές ενέργειες αυτών των θερμικών νετρονίων, κατανέμονται σύμφωνα με την στατιστική Maxwell – Boltzmann. Η πιθανότερη ενέργεια, που αντιστοιχεί στο μέγιστο της κατανομής, δίνεται από τον τύπο :

$$E_p = \frac{1}{2} kT$$

ενώ η μέση τιμή της ενέργειας, από τον τύπο :

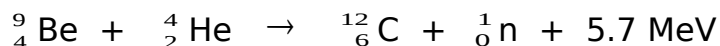
$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT$$

Στην πράξη, έχει γίνει αποδεκτό η ενέργεια των θερμικών νετρονίων να ισούται με τον παράγοντα kT . Αυτό σημαίνει ότι η ενέργειά τους εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία του υλικού στο οποίο διαχέονται και για αυτό τα ονομάζουμε θερμικά.

Τώρα θα δούμε μερικούς από τους τρόπους παραγωγής νετρονίων.

1.2.1 Νετρόνια από αντιδράσεις (α , n)

Ιστορικά είναι ο πρώτος τρόπος παραγωγής νετρονίων, όπως είδαμε και προηγουμένως. Ως στόχοι χρησιμοποιούνται ελαφρά στοιχεία και συνήθως το Βηρύλλιο. Η αντίδραση είναι η



Σαν πηγή των άλφα χρησιμοποιούνται ραδιονουκλίδια που δίνουν α - διάσπαση, όπως ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{210}\text{Po}$ κ.λ.π. Η επιλογή του ραδιοστοιχείου είναι κρίσιμη γιατί, η εκπομπή άλφα συνοδεύεται πάντοτε από ακτίνες γάμμα. Πηγή χωρίς ακτίνες γάμμα είναι το ${}^{210}\text{Po}$ - Be, αλλά το ${}^{210}\text{Po}$ έχει χρόνο ημίσειας ζωής σχετικά μικρό (μόνο 130 ημέρες), πράγμα που καθιστά την πηγή ασταθή, χρονικά, σε ένταση. Μια εξαιρετική πηγή νετρονίων είναι η ${}^{241}\text{Am}$ - Be, αφού ο χρόνος ημίσειας ζωής του ${}^{241}\text{Am}$ είναι μεγάλος ($\approx 400\text{yr}$), και οι γάμμα του Αμερικού είναι μικρής ενέργειας (60 keV).

Το φάσμα των νετρονίων των πηγών (α, n) εξαρτάται ισχυρά από το ζεύγος ραδιοπηγής - στόχου. Τα νετρόνια έχουν συνεχές φάσμα μέχρι τα 15 MeV περίπου. Όπως προαναφέρθηκε, μόνο 1 προς 10^5 από τα σωματία άλφα υπερνικούν το φράγμα Coulomb του στόχου ώστε να παράγουν την αντίδραση αυτή. Για να αυξηθεί η απόδοση της πηγής σε νετρόνια, θα πρέπει τα σωματία άλφα να μην απορροφηθούν ή χάσουν πολύ ενέργεια πριν φτάσουν στον στόχο.

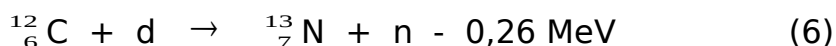
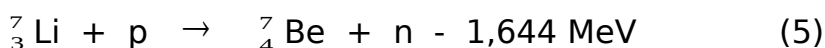
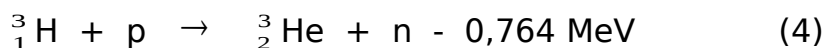
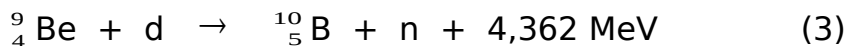
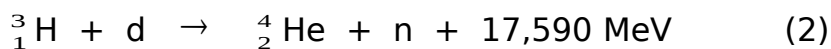
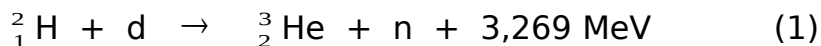
1.2.2 Νετρόνια από φωτοδιασπάσεις. Αντίδραση (γ, n)

Φωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες της ενέργειας σύνδεσης του τελευταίου νετρονίου των πυρήνων, μπορούν να αποσπάσουν το νετρόνιο από τον πυρήνα (αντίδραση (γ, n)). Τα παραγόμενα με αυτόν τον τρόπο νετρόνια είναι κατά πρώτη προσέγγιση μονοενεργειακά, με ενέργεια που εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του πυρήνα - στόχου, την ενέργεια των φωτονίων γάμμα, και την ενέργεια Q της αντίδρασης. Αντιδράσεις (γ, n) μπορούμε να έχουμε με κάθε στοιχείο, αρκεί να πληρείται η συνθήκη ενέργειας που προαναφέρθηκε. Τα περισσότερα νουκλίδια έχουν ενέργεια σύνδεσης του χαλαρότερου νετρονίου, μεγαλύτερη από 5 MeV, το ${}^9_4\text{Be}$ και το ${}^2_1\text{H}$ όμως, έχουν ενέργεια σύνδεσης του τελευταίου νετρονίου 1,67 και 2.23 MeV αντίστοιχα, πράγμα που τα καθιστά τους συνηθέστερους στόχους. Στην πράξη, οι στόχοι αυτοί περιβάλλουν την πηγή των γάμμα. Η πλέον συνηθισμένη πηγή (γ,n) αυτή του ${}^{124}\text{Sb}$ - Be, όπου το ${}^{124}\text{Sb}$ χρησιμοποιείται ως η πηγή των γάμμα.

1.2.3 Νετρόνια από επιταχυντές πρωτονίων ή δευτερονίων

Μονοενεργειακά νετρόνια λαμβάνουμε από τον βομβαρδισμό ορισμένων πυρήνων, όπως του Δευτερίου του Τριτίου κλπ. με

πρωτόνια (αντίδραση (p, n)) ή με δευτερόνια (αντίδραση (d, n)). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες αντιδράσεις είναι οι :



Ιδιαίτερη ώθηση προς αυτές τις πηγές νετρονίων έδωσε η ανάπτυξη της τεχνικής των επιταχυντών. Χρησιμοποιώντας λεπτούς στόχους και για καθορισμένη διεύθυνση εκπομπής των νετρονίων, είναι σήμερα δυνατό να λάβουμε αρκετά ισχυρές δέσμες, μέχρι περίπου 10^7 νετρόνια/cm²/sec, με καλώς προσδιορισμένη ενέργεια και για σχετικά χαμηλές ενέργειες επιτάχυνσης βλημάτων.

1.2.4 Νετρόνια από αντιδραστήρες

Κατά την σχάση των βαρέων πυρήνων ύστερα από τον βομβαρδισμό τους με νετρόνια ή άλλα σωμάτια, παράγεται ένας αριθμός περίπου 2,5 νετρονίων ανά σχάση. Οι αντιδραστήρες είναι η σπουδαιότερη πηγή θερμικών νετρονίων. Στους μεγάλους αντιδραστήρες (αντιδραστήρες ισχύος), μπορεί να έχουμε ροές θερμικών νετρονίων μέχρι και 10^{14} νετρόνια/cm²/sec. Το κύριο μειονέκτημα των νετρονίων από αντιδραστήρες είναι, γενικά, η μεγάλη διασπορά της ενέργειάς τους. Για τον λόγο αυτό έχουν επινοηθεί μηχανικοί επιλογείς νετρονικών ταχυτήτων, καθώς και φίλτρα από διάφορα υλικά, που επιτρέπουν την επιλογή νετρονίων συγκεκριμένης ταχύτητας.

1.3 Αλληλεπιδράσεις νετρονίων με την ύλη

Τα νετρόνια, όπως είδαμε είναι σωματίδια τα οποία, όπως και οι ακτίνες γ , δεν φέρουν φορτίο και συνεπώς δεν μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την ύλη με δυνάμεις Coulomb, τον κύριο μηχανισμό απώλειας ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων. Έτσι είναι δυνατόν να διαπεράσουν αρκετά εκατοστά ύλης, χωρίς την παραμικρή αλληλεπίδραση και άρα να γίνουν πρακτικά «αόρατα» για έναν ανιχνευτή συνήθους μεγέθους. Κατά κύριο λόγο το νετρόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του υλικού-στόχου, με συνέπεια είτε να εξαφανιστεί με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας, είτε να αλλάξει η διεύθυνση ή/και η ενέργειά του.

Σε αντίθεση όμως με τις ακτίνες γ , η δευτερογενής ακτινοβολία που παράγεται από την αλληλεπίδραση του νετρονίου με την ύλη, αποτελείται σχεδόν πάντα από φορτισμένα σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια προέρχονται είτε από πυρηνικές αντιδράσεις που προκλήθηκαν από το νετρόνιο, είτε είναι τα ίδια νουκλίδια από τον πυρήνα του υλικού που πήραν κάποιο ποσό ενέργειας λόγω της σύγκρουσης του νετρονίου με τον πυρήνα.

Για την ανίχνευση των νετρονίων, επειδή ο άμεσος τρόπος είναι δύσκολος λόγω έλλειψης φορτίου του νετρονίου, χρησιμοποιείται συνήθως ένα μέσο μετατροπής των νετρονίων σε φορτισμένα σωματίδια, ώστε να γίνεται η καταμέτρησή τους έμμεσα μέσω αυτών.

Οι σχετικές πιθανότητες για κάθε τύπο αλληλεπίδρασης των νετρονίων με την ύλη, εξαρτώνται ευθέως από την ενέργεια των νετρονίων. Έτσι παρακάτω θα χωρίσουμε τα νετρόνια σε βραδέα (<0.5 MeV) και ταχεία, και θα μελετήσουμε ξεχωριστά τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη [2].

1.3.1 Αλληλεπιδράσεις βραδέων νετρονίων

Οι πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις των βραδέων νετρονίων με την ύλη περιλαμβάνουν: **1) την ελαστική σκέδαση** σε έναν πυρήνα, και **2) πυρηνικές αντιδράσεις**, που προκαλούνται λόγω της ενέργειας του νετρονίου, σε έναν πυρήνα.

Λόγω της μικρής κινητικής ενέργειας των βραδέων νετρονίων, μεταφέρεται πολύ μικρό ποσό ενέργειας, κατά την ελαστική τους σκέδαση στον πυρήνα-στόχο, με συνέπεια αυτή η αλληλεπίδραση να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευσή τους. Παρ' όλα αυτά, οι ελαστικές σκεδάσεις είναι πολύ συχνές και χρησιμεύουν στο να φέρνουν τα νετρόνια σε θερμική ισορροπία με το υλικό απορρόφησης. Έτσι, ένα μεγάλο μέρος των βραδέων νετρονίων βρίσκεται τελικά στην περιοχή των θερμικών νετρονίων με μια μέση ενέργεια 0,025 eV.

Οι αλληλεπιδράσεις των βραδέων νετρονίων με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι αυτές που μπορούν να δημιουργήσουν δευτερεύουσα ακτινοβολία με αρκετή ενέργεια ώστε να είναι ανιχνεύσιμες. Εξ' αιτίας της πολύ μικρής ενέργειας αυτών των

νετρονίων, οι αντιδράσεις τους πρέπει να είναι εξώθερμες, για να είναι ενεργειακά πραγματοποιήσιμες. Στα περισσότερα υλικά, η πιο πιθανή αντίδραση, είναι η σύλληψη του νετρονίου απ' τον πυρήνα (ή (n,γ) αντίδραση) και έχει μεγάλη σημασία όταν μας ενδιαφέρει η εξασθένιση της δέσμης ή γενικά η θωράκιση από τα νετρόνια. Η αντίδραση αυτή, είναι χρήσιμη για την έμμεση ανίχνευση των νετρονίων, μέσω φύλλων ενεργοποίησης. Αντιδράσεις όπως (n, α), (n, p) και (n, σχάση), είναι εξίσου δελεαστικές επειδή τα προϊόντα τους είναι φορτισμένα σωμάτια.

1.3.2 Αλληλεπιδράσεις ταχέων νετρονίων

Η πιθανότητα των περισσότερων αντιδράσεων των νετρονίων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευσή τους, πέφτει κατακόρυφα αυξανόμενης της ενέργειας των νετρονίων. Η σκέδαση, σε αυτήν την περίπτωση γίνεται ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, αφού το νετρόνιο μπορεί να μεταφέρει μεγάλα ποσά ενέργειας με μια και μόνο σύγκρουση, η δευτερεύουσα ακτινοβολία δε, είναι ο ανακρουόμενος πυρήνας ο οποίος έχει λάβει ένα ανιχνεύσιμο ποσό ενέργειας. Σε κάθε σκέδαση το νετρόνιο χάνει ενέργεια, «μετατρέπεται» δηλαδή σε νετρόνιο χαμηλότερης ενέργειας. Ο πιο αποδοτικός «μετατροπέας» είναι το υδρογόνο, επειδή το νετρόνιο μπορεί να χάσει ακόμα και όλη του την ενέργεια σε μια και μόνο σύγκρουση με έναν πυρήνα υδρογόνου, λόγω της συγκρίσιμης μάζας τους. Για βαρύτερους πυρήνες, δύναται να έχουμε μόνο μερική μεταφορά ενέργειας.

Αν η ενέργεια του ταχέος νετρονίου είναι αρκετά μεγάλη, μπορεί να συμβεί και μη-ελαστική σκέδαση, με αποτέλεσμα ο σκεδαζόμενος πυρήνας να διεγερθεί σε κάποια από τις διεγερμένες του καταστάσεις. Κατόπιν, ο πυρήνας αποδιεγείρεται άμεσα, εκπέμποντας γάμμα ακτινοβολία και το νετρόνιο χάνει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από αυτό που θα έχανε σε μια αντίστοιχη ελαστική σκέδαση. Η μη-ελαστική σκέδαση και η επακόλουθη γάμμα ακτινοβολία, παίζουν σημαντικό ρόλο αν μας ενδιαφέρει η θωράκιση από νετρόνια υψηλών ενεργειών, αλλά είναι μια ανεπιθύμητη επιπλοκή όσον αφορά την απόκριση των περισσότερων ανιχνευτών ταχέων νετρονίων.

Κεφάλαιο 2

Η ανίχνευση νετρονίων με τον ανιχνευτή He-3

2.1 Η ανίχνευση νετρονίων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε τους τρόπους αλληλεπίδρασης των νετρονίων με την ύλη, κατηγοριοποιώντας τα σε βραδέα και ταχεία. Έτσι, ανάλογα με την ενέργεια των νετρονίων, διαλέγουμε και διαφορετικές αντιδράσεις τους με την ύλη, πάνω στις οποίες στηριζόμαστε για την ανίχνευσή τους. Κατά συνέπεια, μια παρόμοια κατηγοριοποίηση υπάρχει και στους ανιχνευτές νετρονίων. Υπάρχουν δηλαδή, διαφορετικού τύπου ανιχνευτές τους οποίους χρησιμοποιούμε για τη φασματοσκοπία βραδέων και ταχέων νετρονίων αντίστοιχα. Όλοι βέβαια, οι ανιχνευτές νετρονίων, στηρίζονται στη χρήση ενός υλικού-στόχου, προκειμένου να γίνει μετατροπή των νετρονίων σε φορτισμένα σωματία, ή μετρήσιμη ακτινοβολία γενικά [3].

Μπορούμε να κατατάξουμε τους ανιχνευτές νετρονίων σε:

- **απαριθμητές αερίου γεμίσματος**, με υλικό-στόχο κάποιο αέριο, σε συνδυασμό με ένα ηλεκτρικό πεδίο προκειμένου να ανιχνευθούν τα παραγόμενα σωματία,
- **απαριθμητές ενεργοποίησης**, οι οποίοι είναι ισότοπα υλικά υπό τη μορφή φύλλων, που καθίστανται ραδιενεργά δια της ακτινοβόλησης με νετρόνια
- **θαλάμους σχάσεως**, που χρησιμοποιούν την αντίδραση της σχάσεως για την ανίχνευση νετρονίων μέσω του ισχυρού ιονισμού που προκαλούν τα προϊόντα της σχάσεως [4].

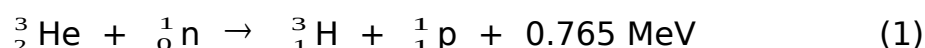
Μέσα σε κάποια πλαίσια, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ενός ανιχνευτή βραδέων νετρονίων για φασματοσκοπία νετρονίων υψηλότερων ενεργειών. Το σημαντικό σε αυτή την περίπτωση, είναι να ελέγξουμε μέχρι ποιο σημείο (ενέργεια νετρονίων) ο ανιχνευτής έχει καλή απόδοση και διακριτική ικανότητα, ώστε να μας εξυπηρετεί η χρήση του.

Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε την απόδοση και την διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή Ηλίου 3 (^3He) στη

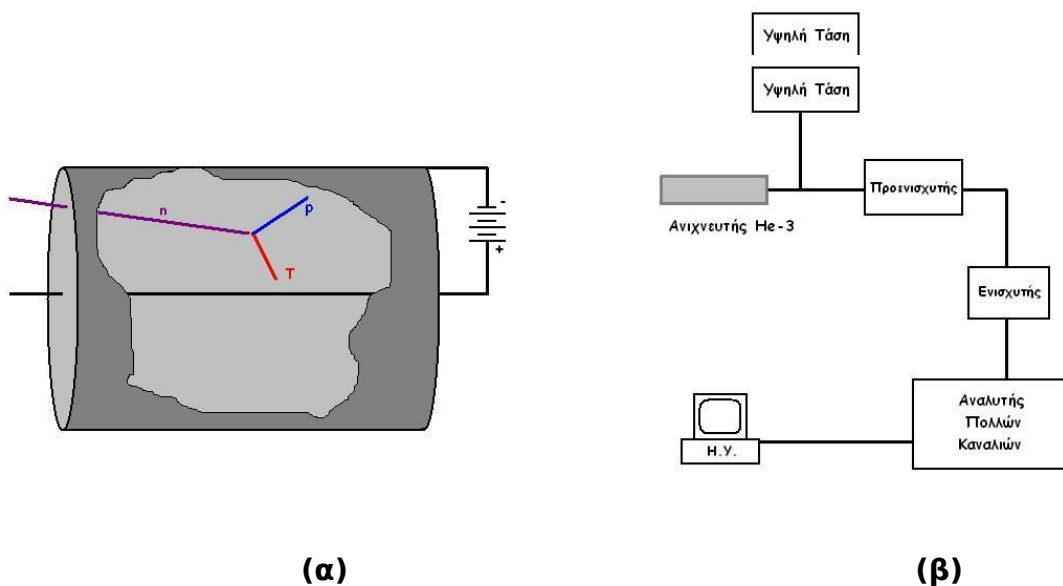
φασματοσκοπία ταχέων νετρονίων, εκτός δηλαδή της περιοχής για την οποία κατασκευάστηκε (ανίχνευση θερμικών-βραδέων νετρονίων).

2.2 Ο ανιχνευτής He-3

Το αέριο ^3He χρησιμοποιείται ευρέως ως μέσο ανίχνευσης νετρονίων μέσω της αντίδρασης



Ο ανιχνευτής He-3, είναι ένας αναλογικός απεριθμητής αερίου γεμίσματος και συνήθως έχει κυλινδρικό σχήμα. Το αέριο μίγμα αποτελείται εκτός του ^3He και από κάποιο άλλο αέριο, συνήθως ευγενές, με μεγάλο δυναμικό ιονισμού ώστε να μειώνεται η εμβέλεια των παραγομένων προϊόντων της αντίδρασης (1) (Σχ. 2.1α). Εφαρμόζοντας μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των τοιχωμάτων του (κάθοδος), και ενός σύρματος κατά μήκος του κεντρικού του άξονα (άνοδος), δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο κυλινδρικής μορφής, το οποίο αρχικά απλώς οδηγεί και κατόπιν επιταχύνει τα ηλεκτρόνια τα οποία πολλαπλασιάζονται, παράγοντας μέσω των «χιονοστοιβάδων» που δημιουργούνται έναν μετρήσιμο παλμό. Δίνεται προσοχή κατά την κατασκευή του, ώστε να ελαττωθεί όσο γίνεται η παραμόρφωση του πεδίου στα άκρα του. Η όλη διάταξη, αποτελείται από ένα τροφοδοτικό, έναν προενισχυτή, έναν ενισχυτή, έναν αναλυτή πολλών καναλιών και έναν υπολογιστή για την τελική καταγραφή (Σχ. 2.1β).



Σχήμα 2.1. Σχηματική αναπαράσταση του ανιχνευτή He-3 (α), και του συστήματος καταγραφής του ανιχνευτή (β).

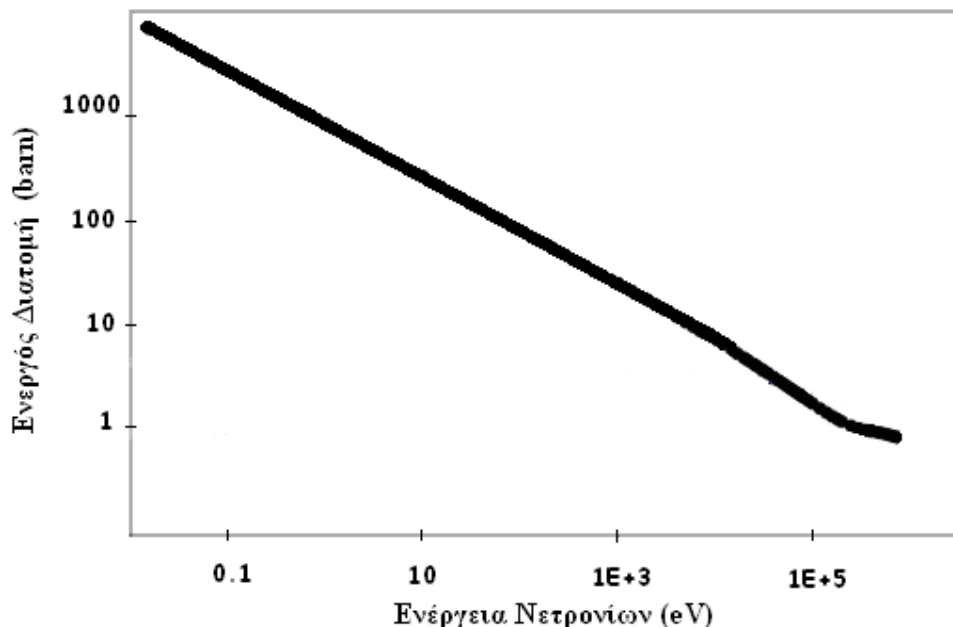
2.2.1 Ανίχνευση βραδέων νετρονίων

Σε έναν ανιχνευτή ^3He , τα ανιχνεύσιμα σωματίδια, είναι τα προϊόντα της αντίδρασης (1) δηλαδή το τρίτιο και το πρωτόνιο, καθώς λόγω του φορτίου τους μπορούν να επιταχυνθούν από το ηλεκτρικό πεδίο του ανιχνευτή και να δώσουν ηλεκτρικό παλμό.

