



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ
ΦΥΣΙΚΗΣ



Αντιδράσεις Νετρονίων στο Ισότοπο ^{203}Tl

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καγιόγλου Μαρία

Επιβλέπουσα: Ρόζα Βλαστού - Ζάννη

Αθήνα, Ιούλιος, 2023

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου, την Καθηγήτρια Δρ. Ρόζα Βλαστού-Ζάννη, για την καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε σε όλη την πορεία της εργασίας, πάντα πρόθυμη να βοηθήσει λύνοντάς μου όλες τις απορίες. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή Δρ. Μιχάλη Κόκκορη, για τις χρήσιμες συμβουλές του και την πολύτιμη βοήθειά του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π. για την βοήθεια, την στήριξη και την συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Περίληψη

Στη παρούσα εργασία μελετάται η ενεργός διατομή των καναλιών εξόδου που προκύπτουν από αντίδραση $^{203}\text{Tl}+n$ για ενέργειες ακτινοβολήσης 15.7MeV, 16MeV και 18MeV. Ως στόχος χρησιμοποιήθηκε παστίλια (pellet) TlCl , όπου για την μετατροπή της από σκόνη σε παστίλια χρησιμοποιήθηκε σελουλόζη ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) συγκεκριμένης μάζας. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης, χρησιμοποιώντας ως στόχους αναφοράς τις αντιδράσεις $^{27}_{13}\text{Al}(n, \alpha)^{24}_{11}\text{Na}$ και $^{197}_{79}\text{Au}(n, 2n)^{196}_{79}\text{Au}$. Η παραγωγή της δέσμης των νετρονίων πραγματοποιήθηκε στον επιταχυντή Tandem Van der Graaf 5.5 MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» μέσω της αντίδρασης $^2_1\text{H}(t, n)^4_2\text{He}$, χρησιμοποιώντας ως στόχο ένα λεπτό φύλλο χαλκού (Cu) πάνω στο οποίο βρισκόταν τιτάνιο (Ti), μέσα στο οποίο ήταν ενσωματωμένο το τρίτιο (T) . Για την μέτρηση της ενεργότητας των δειγμάτων μετά την ακτινοβολήση χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές HPGe σχετικών αποδόσεων 80%.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Ευχαριστίες | 2 |
| Περίληψη..... | 4 |
| Κεφάλαιο 1 | 8 |
| Εισαγωγή | 8 |
| Κεφάλαιο 2 ^ο | 10 |
| Θεωρητικό Μέρος..... | 10 |
| 2.1 Πυρηνικές Αντιδράσεις..... | 10 |
| 2.1.1 Άμεσες Αντιδράσεις (Direct Reactions) | 10 |
| 2.1.2 Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα (Compound Nucleus Reactions)..... | 11 |
| 2.1.3 Πολύπλοκοι Μηχανισμοί Αντιδράσεων | 12 |
| 2.1.4 Ενδόθερμες και Εξώθερμες Αντιδράσεις | 14 |
| 2.2 Αντίδραση $^{203}\text{Tl} + n$ | 16 |
| 2.2.2 Αντίδραση $^{205}\text{Tl} + n$ | 22 |
| 2.3 Ενεργός Διατομή | 26 |
| 2.4 Μέθοδος Ενεργοποίησης..... | 27 |
| Κεφάλαιο 3 ^ο | 31 |
| Πειραματικό Μέρος | 31 |
| 3.1 Επιταχυντής..... | 31 |
| 3.2 Παραγωγή δέσμης νετρονίων | 35 |
| 3.3 Ανίχνευση Νετρονίων | 37 |
| 3.4 Τοποθέτηση των στόχων προς ακτινοβολήση..... | 39 |
| 3.4.1 Ενέργεια ακτινοβολήσης 15.7MeV..... | 39 |
| 3.4.2 Ενέργεια ακτινοβολήσης 16MeV | 40 |
| 3.4.3 Ενέργεια ακτινοβολήσης 18MeV | 42 |
| 3.5 Ανιχνευτής Υπερκαθαρού Γερμανίου (HpGe) | 44 |
| 3.6 Ηλεκτρονικά..... | 45 |
| 3.7 Απόδοση Ανιχνευτή | 45 |
| Κεφάλαιο 4 | 48 |
| Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων | 48 |
| 4.1 Τρόπος Υπολογισμού Διορθωτικών Παραγόντων | 48 |
| 4.2 Υπολογισμός Ενεργού Διατομής για ενέργεια $E=18\text{MeV}$ και $E=16\text{MeV}$ | 53 |
| 4.2.1 Υπολογισμός ενεργού διατομής για ενέργεια $E=18\text{MeV}$ | 58 |
| 4.2.2 Υπολογισμός ενεργού διατομής για ενέργεια $E=16\text{MeV}$ | 65 |
| 4.3 Υπολογισμός Ενεργού Διατομής για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$ | 72 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| Κεφάλαιο 5 | 88 |
| Συμπεράσματα | 88 |
| Βιβλιογραφία | 91 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Κίνητρο

Κίνητρο της παρούσας εργασίας είναι η επιθυμία μελέτης των ισοτόπων στοιχείων με ατομικό αριθμό $Z=77-81$. Εν προκειμένω, μελετάμε το Θάλλιο με ατομικό αριθμό $Z=81$ και συγκεκριμένα τις νετρονικές αντιδράσεις των ισοτόπων του Θαλλίου που στοχεύουν στην παραγωγή άλλων ισοτόπων, ασταθών ή μη, με απώτερο στόχο τη μελέτη των πυρηνικών αντιδράσεων και της αποδιέγερσης του πυρηνικού συστήματος καθώς και τον εμπλουτισμό των βιβλιογραφικών δεδομένων. Παράλληλα, η ομάδα Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ, έχει ασχοληθεί τα τελευταία χρόνια με τη μελέτη ενεργών διατομών νετρονικών αντιδράσεων σε στοιχεία γειτονικά του Θαλλίου (^{191}Ir , ^{193}Ir , ^{197}Au), και η παρούσα εργασία θα βοηθήσει στην περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς των πυρήνων σ' αυτή την περιοχή του περιοδικού πίνακα.

Θάλλιο

Το χημικό στοιχείο Θάλλιο συμβολίζεται με «ΤΙ», έχει ατομικό αριθμό 81 και ανήκει στην 13^η ομάδα του περιοδικού πίνακα στην 6^η περίοδο. Πρόκειται για ένα πολύ μαλακό, εύπλαστο και τοξικό μέταλλο. Έχει 41 ισότοπα με μαζικούς αριθμούς που κυμαίνονται από 176 με 216 και από τα οποία το ^{203}Tl και το ^{205}Tl είναι σταθερά ισότοπα, ενώ το ισότοπο ^{204}Tl είναι το σταθερότερο ραδιοϊσότοπο με χρόνο ημιζωής 3.78y. Το φυσικό ΤΙ αποτελείται από τα σταθερά ισότοπα ^{203}Tl και ^{205}Tl σε ποσοστό 29,5% και 70,5% αντίστοιχα. Η μέση περιεκτικότητα του στερεού φλοιού της γης σε ΤΙ είναι περίπου 0.7ppm και στη φύση συναντάται σε σπάνια ορυκτά τα οποία όμως δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα (, ουρμπαϊτης, χατσινσονίτης), αλλά και μεγάλες ποσότητες αυτού βρίσκονται σε θειούχα μεταλλεύματα βαρέων μετάλλων (σφαλερίτης, σιδηροπυρίτης, γαληνίτης). Η ανακάλυψη του έγινε από τον William Crookes το 1861 αναλύοντας το φάσμα κάποιου ακάθαρτου θειικού οξέος [1].

Χρήσεις Θαλλίου

Το Θάλλιο χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας, από την ηλεκτρονική έως και την φαρμακευτική [1]:

- Στο παρελθόν και με αφορμή την τοξικότητά του χρησιμοποιούσαν σε εντομοκτόνα και ποντικοφάρμακα, με τη χρήση του να απαγορεύεται λόγω παρενεργειών στους ανθρώπους.
- Άλλη χρήση του αφορά στους κρυστάλλους βρωμιούχου και ιωδιούχου Θαλλίου οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί ως υπέρυθρα οπτικά υλικά εξαιτίας της σκληρότητάς τους και της μετάδοσής τους σε μεγαλύτερα μήκη κύματος σε σύγκριση με άλλα υπέρυθρα υλικά. Τέτοιου είδους υλικά συναντώνται με το όνομα KRS-5.
- Σημαντική είναι η συμβολή του και στους ανιχνευτές, όπου το σεληνιούχο θάλλιο (Tl_2Se) έχει χρησιμοποιηθεί σε βολόμετρα, αλλά και το θειούχο θάλλιο (Tl_2S) σε φωτοαγωγούς, ενώ σημαντική είναι και η ενίσχυση κρυστάλλων με θάλλιο, όπως στην περίπτωση των

ημιαγωγών σεληνίου όπου βελτιώνεται η απόδοσή τους, αλλά και σε κρυστάλλους ιωδιούχου νατρίου (NaI) που βρίσκονται σε ανιχνευτές ακτινοβολίας γ, όπου η ενίσχυσής τους με θάλλιο ενεργοποιεί τους κρυστάλλους και αυξάνει την αποτελεσματικότητά τους ως γεννήτριες σπινθηρισμών.

- Στην πυρηνική Ιατρική, έως και σήμερα, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται το ^{201}Tl σε τεστ κοπώσεως.

Κεφάλαιο 2^ο

Θεωρητικό Μέρος

2.1 Πυρηνικές Αντιδράσεις

Με τον όρο πυρηνική αντίδραση χαρακτηρίζεται η μετατροπή ενός πυρήνα σε έναν άλλον μετά την επίδραση σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η γενική μορφή μιας πυρηνικής αντίδρασης είναι:



Μέσα στις δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί ποικίλα μοντέλα που μπορούν να περιγράψουν αποτελεσματικά ορισμένες κατηγορίες διεργασιών μιας πυρηνικής αντίδρασης. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, όλες οι αντιδράσεις μπορούν να ταξινομηθούν:

- **Ανάλογα με τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διεργασίας [2]:**
 1. Άμεσες Αντιδράσεις (Direct Reactions)
 2. Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα (Compound Nucleus Reactions)
 3. Πολύπλοκοι Μηχανισμοί Αντιδράσεων (Μηχανισμοί εκπομπής προισορροπίας- Pre-equilibrium emission)
- **Ανάλογα με την ενέργεια που εκλύεται:**
 1. Ενδόθερμες Αντιδράσεις
 2. Εξώθερμες Αντιδράσεις

2.1.1 Άμεσες Αντιδράσεις (Direct Reactions)

Οι άμεσες αντιδράσεις χαρακτηρίζονται ως αντιδράσεις “ενός βήματος”, καθώς διεξάγονται απευθείας από την αρχική στην τελική κατάσταση χωρίς τον σχηματισμό ενός ενδιάμεσου σύνθετου πυρήνα. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης είναι συγκρίσιμος με τον χρόνο διέλευσης του προσπίπτοντος σωματιδίου εντός του πεδίου του πυρήνα-στόχου ($\sim 10^{-22}$), ενώ το σωματίδιο αλληλεπιδρά μόνο με ένα ή ελάχιστα νουκλεόνια που βρίσκονται στην επιφάνεια του στόχου. [3] Για τον λόγο αυτό, σύμφωνα με το μήκος κύματος de Broglie ($\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$, E:ενέργεια) οι άμεσες αντιδράσεις κυριαρχούν στις υψηλές ενέργειες, όπου το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό προσεγγίζοντας το μέγεθος του νουκλεονίου. [4]

Στην κατηγορία των άμεσων αντιδράσεων ανήκουν οι ακόλουθες αλληλεπιδράσεις [3] [5] :

1. **Ελαστική Σκέδαση (Elastic Scattering):** Τα προϊόντα της αντίδρασης είναι ίδια με τα αντιδρώντα. Στην σκέδαση αυτή δεν υπάρχει μεταβίβαση ενέργειας διεγέρσεως, παρά μόνο κινητική ενέργεια από το βλήμα στον στόχο-πυρήνα.

Γενική μορφή: $A(x,x)A$.

2. **Ανελαστική Σκέδαση (Inelastic Scattering):** Στην περίπτωση αυτή, ο σταθερός πυρήνας-στόχος A, λαμβάνει ένα ποσό ΔΕ της ενέργειας του βλήματος x, καταλήγοντας σε διεγερμένη κατάσταση.

Γενική μορφή: $A(x,x')A'$.

3. **Αντιδράσεις Μεταφοράς (Transfer Reaction):** Στη περίπτωση αυτή το κανάλι εισόδου και εξόδου διαφέρουν.

Γενική μορφή: $A(x,y)B$.

Οι αντιδράσεις μεταφοράς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω στις ακόλουθες δύο κατηγορίες:

- **Αντιδράσεις Απογύμνωσης (Stripping Reactions):**

Κατά την συγκεκριμένη διεργασία ένα ή περισσότερα νουκλεόνια(x) μεταφέρονται από το προσπίπτον σωματίδιο στον πυρήνα-στόχο.

Γενική μορφή: $A(a+x,a)A+x$.

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται αλληλεπιδράσεις όπως οι: **(d,p), (d,n)**.

- **Αντιδράσεις υφαρπαγής (Pickup Reactions):**

Σε αυτήν την περίπτωση ένα ή περισσότερα νουκλεόνια(x) μεταφέρονται από τον πυρήνα-στόχο στο εκπεμπόμενο σωματίδιο.

Γενική μορφή: $A+x(a,a+x)A$.

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται αλληλεπιδράσεις όπως: **(p,d)**.

4. **Αντιδράσεις Χωρισμού (Breakup Reaction):** Κατά την συγκεκριμένη διεργασία, το προσπίπτον σωματίδιο χωρίζεται σε δύο ή περισσότερα θραύσματα-υποσωματίδια. Στο τελικό στάδιο υπάρχουν τρεις ή περισσότεροι πυρήνες/νουκλεόνια. [6]

Γενική μορφή: $A(a,b+c)B$.

Όπου b και c αποτελούν υποσωματίδια του σωματιδίου a.

5. **Knock-out Reactions:** Σε αυτήν την περίπτωση, το βλήμα αλληλεπιδρά με ένα ή περισσότερα νουκλεόνια του πυρήνα-στόχου συντελώντας στην απομάκρυνσή του/τους από τον πυρήνα. Τη θέση του νουκλεονίου/νουκλεονίων του πυρήνα καταλαμβάνουν τα νουκλεόνια του βλήματος. [7]

Γενική μορφή: $A+B(a,B)a+A$.

Ένα παράδειγμα knock-out αντίδρασης είναι: $^{13}\text{C}(a,n)^{16}\text{O}$.