Για αντιδράσεις που γίνονται από βραδέα νετρόνια, η ενέργεια Q της αντίδρασης (0.765 MeV) μεταβιβάζεται στα προϊόντα της, με αναλογία ενέργειας

$$E_p = 0.574 \text{ MeV} \quad E_H = 0.191 \text{ MeV}$$

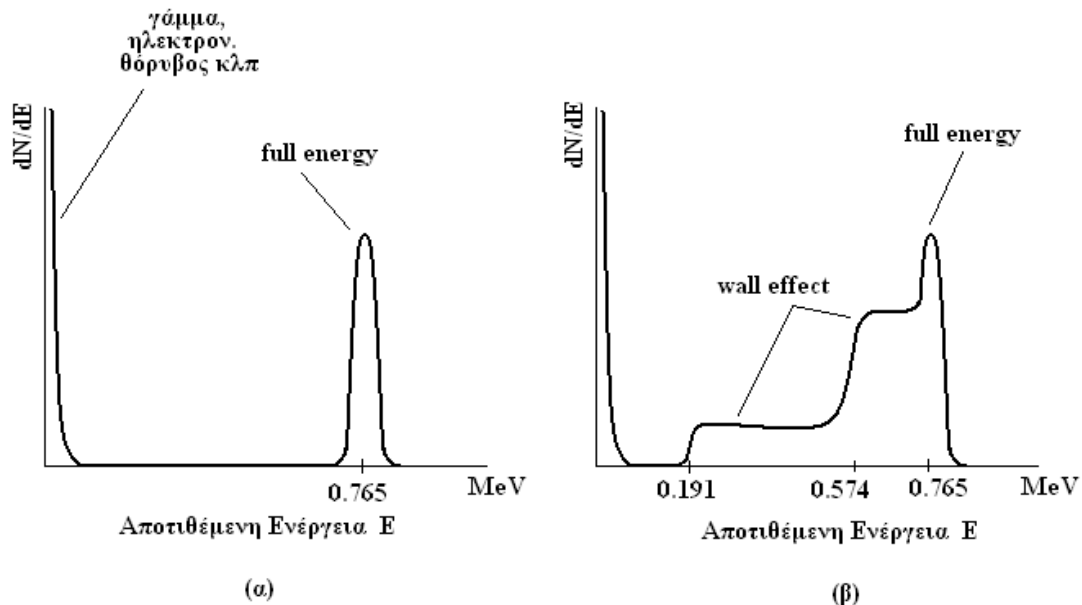
Η ενεργός διατομή για θερμικά νετρόνια είναι της τάξης των 5000 barn, ενώ η τιμή της εξαρτάται από την ενέργεια με ένα λόγο της μορφής $1/v$, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2. Ενεργός διατομή της αντίδρασης $^3\text{He}(n,p)\text{T}$, συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων.

Λόγω της μεγάλης ενεργού διατομής, η αντίδραση $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ είναι ένα καλό μέσο ανίχνευσης για βραδέα νετρόνια. Σε έναν ανιχνευτή μεγάλου μεγέθους, θα περίμενε κανείς, κάθε αντίδραση νετρονίου με το He να αποθέσει 0.765 MeV, υπό μορφή κινητικής ενέργειας των προϊόντων τρίτιο και πρωτόνιο, μέσα στον ανιχνευτή. Ένα τέτοιο φάσμα θα έμοιαζε με αυτό που βλέπουμε στο σχήμα 2.3(α). Παρατηρούμε δύο ομάδες γεγονότων που καταγράφονται. Μια είναι η πλήρης εναπόθεση ενέργειας, η οποία φαίνεται ως μια κορυφή σε ενέργεια ίση με το άθροισμα της κινητικής ενέργειας του νετρονίου συν την τιμή Q της αντίδρασης $^3\text{He}(n,p)\text{T}$. Αυτή την κορυφή θα την ονομάζουμε **full energy** εφεξής. Η άλλη ομάδα γεγονότων που παρατηρείται είναι γεγονότα μικρού μεγέθους όπως αλληλεπιδράσεις γάμμα ακτινοβολίας, ηλεκτρονικός θόρυβος κλπ.

Αυτά αφήνουν πολύ μικρό ποσό ενέργειας στον ανιχνευτή αλλά συνήθως δίνουν πολλά γεγονότα στην αρχή του φάσματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3. Ποιοτικό διάγραμμα ύψους παλμού συναρτήσει της ενέργειας σε ανιχνευτή ^3He , **(α)** για ανιχνευτή μεγάλου μεγέθους, όλα τα προϊόντα της αντίδρασης εναποθέτουν την ενέργειά τους εντός του ανιχνευτή, **(β)** για ανιχνευτή συνήθους μεγέθους, όπου συμβαίνει και wall effect. Η αρχική κινητική ενέργεια του νετρονίου θεωρείται αμελητέα [2].

Το μέγεθος όμως ενός ανιχνευτή δεν είναι πάντα μεγάλο συγκριτικά με την εμβέλεια των προϊόντων των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα εντός του, με συνέπεια τα προϊόντα των αντιδράσεων να συγκρούονται με τα τοιχώματα του ανιχνευτή εναποθέτοντας προηγουμένως μόνο ένα μέρος της ενέργειάς τους. Αυτό το φαινόμενο είναι το λεγόμενο **wall effect** και μετατρέπει το φάσμα που λαμβάνουμε, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3(β). Παρατηρούμε ότι έχει δύο «σκαλοπάτια» αριστερά της κορυφής full energy. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής:

Όταν το εισερχόμενο νετρόνιο δεν έχει μεγάλη ορμή (θερμικό), τα προϊόντα της αντίδρασής του με το ^3He κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις, λόγω αρχής διατήρησης της ορμής. Έτσι, προκύπτουν δύο περιπτώσεις: (1) το πρωτόνιο χτυπά στο τοίχωμα αφού αποθέσει ένα ποσό της ενέργειάς του στο αέριο, ενώ το τρίτο αποθέτει όλη την ενέργεια στο αέριο, ή (2) το τρίτο χτυπά στο τοίχωμα, ενώ το πρωτόνιο αποθέτει όλη την ενέργειά του στο αέριο. Στην πρώτη περίπτωση, το πρωτόνιο μπορεί να βρίσκεται κοντά ή μακριά από το τοίχωμα οπότε η ενέργεια που θα αποθέσει κυμαίνεται μεταξύ $E = 0 \text{ eV}$ (αν βρίσκεται εν επαφή με το τοίχωμα) και $E_p = 0.574 \text{ MeV}$ που είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθέσει. Άρα

η ολική ενέργεια που λαμβάνεται σε αυτήν την περίπτωση είναι μεταξύ $(E_H + 0)$ και $(E_H + E_p)$, δηλαδή μεταξύ 0.191 MeV και 0.765 MeV. Έτσι δημιουργείται το πρώτο «σκαλοπατάκι», το οποίο είναι επίπεδο άνωθεν γιατί κάθε τιμή ενέργειας μεταξύ των δύο παραπάνω ενεργειών, είναι ισοπίθανη. Με το ίδιο σκεπτικό προκύπτει το δεύτερο «σκαλοπατάκι», το οποίο αντιστοιχεί στην δεύτερη περίπτωση, με ενέργεια μεταξύ $(E_p + 0) = 0.574$ MeV έως $(E_p + E_H) = 0.765$ MeV. Η σύνθεση αυτών των δύο περιπτώσεων, μαζί με την ήδη υπάρχουσα κορυφή full energy δημιουργεί αυτή την χαρακτηριστική μορφή στο διάγραμμα.

Αυτό το «πλατώ» στο φάσμα λόγω του wall effect, μπορεί να γίνει πολύ επιζήμιο για μια μέτρηση. Έτσι δίνεται μεγάλη προσοχή στον σχεδιασμό τέτοιων ανιχνευτών, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο. Μια προφανής λύση, είναι η κατασκευή ενός ανιχνευτή με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες διαστάσεις, ούτως ώστε οι αντιδράσεις να γίνονται μακριά από τα τοιχώματα. Άλλη λύση είναι η αύξηση της πίεσης του αερίου ώστε να μειωθεί η εμβέλεια των αντιδράσεων που για το ^3He , λόγω της μικρής ατομικής μάζας του, είναι ασυνήθιστα μεγάλη. Επίσης, την εμβέλεια των παραγομένων προϊόντων των αντιδράσεων μπορούμε να την ελαττώσουμε εισάγοντας και κάποια βαρύτερα αέρια στον ανιχνευτή, τα οποία παρέχουν επιπλέον επιβραδυντική ικανότητα.

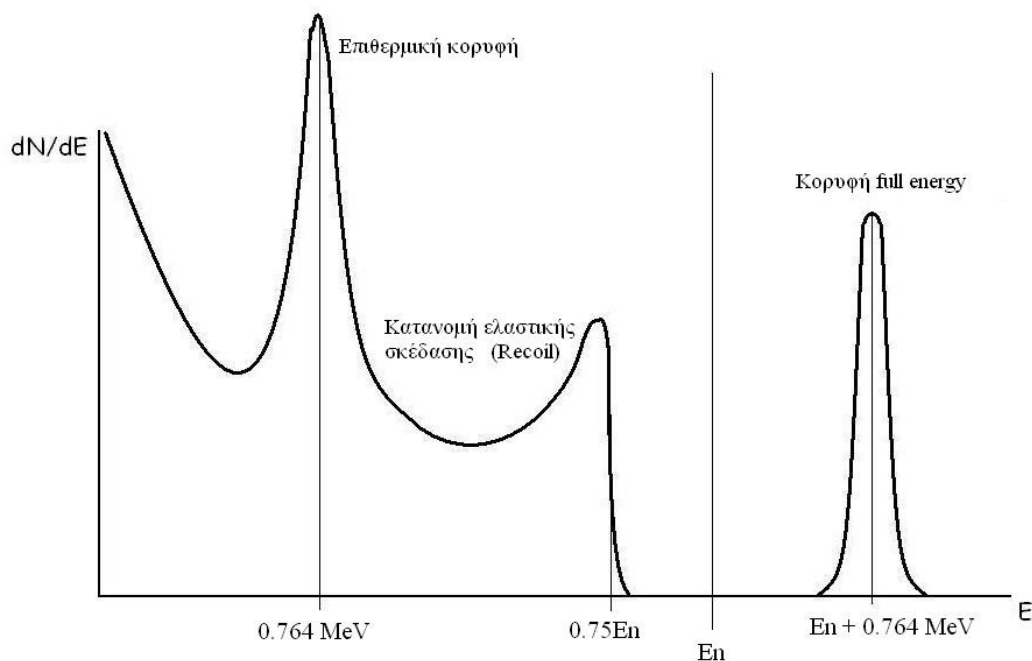
2.2.2. Ανίχνευση ταχέων νετρονίων

Η αντίδραση $^3\text{He}(n,p)$ που είδαμε προηγουμένως, έχει εφαρμογή και στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει η φασματοσκοπία ταχέων νετρονίων. Η ενεργός διατομή όμως ελαττώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται η ενέργεια των νετρονίων.

Έτσι, πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπ' όψιν διάφορες άλλες αντιδράσεις, με πιο σημαντική την ελαστική σκέδαση των νετρονίων στους πυρήνες ηλίου. Η ενεργός διατομή για αυτή την αντίδραση είναι μεγαλύτερη από εκείνη της αντίδρασης (n,p) στα ταχεία νετρόνια, γεγονός που γίνεται εντονότερο αυξανόμενης της ενέργειας των νετρονίων. Για παράδειγμα, οι δυο ενεργές διατομές είναι σχεδόν ίσες όταν τα νετρόνια έχουν ενέργεια 150 keV, αλλά η ελαστική σκέδαση γίνεται τρεις φορές πιθανότερη στα 2 MeV.

Επιπλέον, όταν η ενέργεια των νετρονίων ξεπερνάει τα 4 MeV, είναι πιθανή μια ακόμα αντίδραση, η (n,d) , αλλά η ενεργός της διατομή είναι γενικά μικρή για ενέργειες κάτω από 10 MeV.

Το φάσμα (ύψους παλμού) για έναν τέτοιο ανιχνευτή, αν παραλείψουμε το wall effect, αποτελείται από τρεις ξεχωριστές περιοχές γεγονότων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Μια περιοχή, είναι η κορυφή full energy που είδαμε και στα βραδέα νετρόνια, η οποία αντιστοιχεί στην αντίδραση (n,p) και εμφανίζεται σε ενέργεια ίση με την ενέργεια των νετρονίων, συν την τιμή Q της αντίδρασης.



Σχήμα 2.4. Ποιοτικό διάγραμμα του φάσματος ταχέων νετρονίων, που λαμβάνεται από έναν ανιχνευτή ^3He , για μια συγκεκριμένη ενέργεια E_n [5].

Μια δεύτερη περιοχή, είναι ένα συνεχές (πλατώ), που προέρχεται από την ελαστική σκέδαση του νετρονίου και την μερική μεταφορά ενέργειας στον ανακρουσμένο πυρήνα ηλίου (recoil). Η μέγιστη ενέργεια αυτού του συνεχούς εξαρτάται μόνο από το ατομικό βάρος του πυρήνα και για το ^3He είναι το 75% της ενέργειας του νετρονίου (βλ. §3.2.2). Τρίτον, παρατηρούμε μια επιθερμική κορυφή που αντιστοιχεί στην ανίχνευση νετρονίων που έχουν μετατραπεί σε θερμικά, λόγω αντίδρασης με τα υλικά που είναι παρόντα στον χώρο. Η κορυφή αυτή βρίσκεται σε ενέργεια ίση με την τιμή Q της αντίδρασης (764 keV). Βεβαίως παραμένει η περιοχή στην αρχή του φάσματος που οφείλεται σε ακτίνες γ και ηλεκτρονικό θόρυβο, όπως και στην περίπτωση των βραδέων νετρονίων.

Στο παραπάνω φάσμα μπορεί να προστεθεί και το wall effect, όταν οι διαστάσεις του ανιχνευτή είναι μικρές σχετικά με την εμβέλεια των αντιδράσεων.

Αυξανόμενης της ενέργειας των νετρονίων, θα εμφανιστούν επίσης μια κορυφή που αντιστοιχεί στην αντίδραση $^3\text{He}(n,d)\text{D}$, η οποία έχει τιμή $Q = -3,269\text{ MeV}$, όπως και άλλες κορυφές λόγω αντιδράσεων των νετρονίων με τα υπόλοιπα αέρια που συνυπάρχουν, όπως είδαμε, με το ^3He στον όγκο του ανιχνευτή.

Όλα αυτά θα τα μελετήσουμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3

Μελέτη του ανιχνευτή He-3 με Monte Carlo

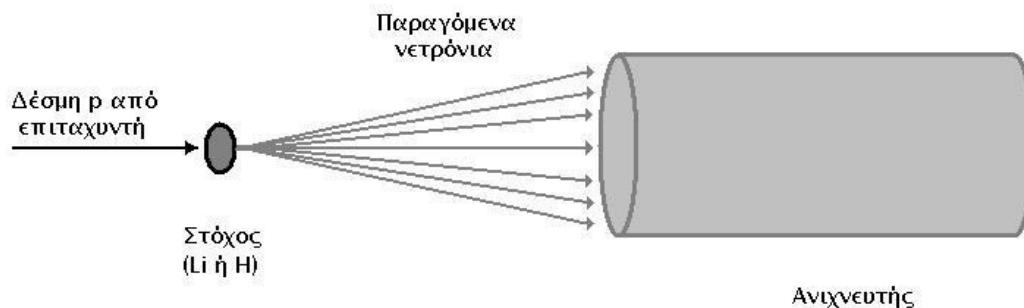
3.1 Εισαγωγικά

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα νετρόνια ως σωμάτια χωρίς φορτίο δεν είναι εύκολο να ανιχνευθούν άμεσα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε κάποιες έμμεσες μεθόδους ανίχνευσης, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα σύστημα μετατροπής των νετρονίων σε φορτισμένα, και άρα ευκολότερα ανιχνεύσιμα σωμάτια. Το αέριο Ήλιο-3, δηλαδή ήλιο του οποίου ο πυρήνας έχει δύο πρωτόνια και ένα μόνο νετρόνιο, χρησιμοποιείται ευρέως στους ανιχνευτές ως μέσο μετατροπής των νετρονίων σε ένα τρίτιο (^3_1H) και ένα πρωτόνιο, τα οποία κατόπιν επιταχύνονται και ανιχνεύονται με τη βοήθεια του ηλεκτρικού πεδίου του ανιχνευτή και του συστήματος καταγραφής παλμών που διαθέτει.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μικρό μέρος μιας ευρύτερης μελέτης, η οποία πραγματοποιήθηκε προκειμένου να ελεγχθεί η δυνατότητα χρήσης ενός συγκεκριμένου κυλινδρικού ανιχνευτή He-3, διαθέσιμου στο εμπόριο, σε περιοχές μεγαλύτερων ενεργειών από αυτές για τις οποίες κατασκευάστηκε. Ο ανιχνευτής αυτός έχει κατασκευαστεί για φασματοσκοπία θερμικών- επιθερμικών νετρονίων, δηλαδή για ενέργειες από μερικά eV έως 500 keV περίπου, αλλά ερευνήθηκε η απόκρισή του για ενέργειες έως 7 MeV, που είναι όπως θα δούμε και τα όρια της διακριτικής του ικανότητας με ικανοποιητική απόδοση. Ας δούμε όμως τα επιμέρους τμήματα αυτής της έρευνας, η οποία διεξήχθη στο τμήμα Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), με τη βοήθεια του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος».

Αρχικά, ο ανιχνευτής He-3 ακτινοβολήθηκε με μονοενεργειακές δέσμες νετρονίων, ενέργειας 230 keV – 7 MeV, χρησιμοποιώντας τις εγκαταστάσεις του επιταχυντή Van de Graff του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής Δημόκριτος στην Αθήνα. Πρωτόνια από τον επιταχυντή προσέκρουαν σε κατάλληλο στόχο παράγοντας νετρόνια συγκεκριμένης ενέργειας, τα οποία στη συνέχεια εκπέμπονταν στον

χώρο. Νετρόνια με ενέργειες από 230 keV έως 3,3 MeV παρήχθησαν μέσω της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ενώ εκείνα με ενέργειες 3,75 MeV έως 7,74 MeV μέσω της αντίδρασης ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ (βλ. §1.2.3). Όταν η ενέργεια των πρωτονίων υπερβαίνει τα 2.2 MeV, εκπέμπεται και μια δεύτερη ομάδα νετρονίων από την αντίδραση ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}^*$ (με $Q=0.429$ MeV). Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε παράλληλα με την κατεύθυνση της δέσμης στις 0° και ελήφθη ένα φάσμα για κάθε ενέργεια νετρονίων. Λόγω της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης και του ανιχνευτή σε σχέση με την δέσμη, εισέρχονται στον ανιχνευτή και νετρόνια με ενέργειες διαφορετικές από αυτή των 0° (Σχ. 3.1). Μέσω αυτών των ακτινοβολήσεων, έγινε η βαθμονόμηση της ενέργειας και της ανάλυσης του ανιχνευτή.



Σχήμα 3.1. Σχηματική παράσταση της διάταξης του ανιχνευτή σε σχέση με την δέσμη.