6. **Αντιδράσεις Ανταλλαγής Φορτίου (Charge-exchange Reactions):** Σε αυτήν την κατηγορία, παρατηρείται ανταλλαγή φορτίου και ενέργειας μεταξύ βλήματος και πυρήνα-στόχου, ενώ η μάζα του εκπεμπόμενου σωματιδίου είναι ίδια με αυτήν του βλήματος. Σε αυτήν την αλληλεπίδραση ανήκουν αλληλεπιδράσεις όπως: **(p,n)**.

2.1.2 Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα (Compound Nucleus Reactions)

Σε αντίθεση με τις άμεσες αντιδράσεις, οι αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα κυριαρχούν στις χαμηλές ενέργειες και πραγματοποιούνται σε δύο διακριτά βήματα όπως προέβλεψε ο Bohr [4] [8]:

1^ο βήμα: Στο πρώτο στάδιο εντάσσεται ο σχηματισμός του σύνθετου πυρήνα, καθώς το προσπίπτον σωματίδιο "αιχμαλωτίζεται" από τον πυρήνα στόχο, μεταφέροντας στον πυρήνα-στόχο όλη την ενέργειά του, E, και ο σύνθετος πυρήνας βρίσκεται πλέον σε υψηλότερη ασταθή διεγερμένη κατάσταση, με ενέργεια $E^*=E_{CM} + Q$. Η διάρκεια ζωής του είναι πολύ μεγάλη ($\sim 10^{-16}$ s) συγκριτικά

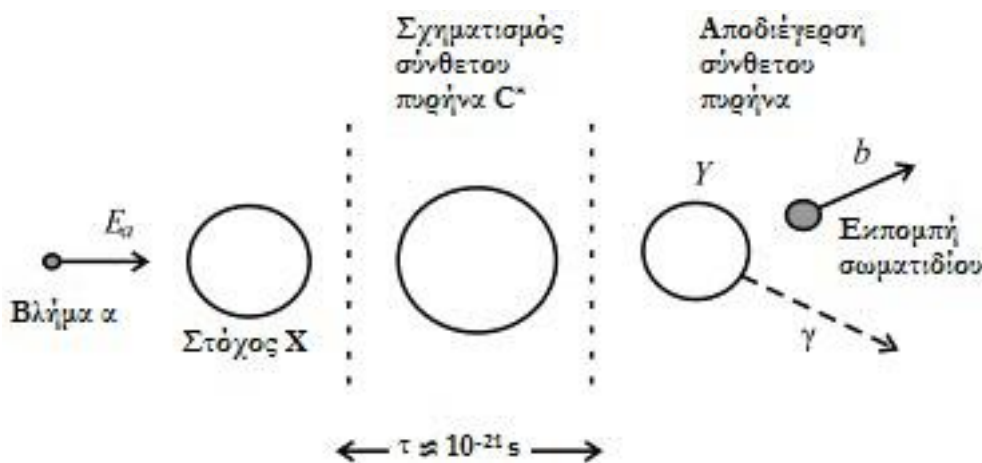
με τον χρόνο που απαιτείται ώστε το σωματίδιο να περάσει το πεδίο του πυρήνα ($\sim 10^{-22}$), έτσι ώστε η ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου να κατανεμηθεί σε πολλά νουκλεόνια του συστήματος στόχου-βλήματος μέχρι το στάδιο της ισορροπίας, χάνοντας οποιαδήποτε πληροφορία του αρχικού συστήματος.

2^ο βήμα: Σε δεύτερο στάδιο ο σύνθετος πυρήνας που σχηματίστηκε φτάνει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ακολουθώντας ένα συγκεκριμένο θερμοδυναμικό μοντέλο σε ισορροπία. Σύμφωνα με αυτό, ο σύνθετος πυρήνας διασπάται εκπέμποντας σωματίδια ή/και ακτίνες γ , ανεξάρτητα του τρόπου με τον οποίο διεγέρθηκε ο σύνθετος πυρήνας, δηλαδή του αρχικού συστήματος. Οι αντιδράσεις που προκύπτουν χαρακτηρίζονται και ως κανάλια εξόδου (exit channels) και εξαρτώνται από την ενέργεια διέγερσης του σύνθετου πυρήνα.

Ο γενικός συμβολισμός της διαδικασίας της πυρηνικής αντίδρασης μέσω σχηματισμού σύνθετου πυρήνα αναγράφεται παρακάτω



Ενώ σχηματικά, η πυρηνική αντίδραση σύνθετου πυρήνα απεικονίζεται στο σχήμα 2.1, όπου παρατηρούνται και οι διάφοροι τρόποι αποδιέγερσης του σύνθετου πυρήνα ανάλογα με την ενέργεια διέγερσης E^* .



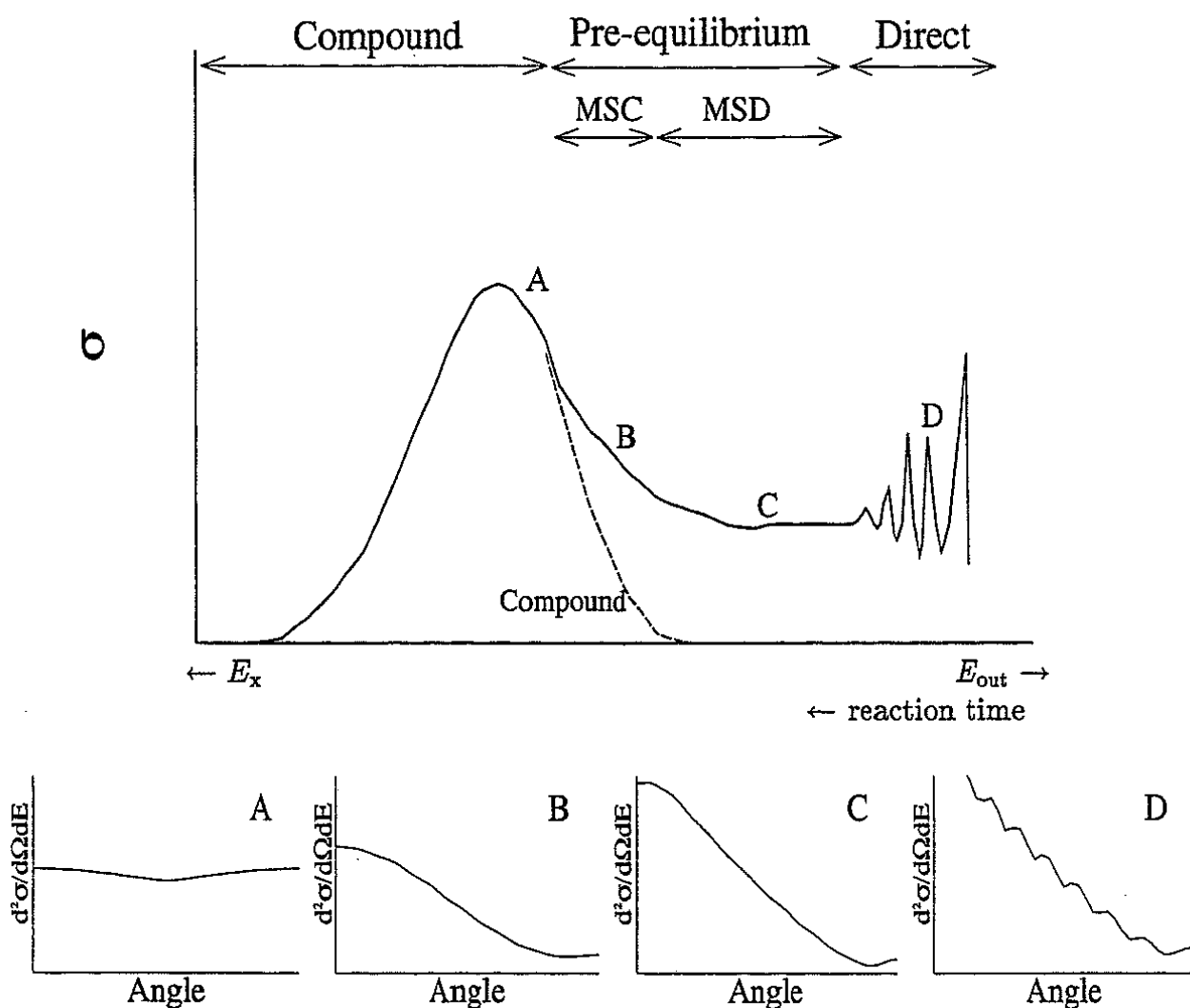
Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της αντίδρασης σχηματισμού σύνθετου πυρήνα.

2.1.3 Πολύπλοκοι Μηχανισμοί Αντιδράσεων

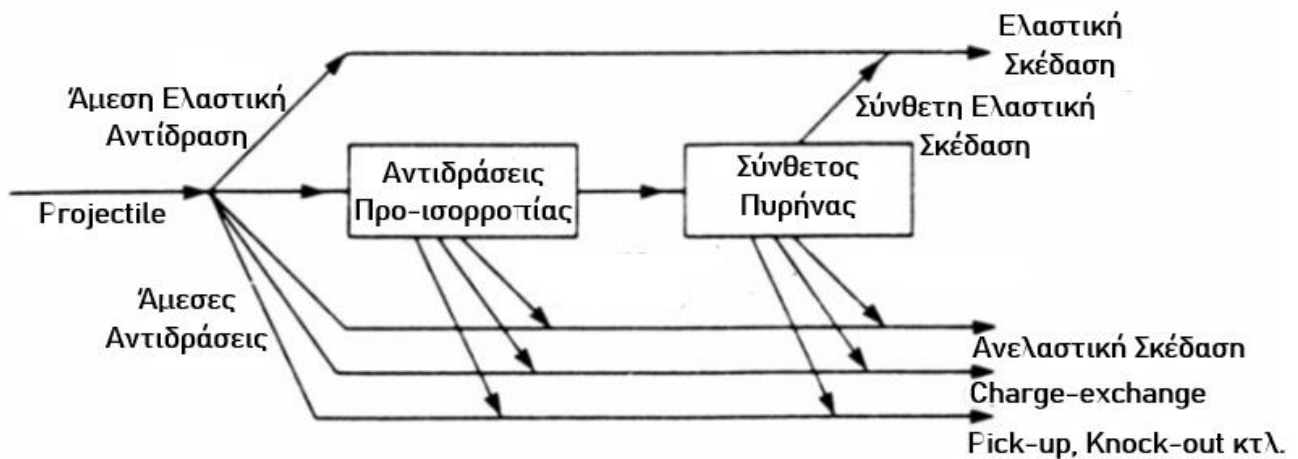
Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι μηχανισμοί εκπομπής προ-ισορροπίας (**Pre-equilibrium emission**), οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα στους άλλους δύο μηχανισμούς (Άμεσες Αντιδράσεις και Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα). Χαρακτηρίζονται με αυτόν το τρόπο, καθώς το σύστημα δεν προλαβαίνει αφενός να φτάσει σε θερμοδυναμική ισορροπία, και αφετέρου η εκπομπή ακτινοβολίας δεν συμβαίνει αμέσως μετά την σύγκρουση όπως γίνεται στις άμεσες αντιδράσεις. Η ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου διαμοιράζεται μεταξύ ενός μικρού αριθμού νουκλεονίων του πυρήνα-στόχου, τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν αλληπάλληλες αντιδράσεις εντός του πυρήνα, οδηγώντας στην εκπομπή σωματιδίων πριν σχηματιστεί ο σύνθετος πυρήνας. [2] Στη

περίπτωση αυτή, η γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων σωματιδίων παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση της ασυμμετρίας αυξανόμενης της ενέργειας, σε σύγκριση με την περίπτωση του σύνθετου πυρήνα, όπου παρατηρείται μεγάλη συμμετρία, όπως φαίνεται και στο (σχήμα 2.2). Η παρατήρηση αυτή, μαρτυρά την ύπαρξη ενός μηχανισμού που διατηρεί κάποιο ποσοστό της “μνήμης” του αρχικού συστήματος, υπονοώντας την ύπαρξη ενός μηχανισμού που προσεγγίζει τον άμεσο. [4] Με τον τρόπο αυτό, επιβεβαιώνεται η ύπαρξη του «pre-equilibrium» μηχανισμού.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται η ενεργειακή εξάρτηση των μηχανισμών αυτών από την ενέργεια πρόσπτωσης και τον χρόνο αλληλεπίδρασης, αλλά και από την γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, καθώς και όλοι οι μηχανισμοί των πυρηνικών αντιδράσεων (σχήμα 2.3).



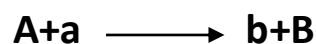
Σχήμα 2.2: Εξάρτηση των Πυρηνικών Μηχανισμών από την ενέργεια πρόσπτωσης και από την γωνιακή κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας [4].



Σχήμα 2.3: Μηχανισμοί Πυρηνικών Αντιδράσεων [2].

2.1.4 Ενδόθερμες και Εξώθερμες Αντιδράσεις

Ένας άλλος τρόπος να κατηγοριοποιηθούν οι πυρηνικές αντιδράσεις καθορίζεται από την τιμή Q (Q -value) που ορίζει αν η ενεργεία απορροφάται ή απελευθερώνεται κατά την πραγματοποίηση μίας αντίδρασης. Η τιμή Q ορίζεται ως η διαφορά της συνολικής μάζας των αντιδρώντων που συμμετέχουν στη αντίδραση μείον την συνολική μάζα των προϊόντων της αντίδρασης. Επομένως, για μια αντίδραση της μορφής:



Η τιμή Q ορίζεται ως:

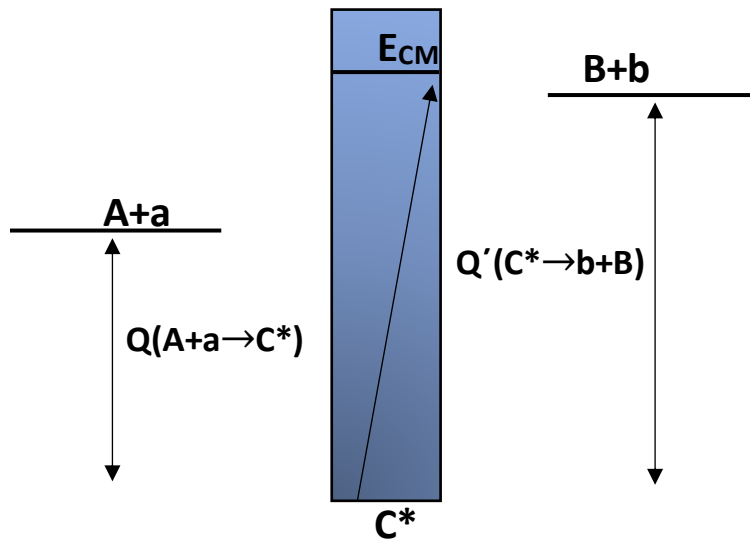
$$Q=(m_A + m_a - m_B - m_b)*c^2$$

Με τον τρόπο αυτόν, μια πυρηνική αντίδραση μπορεί να χαρακτηριστεί ως:

- **Ενδόθερμη:** κατά την διαδικασία της αντίδρασης απορροφάται ενέργεια και ισχύει $Q < 0$. Σύμφωνα με τον ορισμό του Q -value, τα προϊόντα της αντίδρασης βρίσκονται σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο από τα αντιδρώντα, συνεπώς για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, η οποία παρέχεται υπό την μορφή κινητικής ενέργειας του βλήματος.
- **Εξώθερμη:** κατά την διαδικασία της αντίδρασης εκλύεται ενέργεια και ισχύει $Q > 0$. Σε αντίθεση με τις ενδόθερμες αντιδράσεις, τα προϊόντα της αντίδρασης βρίσκονται σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο από τα αντιδρώντα, επομένως η αντίδραση πραγματοποιείται αυθόρμητα.
- **Ελαστική Σκέδαση:** σε αυτήν την περίπτωση τα προϊόντα της αντίδρασης είναι ίδια με τα αντιδρώντα και ισχύει $Q = 0$.

Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα

Στην περίπτωση αντιδράσεων σύνθετου πυρήνα, όπως είναι και η αντίδραση που μελετάμε στην παρούσα εργασία, το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης παίρνει την μορφή:



Σχήμα 2.4: Ενεργειακό Διάγραμμα Σύνθετης Αντίδρασης ($A+a \rightarrow C^* \rightarrow B+b$).

Ενώ, η ενέργεια που πρέπει να δοθεί στον σύνθετο πυρήνα (C^*) δίνεται από την σχέση:

$$E_{CM} = Q + \frac{m_A}{m_A + m_a} \cdot E_{\text{εργαστηρίου}}$$

Όπου:

- $E_{\text{εργαστηρίου}}$: η ενέργεια ακτινοβόλησης στο σύστημα του εργαστηρίου
- E_{CM} : ενέργεια σύνθετου πυρήνα στο σύστημα του κέντρου μάζας

2.2 Μελέτη νετρονικής αντίδρασης φυσικού θαλλίου: $^{nat}\text{Tl}+n$

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο κεφάλαιο, το φυσικό θάλλιο (Tl) συναντάται στη φύση σε δύο σταθερά ισότοπα:

- ^{203}Tl : σε ποσοστό 29.5% του φυσικού Tl
- ^{205}Tl : σε ποσοστό 70.5% του φυσικού Tl

Στη παρούσα εργασία, θα μελετηθεί η νετρονική αντίδραση μόνο του ισότοπου ^{203}Tl και όχι του ισότοπου ^{205}Tl για τους λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω.

2.2.1 Αντίδραση $^{203}\text{Tl} + n$

Κατά την αλληλεπίδραση των νετρονίων με το ^{203}Tl σχηματίζεται ο σύνθετος πυρήνας $^{204}\text{Tl}^*$, ο οποίος στην συνέχεια αποδιεγείρεται δίνοντας τα κανάλια εξόδου που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα 2.1.

Ο υπολογισμός του ενεργειακού επιπέδου έγινε με επίπεδο αναφοράς το ενεργειακό επίπεδο του σύνθετου πυρήνα.

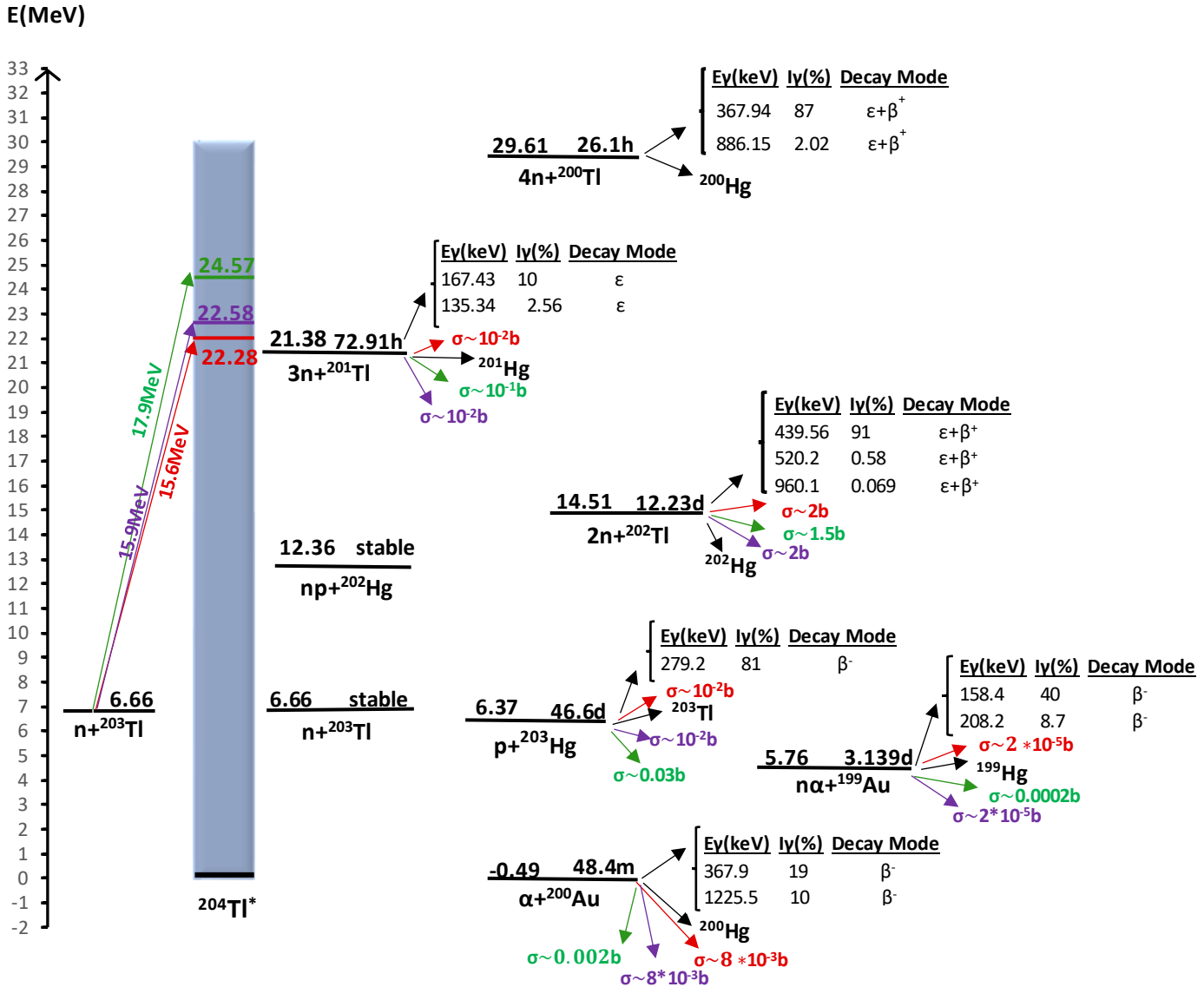
| Κανάλι Εισόδου | Σύνθετος Πυρήνας | Κανάλι Εξόδου | Ενεργειακό Επίπεδο(MeV)* |
|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| $n+^{203}\text{Tl} \longrightarrow$ | $^{204*}\text{Tl} \longrightarrow$ | $n+^{203}\text{Tl}$ | -6.66 |
| | | $2n+^{202}\text{Tl}$ | -14.51 |
| | | $3n+^{201}\text{Tl}$ | -21.38 |
| | | $4n+^{200}\text{Tl}$ | -29.61 |
| | | $p+^{203}\text{Hg}$ | - 6.37 |
| | | $np+^{202}\text{Hg}$ | -12.36 |
| | | $\alpha+^{200}\text{Au}$ | 0.49 |
| | | $n\alpha+^{199}\text{Au}$ | -5.76 |

Πίνακας 2.1: Δυνατά κανάλια εξόδου από την αλληλεπίδραση $^{203}\text{Tl}+n$ και οι ενέργειες που πρέπει να αποκτήσουν πάνω από την θεμελιώδη στάθμη του σύνθετου πυρήνα $^{204}\text{Tl}^*$ για να ανοίξουν [15].

Το αρνητικό πρόσημο στις τιμές του ενεργειακού επιπέδου υποδηλώνει ότι πρέπει να δοθεί ενέργεια στον σύνθετο πυρήνα $^{204}\text{Tl}^$ ώστε να ανοίξει το συγκεκριμένο κανάλι.

Ενεργειακό Διάγραμμα Αντίδρασης $^{203}\text{Tl}+n$:

Επομένως, το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης είναι (σχήμα 2.5):



Σχήμα 2.5: Ενεργειακό διάγραμμα της αλληλεπίδρασης $n+^{203}\text{Tl}$, με τις αποδιεγέρσεις των πυρήνων που προκύπτουν από τη διάσπαση του σύνθετου πυρήνα $^{204}\text{Tl}^*$, αλλά και η αναμενόμενη τιμή της ενεργού διατομής (σ (barn)) των καναλιών εξόδου για την ενέργεια ακτινοβολήσης, όπως προκύπτει από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες ENDF [17].

Υπολογίζοντας την ενέργεια του κέντρου μάζας των νετρονίων της δέσμης, καθορίζονται ποια από τα δυνατά κανάλια εξόδου θα ανοίξουν, επομένως μπορούν να μελετηθούν.

- $E_{\text{εργαστηρίου}} = 15.7\text{MeV}$

Για ενέργεια νετρονίων 15.5MeV , η ενέργεια του κέντρου μάζας (E_{cm}) είναι:

$$E_{\text{CM}} = E_{\text{εργαστηρίου}} * \frac{A_{\text{Αντιδρώντος}}}{A_{\text{Σύνθετου Πυρήνα}}} = 15.7 \cdot \frac{203}{204} = 15.6\text{MeV}$$

$E_{\text{εργαστηρίου}}$: η ενέργεια εργαστηρίου των νετρονίων της δέσμης, με την οποία γίνεται η ακτινοβόληση.

$A_{\text{αντιδρώντος}}$: ο μαζικός αριθμός του πυρήνα που ακτινοβολείται, στη συγκεκριμένη περίπτωση, για το ^{203}Tl , είναι $A=203$.

$A_{\text{σύνθ.πυρήνα}}$: ο μαζικός αριθμός του σύνθετου πυρήνα που δημιουργείται, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο σύνθετος πυρήνας είναι ο $^{204*}\text{Tl}$, και ο μαζικός αριθμός είναι $A=204$.

Προκύπτει : $E_{\text{CM}} = 15.6 \text{ MeV}$

Επομένως, για δέσμη νετρονίων ενέργειας 15.6 MeV, τα κανάλια που θα μπορέσουν να ανοίξουν και συνεπώς να μελετηθούν είναι αυτά που βρίσκονται σε ενεργειακό επίπεδο χαμηλότερο των 22.28 MeV, που αντιστοιχεί στο ενεργειακό επίπεδο διέγερσης του σύνθετου πυρήνα ($^{204*}\text{Tl}$)

- $E_{\text{εργαστηρίου}} = 16\text{MeV}$ και 18MeV

Ομοίως, για ενέργεια νετρονίων 16MeV, η ενέργεια του κέντρου μάζας (E_{CM}) είναι:

$$E_{\text{CM}} = E_{\text{εργαστηρίου}} * \frac{A_{\text{αντιδρώντος}}}{A_{\text{σύνθετου Πυρήνα}}} = 16 \cdot \frac{203}{204} = 15.9\text{MeV}$$

Προκύπτει : $E_{\text{CM}} = 15.9\text{MeV}$

Για ενέργεια νετρονίων 18MeV, η ενέργεια του κέντρου μάζας (E_{CM}) είναι:

$$E_{\text{CM}} = E_{\text{εργαστηρίου}} * \frac{A_{\text{αντιδρώντος}}}{A_{\text{σύνθετου Πυρήνα}}} = 18 \cdot \frac{203}{204} = 17.9\text{MeV}$$

Προκύπτει : $E_{\text{CM}} = 17.9\text{MeV}$

Επομένως, για δέσμη νετρονίων ενέργειας 16 MeV και 18 MeV, τα κανάλια που θα μπορέσουν να ανοίξουν και συνεπώς να μελετηθούν είναι αυτά που βρίσκονται σε ενεργειακό επίπεδο χαμηλότερο των 22.56MeV και 24.28MeV αντίστοιχα, που αντιστοιχεί στο ενεργειακό επίπεδο διέγερσης του σύνθετου πυρήνα ($^{204*}\text{Tl}$)

Ανάλυση Καναλιών Εξόδου

- $E_{\text{εργαστηρίου}} = 15.7\text{MeV}$

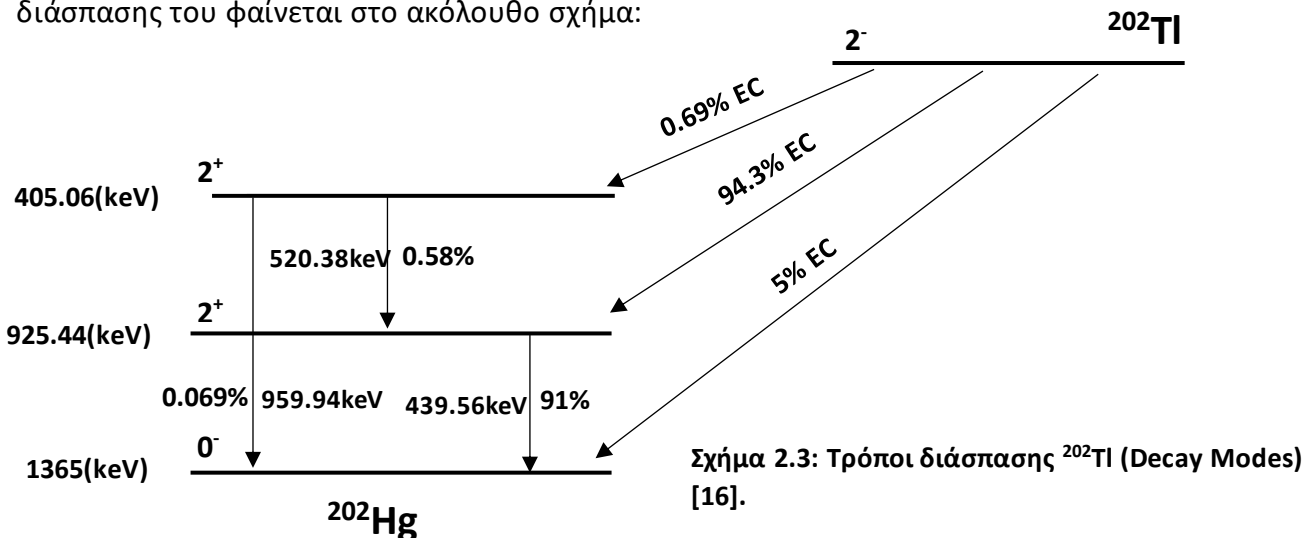
Αξιολογώντας τα κανάλια που προκύπτουν από την αντίδραση $^{203}\text{Tl}+n$, διαπιστώνουμε τα παρακάτω:

- Το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,\alpha)^{199}\text{Au}$ δεν μπορεί να μελετηθεί εξαιτίας των πολύ μικρών τιμών cross-section ($\sim 10^{-5}\text{ b}$)
- Για το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,\alpha)^{200}\text{Au}(-0.49\text{MeV})$ επίσης δεν είναι δυνατή η μελέτη του, λόγω της μεγάλης ενεργειακής διαφοράς που έχει με την διεγερμένη στάθμη του σύνθετου πυρήνα ^{204}Tl (22.2MeV), καθώς επίσης ο πυρήνας που παράγεται (^{200}Hg) δίνει ακτίνες-γ με πολύ μικρή ένταση (στα 367keV: $I_{\gamma}=19\%$)
- Το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,np)^{202}\text{Hg}$ δεν μπορεί να μελετηθεί καθώς ο παραγόμενος πυρήνας, ^{202}Hg , είναι σταθερός (stable)
- Από το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,3n)^{201}\text{Tl}$ ο παραγόμενος πυρήνας έχει πολύ μικρής έντασης ακτίνες-γ και η ενεργός διατομή για την συγκεκριμένη ενέργεια (15.4MeV) είναι επίσης μικρή, επομένως είναι δύσκολη η μελέτη του.
- Το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,4n)^{200}\text{Tl}$ βρίσκεται σε πολύ υψηλό ενεργειακό επίπεδο συγκριτικά με τη δέσμη νετρονίων που θα χρησιμοποιηθεί, επομένως δεν είναι δυνατή η μελέτη του.
- Το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ έχει σχετικά μεγάλο χρόνο ημι-ζωής ($\tau_{1/2}=12.23\text{d}$), κατάλληλος για την αποτελεσματική μελέτη του πυρήνα, ακόμη ο πυρήνας που παράγεται από την αποδιέγερσή του, ^{202}Hg , δίνει ακτίνες-γ με πολύ υψηλή ένταση ($I_{\gamma}=91\%$: 439.56keV)
- Το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,p)^{203}\text{Hg}$

- $E_{\text{εργαστηρίου}} = 16\text{MeV}$ και 18MeV

Ομοίως, και σε αυτήν την περίπτωση, αξιολογώντας τα κανάλια που προκύπτουν, διαπιστώνουμε τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Συνεπώς, από όλα τα δυνατά κανάλια αυτό που δύναται να μελετηθεί είναι το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$, όπου ο πυρήνας ^{202}Tl διασπάται στον πυρήνα ^{202}Hg εκπέμποντας ακτίνες γ. Ο τρόπος διάσπασης του φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Προηγούμενες Μετρήσεις της Αντίδραση $^{203}\text{Tl} + n$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{203}\text{Tl} + n$ έχει μελετηθεί και από άλλες ερευνητικές ομάδες στο παρελθόν. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ερευνών σε συνδυασμό με τα θεωρητικά μοντέλα που προκύπτουν από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων ENDF-Evaluated Nuclear Data File.

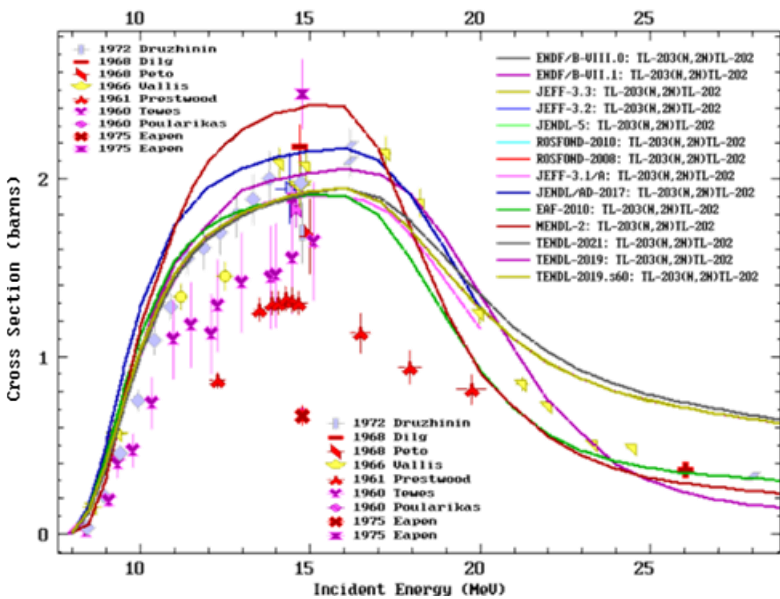
Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν με σημεία αναπαρίστανται οι πειραματικές τιμές, ενώ οι συνεχείς καμπύλες είναι τα θεωρητικά μοντέλα από τις διάφορες βιβλιοθήκες πυρηνικών δεδομένων.

Για την αλληλεπίδραση $^{203}\text{Tl} + n$, οι αντιδράσεις που έχουν μελετηθεί είναι οι ακόλουθες:

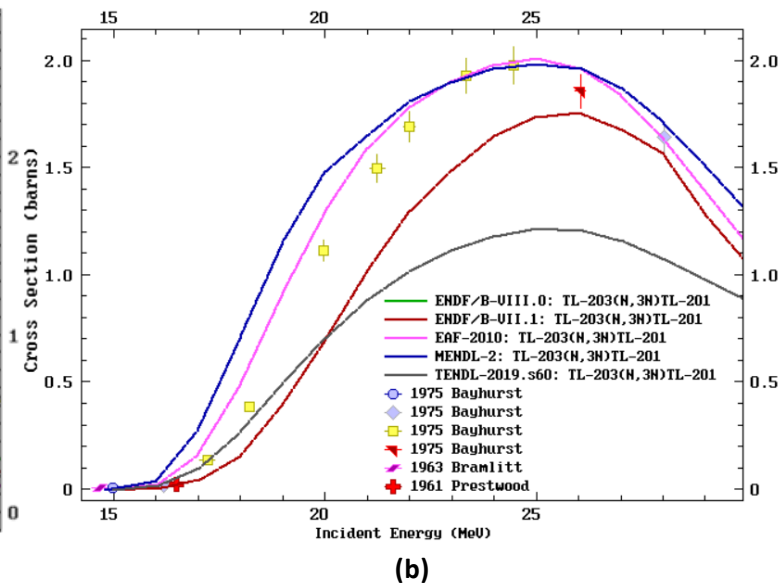
1. $^{203}\text{Tl} (n, 2n)^{202}\text{Tl}$
2. $^{203}\text{Tl} (n, 3n)^{201}\text{Tl}$
3. $^{203}\text{Tl} (n, 4n)^{200}\text{Tl}$
4. $^{203}\text{Tl} (n, p)^{203}\text{Hg}$
5. $^{203}\text{Tl} (n, \alpha)^{200}\text{Au}$
6. $^{203}\text{Tl} (n, n\alpha)^{199}\text{Au}$

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα των ερευνών για τις διάφορες αλληλεπιδράσεις του ^{203}Tl με τα νετρόνια:

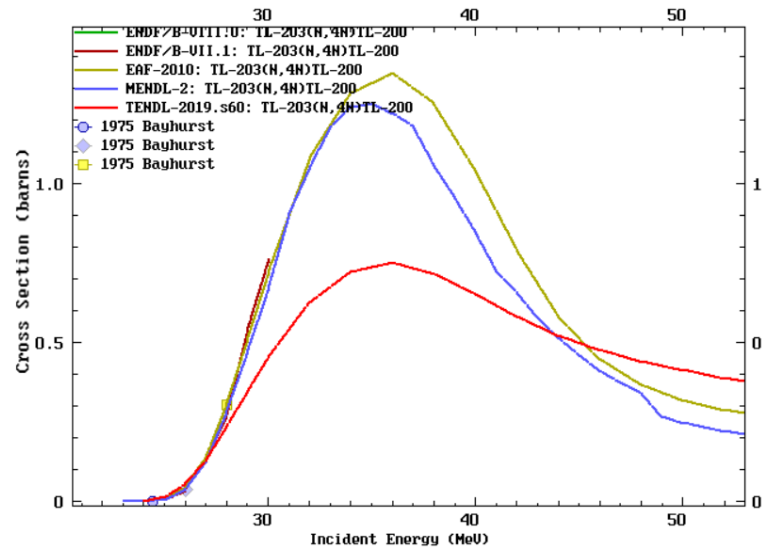
ENDF Request 4934, 2022-Dec-12, 11:09:26
EXFOR Request: 6277/1, 2022-Dec-12 2022:11:28



ENDF Request 5604, 2023-May-23, 20:31:27
EXFOR Request: 10271/1, 2023-May-23 2023:05:23

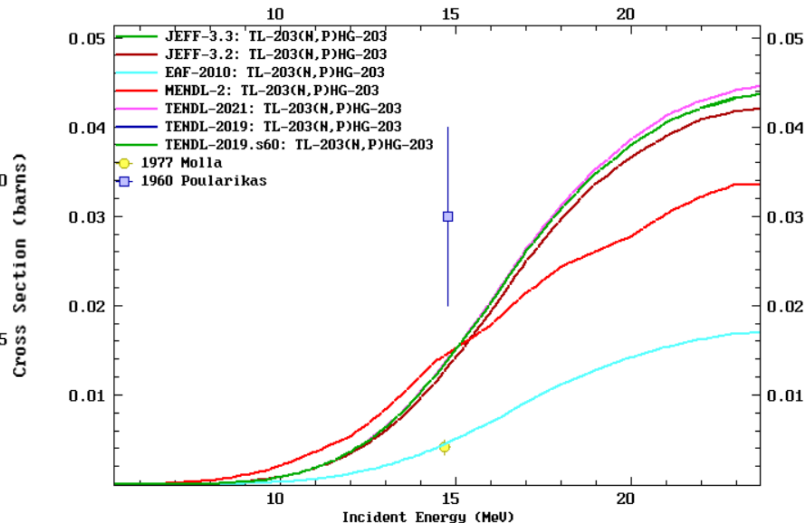


ENDF Request 4949, 2022-Dec-12, 11:58:01
EXFOR Request: 6343/1, 2022-Dec-12 2022:11:28



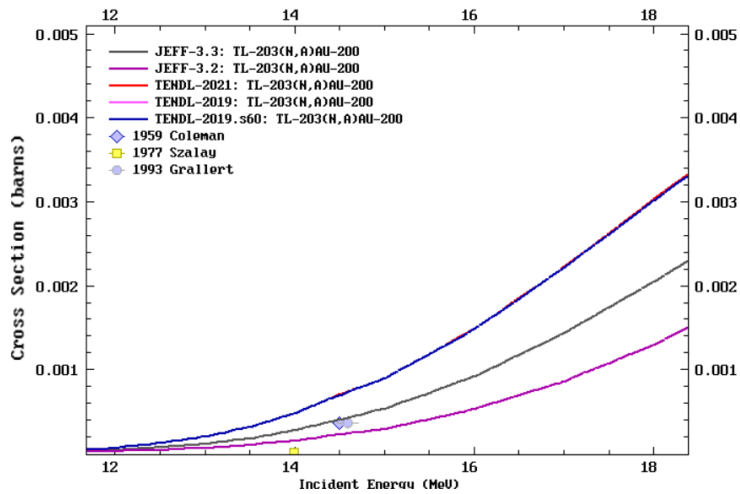
(c)

ENDF Request 5601, 2023-May-23, 20:18:22
EXFOR Request: 10267/1, 2023-May-23 2023:05:23



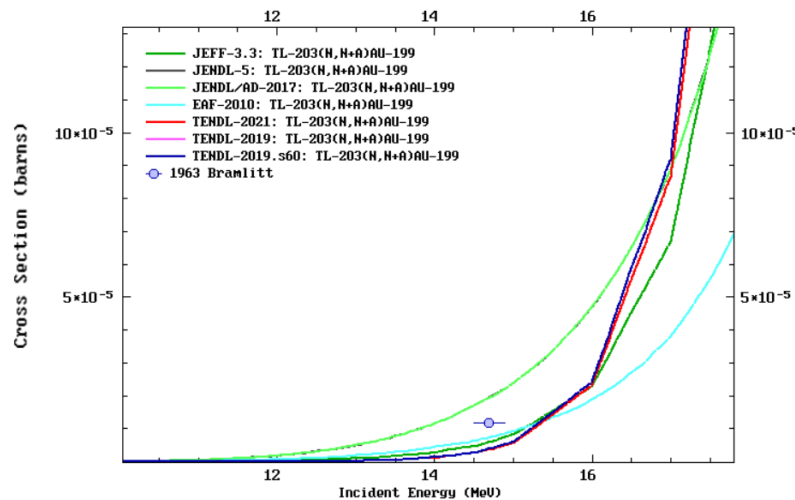
(d)

ENDF Request 14333, 2023-Apr-06, 09:06:35
EXFOR Request: 9724/1, 2023-Apr-06 2023:04:04



(e)

ENDF Request 19554, 2023-Apr-21, 08:08:32
EXFOR Request: 20368/1, 2023-Apr-21 2023:04:11



(f)

Σχήμα 2.4: Προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις αντίδρασης $^{203}\text{Tl}+n$ [17]:

- (a) $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$
- (b) $^{203}\text{Tl}(n,3n)^{201}\text{Hg}$
- (c) $^{203}\text{Tl}(n,4n)^{200}\text{Au}$
- (d) $^{203}\text{Tl}(n,p)^{203}\text{Hg}$
- (e) $^{203}\text{Tl}(n,\alpha)^{200}\text{Au}$
- (f) $^{203}\text{Tl}(n,n\alpha)^{199}\text{Au}$

2.2.2 Αντίδραση $^{205}\text{Tl}+n$

Κατά την αλληλεπίδραση των νετρονίων με το ^{205}Tl σχηματίζεται ο σύνθετος πυρήνας $^{206}\text{Tl}^*$, ο οποίος στην συνέχεια αποδιεγείρεται δίνοντας τα κανάλια εξόδου που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα 1.1.