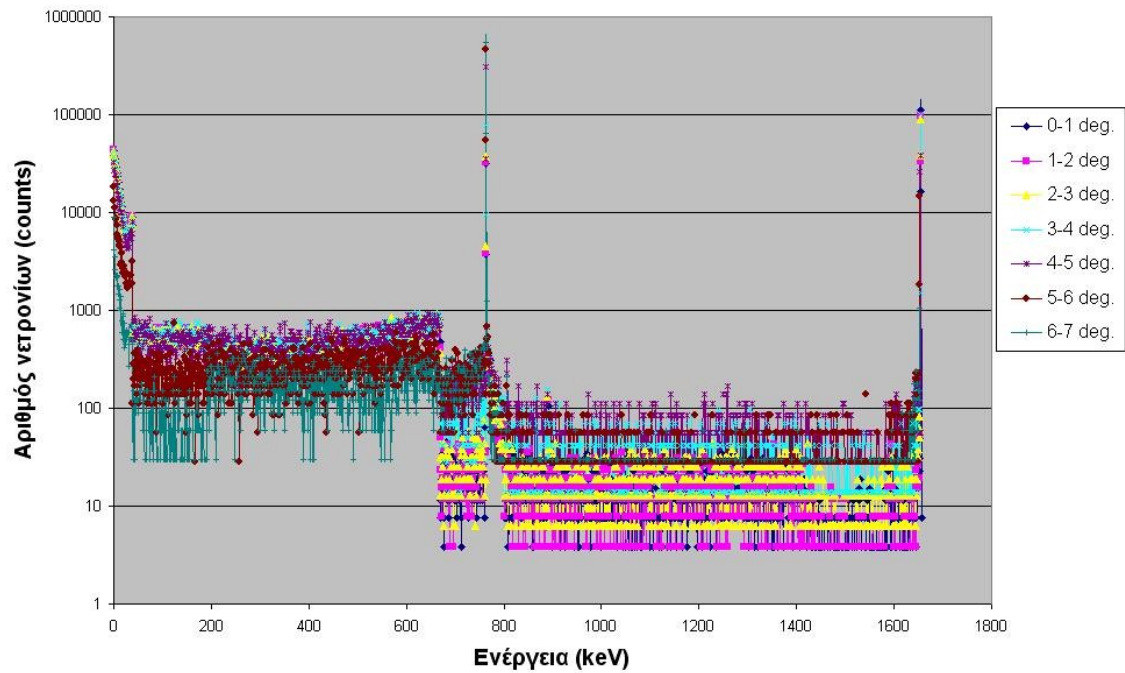
Το δεύτερο μέρος της έρευνας αυτής, ήταν η προσομοίωση των παραπάνω ακτινοβολήσεων με τη βοήθεια του προγράμματος Geant 4 έκδοση 6.2, p.02 [6], και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια του CERN και χρησιμοποιήθηκε η λίστα φυσικής που διαθέτει, για ιατρικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Μέσω της διαδικασίας αυτής, υπολογίστηκε η απόκριση του ανιχνευτή. Προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη η αποτύπωση της πειραματικής διάταξης, τα δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα περιέγραφαν με λεπτομέρεια τους κύριους όγκους του χώρου, την υποστήριξη του ανιχνευτή και των υλικών από τα οποία αποτελούνταν. Επίσης για να υπάρχει καλή εποπτεία των αποτελεσμάτων, δόθηκε εντολή στο πρόγραμμα να τα διαχωρίζει. Έτσι, τα γεγονότα που προέκυψαν από διαφορετικές αντιδράσεις (${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}(n,\text{ελαστική})$ και ${}^3\text{He}(n,d){}^2\text{H}$), διαχωρίστηκαν και επεξεργάστηκαν μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση της ενέργειας.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η επεξήγηση των φασμάτων που λαμβάνονται κατά την προσομοίωση ακτινοβολήσεων του ανιχνευτή, και η σύγκριση αυτών με τα πειραματικά. Στα επόμενα

θα χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, για να αναλύσουμε αυτά τα φάσματα από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Οι ενέργειες για τις οποίες έγινε προσομοίωση, ήταν φυσικά οι ίδιες με αυτές του πειράματος, εκτός της ενέργειας των 230 keV, δηλαδή 385, 612, 892, 1042, 1099, 1510, 1561, 2019, 2073, 2525, 2885, 3331, 3754, 4389, 5036, 5615, 6699 και 7736 keV. Για πρακτικούς λόγους θα ασχοληθούμε μόνο με κάποιες χαρακτηριστικές ενέργειες νετρονίων, αφού αφενός μεν τα θεωρητικά δεδομένα που έχουμε και που θα χρησιμοποιήσουμε για την επαλήθευση της προσομοίωσης αφορούν μόνο λίγες από αυτές, αφετέρου δε ο αντικειμενικός μας σκοπός καλύπτεται αν επαληθεύσουμε ότι η προσομοίωση δουλεύει σωστά σε κάποιες από τις ενέργειες στο εύρος που μελετάμε. Τα φάσματα των ενεργειών με τις οποίες δεν θα ασχοληθούμε επισυνάπτονται στο παράρτημα 1 στο τέλος της εργασίας.

3.2 Μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Τα εξαγόμενα δεδομένα από το πρόγραμμα, είχαν την μορφή αρχείων κειμένου (ένα για κάθε ενέργεια νετρονίων) και μορφοποιήθηκαν σε πίνακες με την εξής διάταξη: Στην πρώτη στήλη του πίνακα τοποθετήθηκε η τιμή της ενέργειας μετά από την βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Στις επόμενες στήλες τοποθετήθηκε το ύψος παλμού που λαμβάνονταν, χωρισμένο σε τρεις μικρότερες στήλες, μια για το συνολικό ύψος παλμού, μια για την αντίδραση ${}^3\text{He}(n,\text{ελαστική})$ και μια για την αντίδραση ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$. Στις περιπτώσεις που υπάρχει και αντίδραση ${}^3\text{He}(n,d){}^2\text{H}$ τοποθετήθηκε σε μια τέταρτη στήλη (Σχ. 3.3). Αυτή η μορφοποίηση του πίνακα γινόταν επτά φορές, μια για κάθε γωνία εισόδου της δέσμης στον ανιχνευτή, δηλαδή για στερεές γωνίες $0^\circ\text{-}1^\circ$, $1^\circ\text{-}2^\circ$, ..., $6^\circ\text{-}7^\circ$ και στο τέλος τοποθετήθηκε η μία τριάδα στηλών δίπλα στην άλλη. Πέραν των 7° δεν υπήρχε λόγος να λάβουμε δεδομένα, εφ' όσον λόγω της γεωμετρίας του πειράματος (διάταξης του ανιχνευτή σε σχέση με την δέσμη, και της



Σχήμα 3.2. Φάσμα που προέκυψε από την προσομοίωση, για ενέργεια νετρονίων 892 keV, για όλες τις γωνίες εισόδου. Διακρίνονται η κορυφή *full energy*, η κορυφή των επιθερμικών νετρονίων και η κατανομή ανάκρουσης (*recoil*).

διαμέτρου του), τα νετρόνια που εκπέμπονται σε μεγαλύτερες γωνίες, δεν εισέρχονται στον ανιχνευτή. Με αυτόν τον τρόπο συγκεντρώσαμε τα δεδομένα που μας έδινε η προσομοίωση σε ένα πίνακα για κάθε ενέργεια, και πλέον ήταν εύκολο να τα χρησιμοποιήσουμε κατασκευάζοντας διαγράμματα ούτως ώστε να έχουμε εποπτεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Ένα τέτοιο συγκεντρωτικό φάσμα φαίνεται στο σχήμα 3.2. Τα παραπάνω έγιναν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Excel της Microsoft.

Έχοντας πλέον στα χέρια μας πίνακες όπως ο πίνακας 3.1, μπορούμε να απομονώσουμε περιοχές του φάσματος που μας ενδιαφέρουν, να ξεχωρίσουμε τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα και γενικά να συγκρίνουμε τις ιδιαιτερότητες κάθε φάσματος ενεργειών, όχι μόνο με το πείραμα αλλά και μεταξύ τους.

Πίνακας 3.1. Συγκεντρωτικός πίνακας των δεδομένων που προήλθαν από την προσομοίωση για ενέργεια νετρονίων 892 keV. Οι αριθμοί 0, 1,..., 6 δηλώνουν γωνία εισόδου 0° - 1°, 1°- 2°,..., 6°- 7° αντίστοιχα από την οριζόντια. Οι στήλες T (Total) υποδηλώνουν το σύνολο των γεγονότων που συνέβησαν, οι στήλες R (Recoil) τα γεγονότα ελαστικής σκέδασης και οι στήλες (n,p) τα γεγονότα λόγω αντίδρασης (n,p).

100000000	0		1		2		3		4		5		6								
	26280000		25780000		15760000		7120000		3560000		3560000		3340000								
	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R							
	3.805175038		3.87897595		6.345177665		14.04494382		28.08988764		28.08988764		29.94011976								
0	42863.88	559.3807	15.2207	44089.44	515.9038	23.27386	43153.55	621.8274	31.72589	42443.82	477.5281	28.08989	32106.74	926.9863	112.3596	18314.61	1235.955	56.17978	9041.916	1646.702	29.94012
1	39155.25	456.621	26.63623	39111.71	399.5345	42.66874	39276.65	456.8528	44.41624	37373.6	505.618	70.22472	26657.3	449.4382	0	13005.62	337.0787	0	4131.737	329.3413	0
2	35692.28	353.8813	45.6623	35275.41	352.9868	31.03181	35888.32	387.0568	25.38071	34564.61	547.7528	84.26966	27612.36	365.1685	140.4494	11179.78	308.9888	56.17978	3502.994	209.6808	59.88024
3	32868.45	437.5951	60.8828	32699.77	465.4771	58.18464	32804.57	387.0568	63.45178	31278.09	407.3034	42.13483	24831.46	280.8989	0	11151.69	224.7191	0	2604.79	179.6407	29.94012
4	29524.35	445.2055	34.24568	29705.2	415.9504	38.78976	29615.99	431.4721	63.45178	26750	463.4831	42.13483	24353.93	224.7191	84.26966	8651.865	252.809	0	2275.449	149.7006	0
5	27187.98	395.7302	26.63623	27684.25	512.0248	31.03181	27544.42	469.5431	31.72589	27462.92	449.4382	42.13483	22275.28	505.618	28.08989	8539.326	168.5393	0	2125.749	149.7006	29.94012
6	25179.84	437.5951	45.6621	25116.37	484.872	54.30566	24251.27	317.2589	38.07107	24648.88	407.3034	56.17978	20421.35	505.618	28.08989	7415.73	112.3596	28.08989	2275.449	89.82036	0
7	23401.83	372.9072	38.05175	23076.03	403.4135	27.15283	22620.56	393.401	25.38071	22570.22	491.757	28.08989	18792.13	421.3483	56.17978	7443.82	252.809	28.08989	1796.407	29.94012	29.94012
8	21423.14	433.79	45.6621	21887.35	407.2925	54.30566	20970.81	355.3299	63.45178	20421.35	337.0787	28.08989	16938.2	393.2584	28.08989	5955.056	224.7191	28.08989	2185.629	179.6407	29.94012
9	20117.96	399.5434	19.02588	19712.96	411.1715	19.39488	19873.1	488.5787	19.03563	18888.76	421.3483	28.08989	14943.82	337.0787	0	5337.079	168.5393	0	1467.066	119.7605	0
10	18316.11	468.0365	34.24568	18176.68	477.114	34.91078	18389.32	380.7107	12.69036	18019.66	449.4382	0	14044.94	252.809	56.17978	5561.796	280.8989	28.08989	1796.407	89.82036	59.88024
11	17165.14	422.3744	11.41553	16784.93	434.4453	11.63693	17380.41	456.8528	19.03563	15988.88	632.0225	14.0494	12443.82	361.7976	0	5000	196.6292	0	1616.758	119.7605	0
12	15890.88	372.9072	22.83105	14910.78	403.4135	11.63693	16091.37	431.4721	6.345178	15660.11	393.2584	14.0494	13005.62	449.4382	0	4634.831	140.4494	56.17978	1047.904	89.82036	29.94012
13	14238.96	414.7641	19.02588	14425.91	411.1715	15.5159	14492.39	475.8883	19.03563	13695.51	337.0787	42.13483	11151.69	365.1685	0	4522.472	84.26966	0	1287.425	89.82036	0
14	12815.83	391.3933	11.41553	12750.19	372.3817	19.39488	13515.23	545.8853	25.38071	12949.44	280.8989	28.08989	9943.82	308.9888	28.08989	4410.112	140.4494	0	1407.186	89.82036	0
15	12020.55	422.3744	26.63623	12416.6	407.2925	27.15283	11973.35	342.6396	12.69036	11896.07	393.2584	70.22472	9971.91	393.2584	56.17978	2949.438	56.17978	56.17978	988.024	89.82036	29.94012
16	11385.08	422.3744	3.805175	11190.85	446.0822	19.39488	11421.32	456.8528	12.69036	11530.9	449.4382	28.08989	9915.73	533.7079	0	3792.135	140.4494	28.08989	598.8024	29.94012	29.94012
17	10512.63	391.3933	7.61035	10217.22	387.0568	23.27386	10133.25	323.6941	19.03563	10112.36	435.3933	0	8389.876	365.1685	0	3061.798	196.6292	0	778.4431	59.88024	0
18	9482.496	388.1279	11.41553	9534.523	434.4453	15.5159	9251.269	450.5076	19.03563	9171.348	252.809	0	7247.191	308.9888	0	2752.809	28.08989	0	688.2635	119.7605	59.88024
19	8915.525	369.102	7.61035	8956.555	356.8658	15.5159	8838.832	450.5076	12.69036	8974.719	365.1685	14.0494	7275.281	337.0787	0	2387.64	224.7191	0	928.1437	89.82036	29.94012
20	8321.918	372.9072	7.61035	8471.683	380.1386	15.5159	8261.421	387.0568	0	8497.191	533.7079	0	7500	252.809	28.08989	2696.629	56.17978	0	508.982	89.82036	0
21	7812.024	342.4568	7.61035	7889.837	411.1715	15.5159	7703.046	523.6041	12.69036	7584.27	351.1236	28.08989	5617.978	337.0787	28.08989	2808.969	168.5393	28.08989	748.503	89.82036	0
22	7343.986	388.1279	11.41553	7489.061	449.9612	7.757952	7093.909	374.3655	0	7052.887	463.4831	28.08989	5874.157	168.5393	28.08989	2612.36	196.6292	0	419.1617	0	0
23	7095.651	403.3486	7.61035	7017.067	449.9612	7.757952	6649.746	399.7462	12.69036	6825.843	323.0377	14.0494	5814.607	393.2584	0	2219.101	196.6292	28.08989	598.9623	89.82036	0
24	6518.265	365.9686	19.02588	6636.928	356.8658	11.63693	6926.934	431.4721	12.69036	6207.865	210.6742	42.13483	4803.371	280.8989	0	2219.101	252.809	0	598.8024	0	0
25	6750.913	403.3486	11.41553	6841.769	399.5345	7.757952	6167.513	444.1624	6.345178	6615.169	379.2135	14.0494	5140.449	168.5393	0	2500	56.17978	28.08989	449.1018	29.94012	0
26	6126.332	391.3933	19.02588	6345.005	442.2033	11.63693	6288.071	469.5431	0	6109.551	435.3933	14.0494	4606.742	477.5281	56.17978	2247.191	112.3596	0	628.7425	29.94012	0
27	6171.984	403.3486	7.61035	6365.081	369.5027	7.757952	6034.264	456.8528	6.345178	5958.022	393.2584	28.08989	4325.843	224.7191	28.08989	1853.933	112.3596	0	508.982	0	29.94012
28	6075.855	388.1279	15.2207	5984.407	354.5237	11.63693	6006.863	491.4721	12.69036	5702.247	351.1236	14.0494	4897.64	224.7191	0	1741.573	196.6292	0	598.8024	29.94012	29.94012
29	5875.19	361.4916	3.805175	5748.642	395.6555	3.878976	5695.599	355.3299	6.345178	5632.022	421.3483	0	4578.652	337.0787	56.17978	1685.393	196.6292	0	598.8024	89.82036	29.94012
30	5936.073	445.2055	7.61035	6144.296	430.5883	7.757952	5875.635	368.0203	12.69036	5589.888	351.1236	0	5280.899	252.809	28.08989	1825.843	140.4494	0	508.982	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
492	506.0883	498.4779	7.61035	574.0884	570.2056	3.878976	444.1624	437.8173	6.345178	660.1124	466.0474	14.0494	505.618	365.1685	140.4494	140.4494	28.08989	112.3596	239.521	59.88024	179.6407
493	519.6986	502.2821	11.41553	453.8402	442.2033	11.63693	590.1015	577.4112	12.69036	519.8829	477.5281	42.13483	633.7079	477.5281	56.17978	393.2584	224.7191	168.5393	209.6808	59.88024	149.7006
494	540.3349	532.7245	7.61035	616.7572	605.1202	11.63693	494.9239	475.8883	19.03563	491.573	463.4831	28.08989	589.8876	477.5281	112.3596	337.0787	252.809	84.26966	209.6808	59.88024	149.7006
495	487.0624	471.8417	15.2207	508.1458	492.6299	15.5159	526.6497	501.269	25.38071	702.2472	674.1573	28.08989	449.4382	308.9888	140.4494	308.9888	196.6292	112.3596	239.521	59.88024	179.6407
496	525.1142	502.2821	22.83105	508.1458	492.6299	15.5159	463.198	437.8173	25.38071	589.886	519.6926	70.22472	674.1573	449.4382	224.7191	393.2584	308.9888	84.26966	119.7605	0	0
497	608.828	602.1918	26.63623	461.5881	446.0822	15.5159	564.7208	526.6497	38.07107	505.618	491.573	14.0494	477.5281	421.3483	56.17978	280.8989	224.7191	56.17978	179.6407	89.82036	59.88024
498	578.3666	588.9711	11.41553	519.7828	504.2699	15.5159	494.9239	488.5787	6.345178	547.7528	435.3933	12.3596	449.4382	365.1685	84.26966	337.0787	224.7191	112.3596	209.6808	59.88024	149.7006
499	475.6469	480.4252	15.2207	519.7828	500.3879	19.39488	583.7583	571.886	12.69036	477.5281	449.4382	28.08989	365.1685	308.9888	56.17978	224.7191	140.4494	84.26966	209.6808	59.88024	0
500	506.0883	498.4779	7.61035	519.7828	512.0248	7.757952	596.4467	577.4112	19.03563	407.3034	351.1236	56.1797.									

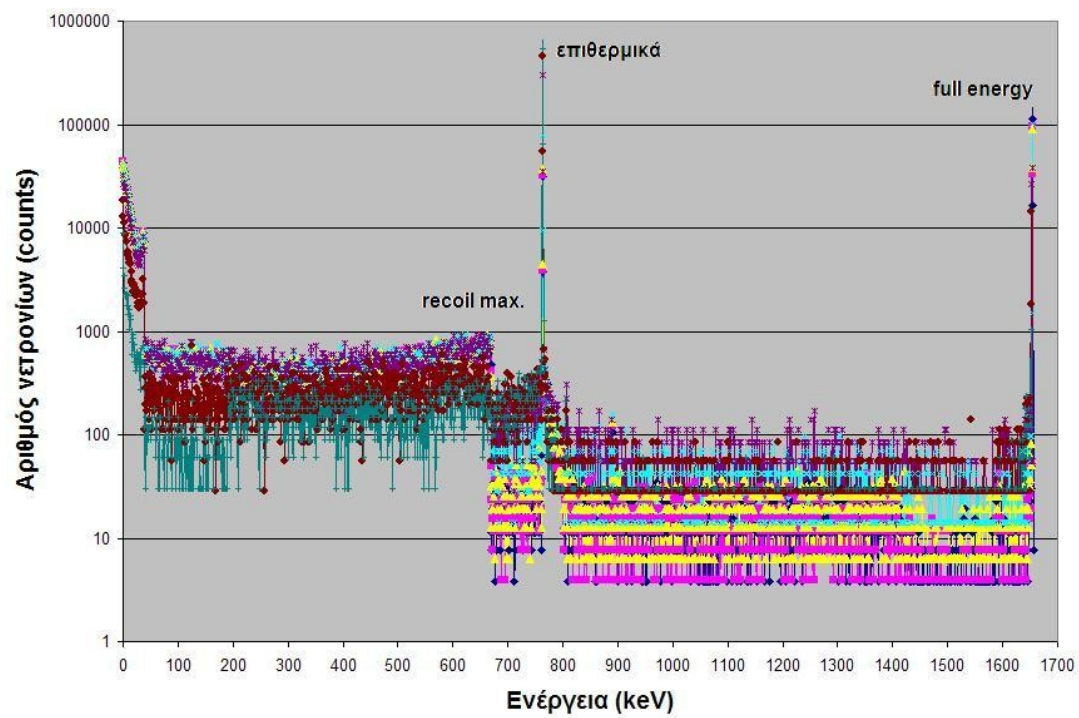
3.2.1 Η μορφή των φασμάτων

Αν από τα δεδομένα που έχουμε υπό μορφή πινάκων, τοποθετήσουμε σε ένα διάγραμμα, στον μεν άξονα- x τις τιμές της ενέργειας (πρώτη στήλη), στον δε άξονα- y τον συνολικό αριθμό των γεγονότων (counts) που συνέβησαν (στήλη T για κάθε γωνία), τότε θα έχουμε ένα διάγραμμα του συνολικού αριθμού των γεγονότων που έλαβαν χώρα εντός του ανιχνευτή για μια συγκεκριμένη ενέργεια νετρονίων. Ας δούμε λοιπόν, εκ πρώτης όψεως, κατά πόσον υπάρχει αντιστοιχία με την πραγματικότητα, για τις έξι αυτές ενέργειες νετρονίων που αναφέραμε. Θυμίζουμε ότι περιμένουμε ένα φάσμα με μορφή παρόμοια με αυτή του σχήματος 2.4, δηλαδή μια κορυφή full energy σε ενέργεια ίση με την ενέργεια των νετρονίων συν 764 keV, μια χαρακτηριστική κατανομή recoil με μέγιστο στο 75% της ενέργειας των νετρονίων, μια επιθερμική κορυφή στα 764 keV λόγω των νετρονίων που μετατράπηκαν σε επιθερμικά μέσω των σκεδάσεων στον περιβάλλοντα χώρο, και τέλος μια κορυφή λόγω της αντίδρασης $^3\text{He}(n,d)\text{D}$, για ενέργειες νετρονίων άνω των 4 MeV, σε ενέργεια ίση με αυτή των νετρονίων μείον 3,269 MeV. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν αναφερόμαστε σε θερμικά νετρόνια παρά μόνο σε επιθερμικά γιατί ο ανιχνευτής κατά την διάρκεια των ακτινοβολήσεων ήταν καλυμμένος με φύλλο Cd πάχους 1.6 mm, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο ρυθμός καταγραφής νετρονίων από σκεδάσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μαζί με ένα πίνακα των αναμενόμενων τιμών για το καθένα.

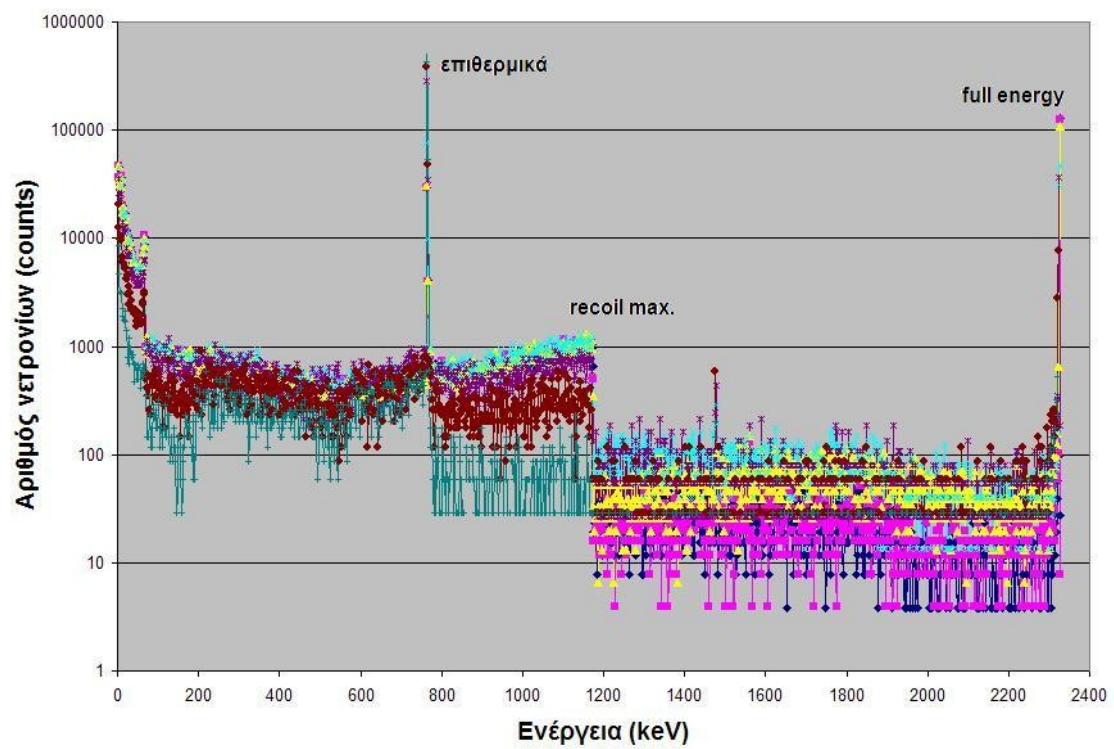
Πίνακας 3.2. Πίνακας αναμενόμενων τιμών διάφορων γεγονότων, για κάθε ενέργεια.

Ενέργεια Νετρονίων (keV)	Κορυφή full energy (keV)	Μέγιστο Κατανομής Recoil (keV)	Επιθερμική Κορυφή (keV)	Κορυφή Αντίδρασης (n, d) (keV)
892	1656	669	764	-
1561	2325	1171	764	-
2525	3289	1894	764	-
3331	4095	2498	764	-
5615	6379	4211	764	2346
7736	8500	5802	764	4467

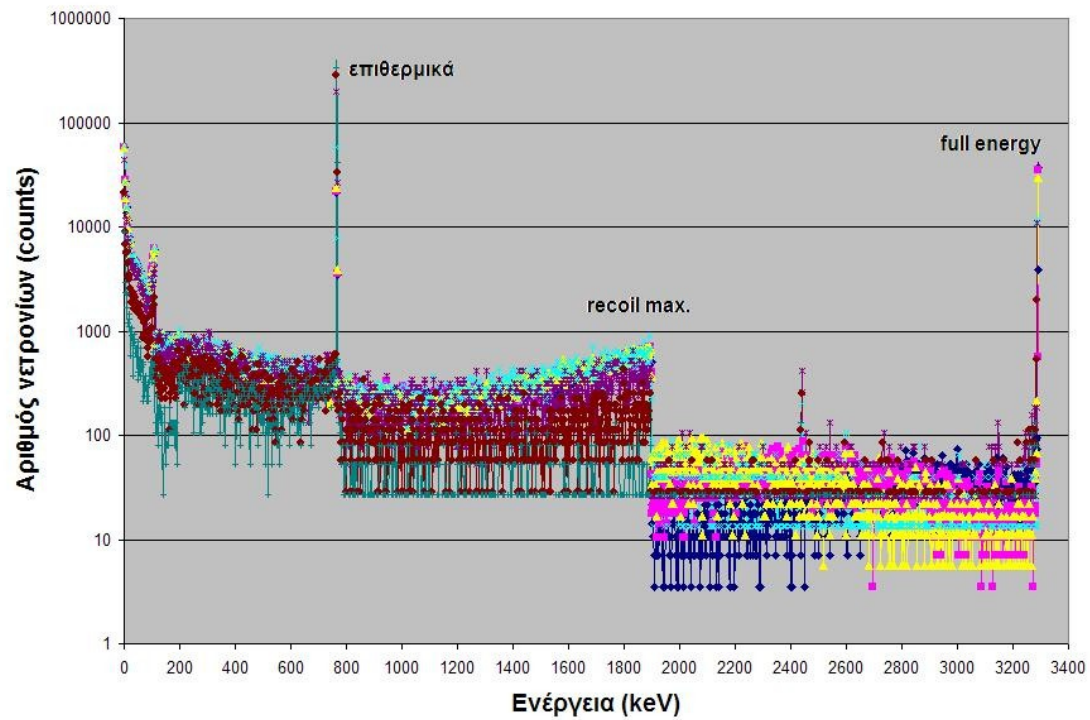
- **892 keV (Total)**



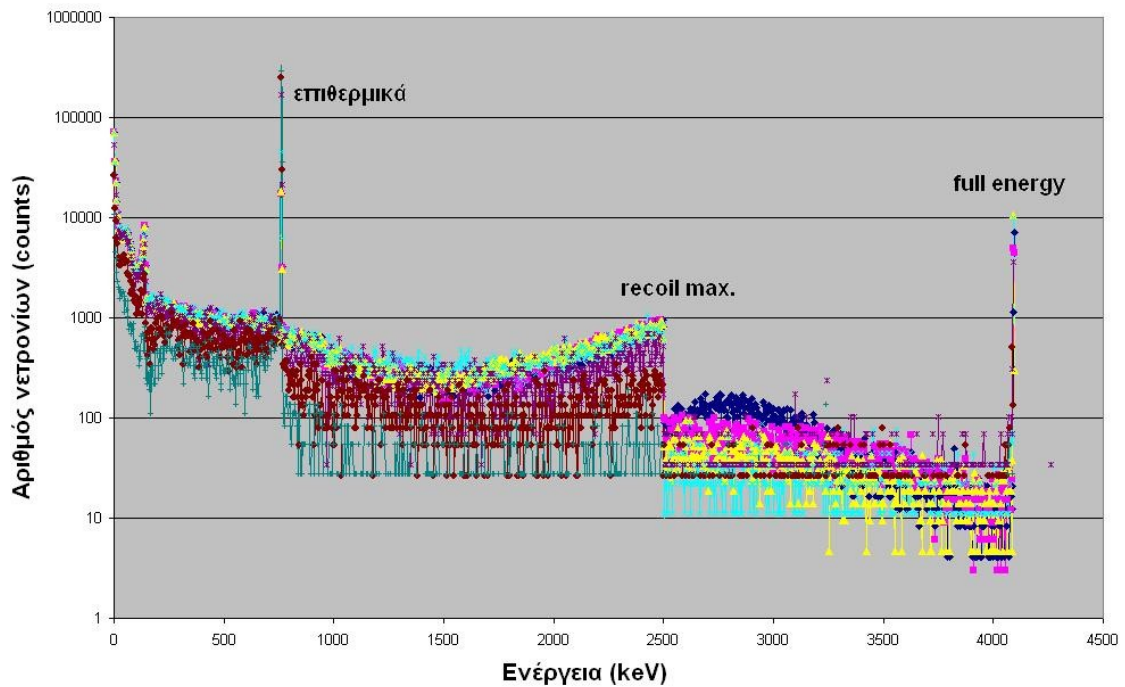
- **1561 keV (Total)**



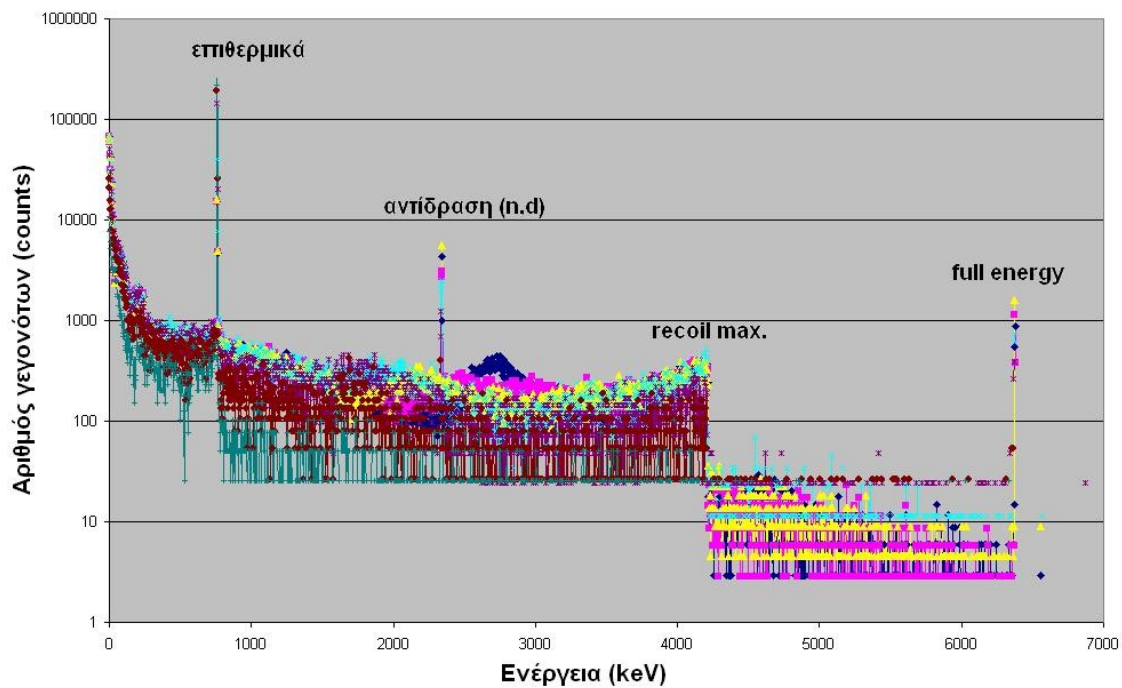
- **2525 keV (Total)**



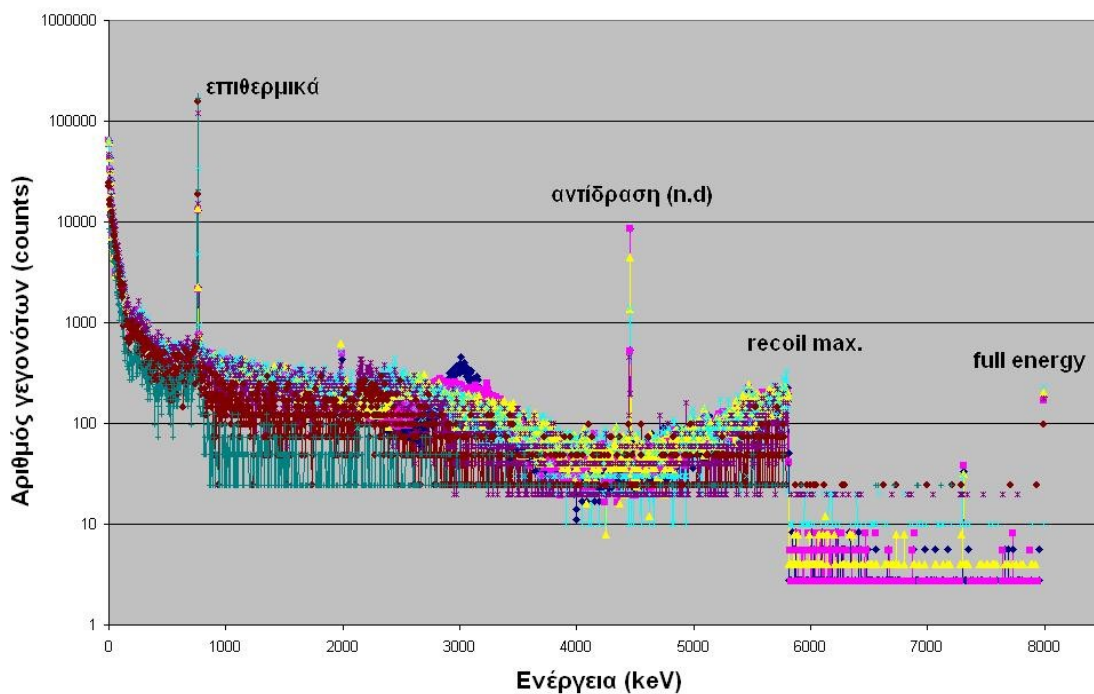
- **3331 keV (Total)**



- **5615 keV (Total)**



- **7736 keV (Total)**



Στα παραπάνω διαγράμματα των φασμάτων, οι χρωματισμοί χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τις διαφορετικές γωνίες

εισόδου στον ανιχνευτή. Παρατηρούμε ότι τα φάσματα που προέκυψαν έχουν την αναμενόμενη μορφή και επιπλέον, συγκρίνοντάς τα με τις τιμές του πίνακα 3.4, βλέπουμε ότι τα βασικά γεγονότα που περιμέναμε να δούμε, εμφανίζονται στη σωστή θέση όσον αφορά την ενέργεια.

Με μια πρώτη ματιά λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι η προσομοίωση έγινε σωστά. Προκειμένου να ελέγξουμε περεταίρω τα αποτελέσματά της, θα πρέπει να μελετήσουμε πιο διεξοδικά τα επιμέρους τμήματα των φασμάτων.

3.2.2 Η κατανομή ελαστικής σκέδασης (recoil)

Με την διαδικασία της ελαστικής σκέδασης το νετρόνιο μεταφέρει ένα μέρος της ενέργειάς του στον σκεδαζόμενο πυρήνα, στην περίπτωση μας τον πυρήνα ^3He . Μετά την σκέδαση ο πυρήνας χάνει τα ηλεκτρόνιά του, και καθίσταται ηλεκτρικά φορτισμένος, άρα μπορεί να αποδώσει ένα μετρήσιμο ποσό ενέργειας στον ανιχνευτή. Αυτήν την ενέργεια μετράει ο ανιχνευτής και καταγράφει ως κατανομή recoil και αυτό θα μελετήσουμε σε ετούτη την παράγραφο.

Αν θεωρήσουμε τον πυρήνα ακίνητο πριν την σύγκρουση, τότε το άθροισμα της ενέργειας των προϊόντων της σκέδασης (νετρόνιο και σκεδαζόμενος πυρήνας), θα πρέπει να ισούται με την ενέργεια του εισερχόμενου νετρονίου.

Όπως γνωρίζουμε, κατά την ελαστική σκέδαση νετρονίων ενέργειας μέχρι μερικές εκατοντάδες keV, η ενέργεια του σκεδαζόμενου πυρήνα δεν εξαρτάται από την γωνία στην οποία θα σκεδαστεί και κατά συνέπεια όλες οι γωνίες είναι ισοπίθανες (αυτό το παρατηρούμε και στα διαγράμματα της § 3.2.1, αφού στα 892 keV η κατανομή της recoil είναι επίπεδη σε αντίθεση με αυτή των υπολοίπων ενεργειών). Όταν όμως το εισερχόμενο νετρόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη του 1 MeV, τότε αρχίζει να υπάρχει εξάρτηση της γωνίας σκέδασης με την ενέργεια του σκεδαζόμενου πυρήνα, με μια σχέση της μορφής:

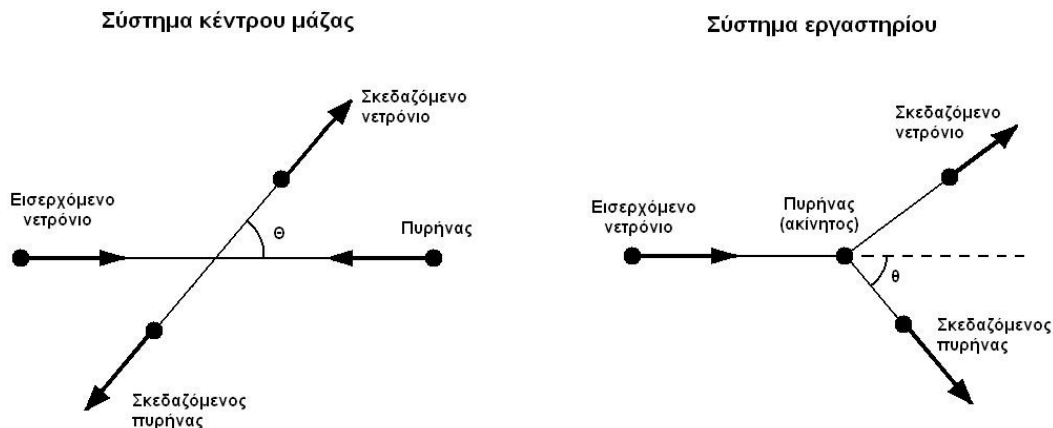
$$E_R = \frac{2A}{(1+A)^2} (1 - \cos \Theta) E_n \quad (1\alpha)$$

όπου A είναι ο ατομικός αριθμός του πυρήνα, Θ η γωνία σκέδασης ως προς το σύστημα κέντρου μάζας και E_n η ενέργεια του εισερχόμενου νετρονίου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση $A=3$, οπότε η σχέση παίρνει την μορφή:

$$E_R = \frac{3}{8} (1 - \cos \Theta) E_n \quad (1\beta)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν δύο τρόποι να ορίσουμε την γωνία σκέδασης. Ο ένας είναι ως προς το «**σύστημα κέντρου μάζας**» και ο άλλος ως προς το «**σύστημα εργαστηρίου**», όπως χαρακτηριστικά λέγονται (Σχ. 3.3) [2]. Στο σύστημα κέντρου μάζας θεωρούμε ότι το νετρόνιο και ο πυρήνας

κινούνται αντίθετα πάνω στην ίδια ευθεία και ότι η κρούση λαμβάνει χώρα στο σημείο που βρίσκεται το κέντρο μάζας του συστήματος. Μετά την κρούση τα δυο προϊόντα κινούνται πάλι αντίθετα πάνω σε μια ευθεία που περνάει από το κέντρο μάζας του συστήματος και σχηματίζει γωνία Θ σε σχέση με την προηγούμενη. Στο σύστημα εργαστηρίου θεωρούμε τον πυρήνα ακίνητο και το νετρόνιο κινούμενο προς αυτόν. Μετά την κρούση τα προϊόντα σκεδάζονται σε διαφορετικές γωνίες ως προς την αρχική τροχιά του νετρονίου, αλλά η γωνία που μας ενδιαφέρει σε αυτήν την περίπτωση είναι η γωνία σκέδασης θ του πυρήνα.



Σχήμα 3.3. Ελαστική σκέδαση νετρονίου από πυρήνα στο σύστημα κέντρου μάζας και στο σύστημα εργαστηρίου.

Η σχέση που συνδέει αυτές τις δύο γωνίες Θ και θ είναι:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{1 - \cos \Theta}{2}} \quad (2)$$

κατά συνέπεια η σχέση (1α) μετασχηματίζεται στην:

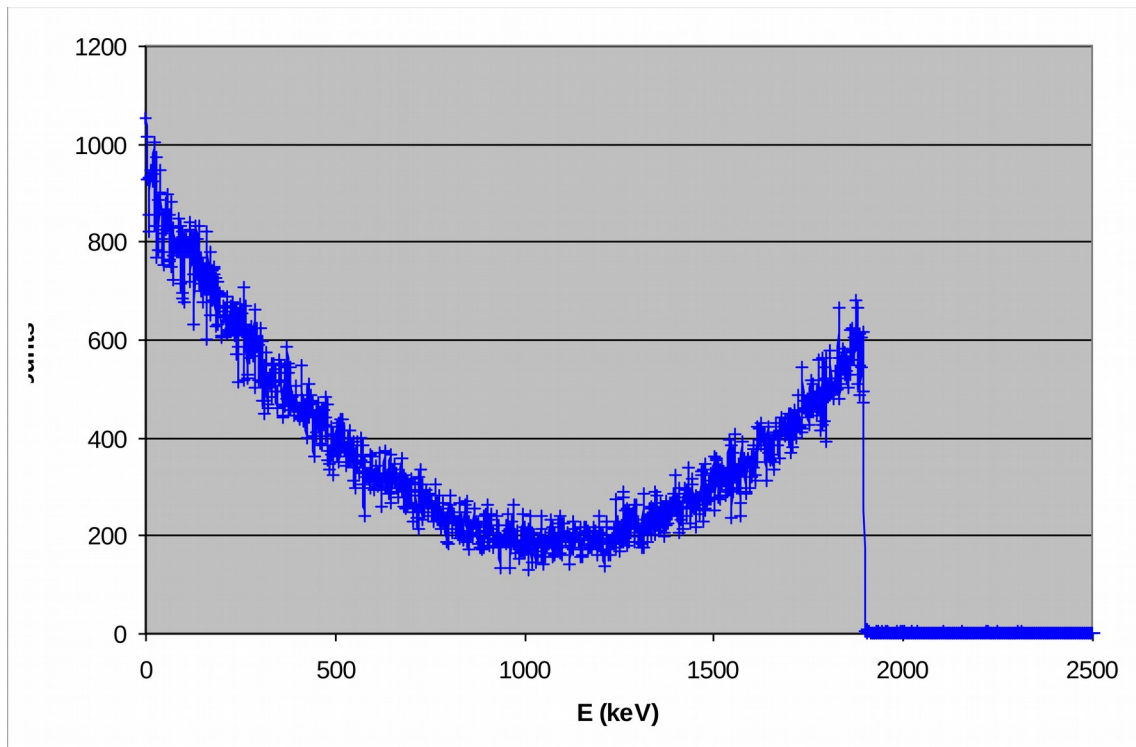
$$E_R = \frac{4A}{(1+A)^2} \cos^2 \theta \cdot E_n \quad (3\alpha)$$

όπου A ο ατομικός αριθμός, θ η γωνία σκέδασης του πυρήνα ως προς το σύστημα εργαστηρίου και E_n η ενέργεια του εισερχόμενου νετρονίου.

Από τη σχέση (3α) (ή (1β)) βλέπουμε ότι για το He-3 η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να πάρει ο σκεδαζόμενος πυρήνας είναι:

$$E_R = \frac{3}{4} E_n = 0,75 E_n \quad (3\beta)$$

Στο σχήμα 3.4 βλέπουμε την μορφή κατανομής της ελαστικής σκέδασης που λαμβάνουμε από την προσομοίωση, σε ένα διάγραμμα ενέργειας-γεγονότων (counts).



Σχήμα 3.4. Κατανομή της ελαστικής σκέδασης για ενέργεια νετρονίων 2525 keV.

Η κατανομή αυτή φαίνεται να είναι εντάξει. Το μέγιστο αντιστοιχεί σε ενέργεια 1894 keV, ακριβώς όσο περιμέναμε και θεωρητικά και επίσης χαρακτηρίζεται από την έντονη καμπυλότητά της γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει συσχέτιση γωνίας σκέδασης-ενέργειας πράγμα το οποίο επίσης περιμέναμε να δούμε. Αν θέλουμε όμως να είμαστε σίγουροι για την ακρίβεια της προσομοίωσης, πέραν της εποπτικής επιβεβαίωσης, πρέπει να συγκρίνουμε αυτή την κατανομή με την θεωρητικά αναμενόμενη αντίστοιχή της.

Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας στοιχεία από κάποια βάση δεδομένων. Μια τέτοια βάση με τεράστιο όγκο πληροφοριών ειδικά για πυρηνικές αντιδράσεις είναι η ENDF (Evaluated Nuclear Data Files), που βρίσκεται στην διαδικτυακή τοποθεσία της NNDC (National Nuclear Data Center) [7]. Εισάγοντας σαν δεδομένα σε αυτή την τράπεζα το σωματίο-βλήμα, το υλικό του στόχου και την αντίδραση που θέλουμε να ελέγξουμε (στην περίπτωση μας νετρόνιο, He-3 και ελαστική σκέδαση αντίστοιχα) και ζητώντας στοιχεία για την γωνιακή κατανομή, λάβαμε ένα αρχείο το οποίο περιέχει την πιθανότητα σκέδασης για διάφορες γωνίες, για τις εξής ενέργειες νετρονίων: 1, 2, 2.6, 3.5, 5, 6 και 8 MeV. Σαν παράδειγμα της διάταξης αυτών των αρχείων, δίνεται ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 3.3. Γωνιακή κατανομή της πιθανότητας για την ενέργεια των 2,6 keV (από την βάση δεδομένων ENDF).

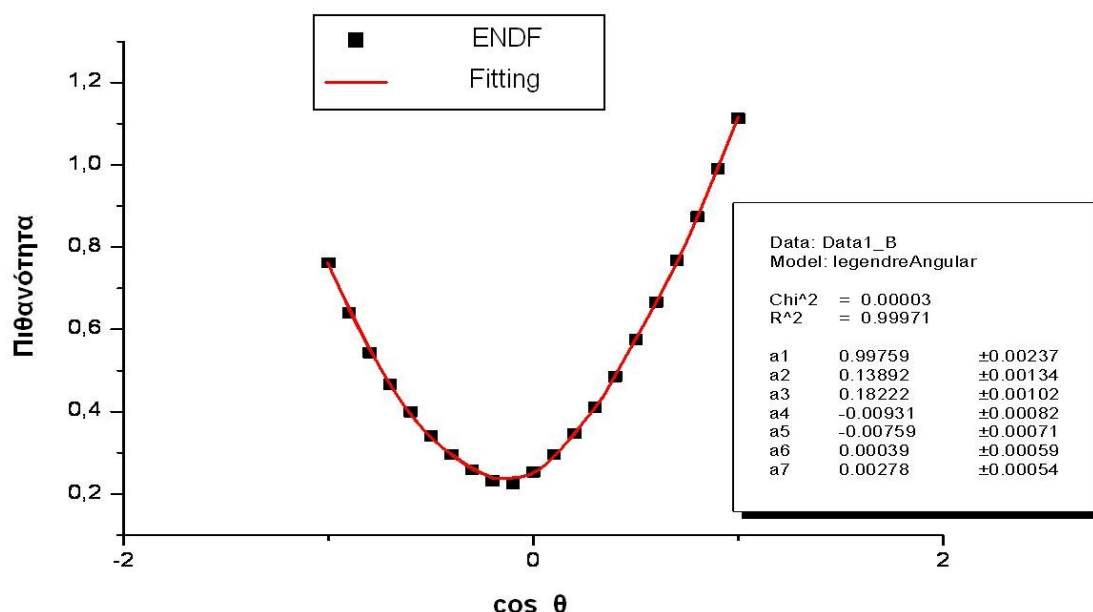
cos θ	Πιθανότητα	cos θ	Πιθανότητα
- 1	0,9347	0,1	0,3713
- 0,9	0,8643	0,2	0,3585
- 0,8	0,7939	0,3	0,3521
- 0,7	0,7234	0,4	0,3521
- 0,6	0,6594	0,5	0,3585
- 0,5	0,5986	0,6	0,3681
- 0,4	0,5442	0,7	0,3809
- 0,3	0,4994	0,8	0,4001
- 0,2	0,4546	0,9	0,4193
- 0,1	0,4225	1	0,4417
0	0,3905	-	-

Όπως βλέπουμε δεν υπάρχει μια συνεχής κατανομή την οποία να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να ελέγξουμε τα αποτελέσματά μας. Ξέρουμε όμως ότι η σχέση πιθανότητας-γωνίας υπακούει σε μια εξίσωση. Αυτή είναι η παρακάτω:

$$f(\mu, E) = \frac{2\pi}{\sigma_s(E)} \sigma(\mu, E) = \sum_{l=0}^{NL} \frac{2l+1}{2} a_l(E) P_l(\mu) \quad (4)$$

$$\int_{-1}^1 f(\mu, E) d\mu = 1$$

όπου f η πιθανότητα, μ το συνημίτονο της γωνίας σκέδασης α , i η σταθερά τάξης l του πολυωνύμου Legendre και P_l το πολυώνυμο Legendre τάξης l . Έτσι με βάση αυτή την εξίσωση, μπορούμε να κάνουμε προσαρμογή (fitting) μιας ευθείας στις τιμές του πίνακα 3.7 προκειμένου να βρούμε τις τιμές των σταθερών του πολυωνύμου Legendre και άρα να γνωρίζουμε ποια είναι η σχέση που συνδέει την πιθανότητα με οποιαδήποτε γωνία. Η προσαρμογή αυτή έγινε μέσω κατάλληλου προγράμματος (OriginLab) και το αποτέλεσμα για την ενέργεια των 2,6 keV φαίνεται στο σχήμα 3.5.



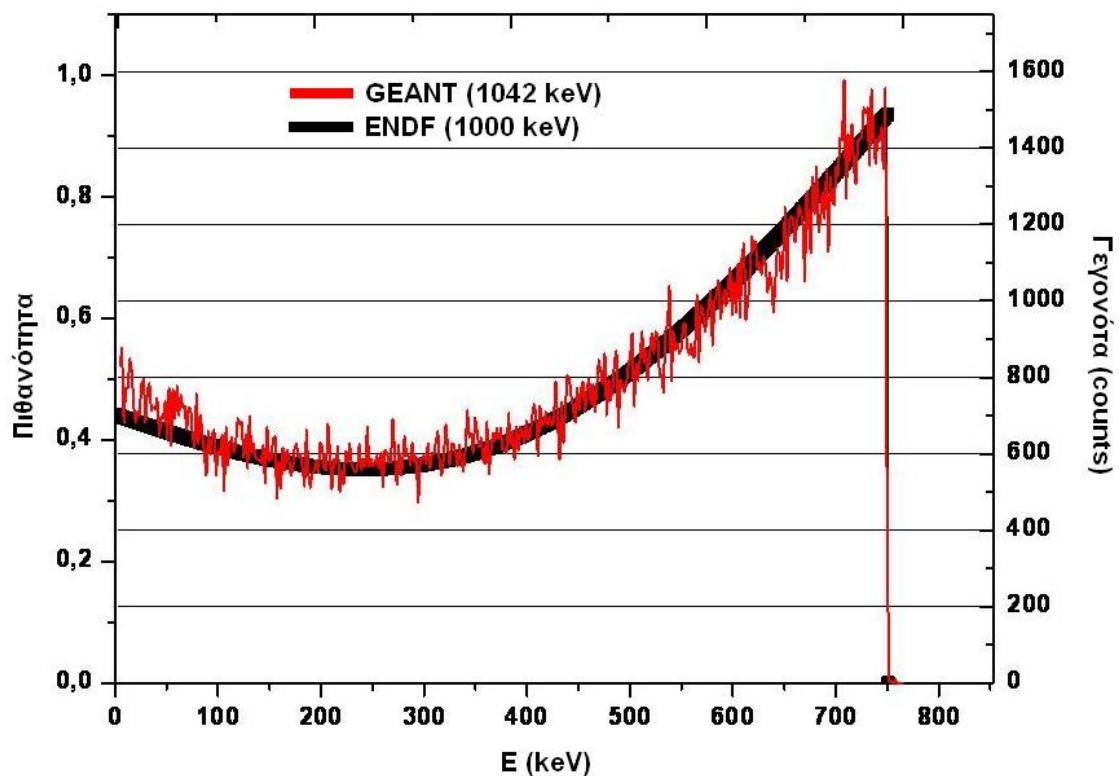
Σχήμα 3.5. Προσαρμογή (fitting) ευθείας στις τιμές των δεδομένων της ENDF για την ενέργεια των 2,6 keV.

Χρησιμοποιήσαμε τα πολυώνυμα Legendre μέχρι έκτης τάξης γιατί δεν παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στην προσαρμογή με χρήση πολυωνύμων ανώτερης τάξης. Έχοντας πλέον την εξίσωση γωνίας-πιθανότητας για κάθε ενέργεια νετρονίων, μπορούμε να προχωρήσουμε στην σύγκριση θεωρίας και προσομοίωσης.

Τα δεδομένα που έχουμε από την ENDF είναι για συγκεκριμένες ενέργειες νετρονίων. Το ίδιο όμως συμβαίνει και με τα αποτελέσματα που έχουμε από την προσομοίωση. Έτσι πρέπει να επιλέξουμε ενέργειες που να μην διαφέρουν πολύ για να κάνουμε μια ρεαλιστική σύγκριση. Για τον λόγο αυτό επιλέξαμε να συγκρίνουμε τις εξής ενέργειες :

	Θεωρία (ENDF)	Προσομοίωση (GEANT)
1)	1000 keV	1042 keV
2)	2000 keV	2019 keV
3)	2600 keV	2525 keV
4)	3500 keV	3331 keV
5)	5000 keV	5036 keV
6)	6000 keV	5615 keV
7)	8000 keV	7736 keV

Από την σχέση (1β) μπορούμε να μετατρέψουμε την ενέργεια (από 0 έως το μέγιστο της recoil) σε γωνία και χρησιμοποιώντας την εξίσωση που προέκυψε από την προσαρμογή των δεδομένων να αντιστοιχίσουμε την γωνία με μια πιθανότητα. Κατ' αυτόν τον τρόπο έχουμε μια σχέση ενέργειας-πιθανότητας για κάθε ενέργεια νετρονίων της ENDF που είναι πλέον άμεσα συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (ενέργεια-counts). Αυτό φαίνεται στα σχήματα 3.6 και 3.7 όπου έχουν τοποθετηθεί στο ίδιο διάγραμμα η θεωρητικά αναμενόμενη κατανομή της recoil (ENDF), μαζί με την αντίστοιχη κατανομή που προέκυψε από την προσομοίωση (GEANT), για τρία ζευγάρια ενεργειών.

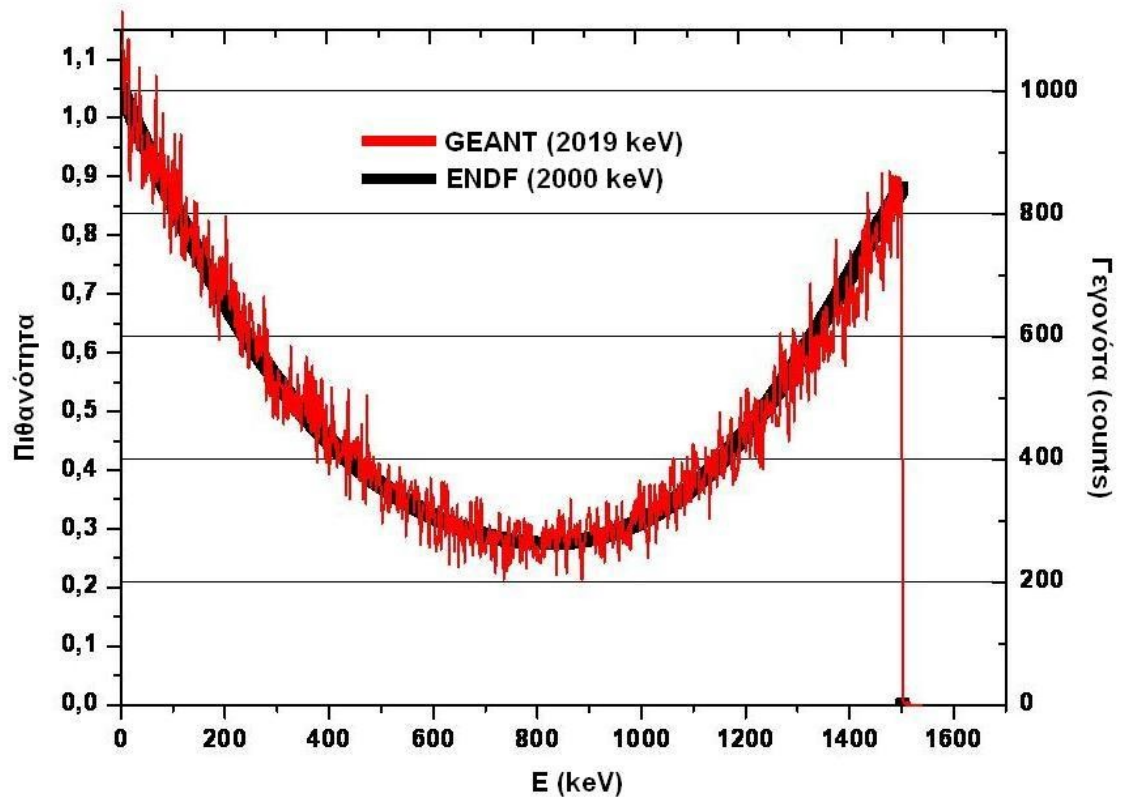


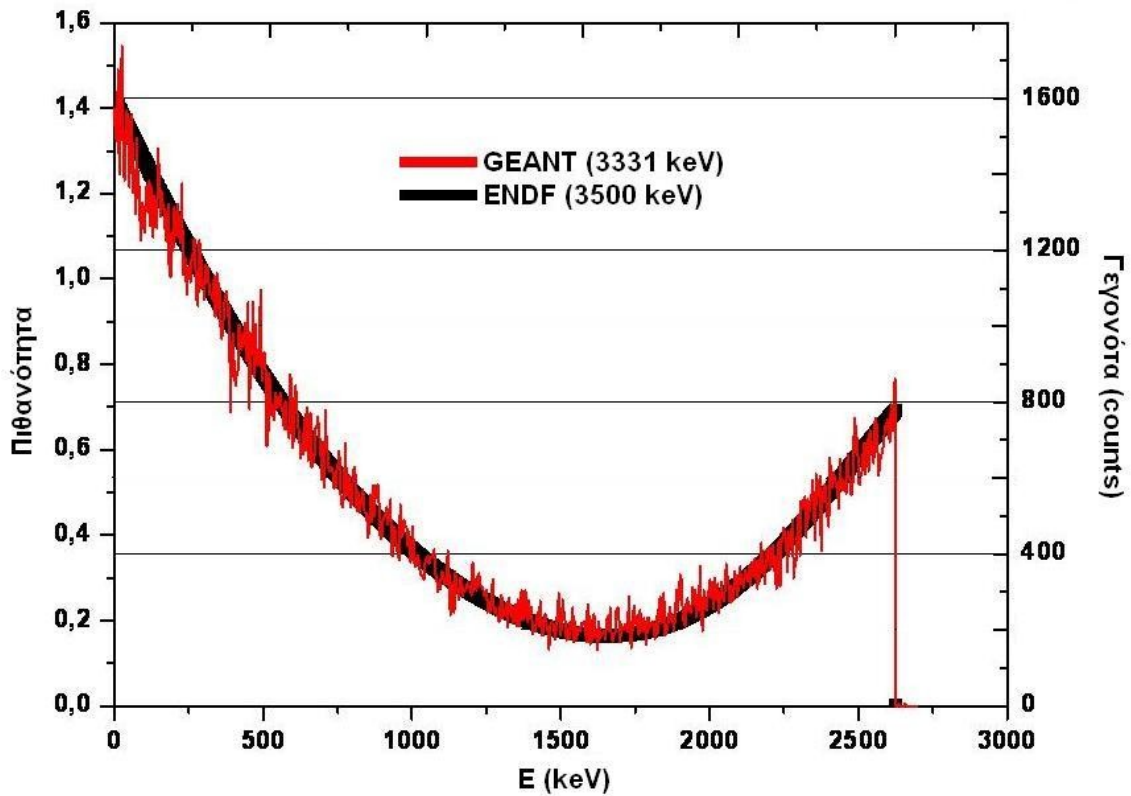
Σχήμα 3.6. Σύγκριση της κατανομής recoil από την προσομοίωση με την θεωρητικά αναμενόμενη καμπύλη για τις ενέργειες 1000-1042 keV.

Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι η σύγκλιση θεωρίας και προσομοίωσης είναι ικανοποιητική, ενώ οι μικρές αποκλίσεις που υπάρχουν δικαιολογούνται λόγω της διαφοράς μεταξύ των ενεργειών που συγκρίναμε.

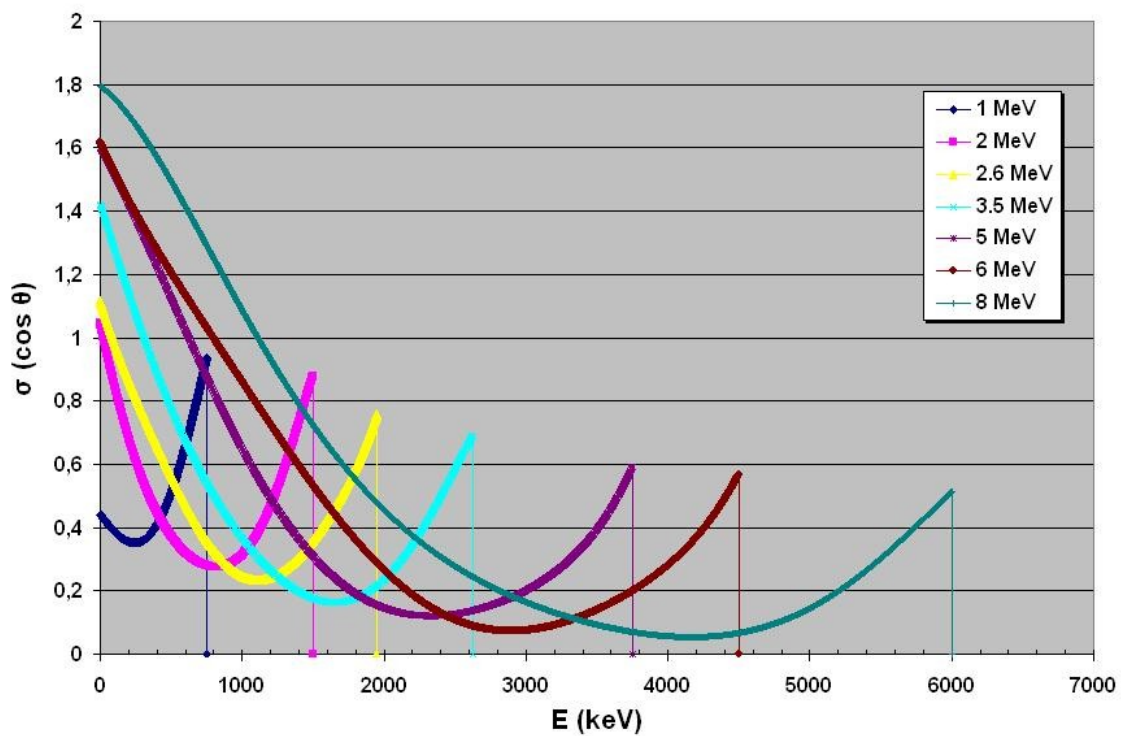
Αν τοποθετήσουμε σε ένα κοινό διάγραμμα όλες τις κατανομές της ελαστικής σκέδασης που προέκυψαν με τον παραπάνω τρόπο, θα παρατηρήσουμε ότι η μορφή της κατανομής δεν είναι η ίδια για κάθε ενέργεια νετρονίων. Για παράδειγμα στην ενέργεια των 1000 keV, η καμπύλη ξεκινάει από μικρές πιθανότητες στις μικρές ενέργειες και καταλήγει σε μεγάλη πιθανότητα στο μέγιστο της κατανομής. Αυτή η

κατάσταση αλλάζει όσο αυξάνεται η ενέργεια των νετρονίων και βλέπουμε ότι στις μεγαλύτερες ενέργειες έχει αντιστραφεί εντελώς (Σχήμα 3.8).



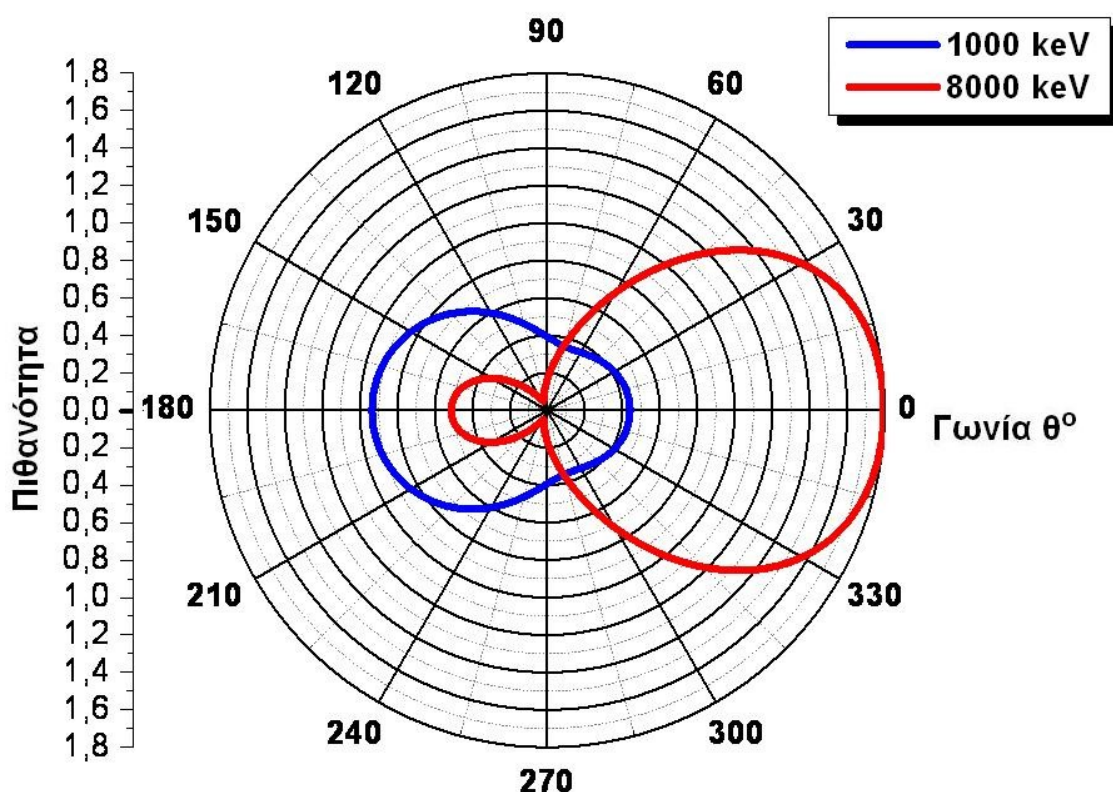


Σχήμα 3.7. Σύγκριση της κατανομής *recoil* από την προσομοίωση με την θεωρητικά αναμενόμενη καμπύλη για τις ενέργειες 2000-2019 keV και 3500-3331 keV.