Ο υπολογισμός του ενεργειακού επιπέδου έγινε με επίπεδο αναφοράς το ενεργειακό επίπεδο του σύνθετου πυρήνα.

| Κανάλι Εισόδου | Σύνθετος Πυρήνας | Κανάλι Εξόδου | Ενεργειακό Επίπεδο(MeV)* |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| $n+^{205}\text{Tl}$ | \longrightarrow $^{206*}\text{Tl}$ | \longrightarrow $n+^{205}\text{Tl}$ | -6.50 |
| | | $2n+^{204}\text{Tl}$ | -14.05 |
| | | $3n+^{203}\text{Tl}$ | -20.71 |
| | | $4n+^{202}\text{Tl}$ | -28.78 |
| | | $p+^{205}\text{Hg}$ | - 7.25 |
| | | $np+^{204}\text{Hg}$ | -12.36 |
| | | $\alpha+^{202}\text{Au}$ | 0.32 |
| | | $n\alpha+^{201}\text{Au}$ | -6.35 |

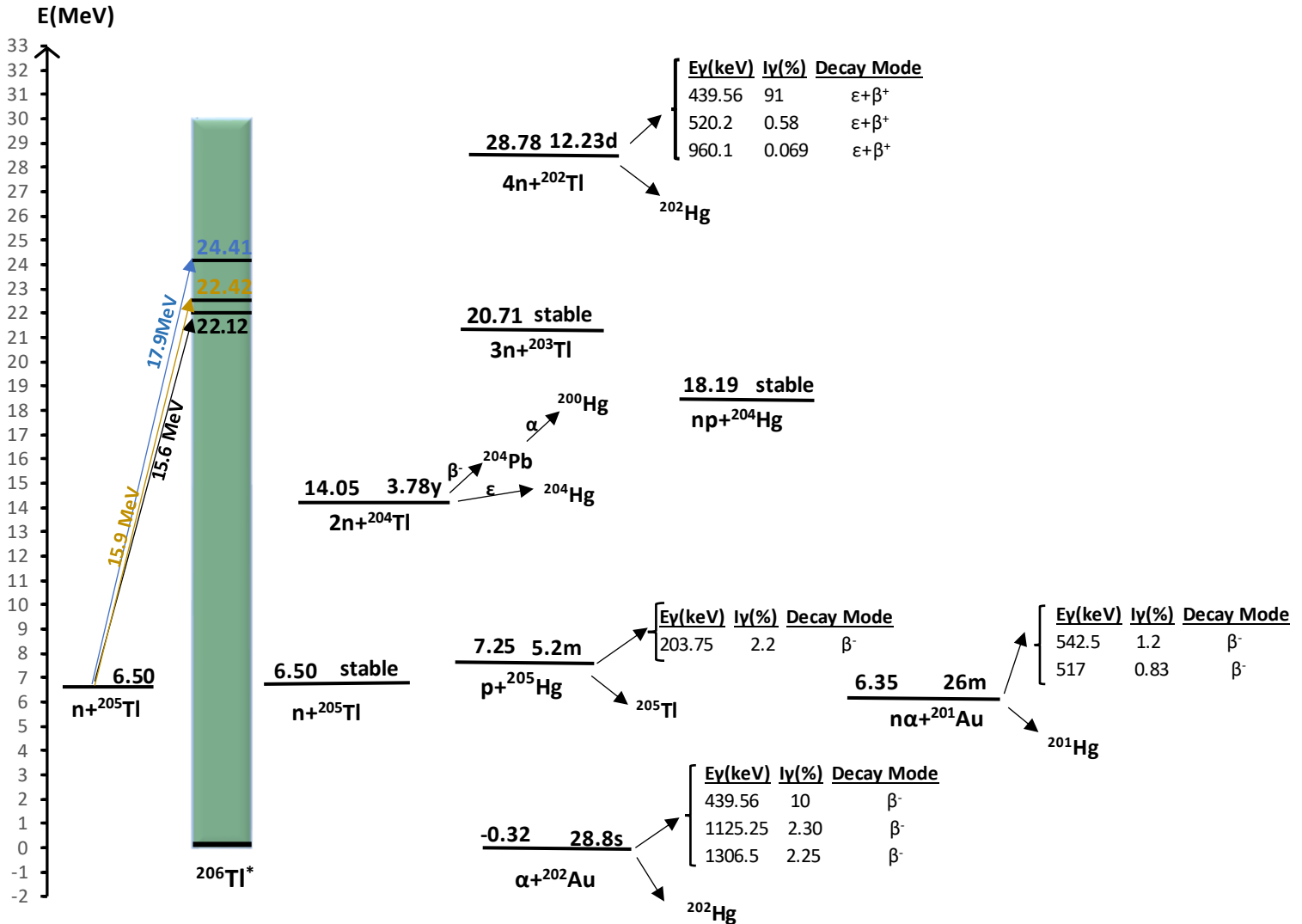
Πίνακας 2.1: Δυνατά κανάλια εξόδου από την αλληλεπίδραση $^{205}\text{Tl}+n$ και οι ενέργειες που πρέπει να αποκτήσουν πάνω από την θεμελιώδη στάθμη του σύνθετου πυρήνα $^{206}\text{Tl}^*$ για να ανοίξουν [15].

Το αρνητικό πρόσημο στις τιμές του ενεργειακού επιπέδου υποδηλώνει ότι πρέπει να δοθεί ενέργεια στον σύνθετο πυρήνα $^{206}\text{Tl}^$ ώστε να ανοίξει το συγκεκριμένο κανάλι.

Ενεργειακό Διάγραμμα Αντίδρασης $^{205}\text{Tl}+n$:

Επομένως, το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης είναι:

Το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{205}\text{Tl}+n$ φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



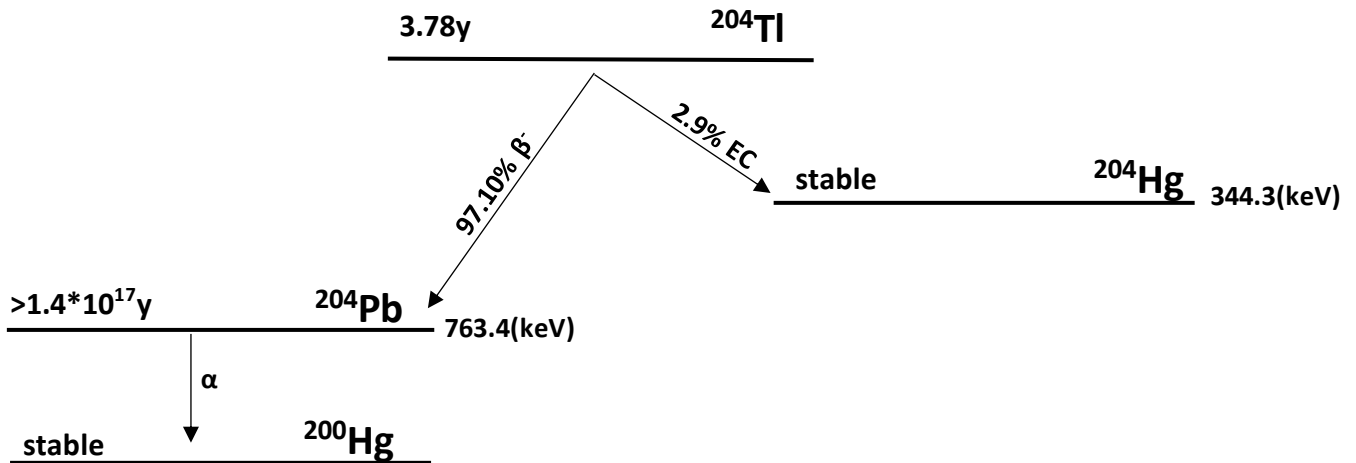
Σχήμα 2.5: Ενεργειακό διάγραμμα της αλληλεπίδρασης $n+^{205}\text{Tl}$, με τις αποδιεγέρσεις των πυρήνων που προκύπτουν από τη διάσπαση του σύνθετου πυρήνα $^{206}\text{Tl}^*$, αλλά και η ενεργός διατομή (σ(barn)) των καναλιών εξόδου για την ενέργεια ακτινοβολήσης όπως προκύπτει από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες ENDF [17].

Η ενέργεια εργαστηρίου των νετρονίων της δέσμης, που θα χρησιμοποιηθεί για την ακτινοβολήση, είναι $E_{\text{εργαστηρίου}}=15.7\text{MeV}$, $E_{\text{εργαστηρίου}}=16\text{MeV}$ και $E_{\text{εργαστηρίου}}=18\text{MeV}$:

$$E_{\text{CM}} = E_{\text{εργαστηρίου}} * \frac{A_{\text{Αντιδρώντος}}}{A_{\text{Σύνθετου Πυρήνα}}} = 15.7(18,16) \cdot \frac{203}{204} = 15.6(17.9,15.9)\text{MeV}$$

Ανάλυση Καναλιών Εξόδου

Αξιολογώντας τα κανάλια εξόδου που προκύπτουν κατά την αλληλεπίδραση $^{205}\text{Tl}+n$, συμπεραίνουμε ότι από τη βασική του αντίδραση, $^{205}\text{Tl}(n,2n)^{204}\text{Tl}$, ο παραγόμενος πυρήνας, ^{204}Tl , αφενός έχει πολύ μεγάλο χρόνο ημι-ζωής (3,78y) και αφετέρου κατά την διάσπασή του δεν προκύπτουν ακτίνες γ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6:



Σχήμα 2.6: Τρόποι διάσπασης ^{204}Tl (Decay Modes) [16].

Από τις υπόλοιπες αντιδράσεις προκύπτουν σταθεροί πυρήνες (^{204}Hg και ^{203}Tl), πυρήνες με πολύ μικρό χρόνο ημιζωής και πυρήνες που αποδιεγείρονται δίνοντας ακτίνες γ με πολύ μικρή ένταση (I_γ).

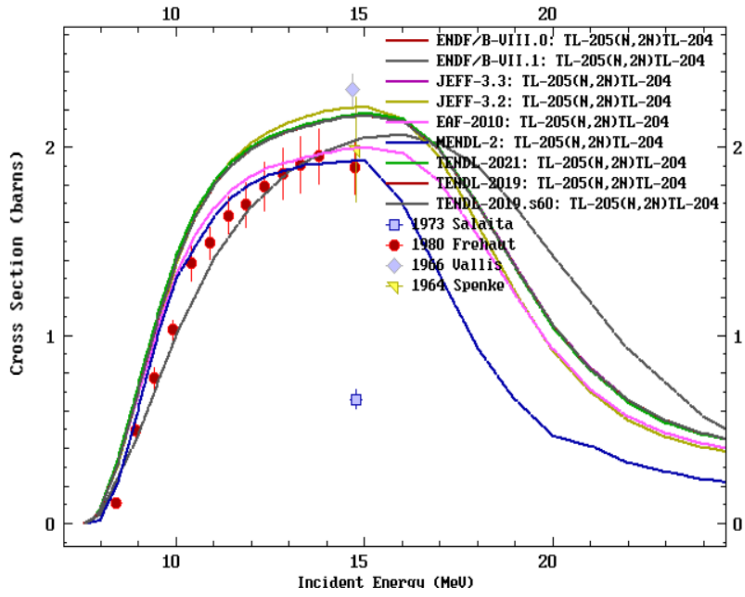
Επομένως, παρόλο που το ^{205}Tl βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στο φυσικό Tl, η μελέτη της αντίδρασης $^{205}\text{Tl}+n$ είναι αρκετά δύσκολη.

Προηγούμενες Μετρήσεις της Αντίδραση $^{205}\text{Tl}+n$

Παρόλα αυτά, η αντίδραση " $^{205}\text{Tl}+n$ " έχει μελετηθεί όμως από άλλες ερευνητικές ομάδες. Συγκεκριμένα, οι αντιδράσεις των οποίων έχει μελετηθεί η ενεργός διατομή, είναι οι ακόλουθες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7:

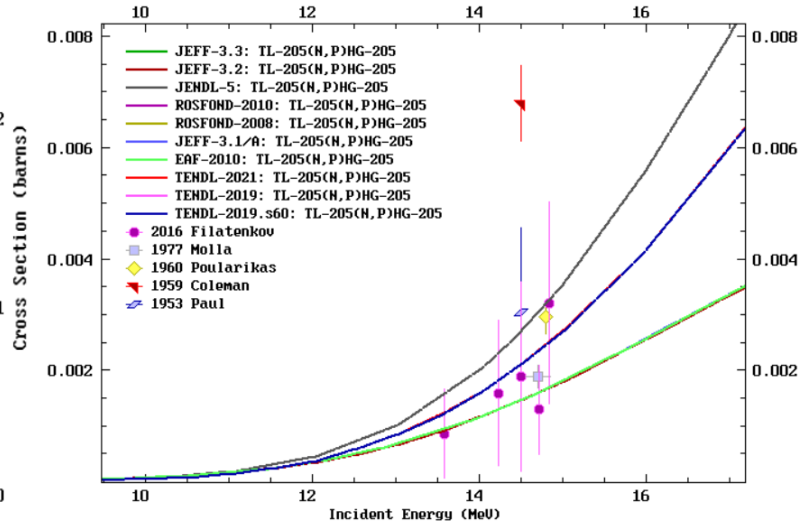
1. $^{205}\text{Tl}(n,2n)^{204}\text{Tl}$
2. $^{205}\text{Tl}(n,4n)^{202}\text{Tl}$
3. $^{205}\text{Tl}(n,p)^{205}\text{Hg}$
4. $^{205}\text{Tl}(n,\alpha)^{202}\text{Au}$

ENDF Request 18815, 2023-May-08, 11:26:16
EXFOR Request: 16515/1, 2023-May-08 2023:04:29



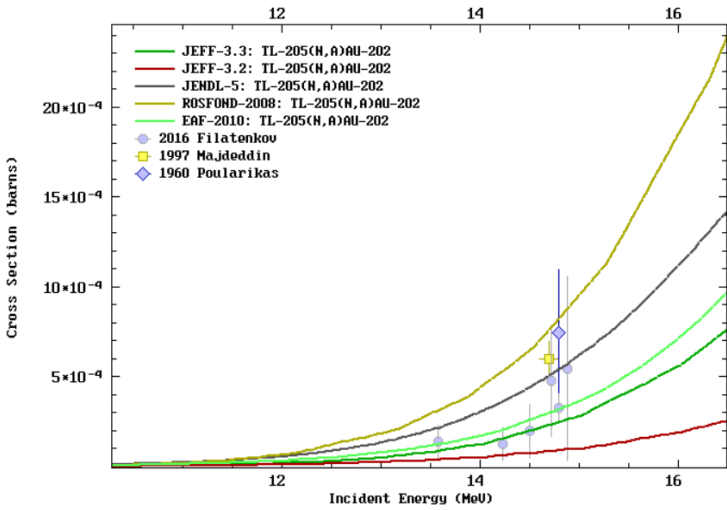
(a)