Σχήμα 3.8. Συγκεντρωτικό διάγραμμα των κατανομών της ελαστικής σκέδασης, για τις 7 ενέργειες νετρονίων της ENDF.

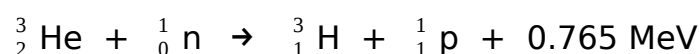
Ο άξονας- x , που στην προκειμένη περίπτωση συμβολίζει την ενέργεια, αντιστοιχίζεται άμεσα σε γωνία όπως φαίνεται από την σχέση (1β). Πιο συγκεκριμένα, η ελάχιστη ενέργεια της κατανομής αντιστοιχεί σε γωνία σκέδασης του πυρήνα ίση με 0° , ενώ το μέγιστο σε γωνία 180° . Τα παραπάνω μας ωθούν στο συμπέρασμα ότι για μικρές ενέργειες νετρονίων (~ 1000 keV), ευνοείται η οπισθοσκέδαση (μεγαλύτερη πιθανότητα), ενώ καθώς αυξάνεται η ενέργεια το φαινόμενο αντιστρέφεται και ευνοείται η σκέδαση σε μικρές γωνίες. Αυτή η διαφορά φαίνεται έντονα και στο πολικό διάγραμμα του σχήματος 3.9, όπου έχουν τοποθετηθεί οι δυο ακραίες ενέργειες των 1000 και 8000 keV, με την πιθανότητα συναρτήσει της γωνίας.



Σχήμα 3.9. Πολικό διάγραμμα της πιθανότητας σκέδασης για τις ενέργειες των 1 και 8 MeV.

3.2.3 Η αντίδραση (n,p) και η κορυφή full energy

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 2.2, τα νετρόνια αντιδρούν με το ^3He μέσω της αντίδρασης (1):



Αν η εμβέλεια των προϊόντων αυτής της αντίδρασης είναι μικρότερη από τις διαστάσεις του ανιχνευτή He-3 , ώστε να αποθέσουν όλη τους

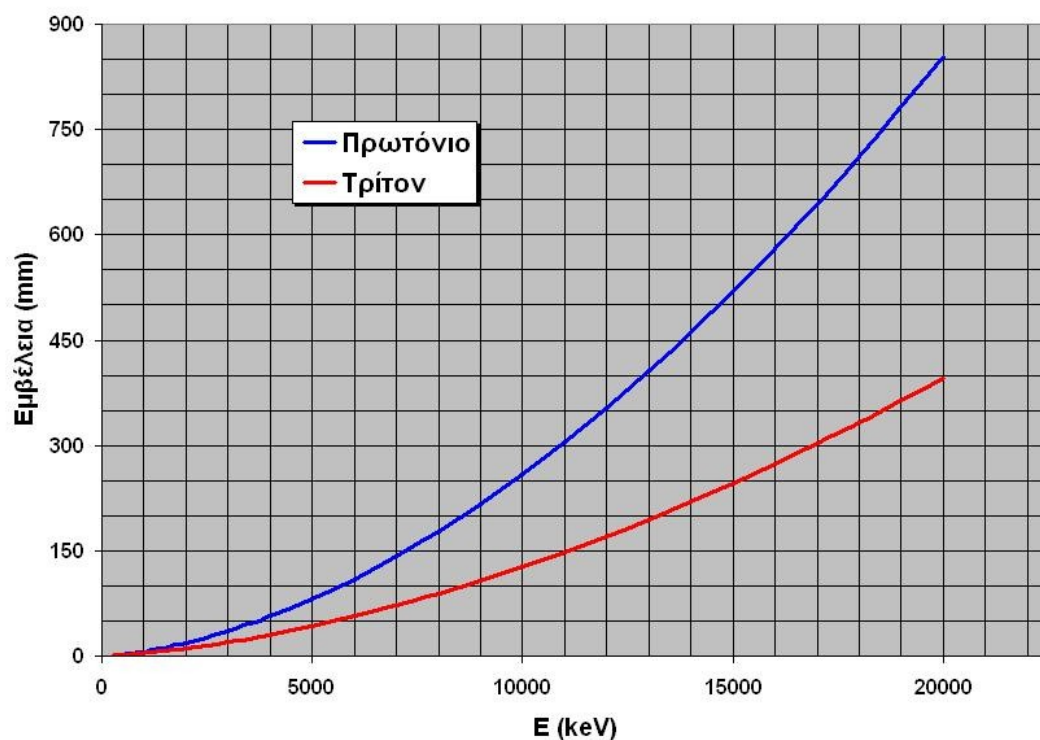
την ενέργεια εντός του ανιχνευτή, τότε αυτό που θα προκύψει ως μέτρηση θα είναι μια κορυφή full energy σε ενέργεια ίση με την ενέργεια του νετρονίου συν 765 keV. Αν πάλι, οι διαστάσεις του ανιχνευτή είναι μικρότερες, τότε είναι πιθανό, ανάλογα με την γωνία εκπομπής των προϊόντων της αντίδρασης, μέρος της ενέργειάς τους να αποθεθεί στα τοιχώματα του ανιχνευτή (wall effect), με συνέπεια να μην εμφανιστεί μόνο η κορυφή full energy, αλλά και ένα πλήθος γεγονότων σε μικρότερες ενέργειες.

Για να μπορέσουμε λοιπόν να υπολογίσουμε την εμβέλεια των προϊόντων ${}^3_1\text{H}$ και p εντός του συγκεκριμένου ανιχνευτή He-3 που μελετάμε, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) [8]. Ως δεδομένα στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, εισάγαμε με ακρίβεια τα στοιχεία του αερίου γεμίσματος του ανιχνευτή, όπως, τα χημικά στοιχεία που το αποτελούν, τον ατομικό τους αριθμό και το ατομικό τους βάρος, το ποσοστό του καθενός, την πυκνότητα του μίγματος και τα ιόντα των οποίων την εμβέλεια θέλουμε να μετρήσουμε. Τα δεδομένα αυτά, για τον συγκεκριμένο ανιχνευτή, φαίνονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4. Δεδομένα του αερίου μίγματος του ανιχνευτή He-3 και των ιόντων πρωτόνιο και τρίτον.

Χημικό Στοιχείο (ή σωματίο)	Ατομικός Αριθμός	Ατομικό Βάρος (amu)	Άτομα ανά 100 (Ποσοστό)
Ήλιο	2	3,016	62,1
Κρυπτό	36	83,8	32
Άνθρακας	6	12,011	1,92
Οξυγόνο	8	15,999	3,84
Πρωτόνιο	1	1,008	-
Τρίτον	1	3,025	-
Πυκνότητα Αερίου : 0,008235 gr/cm³			

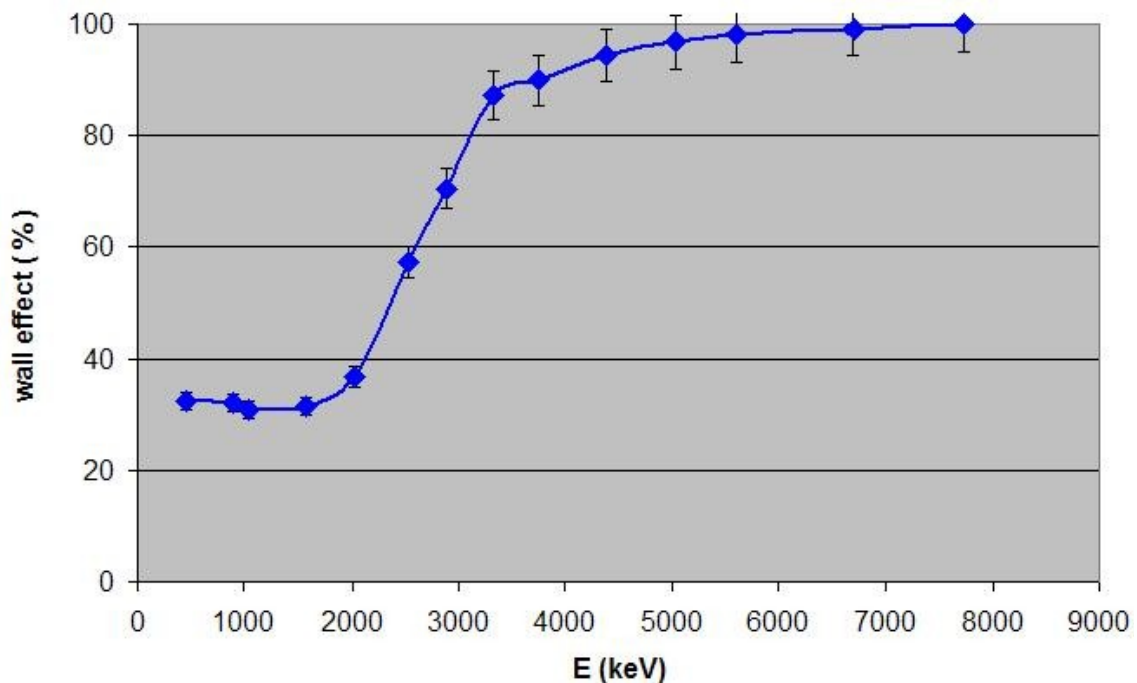
Εκτελώντας το πρόγραμμα, προέκυψαν οι εμβέλειες των ιόντων μέσα στο συγκεκριμένο μίγμα αερίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10. Εμβέλεια των ιόντων πρωτόνιο και τρίτον εντός του αερίου μίγματος του ανιχνευτή He-3 (SRIM).

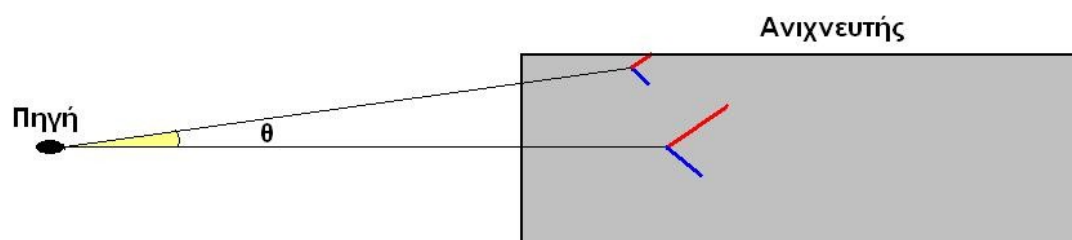
Αν τώρα λάβουμε υπόψη ότι το ενεργό μήκος και η ενεργός διάμετρος του ανιχνευτή μας είναι 15 cm και 5 cm αντίστοιχα, μπορούμε να συμπεράνουμε από το διάγραμμα ότι η μέγιστη ενέργεια στην οποία τα προϊόντα της αντίδρασης (1) αποθέτουν όλη τους την ενέργεια στον όγκο του ανιχνευτή δεν είναι μεγαλύτερη από 7 MeV (στην ιδανική περίπτωση που η αντίδραση (n,p) γίνεται αμέσως μετά την είσοδο του νετρονίου στον ανιχνευτή και τα προϊόντα αυτής κινηθούν παράλληλα με τον κεντρικό του άξονα).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα ιόντα που παράγονται από την αντίδραση (n,p) και χτυπάνε στα τοιχώματα του ανιχνευτή δεν συνεισφέρουν στην κορυφή full energy, πράγμα που μειώνει την απόδοση μιας μέτρησης. Στο σχήμα 3.11 βλέπουμε το ποσοστό επί τοις εκατό των προϊόντων της αντίδρασης (n,p) που έκαναν wall effect σύμφωνα με τα δεδομένα που πήραμε από την προσομοίωση με το Geant. Παρατηρούμε ότι πέραν των 7 MeV όλα τα προϊόντα της αντίδρασης (n,p) (100%) χτυπάνε στα τοιχώματα, κατά συνέπεια δεν θα έχουμε κορυφή full energy, πράγμα που συμφωνεί με την θεωρητική προσέγγιση που κάναμε με το SRIM. Τα στοιχεία αυτά είναι για γωνία εισόδου 0° για την δέσμη νετρονίων.



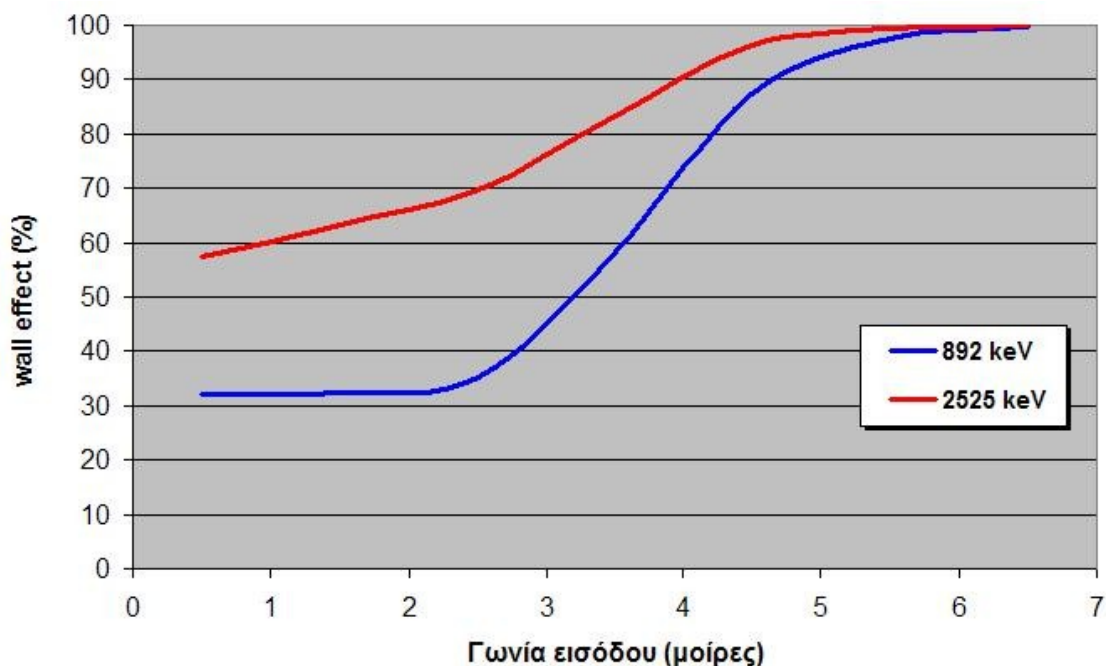
Σχήμα 3.11. Ποσοστό των προϊόντων της αντίδρασης που συμβάλει στο wall effect, συναρτήσει της ενέργειας (προστέθηκε σφάλμα της τάξεως του 5% επειδή μιλάμε για προσομοίωση Monte Carlo).

Βέβαια, το αν θα συμβεί ή όχι wall effect, δεν έχει να κάνει μόνο με την ενέργεια της εισερχόμενης δέσμης νετρονίων, αλλά και με την γωνία εισόδου αυτής στον ανιχνευτή. Αν παρατηρήσουμε το σχήμα 3.12, θα δούμε ότι λόγω γεωμετρίας, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία εισόδου της δέσμης στον ανιχνευτή, τόσο πιο κοντά στο τοίχωμα θα γίνει η αντίδραση (n,p), άρα τόσο πιθανότερο είναι να συμβεί wall effect.



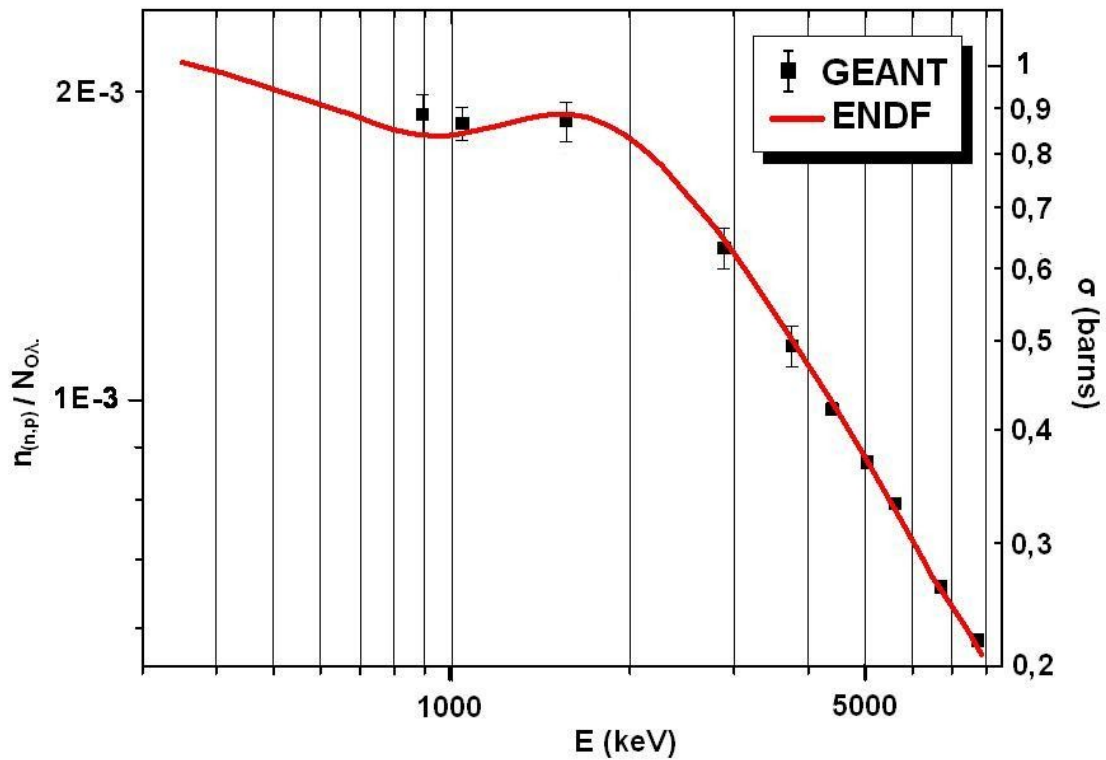
Σχήμα 3.12. Γεωμετρία της διάταξης ανίχνευσης για γωνία εισόδου της δέσμης νετρονίων 0° και θ° .

Χρησιμοποιώντας και πάλι τα στοιχεία που πήραμε από την προσομοίωση με το Geant, κατασκευάσαμε το διάγραμμα του σχήματος 3.13, το οποίο παρουσιάζει την ποσοστό των προϊόντων της αντίδρασης (n,p) που έκαναν wall effect συναρτήσει της γωνίας εισόδου, για δύο διαφορετικές ενέργειες νετρονίων. Παρατηρούμε ότι όπως αναμενόταν, το wall effect αυξάνεται όσο μεγαλώνει η γωνία εισόδου και πέραν των 4 - 5 μοιρών αγγίζει το 100%.



Σχήμα 3.13 Ποσοστό των προϊόντων της αντίδρασης (n,p) που κάνει wall effect, συναρτήσεως της γωνίας εισόδου της δέσμης των νετρονίων (η τιμή 0 συμβολίζει στερεά γωνία $0^\circ - 1^\circ$ κ.ο.κ.).

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε το κατά πόσο τα στοιχεία που πήραμε από την προσομοίωση, για την αντίδραση (n,p), συμφωνούν με την θεωρία, χρησιμοποιήσαμε και πάλι την τράπεζα δεδομένων ENDF. Έτσι πήραμε την θεωρητική ενεργό διατομή της αντίδρασης (n,p) σε barn, συναρτήσεως της ενέργειας. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τοποθετήσαμε στο ίδιο διάγραμμα τον αριθμό των νετρονίων που έκαναν αντίδραση (n,p) προς τον ολικό αριθμό των νετρονίων που «έπεσαν» στον ανιχνευτή, πάλι σαν συνάρτηση της ενέργειας, με την αντίστοιχη διακύμανση. Επειδή η ενεργός διατομή είναι μέτρο της πιθανότητας να συμβεί μια αντίδραση, οι δύο άξονες του διαγράμματος είναι συγκρίσιμοι αν θεωρηθεί ότι πρακτικά δεν υφίσταται μείωση η δέσμη κατά μήκος του ανιχνευτή [9]. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 3.14.

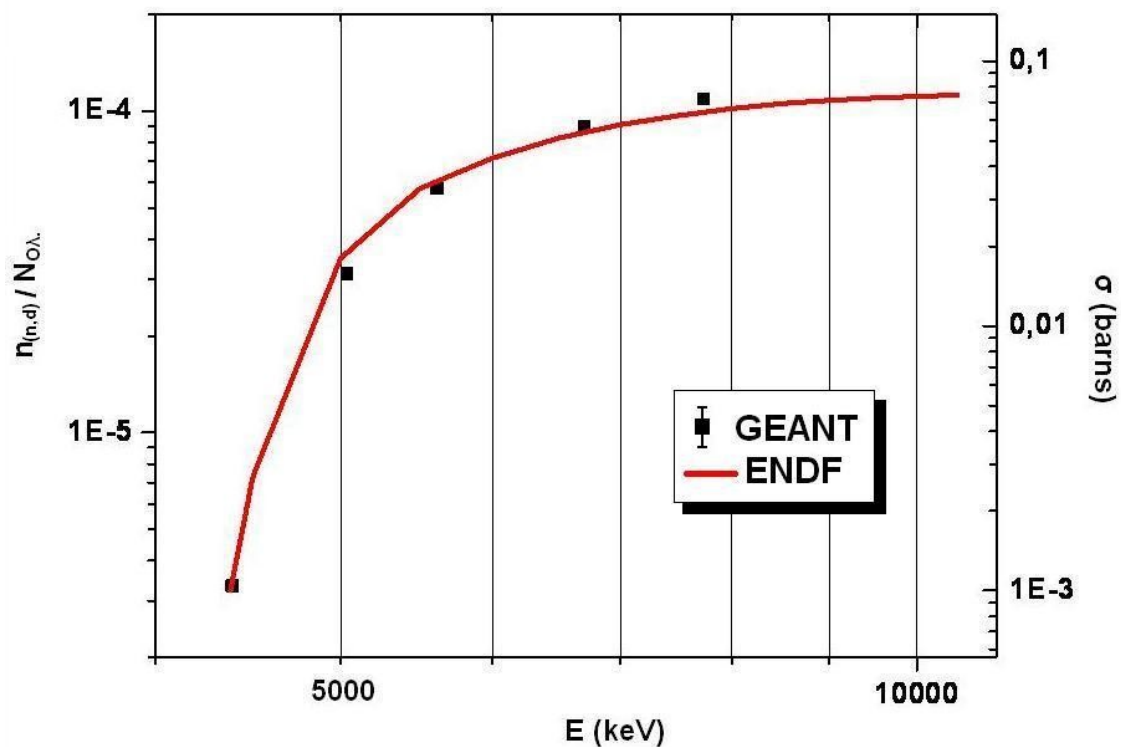


Σχήμα 3.14. Θεωρητική ενεργός διατομή συναρτήσει της ενέργειας, της αντίδρασης (n,p) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Geant.