ENDF Request 18821, 2023-May-08, 11:35:26
EXFOR Request: 16547/1, 2023-May-08 2023:04:29



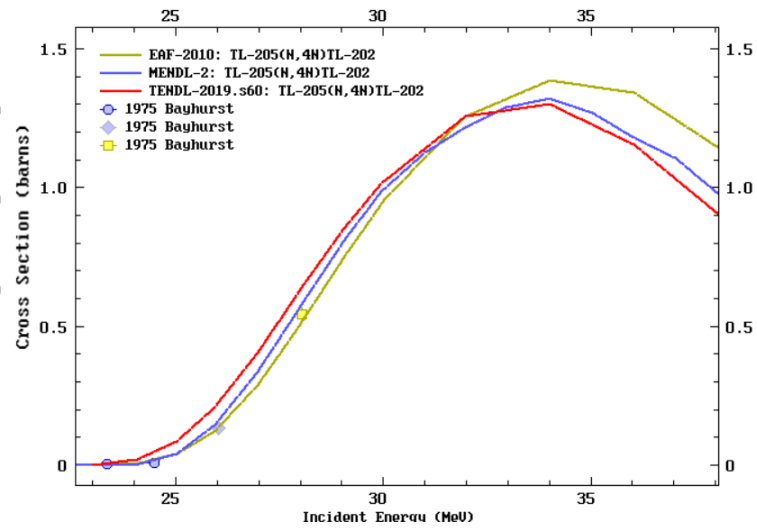
(b)

ENDF Request 18823, 2023-May-08, 11:38:13
EXFOR Request: 16557/1, 2023-May-08 2023:04:29



(c)

ENDF Request 18818, 2023-May-08, 11:32:48
EXFOR Request: 16544/1, 2023-May-08 2023:04:29



(d)

Σχήμα 2.7: Προηγούμενες Πειραματικές Μετρήσεις αντίδρασης $^{205}\text{Tl}+n$ [17]:

(a) $^{205}\text{Tl}(n,2n)^{204}\text{Tl}$

(b) $^{205}\text{Tl}(n,p)^{205}\text{Hg}$

(c) $^{205}\text{Tl}(n,\alpha)^{202}\text{Au}$

(d) $^{205}\text{Tl}(n,4n)^{202}\text{Tl}$

2.3 Ενεργός Διατομή

Η ενεργός διατομή καθορίζει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μία πυρηνική αντίδραση και έχει διαστάσεις επιφάνειας- συνήθως χρησιμοποιείται η μονάδα barn όπου $1b=10^{-24}cm^2$. Έστω ότι πυρήνας A βομβαρδίζεται με σωματίδια x, κατά την αλληλεπίδρασή τους μπορούν να λάβουν χώρα περισσότερες από μία αντιδράσεις που οδηγούν σε διαφορετικά προϊόντα. Η ολική ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης (total cross section) των σωματιδίων x με τους πυρήνες A (A+x) ισούται με το άθροισμα των επιμέρους ενεργών διατομών όλων των αντιδράσεων (π.χ. ελαστική ή μη ελαστική σκέδαση κτλ.) :

$$\sigma_{ολ} = \sum_{j=1}^{j=n} \sigma_j$$

Επομένως, θεωρώντας τον πυρήνα A σαν ένα στόχο που ακτινοβολείται, οι ενεργές διατομές των επιμέρους αντιδράσεων μπορούν να ορισθούν ως το τμήμα της επιφάνειας του στόχου που είναι διαθέσιμο για κάθε μία από αυτές.

Η ενεργός διατομή των πυρηνικών αντιδράσεων εξαρτάται ισχυρά από την κινητική ενέργεια των σωματιδίων, που τις προκαλούν. Η εξάρτηση αυτή χαρακτηρίζεται ως συνάρτηση διεγέρσεως της πυρηνικής αντίδρασης.

Η ενεργός διατομή για μια αντίδραση της μορφής $A(a,b)B$ δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a \cdot n}$$

Όπου,

R_b : ο ρυθμός των εξερχόμενων σωματιδίων b, στη μονάδα του χρόνου

I_a : ροή των σωματιδίων a που προσπίπτουν στο στόχο, στη μονάδα του χρόνου.

n: αριθμός των πυρήνων του στόχου ανά μονάδα επιφάνειας.

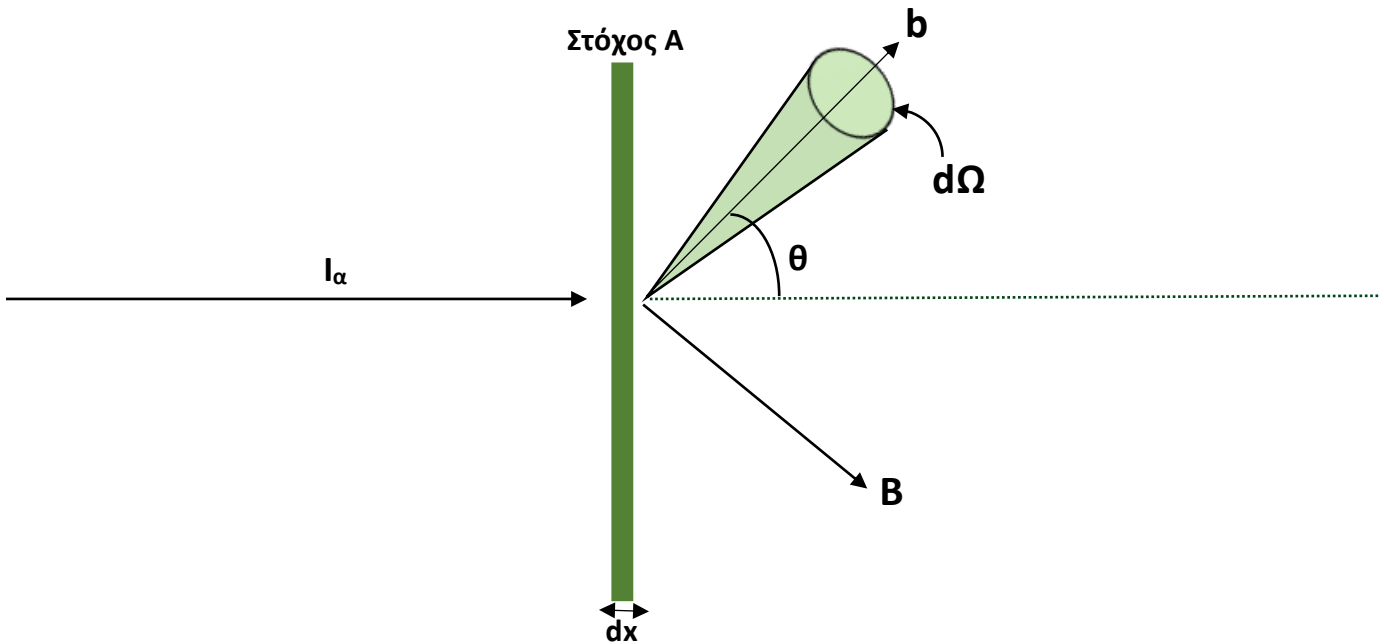
Ο παραπάνω τύπος όμως κάνει χρήση του συνολικού αριθμού των σωματιδίων b, τα οποία δεν εκπέμπονται ομοιόμορφα στο χώρο, αλλά έχουν μια κατανομή που εξαρτάται από τις γωνίες θ και ϕ . Επιπλέον, ο ανιχνευτής που χρησιμοποιούμε καταλαμβάνει μια μικρή γωνία $d\Omega$ και δεν δύναται να μετρήσει τα εκπεμπόμενα σωματίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η διαφορική ενεργός διατομή ($d\sigma/d\Omega$), η οποία για μια αντίδραση της μορφής $A(a,b)B$ ορίζεται ως η πιθανότητα να συμβεί η αντίδραση και τα εξερχόμενα σωματίδια b να σκεδαστούν σε μια συγκεκριμένη γωνία (θ, ϕ) εντός μιας στερεάς γωνίας $d\Omega$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.13. Δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a n}$$

Μονάδα μέτρησης της διαφορικής ενεργού διατομής είναι barn/sr.

Ολοκληρώνοντας την σχέση αυτή για $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ παίρνουμε την ενεργό διατομή(σ):

$$\sigma = \int_0^{4\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega.$$



Σχήμα 2.13: Ενεργός διατομή της αντίδρασης A(a,b)B.

2.4 Μέθοδος Ενεργοποίησης

Για τον πειραματικό υπολογισμό της ενεργού διατομής χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία η μέθοδος της ενεργοποίησης- Activation Analysis. Ακτινοβολώντας πυρήνες A με δέσμη σωματιδίων α, παράγονται ασταθείς πυρήνες B, οι οποίοι αποδιεγείρονται δίνοντας ακτίνες-γ. Μετρώντας το πλήθος των ακτίνων-γ που παράγονται μπορούμε να υπολογίσουμε το πλήθος των πυρήνων B που παρήχθησαν από την πυρηνική αντίδραση: $A + \alpha \rightarrow b + B$.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η ακόλουθη:

Για μια πυρηνική αντίδραση της μορφής:



Η ενεργός διατομή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma = \frac{N_p}{N_t} \cdot \frac{1}{\phi} \quad (2.1)$$

Όπου,

- N_p : πλήθος πυρήνων B που παρήχθησαν κατά την ακτινοβολή σε χρόνο t_b .
- N_t : πλήθος των αρχικών πυρήνων A, που θα ακτινοβοληθούν. Δίνεται από τον τύπο:

$$N_{\tau} = \frac{m \cdot N_A \cdot K}{AB} \quad (2.2)$$

Όπου,

- **m** : μάζα του στόχου A.
 - **N_A** : αριθμός Avogadro.
 - **K** : ισοτοπική αναλογία του πυρήνα που μελετάμε.
 - **AB** : μοριακό βάρος στόχου A.
- **Φ**: συνολική ροή σωματιδίων α που προσπίπτουν στον στόχο A, κατά την διάρκεια της ακτινοβόλησης, ανά μονάδα επιφάνειας του στόχου (αριθμός σωματιδίων/cm²).

Αναλυτικότερα, κατά την ακτινοβόληση, παράγονται **πυρήνες B με ρυθμό**:

$$\frac{dN}{dt} = \sigma \cdot f(t) \cdot N_{\tau} - \lambda \cdot N \quad (2.3)$$

Όπου,

- **λ** : σταθερά αποδιέγερσης του πυρήνα B
- **f(t)**: ροή σωματιδίων της δέσμης συναρτήσει του χρόνου
- **N**: πυρήνες B που δεν έχουν αποδιεγερθεί ακόμη

Στην παραπάνω εξίσωση (2.3), ο όρος $\sigma \cdot f(t) \cdot N_{\tau}$ δηλώνει την δημιουργία πυρήνων B, ενώ ο όρος $\lambda \cdot N$ δηλώνει την αποδιέγερση των ασταθών πυρήνων B.

Επιλύοντας την εξίσωση (2.3) υπολογίζουμε τον αριθμό των πυρήνων B που παράγονται κατά την ακτινοβόληση:

$$N(t) = \frac{\int \sigma \cdot f(t) \cdot N_{\tau} \cdot e^{\int \lambda dt} \cdot dt + C}{e^{\int \lambda dt}}$$

Για ακτινοβόληση που ξεκινάει από t=0 (όπου N=0 και C=0) και για χρονική διάρκεια ακτινοβόλησης t_B προκύπτει [5]:

$$N(t_B) = \frac{N_{\tau} \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_B} f(t) \cdot e^{\int \lambda dt} \cdot dt}{e^{\lambda \cdot t_B}}$$

$$N(t_B) = (N_{\tau} \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_B} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt) \cdot e^{-\lambda \cdot t_B}$$

$$N(t_B) = N_{\tau} \cdot \sigma \cdot \left(\int_0^{t_B} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} \cdot \frac{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt}$$

$$N(t_B) = N_{\tau} \cdot \sigma \cdot \left(\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} \cdot \frac{\int_0^{t_B} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt}$$

Με τον τρόπο αυτό, για το πλήθος των πυρήνων B προκύπτει:

$$N(t_B) = N\tau \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot f_c \quad (2.4)$$

Όπου,

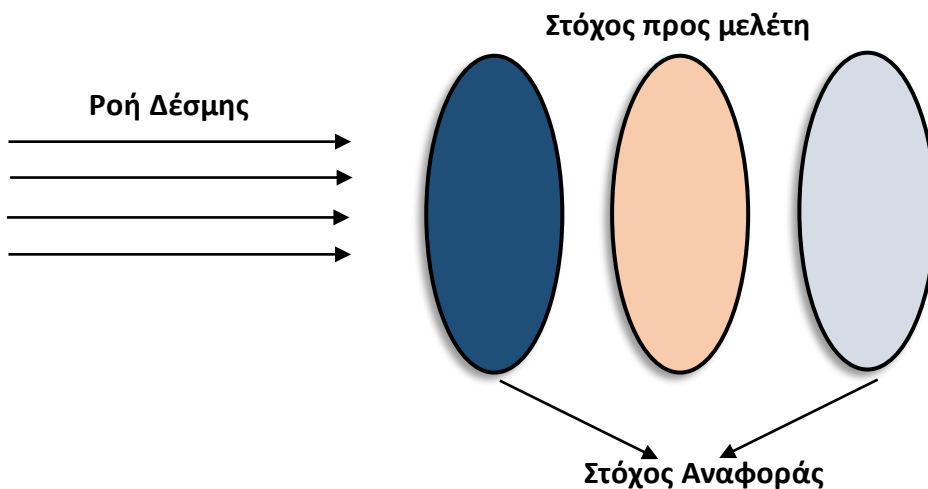
- $\Phi = \int_0^{t_B} f(t) \cdot dt$: η συνολική ροή της δέσμης που ακτινοβολήθηκε το δείγμα.
- $f_c = e^{-\lambda \cdot t_B} \cdot \frac{\int_0^{t_B} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt}$: διορθωτικός παράγοντας που υπολογίζει το ποσοστό των πυρήνων B που δημιουργήθηκαν αλλά αποδιεγέρθηκαν μέχρι το τέλος της ακτινοβολήσης.

Στην εξίσωση (2.4) θέτοντας: $Np = \frac{N(t_B)}{f_c}$ προκύπτει η εξίσωση της ενεργού διατομής όπως ορίζεται από την σχέση (1.1).

Επομένως, κάνοντας χρήση της μεθόδου ενεργοποίησης, μπορούμε γνωρίζοντας τα δύο από τα τρία μεγέθη (σ , Φ , Np) και χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.1 να υπολογίσουμε το τρίτο-άγνωστο-μέγεθος [5]:

| Δεδομένα | Ζητούμενο |
|----------------|-----------|
| σ, Φ | Np |
| σ, Np | Φ |
| Φ, Np | σ |

Η τεχνική που χρησιμοποιείται στο πείραμα, σύμφωνα με την μέθοδο της ενεργοποίησης, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14:



Σχήμα 2.14: Τεχνική Σάντουιτς.

Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούνται δύο στόχοι αναφοράς εκατέρωθεν του στόχου που θα μελετηθεί και σε πολύ κοντινή απόσταση με αυτόν, με σκοπό να μην μειώνεται η ροή της δέσμης (Φ) καθώς διέρχεται από τον έναν στόχο στον άλλον. Η τεχνική αυτή ονομάζεται τεχνική σάντουιτς. Οι στόχοι

αναφοράς αποτελούνται από ένα συγκεκριμένο υλικό, του οποίου η ενεργός διατομή είναι γνωστή με πολύ μεγάλη ακρίβεια για τις ενέργειες ακτινοβολήσης του συγκεκριμένου πειράματος. Έτσι, η ενεργός διατομή του στόχου, που θέλουμε να μελετήσουμε, υπολογίζεται κάνοντας χρήση των ενεργών διατομών των στόχων αναφοράς, όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα στην συνέχεια. Τόσο ο στόχος προς μελέτη, όσο και οι στόχοι αναφοράς περιγράφονται από την σχέση **(2.1)**.

Στη περίπτωση που κατά την διάρκεια της ακτινοβολήσης χρησιμοποιείται **δέσμη νετρονίων**, η μέθοδος αναφέρεται ως **Μέθοδος Νετρονικής Ενεργοποίησης- Neutron Activation Analysis(NAA)**.

Κεφάλαιο 3^ο

Πειραματικό Μέρος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον ηλεκτροστατικό επιταχυντή 5.5MV Van de Graff Tandem του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".



Σχήμα 3.1: Επιταχυντής 5.5MV Van de Graff Tandem του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

3.1 Επιταχυντής

Πρόκειται για διάταξη που επιταχύνει φορτισμένα σωματίδια και ιόντα σε υψηλές ταχύτητες και ενέργειες και τα συγκρατεί σε συγκεκριμένη τροχιά. Με τον τρόπο αυτό παράγεται δέσμη ιόντων, συγκεκριμένης ενέργειας, που θα χρησιμοποιηθεί στο πείραμα. Η κατασκευή της πηγής ιόντων, που πρόκειται να επιταχυνθεί, βασίζεται στην προσθήκη ή αφαίρεση ηλεκτρονίων από το αντίστοιχο ουδέτερο άτομο. Για να αποκτήσει ένα σωματίδιο υψηλές κινητικές ενέργειες, πρέπει να ασκηθούν πάνω του ισχυρές δυνάμεις για ένα επαρκές χρονικό διάστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων: καθώς τα φορτισμένα σωματίδια ή ιόντα ταχύτητας "υ" περνούν μέσα από μια περιοχή όπου υπάρχει μαγνητικό πεδίο επαγωγής "B" και ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως "E" τότε πάνω τους δρα η δύναμη Lorentz η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Ο πρώτος όρος ($q \cdot \mathbf{E}$) είναι υπεύθυνος για την επιτάχυνση των σωματιδίων, ενώ ο δεύτερος όρος ($q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$) καθορίζει την διεύθυνση της δέσμης.

Οι επιταχυντές κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου:

- Ηλεκτροστατικοί Επιταχυντές
- Ηλεκτροδυναμικοί Επιταχυντές (γραμμικοί επιταχυντές, κυκλοτρόνιο, συγχροτρόνιο)

Ηλεκτροστατικός Επιταχυντής

Ένας ηλεκτροστατικός επιταχυντής επιταχύνει τα σωματίδια δημιουργώντας ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο. Στην απλούστερη μορφή του, αποτελείται από έναν πυκνωτή με επίπεδους οπλισμούς, όπου το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται από μία γεννήτρια υψηλής τάσης. Υποθέτοντας ιόντα με θετικό φορτίο Q , τα οποία εισέρχονται στον χώρο μεταξύ των οπλισμών από μία μικρή οπή του θετικού οπλισμού, επιταχύνονται προς τον αρνητικό οπλισμό εξαιτίας της δύναμης $F = q \cdot E$, και στην συνέχεια εξέρχονται από μία αντίστοιχη οπή του αρνητικού οπλισμού.

Η δέσμη ιόντων που εξέρχεται αποκτά κινητική ενέργεια που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{\text{kinetic}} = \frac{m \cdot v^2}{2} = q \cdot V$$

- , Όπου:
- V : διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο οπλισμών.
 - q : φορτίο του σωματιδίου
 - m : μάζα του σωματιδίου
 - v : ταχύτητα του σωματιδίου

Με την διάταξη αυτή, σωματίδια μπορούν να επιταχυνθούν σε ενέργειες μέχρι μερικών keV, καθώς για μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο εμφανίζεται σπινθηρισμός μεταξύ των οπλισμών. Με σκοπό, λοιπόν, την επιτάχυνση των σωματιδίων σε υψηλότερες ενέργειες, χρησιμοποιούνται πλέον άλλες διατάξεις, όπως ο **επιταχυντικός σωλήνας**, που αποτελεί το σημαντικότερο μέρος των ηλεκτροστατικών επιταχυντών.

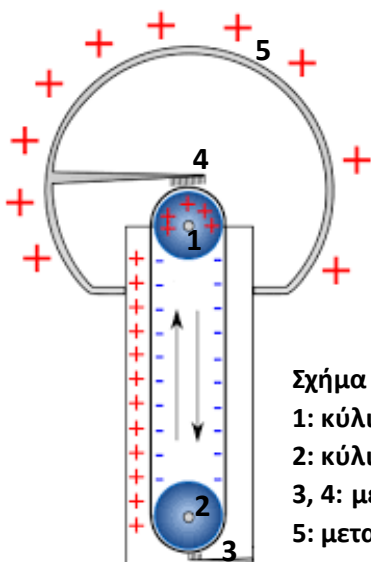
Η κατασκευή του επιταχυντικού σωλήνα βασίζεται στην επανάληψη της παραπάνω διάταξης σε μια συστοιχία που αποτελείται από εναλλάξ ηλεκτρόδια και δακτυλίους από μονωτικό υλικό. Μέσω ενός τροφοδοτικού συνεχούς ρεύματος, δημιουργείται στο αριστερό άκρο του επιταχυντικού σωλήνα, από το οποίο εισέρχονται τα θετικά ιόντα, θετικό δυναμικό V , σε σχέση με το δεξιό άκρο που διατηρείται γειωμένο. Μια σειρά από όμοιες αντιστάσεις R που συνδέουν διαδοχικά ηλεκτρόδια εξασφαλίζει ομοιόμορφη πτώση δυναμικού $V = I \cdot R$ σε κάθε στάδιο της διάταξης. Κάνοντας χρήση πολλών ηλεκτροδίων, της τάξης των 100, είναι δυνατή η ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού της τάξης των μερικών MV.

Όσον αφορά την ανάπτυξη της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του επιταχυντικού σωλήνα, μπορεί να επιτευχθεί με χρήση διάφορων τύπων γεννητριών υψηλής τάσης. Στο συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποιείται η γεννήτρια Van de Graaff. [5]

Γεννήτρια Van de Graaff

Η γεννήτρια Van de Graaff αποτελείται από μία μεγάλη μεταλλική σφαίρα τοποθετημένη πάνω σε στερεές στήλες μονωτικού υλικού. Η υψηλή τάση επιτυγχάνεται με την μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου πάνω σε έναν ιμάντα που κινείται με την βοήθεια δύο κυλίνδρων. Μέσω μιας πηγής τάσης θετικό φορτίο συγκεντρώνονται στις άκρες των μεταλλικών ακίδων που βρίσκονται στο κάτω μέρος του επιταχυντή, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με τον ιμάντα. Το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο αυτό αυξάνεται και ιονίζει τον αέρα. Στην συνέχεια, τα θετικά φορτία απωθούνται και εναποτίθενται στον

ιμάντα. Με τον τρόπο αυτό τα φορτία μεταφέρονται προς τα πάνω μέσω του ιμάντα, ώσπου μόλις ο ιμάντας φτάσει στην πάνω ακίδα(ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης), τα φορτία μεταφέρονται στην μεταλλική σφαίρα, η οποία πλέον φορτίζεται θετικά και τα φορτία κατανέμονται ομοιόμορφα σε αυτήν.



Σχήμα 3.2: Σύστημα γεννήτριας Van de Graaff
 1: κύλινδρος στο κέντρο της μεταλλικής σφαίρας.
 2: κύλινδρος στο κάτω μέρος του επιταχυντή.
 3, 4: μεταλλικές ακίδες.
 5: μεταλλική σφαίρα.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πολλές φορές, με το αφόρτιστο τμήμα του ιμάντα να επιστρέφει κάτω να συλλέγει φορτίο και να το εναποθέτει στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να εναποτεθεί στην σφαίρα εξαρτάται από το μέγεθός της. Η διάταξη δημιουργεί διαφορά δυναμικού:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Όπου,

- Q: το ολικό φορτίο που συσσωρεύεται στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.
- C: η χωρητική σύνδεση του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης ως προς την γη.

Σε περίπτωση που το φορτίο αυξηθεί περισσότερο από αυτό που αντέχει η σφαίρα, το σύστημα καταρρέει και η σφαίρα εκφορτίζεται. Για τον λόγο αυτό, ο επιταχυντής Tandem αποτελείται από μία δεξαμενή που περιέχει μονωτικό αέριο SF₆ υπό πίεση, έτσι ώστε να εμποδίζει τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που είναι δυνατόν να προκληθούν μέσα στη δεξαμενή λόγω υψηλής τάσης που αναπτύσσεται στο κέντρο της [9].

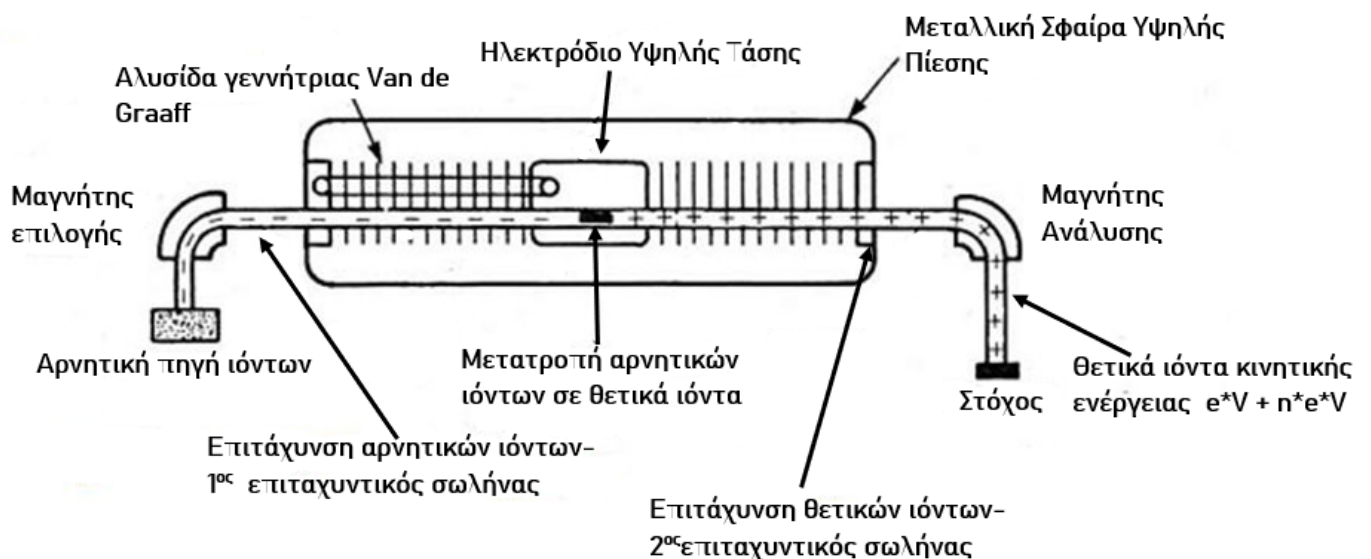
Ο **επιταχυντής Tandem** αποτελείται από δύο ηλεκτροστατικούς επιταχυντές σε σειρά, τα άκρα των οποίων βρίσκονται στο δυναμικό της γης.

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας επιτάχυνσης περιλαμβάνει την επιτάχυνση αρνητικών ιόντων μέσα στον επιταχυντικό σωλήνα καθώς έλκονται από την μεγάλη μεταλλική δεξαμενή όπου βρίσκεται η γεννήτρια υψηλής τάσης. Τα ιόντα αυξάνουν σταδιακά την ταχύτητά τους και επομένως

και την ενέργειά τους καθώς κινούνται μέσα στον σωλήνα. Στο σημείο που αναπτύσσεται η υψηλή τάση τα ιόντα συγκρούονται με ένα λεπτό φύλλο άνθρακα, C, (απογυμνωτής-Carbon Stripper). Μέχρι το σημείο αυτό, τα αρνητικά ιόντα έχουν επιταχυνθεί σε ενέργεια $e \cdot V$.

Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας, τα αρνητικά ιόντα καθώς διαπερνούν το φύλλο C χάνουν μερικά από τα ηλεκτρόνια που διαθέτουν και μετατρέπονται σε θετικά ιόντα. Συνεπώς, τα θετικά φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται από το σημείο αυτό και έπειτα, εξαιτίας του θετικού δυναμικού, λόγω άπωσης Coulomb. Με τον τρόπο αυτό η ενέργεια που είχαν αποκτήσει τα αρνητικά ιόντα λόγω έλξης από το κέντρο της δεξαμενής, αυξάνεται περισσότερο λόγω άπωσης, καθώς μετατρέπονται σε θετικά φορτισμένα ιόντα. Τα θετικά ιόντα με φορτίο $n \cdot e$ (όπου n: ο αριθμός των ηλεκτρονίων που έχουν αφαιρεθεί από το αντίστοιχο ουδέτερο άτομο στην πηγή ιόντων), επιταχύνονται μέχρι το άλλο άκρο του συστήματος αποκτώντας ενέργεια: $n \cdot e \cdot V$.