Με βάση όλα όσα είδαμε στην ενότητα αυτή, βλέπουμε ότι όσον αφορά την αντίδραση (n,p) υπάρχει καλή σύγκλιση της θεωρίας και της προσομοίωσης με το Geant.

3.2.4. Η αντίδραση (n,d)

Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της παραγράφου 3.2.3, λαμβάνοντας δηλαδή τα δεδομένα της ENDF για την αντίδραση (n,d) (ενεργός διατομή σε barn σαν συνάρτηση της ενέργειας) και τοποθετώντας τα στο ίδιο διάγραμμα με τα δεδομένα που προέκυψαν από την προσομοίωση (αριθμός των νετρονίων που έκαναν αντίδραση (n,d) προς τον ολικό αριθμό των νετρονίων που «έπεσαν» στον ανιχνευτή, συναρτήσει της ενέργειας), δημιουργήσαμε το διάγραμμα του σχήματος 3.15.



Σχήμα 3.15. Θεωρητική ενεργός διατομή συναρτήσει της ενέργειας, της αντίδρασης (n,p) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του Geant.

Η συνθήκη που μας επιτρέπει την σύγκριση των δύο αξόνων είναι η θεώρηση ότι πρακτικά η δέσμη δεν υφίσταται μείωση κατά μήκος του ανιχνευτή.

Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει, η σύγκλιση θεωρίας - προσομοίωσης και στην περίπτωση της αντίδρασης (n,d) είναι αρκετά ικανοποιητική, πράγμα που μας δείχνει ότι η προσομοίωση είναι ρεαλιστική.

Κεφάλαιο 4

Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με το πείραμα

4.1. Τα πειραματικά αποτελέσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι στο πείραμα που διεξήχθη, η δέσμη νετρονίων με την οποία ακτινοβολήθηκε ο ανιχνευτής He-3 (σχήμα 4.1), παράχθηκε μέσω της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$.



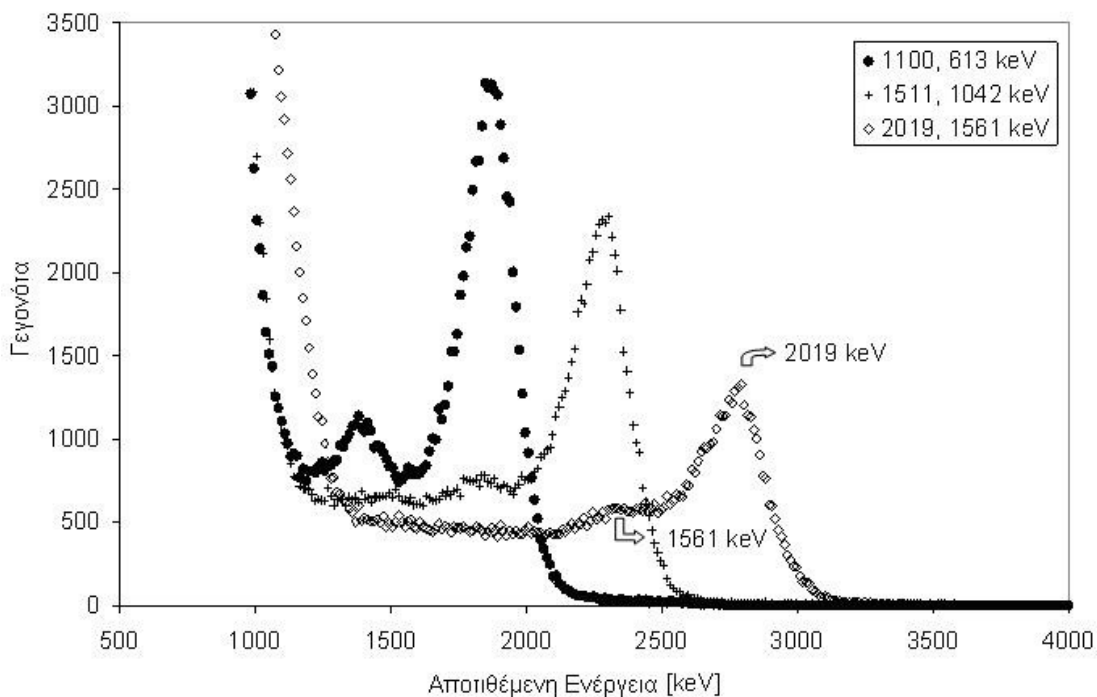
Σχήμα 4.1. Ο κυλινδρικός ανιχνευτής He-3 που ακτινοβολήθηκε (επάνω) μαζί με το περίβλημα Cd που χρησιμοποιήθηκε για την θωράκιση από τα θερμικά νετρόνια (κάτω).

Όταν η ενέργεια του πρωτονίου (βλ. § 1.2.3 (5)) είναι μεγαλύτερη από 2,2 MeV, τότε εκπέμπεται και μια δεύτερη ομάδα νετρονίων λόγω της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}^*$ ($Q = -2073$ keV). Στο σχήμα 4.2 βλέπουμε ένα τμήμα των κατανομών που λήφθηκε με τον ανιχνευτή He-3, στο οποίο η κορυφή της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}^*$

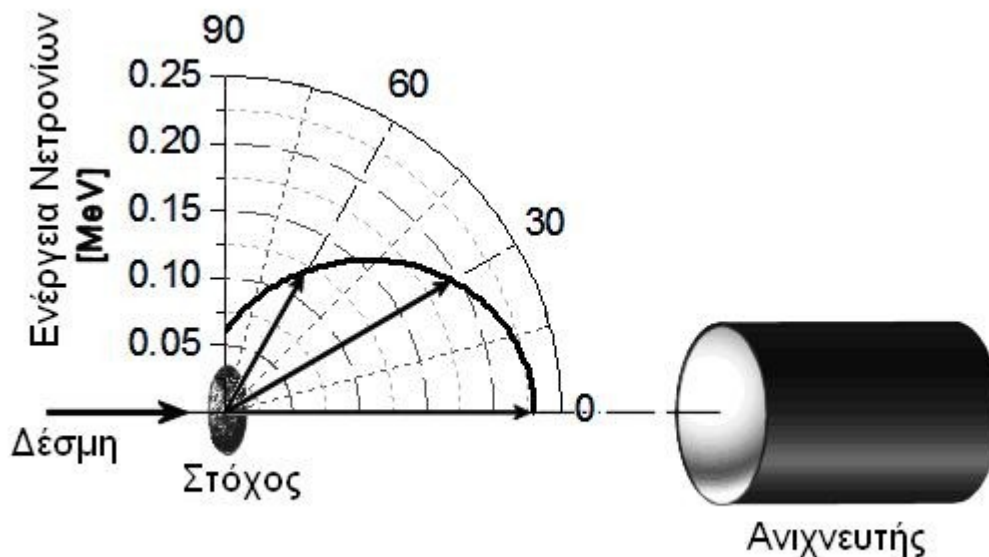
διακρίνεται καθαρά από εκείνη της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$. Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω της διαφοράς στην ενέργεια των δυο αυτών αντιδράσεων, αφετέρου λόγω της συγκριτικά μικρότερης ενεργού διατομής της πρώτης. Συνεπώς, η δεύτερη αυτή ομάδα γεγονότων δεν επηρεάζει τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών κορυφών της κυρίως ομάδας νετρονίων. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.2 οι δυο κορυφές που αντιστοιχούν στα 2019 keV (μέσω της ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$) και στα 1561 keV (μέσω της ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}^*$) έχουν σημειωθεί με βέλη. Νετρόνια ενεργειών 3.75 έως 7.74 MeV παράχθηκαν από την αντίδραση ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$.

Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε παράλληλα με την κατεύθυνση της δέσμης στις 0°. Λόγω της γεωμετρίας της διάταξης και του ανιχνευτή σε σχέση με την δέσμη, εισέρχονται στον ανιχνευτή και νετρόνια με ενέργειες διαφορετικές από αυτή των 0° (Σχήμα 4.3). Όπως παρατηρούμε, υπάρχει εξάρτηση της γωνίας των νετρονίων με την ενέργεια. Η εξάρτηση της ενέργειας από την γωνία έχει ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση.

Στα σχήματα 4.4 (α) και (β) φαίνονται οι κατανομές του ύψους παλμού που λήφθηκε με τον ανιχνευτή He-3, κατά τη διάρκεια ακτινοβόλησής του με νετρόνια από τις αντιδράσεις ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ και ${}^2\text{H}(d,n)$ αντίστοιχα [10]. Οι κατανομές αυτές αποτελούνται από:



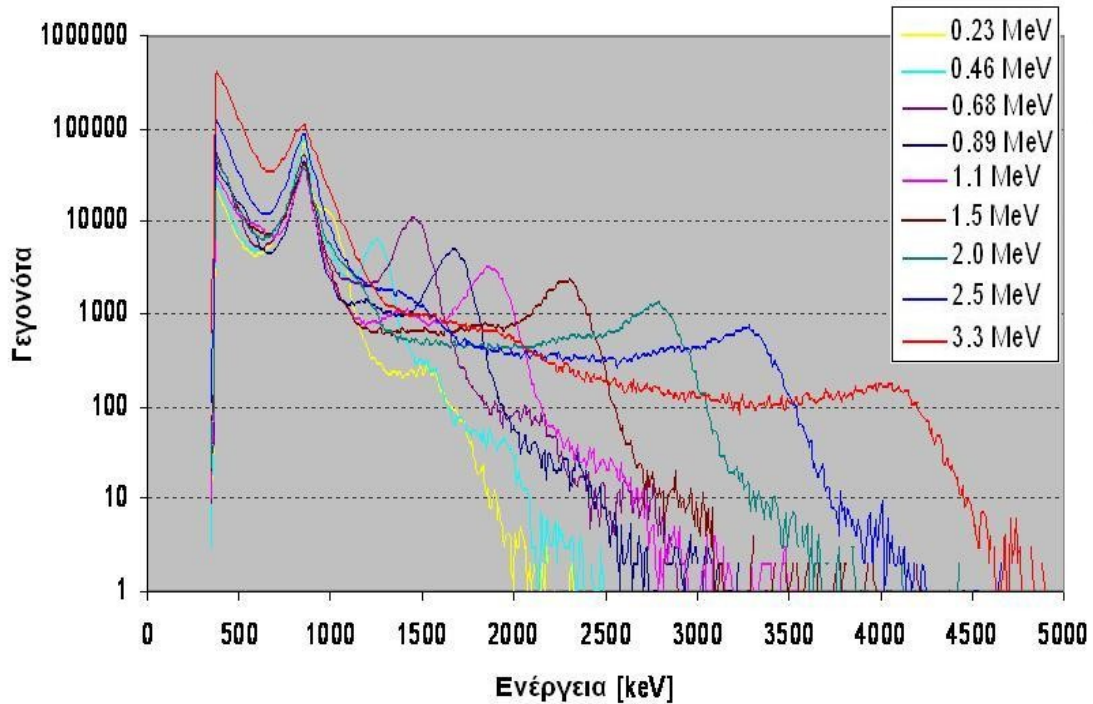
Σχήμα 4.2. Τμήμα των κατανομών παλμού που λήφθηκε με τον ανιχνευτή He-3. Οι δύο ομάδες νετρονίων που παράγονται από τις αντιδράσεις ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ και ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}^*$ διακρίνονται καθαρά σε κάθε κατανομή [10].



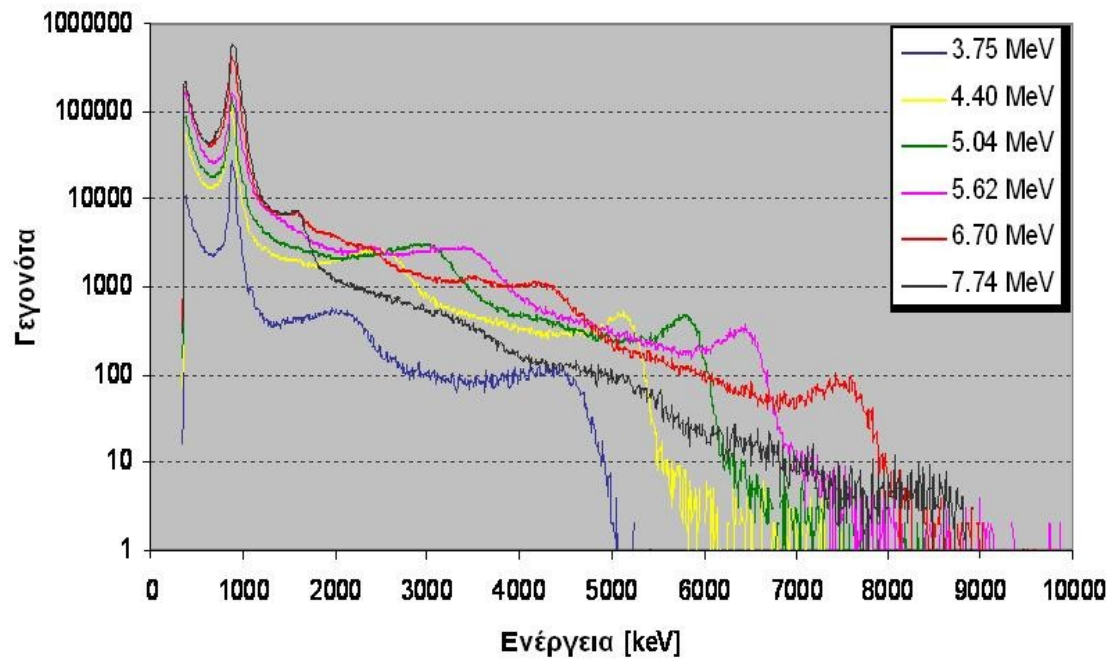
Σχήμα 4.3. Διάταξη του ανιχνευτή σε σχέση με την διεύθυνση της δέσμης. Παρουσιάζεται σαν παράδειγμα η ενέργεια νετρονίου συναρτήσει της γωνίας εκπομπής, στην περίπτωση της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, όπου η ενέργεια του πρωτονίου είναι 2 MeV [10].

- Μια κορυφή λόγω της αντίδρασης ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$, δηλαδή την κορυφή full energy που είδαμε και στην προσομοίωση. Η ολική κινητική ενέργεια των προϊόντων της θα είναι $E_n + 764 \text{ keV}$. Η κορυφή αυτή εμφανίζεται στο τέλος της κατανομής παλμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Επειδή η μέγιστη ενέργεια πρωτονίου που μπορεί να απορροφηθεί ολικά στον συγκεκριμένο ανιχνευτή είναι περίπου 7 MeV (βλ. και σχήμα 3.14), η πιθανότητα καταγραφής παλμών στην κορυφή full-energy μειώνεται ταχύτατα για νετρόνια μεγαλύτερης ενέργειας από αυτήν, λόγω της αυξημένης πιθανότητας που έχει το wall effect.
- Για ενέργειες νετρονίων πάνω από 4.4 MeV μια κορυφή λόγω της αντίδρασης ${}^3\text{He}(n,d){}^2\text{H}$. Επειδή η τιμή Q της αντίδρασης αυτής είναι -3.27 MeV, η ολική κινητική ενέργεια των προϊόντων της θα είναι $E_n - 3.27 \text{ MeV}$.
- Μια κορυφή λόγω των ανακρουόμενων πυρήνων ${}^3\text{He}$ με γωνία ανάκρουσης $\theta_{\text{lab}}=0^\circ$, όταν όλη η ενέργειά τους αποτίθεται εντός του όγκου του ανιχνευτή. Η μέγιστη ενέργεια, E_{max} είναι όπως είδαμε και στην § 3.2.2 το 75% της ενέργειας του νετρονίου
- Ένα συνεχές που παράγεται από τον ανακρουόμενο πυρήνα λόγω της αντίδρασης ${}^3\text{He}(n,\text{ελαστική})$.
- Ένα συνεχές λόγω ανάκρουσης των πυρήνων άλλων αερίων που βρίσκονται εντός του ανιχνευτή. Η μέγιστη ενέργεια αυτών των ανακρούσεων είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν της ανάκρουσης του πυρήνα ${}^3\text{He}$ E_{max} π.χ. $0.05 \cdot E_n$ για το Kr, $0.29 \cdot E_n$ για τον C και $0.22 \cdot E_n$ για το O.

- Μια κορυφή λόγω θερμικών-επιθερμικών νετρονίων (764 keV) τα οποία προέρχονται από τις σκεδάσεις στα υλικά του χώρου της ακτινοβολήσης.
- Ένα εκθετικά μειούμενο τμήμα στην αρχή του φάσματος λόγω αντιδράσεων ακτίνων-γ, κυρίως με τα τοιχώματα του ανιχνευτή.



(α)



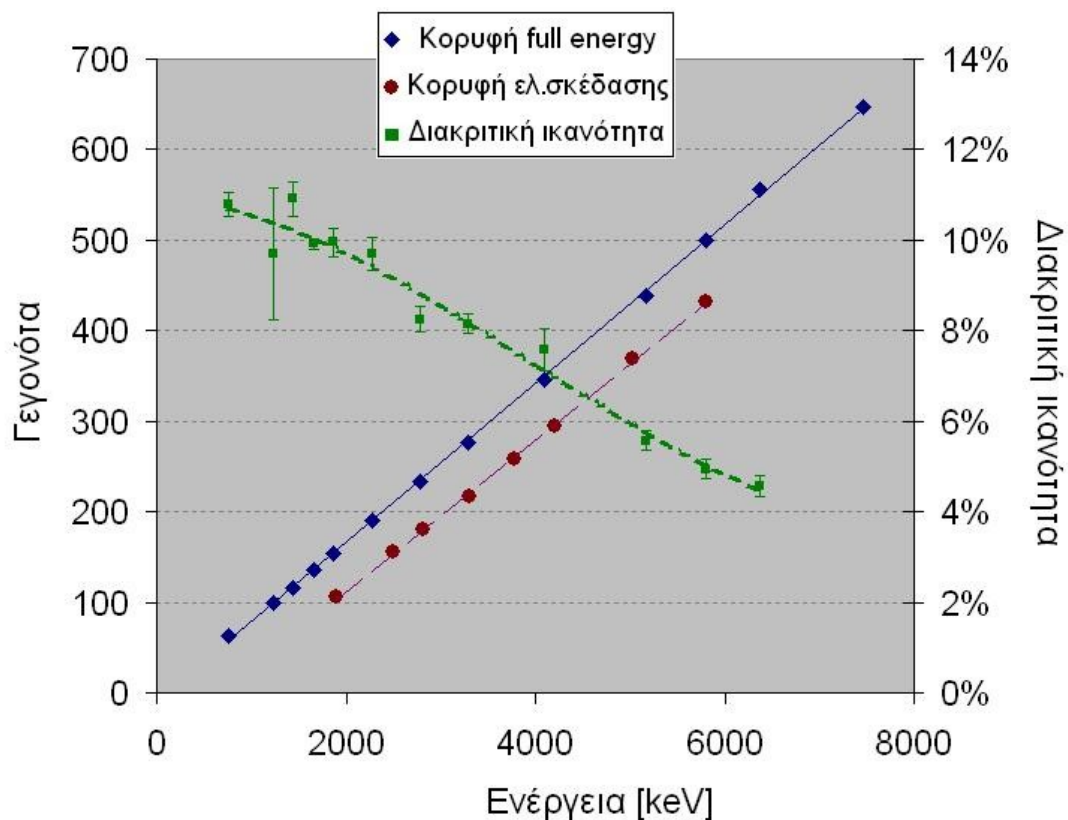
(β)

Σχήμα 4.4. Κατανομές ύψους παλμού που λήφθηκαν με τον ανιχνευτή He-3 κατά τη διάρκεια ακτινοβολήσής του με νετρόνια μέσω των αντιδράσεων ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ (α) και ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ (β) [10].

4.1.1. Η βαθμονόμηση της ενέργειας και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή He-3

Τα αποτελέσματα του πειράματος, τα δεδομένα δηλαδή που πήραμε από τον ανιχνευτή για κάθε ακτινοβολήση, ήταν στην μορφή γεγονότων ανά κανάλι. Προκειμένου να μετατραπούν στη μορφή που έχουν τα διαγράμματα του σχήματος 4.4 έπρεπε να γίνει κατάλληλη βαθμονόμηση της ενέργειας του ανιχνευτή. Αυτό έγινε με τον εξής τρόπο:

Στις κατανομές αυτές έγινε προσαρμογή (fitting) της κορυφής full energy και της κορυφής της ελαστικής σκέδασης με κατανομή Gauss. Το κεντροειδές της κατανομής αντιστοιχεί στην θεωρητικά αναμενόμενη ενέργεια της κορυφής (π.χ. $E_n + 764$ keV για την full energy) έγινε η αντιστοίχιση καναλιού-ενέργειας (βαθμονόμηση). Επίσης από το εύρος της κατανομής έγινε δυνατός ο υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή (μεγάλο εύρος στην κορυφή full energy σημαίνει μικρή διακριτική ικανότητα και αντίστροφα). Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 4.5.

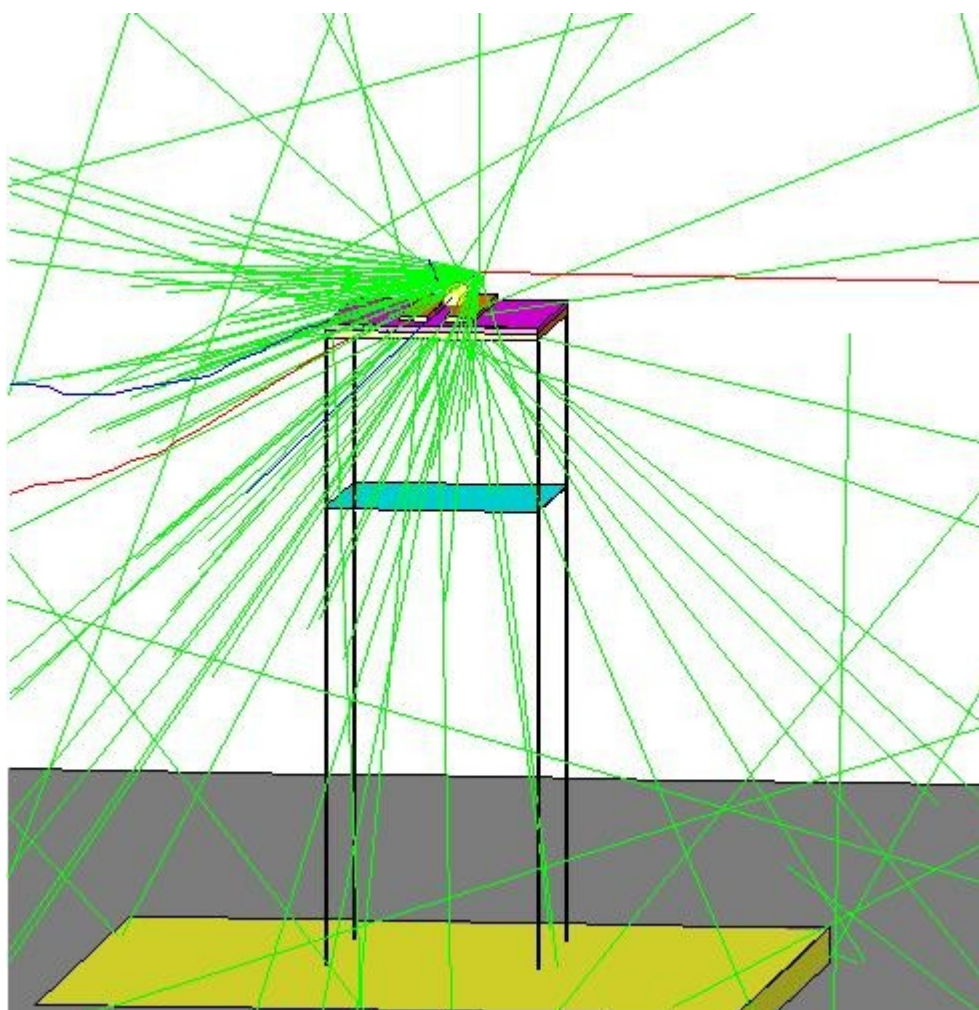


Σχήμα 4.5. Βαθμονόμηση της ενέργειας και της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή

Έτσι βλέπουμε ότι η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή είναι 4 - 11 % για τις ενέργειες που μελετάμε.

4.1.2. Η απόκριση και η απόδοση του ανιχνευτή He3

Η απόκριση του ανιχνευτή He-3 υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Geant4, χρησιμοποιώντας την λίστα φυσικής για ιατρικές και στρατιωτικές εφαρμογές που διαθέτει. Είχαμε στη διάθεσή μας μια ακριβή περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή καθώς και των υλικών κατασκευής του. Λήφθηκε υπ' όψη η εξάρτηση γωνίας-ενέργειας της δέσμης των νετρονίων (Σχ. 4.3). Στην προσομοίωση περιγράφηκαν επίσης η υποστήριξη του ανιχνευτή καθώς και οι κύριοι όγκοι που αποτελούσαν την διάταξη και τον κοντινό περιβάλλοντα χώρο του πειράματος (Σχήμα 4.6).

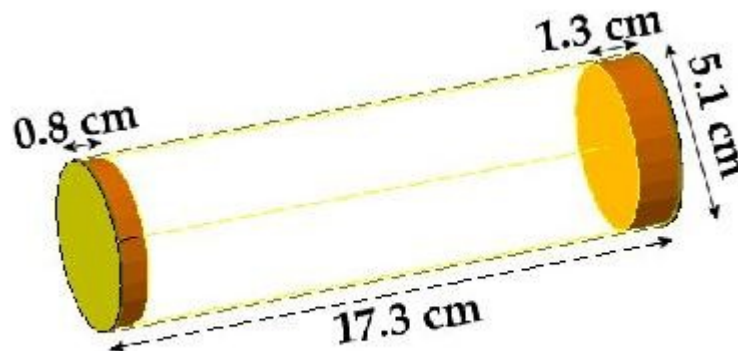


Σχήμα 4.6. Σχέδιο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του χώρου ακτινοβολήσης

Στο σχήμα 4.6 παρατηρούμε το τραπέζι - υποστήριξη του ανιχνευτή, το οποίο βρίσκεται πάνω σε υπόστρωμα παραφίνης (τετράγωνο κίτρινου χρώματος), το μεταλλικό υπόβαθρο (γκρι χρώμα), τις τροχιές των σκεδασμένων νετρονίων (πράσινο χρώμα), ενώ με

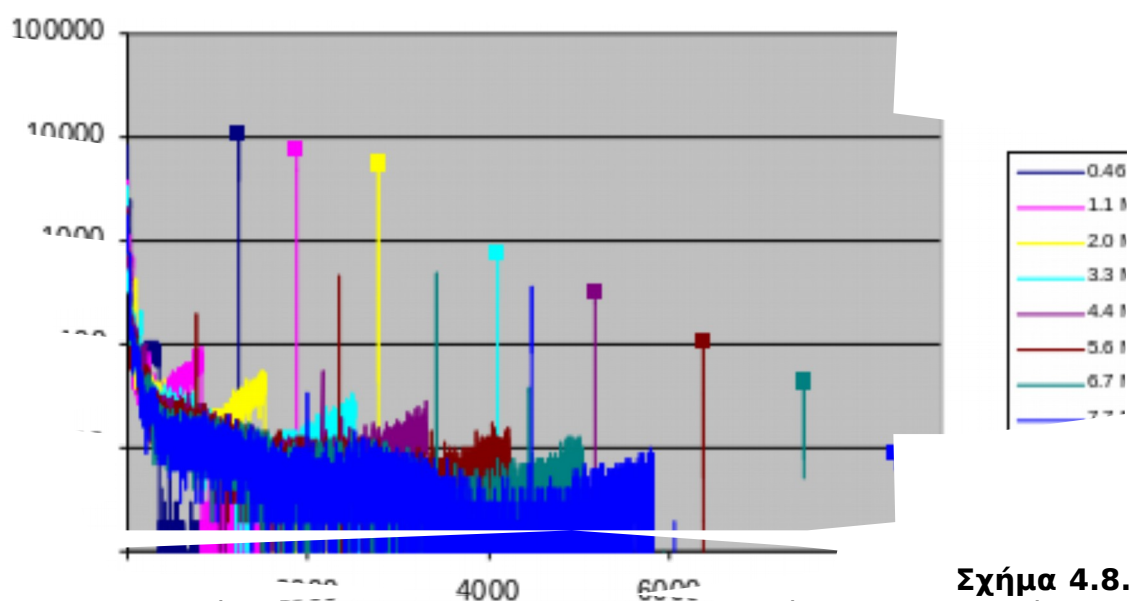
κόκκινο και μπλε χρώμα εμφανίζονται τα αρνητικά και θετικά φορτισμένα σωματίδια αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ο «νεκρός όγκος» του ανιχνευτή, ο οποίος βρίσκεται στα δυο του άκρα και αποτελείται από το αέριο μίγμα και οφείλεται στις συνδέσεις - κατασκευή της ανόδου. Ο όγκος αυτός απορροφά μέρος της δέσμης των νετρονίων.



Σχήμα 4.7. Οι διαστάσεις του ανιχνευτή He-3 (ενεργό μήκος και διάμετρος και ο «νεκρός όγκος»).

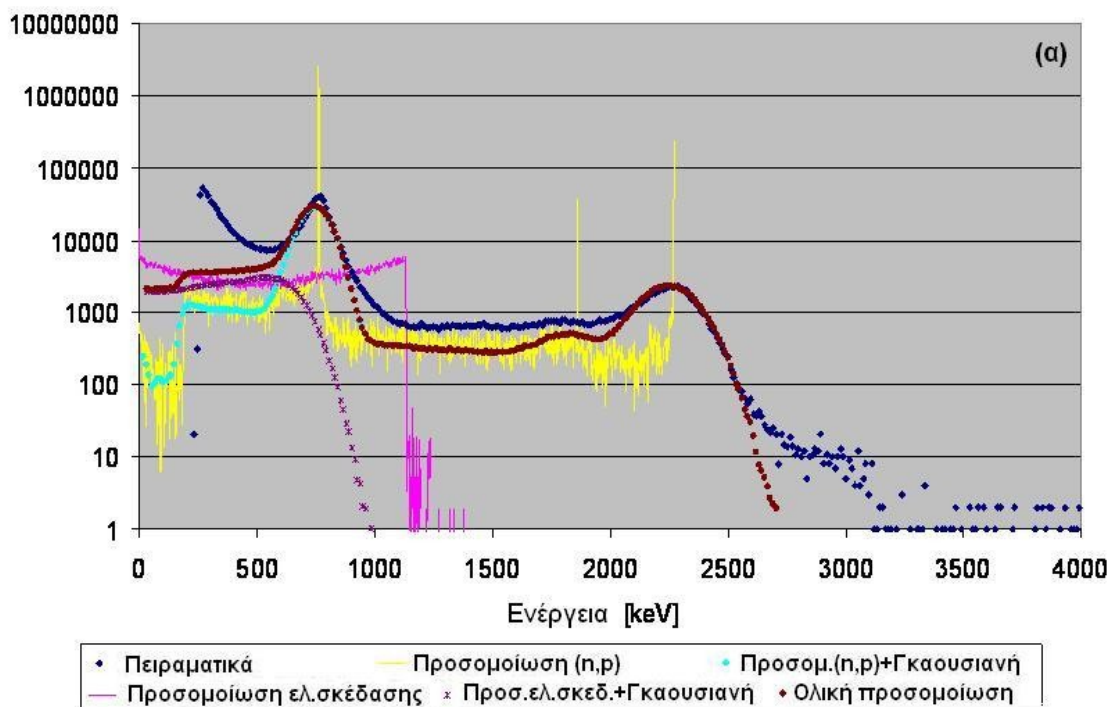
Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία ως δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα Geant, υπολογίστηκε η ολική αποτιθέμενη ενέργεια στο αέριο του ανιχνευτή (Σχήμα 4.8).



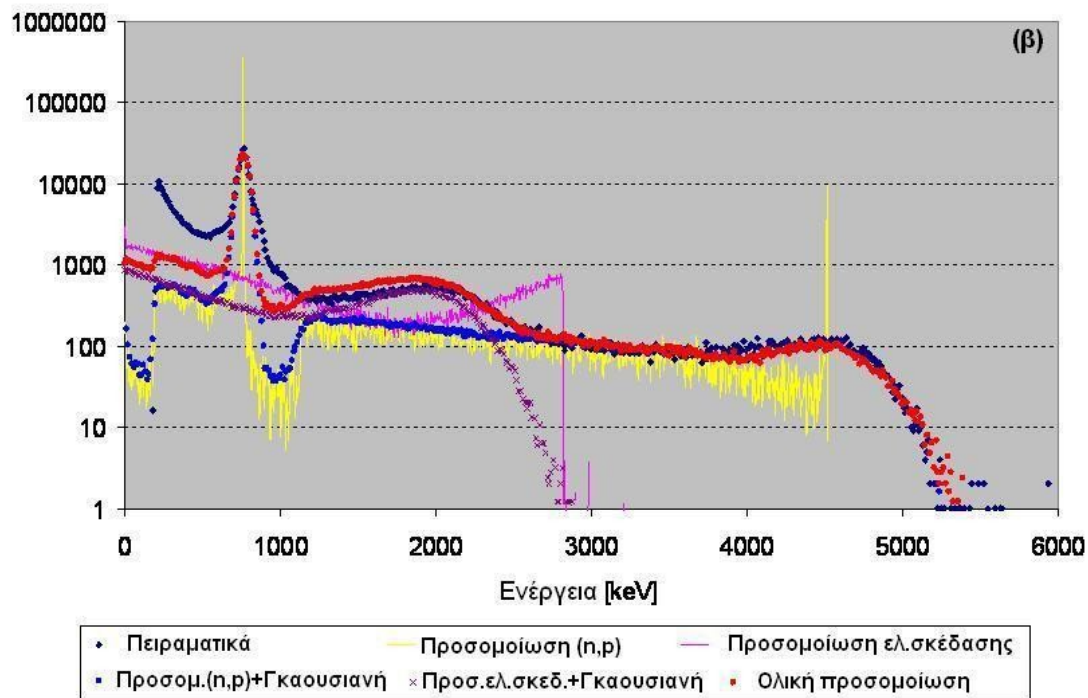
Σχήμα 4.8. Συνολικό φάσμα που λήφθηκε κατά την προσομοίωση διάφορων ενεργειών νετρονίων. Τα πλήρη τετράγωνα συμβολίζουν την κορυφή full energy για κάθε φάσμα.

Στους παραπάνω υπολογισμούς, δεν λήφθηκαν υπ'όψην τα υλικά που βρίσκονταν στον περιβάλλοντα χώρο του πειράματος.

Τα γεγονότα που προέκυψαν από διαφορετικές αντιδράσεις ($^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$, $^3\text{He}(n,\text{ελαστική})$ και $^3\text{He}(n,d)^2\text{H}$), διαχωρίστηκαν και υπέστησαν επεξεργασία μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση ως προς την ενέργεια (Σχήμα 4.5). Στα φάσματα που προέκυψαν με αυτόν τον τρόπο, εφαρμόστηκε η κατανομή Gauss (μια καμπύλη για κάθε σημείο του φάσματος), σύμφωνα με την πειραματικά καθορισμένη βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας.



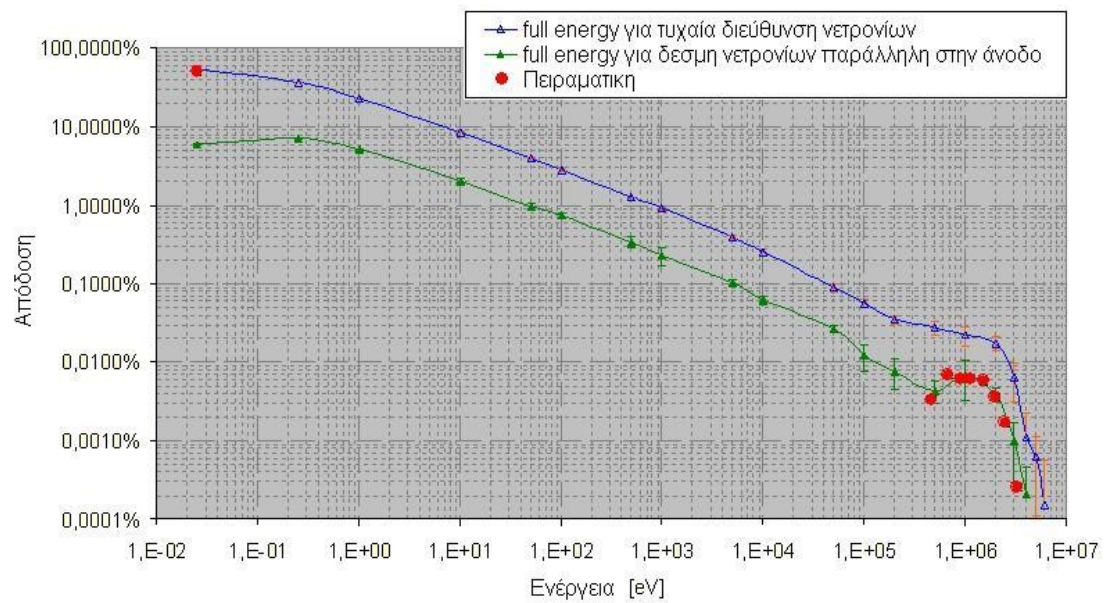
Σχήμα 4.9. Πειραματικές και προσομοιωμένες κατανομές ύψους παλμού για νετρόνια ενεργειών 1.51 MeV και 1.04 MeV. Παρουσιάζεται επίσης το προσομοιωμένο φάσμα (επεξεργασμένο και μη), που προέρχεται από διαφορετικές αντιδράσεις [10].



Σχήμα 4.10. Πειραματικές και προσομοιωμένες κατανομές ύψους παλμού για νετρόνια ενέργειας 3.75 MeV. Παρουσιάζεται επίσης το προσομοιωμένο φάσμα (επεξεργασμένο και μη), που προέρχεται από διαφορετικές αντιδράσεις [10].

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στα σχήματα 4.9 και 4.10, δείχνουν ότι υπάρχει σχετικά καλή αντιστοιχία πειραματικών και υπολογιζόμενων φασμάτων.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν μέσω της αντίδρασης ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ (ενέργειες νετρονίων από 230 keV έως 3.3 MeV), για να υπολογιστεί η σχετική απόδοση της κορυφής full energy. Μια διαδικασία ανάλογη με αυτή που ακολουθήσαμε με τα δεδομένα του Geant στην παράγραφο 3.2.3. Η απόλυτη απόδοση (αριθμός νετρονίων που καταγράφονται/αριθμό νετρονίων που προσπίπτουν) δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί καθώς ο αριθμός των νετρονίων της δέσμης δεν ήταν γνωστός. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η ένταση της δέσμης των πρωτονίων στην αντίδραση ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης. Προκειμένου να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση που έχουν κάποιοι παράγοντες, όπως η γεωμετρία του χώρου, ανακρίβειες της μάζας του στόχου κ.λ.π., τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν σε ως προς τα αποτελέσματα του Geant4 στην ενέργεια 1 MeV. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11 και δείχνουν καλή αντιστοιχία με την προσομοίωση.



Σχήμα 4.11. Η απόδοση του ανιχνευτή He-3 για ταχεία νετρόνια, όπως προκύπτει από το πείραμα και την προσομοίωση. Το σημείο που αντιστοιχεί σε θερμικά νετρόνια δίνεται από τον κατασκευαστή του ανιχνευτή.

4.2. Συμπεράσματα

Από την μελέτη που έγινε στα κεφάλαια 3 και 4, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής He-3 που μελετήθηκε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην φασματοσκοπία ταχέων νετρονίων, ενέργειας μέχρι 7 MeV. Μόνος τρόπος να αυξηθεί αυτή η μέγιστη ενέργεια είναι είτε να αυξηθεί το μέγεθος του ανιχνευτή, είτε να αυξηθεί η εσωτερική του πίεση.
- Παρατηρήθηκε γραμμική απόκριση του ανιχνευτή σε σχέση με την ενέργεια των νετρονίων, στην περίπτωση που η δέσμη είναι παράλληλη με τον άξονά του.
- Η σχετική απόδοση για την κορυφή full energy κυμαίνεται, για δέσμη νετρονίων παράλληλη με τον άξονά του, μεταξύ 0,0003% και 0,0080%, και μεταξύ 0,0002 και 0,035%, για τυχαία διεύθυνση νετρονίων, για τις ενέργειες που μελετήσαμε, ενώ η αντίστοιχη απόδοση για θερμικά νετρόνια είναι της τάξεως του 50%.
- Η διακριτική του ικανότητα για ενέργειες νετρονίων από 1 έως 7 MeV, είναι 4 - 11 % για την κορυφή full energy.
- Οι υπολογισμοί που έγιναν μέσω του Geant προκειμένου να προσομοιωθεί η απόκριση του He-3 στα ταχεία νετρόνια είναι σε αποδεκτή αντιστοιχία με το πείραμα.
- Η προσομοίωση του συγκεκριμένου πειράματος με το Geant έχει ικανοποιητική σύγκλιση με τα θεωρητικώς αναμενόμενα.
- Υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης τόσο του ίδιου του προγράμματος (πιο λεπτομερής ανάλυση θα αναδείκνυε απόκλιση από την θεωρία), όσο και της ίδιας της προσομοίωσης (η γεωμετρία του χώρου του πειράματος και τα αντικείμενα που υπήρχαν εντός του θα μπορούσαν να περιγραφούν με μεγαλύτερη ακρίβεια).

Βιβλιογραφία

- [1] Σ. Χαραλάμπους, Φυσική Νετρονίων, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1981.
- [2] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York 1999.
- [3] Σ. Χαραλάμπους, Ανιχνευτές Πυρηνικών Ακτινοβολιών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1984.
- [4] Λ. Σ. Σκλαβενίτης, Ανίχνευσις Πυρηνικών Ακτινοβολιών – Τεχνική Ραδιοϊσοτόπων, Εκδόσεις Πέργαμος.
- [5] A. R. Sayres, K. W. Jones and C. S. Wu, Interaction of Neutrons with ^3He , Physical Review, Volume 122, Number 6, Columbia University, New York 1961.
- [6] S. Agostinelli et al., A Simulation Toolkit, 2003, J. Allison et al., GEANT Developments And Applications, Nuclear Science, IEEE Transactions on, Volume 53, Issue 1, Part 2, 2006 - GEANT4, έκδοση 6.2, p.02, <http://geant4.web.cern.ch>
- [7] Evaluated Nuclear Data File (ENDF), <http://www.nndc.bnl.gov>
- [8] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, Stopping and Ranges of Ions in Matter (SRIM), Pergamon Press, New York 1985, <http://www.srim.org>
- [9] Σ. Δεδούσης, Χ. Ελευθεριάδης, Μ. Ζαμάνη, Κ. Ζιούτας, Α. Λιόλιος, Μ. Μανωλοπούλου, Κ. Παπαστεφάνου, Η. Σαββίδης, Εργαστηριακές Ασκήσεις Πυρηνικής Φυσικής, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2001.
- [10] Μ. Manolopoulou, Μ. Fragopoulou, S. Stoulos, S. Petalas and M. Zamani, Monte Carlo calculation of the response of He-3 counter with Geant4, 15th Panhellenic Symposium in Nuclear Physics, Aristotle University of Thessaloniki, Physics Dept. 2005.