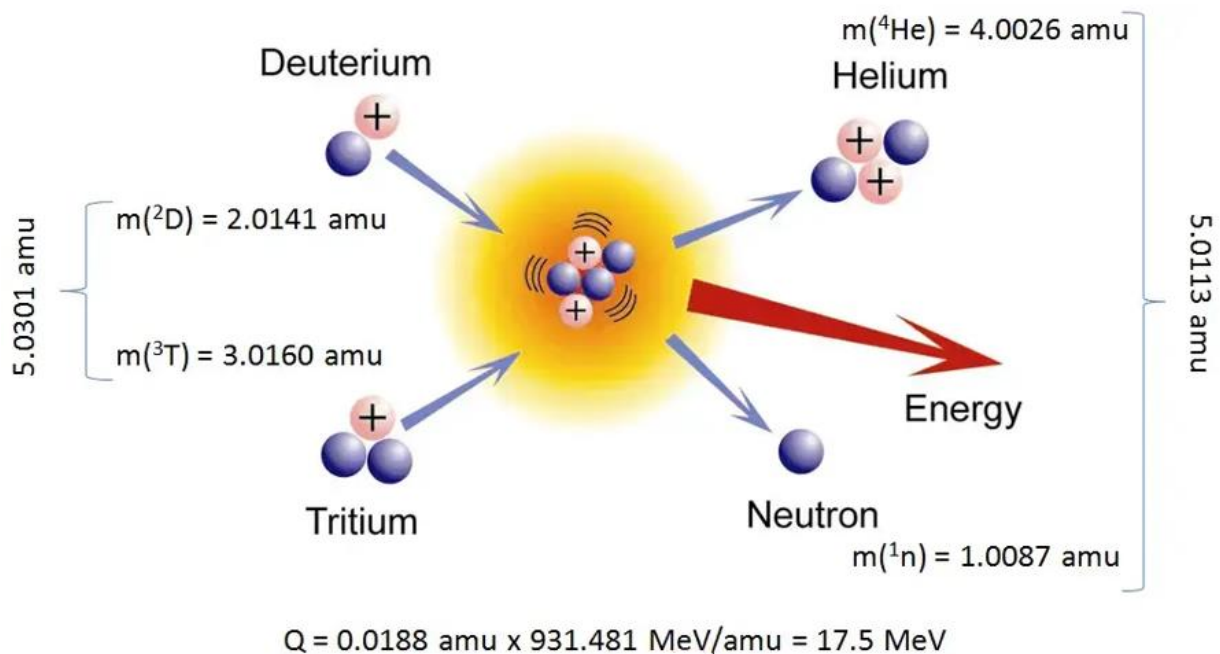
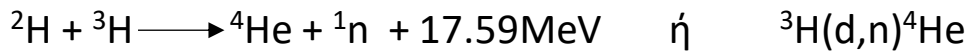
Η συνολική κινητική ενέργεια που παράγεται από την διαδικασία επιτάχυνσης και στα δύο στάδια ισούται με: $e \cdot V + n \cdot e \cdot V$ [5], [10].



Σχήμα 3.3: Διάταξη Επιταχυντή 5.5MV Van de Graff Tandem.

3.2 Παραγωγή δέσμης νετρονίων

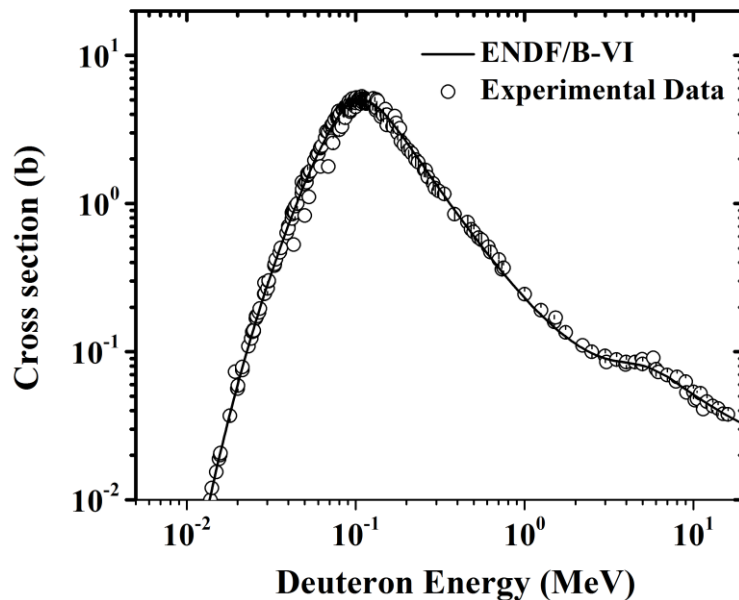
Καθώς, τα νετρόνια δεν έχουν φορτίο για την παραγωγή τους χρησιμοποιείται συνήθως κάποια πυρηνική αντίδραση. Στο συγκεκριμένο πείραμα η παραγωγή των νετρονίων έγινε μέσω της αντίδρασης D-T, δηλαδή [11], [8]:



Σχήμα 3.4: Αντίδραση D-T.

Η αντίδραση αυτή προτιμάται για την παραγωγή νετρονίων υψηλών ενεργειών λόγω:

- του υψηλού Qvalue που ισούται με 17.59MeV. Μπορεί να δώσει νετρόνια μέχρι και 21MeV χωρίς την παραγωγή παρασιτικών νετρονίων-νετρόνια διαφορετικής ενέργειας από τα επιθυμητά που παράγονται λόγω διάσπασης του δευτερίου (breakup reaction). Στην συγκεκριμένη αντίδραση, παρασιτικά νετρόνια παράγονται για ενέργειες δευτερίων μεγαλύτερες των 3.7MeV,
- της δυνατότητας χρήσης μικρών επιταχυντών που θα παρέχουν υψηλό ρεύμα, καθώς μπορούν να παραχθούν νετρόνια υψηλής ενέργειας με δέσμη δευτερίων μικρής ενέργειας, δηλαδή δεν απαιτείται μεγάλη επιτάχυνση της δέσμης,
- της μεγάλης ενεργού διατομής της αντίδρασης σε σχέση με άλλες πυρηνικές αντιδράσεις παραγωγής μονοενεργειακών νετρονίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5:



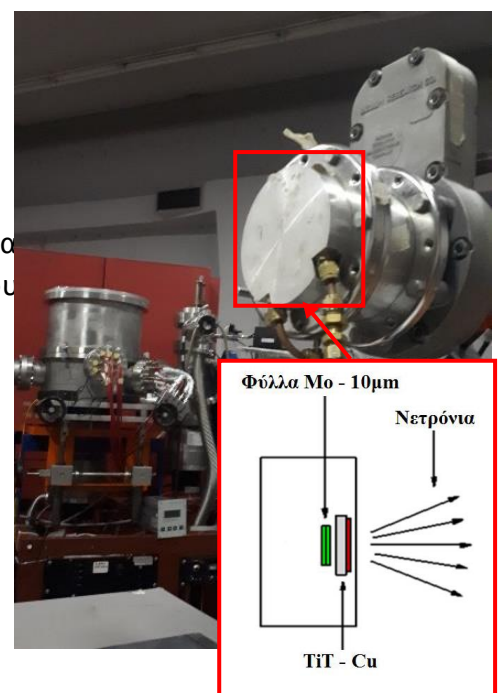
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ενεργού διατομής της αντίδρασης D-T συναρτήσει της ενέργειας των δευτερίων (D). [8]

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- ✓ Μέσω της διάταξης του επιταχυντή tandem που περιεγράφηκε στην παραπάνω ενότητα πραγματοποιείται η παραγωγή της δέσμης νετρονίων κατάλληλης ενέργειας. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δευτέρια (D) ενέργειας:
 - $E_d=2.145\text{MeV}$ για την παραγωγή νετρονίων ενέργειας $E_n=15.7\text{MeV}$,
 - $E_d=2.916\text{MeV}$ για την παραγωγή νετρονίων ενέργειας $E_n=18\text{MeV}$,
 - $E_d=2.153\text{MeV}$ για την παραγωγή νετρονίων ενέργειας $E_n=16\text{MeV}$.
- ✓ Στη συνέχεια, μέσω μιας γραμμής μεταφοράς, η οποία βρίσκεται σε υψηλό κενό, η δέσμη των δευτερίων προσκρούει στο στόχο του τριτίου (CuTiT).

Στόχος CuTiT

Ο στόχος τριτίου αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο χαλκού (Cu), πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα τιτανίου (Ti) στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται το τρίτιο (T). Δεδομένου ότι η ενεργός διατομή της αντίδρασης D-T είναι μεγάλη για σχετικά μικρές ενέργειες δευτερίων ($\approx 100\text{keV}$), επιθυμούμε οι ενέργειες της δέσμης να είναι μικρές. Όσο μικρότερη, όμως, είναι η ενέργεια των δευτερίων, τόσο μικρότερη είναι και η ένταση της δέσμης που παράγεται μέσω του επιταχυντή. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό, τοποθετούνται μπροστά από τη διάταξη του στόχου (CuTiT) δύο φύλλα μολυβδαίνιου (Mo) πάχους $5\mu\text{m}$ το καθένα. Με τον τρόπο αυτό, υψηλής ενέργειας δευτέρια επιταχύνονται στον επιταχυντή, διαπερνώντας τα φύλλα Mo χάνουν μέρος της ενέργειάς τους και προσπίπτουν πλέον στον στόχο με ενέργεια ικανοποιητική ώστε η ενεργός διατομή της αντίδρασης D-T να είναι υψηλή.



Σχήμα 3.6: Στόχος CuTiT.

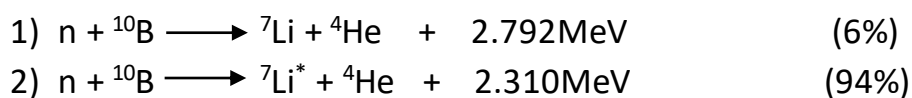
3.3 Ανίχνευση Νετρονίων

Κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης είναι σημαντική η παρακολούθηση και καταγραφή της διακύμανσης της δέσμης των νετρονίων. Καθώς όμως τα νετρόνια δεν έχουν φορτίο η ανίχνευσή τους βασίζεται στη χρήση ενός ανιχνευτή BF₃ και ενός αμπερομέτρου.

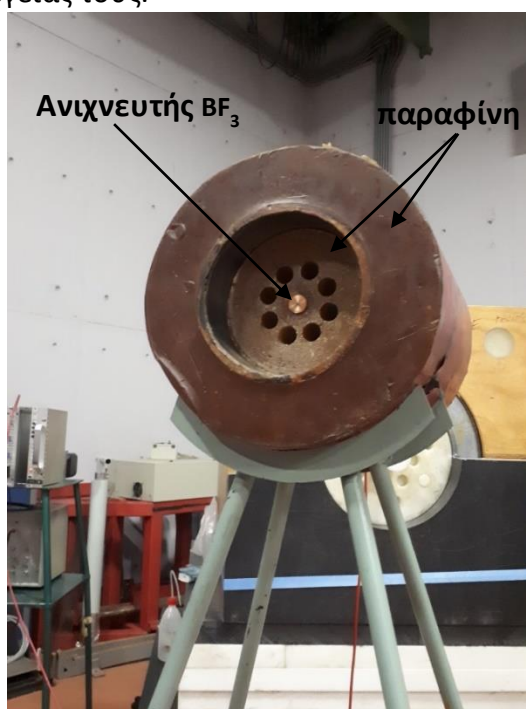
- **Ανιχνευτής BF₃**

Τα νετρόνια αντιδρούν με το βόριο (B) του ανιχνευτή και παράγονται πυρήνες ⁴He και ⁷Li (βασική κατάσταση) και ⁷Li* (διεγερμένη κατάσταση), οι οποίοι ανιχνεύονται καθώς χάνουν ενέργεια μέσα στο αέριο. Από την αντίδραση αυτή, περίπου το 6% των συνολικών αντιδράσεων οδηγούν στην βασική κατάσταση, ενώ από το 94% των αντιδράσεων προκύπτει ο διεγερμένος πυρήνας, ο οποίος στη συνέχεια αποδιεγείρεται δίνοντας ακτίνα-γ ενέργειας 0.48MeV με διάρκεια ζωής τ≈10⁻³ s.

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι ακόλουθες [12]:

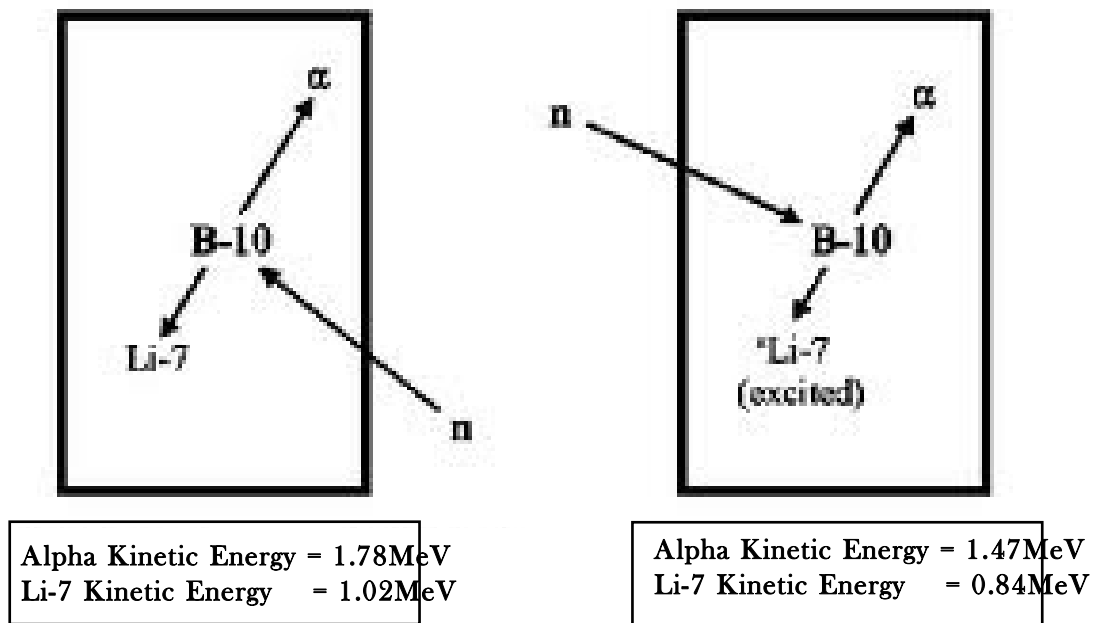


Οι αντιδράσεις αυτές, όμως, έχουν μεγάλη ενεργό διατομή για θερμικά νετρόνια (0.025eV), γεγονός που καθιστά τον ανιχνευτή BF₃ ευαίσθητο σε νετρόνια χαμηλών ενεργειών. Αντιθέτως, η απόδοση του ανιχνευτή μειώνεται όσο η ενέργεια των νετρονίων αυξάνεται και αυτό οφείλεται στο ότι η ενεργός διατομή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ενέργειας των νετρονίων ($\sigma \sim 1/u$). Για τον λόγο αυτό, ο ανιχνευτής τοποθετείται στο κέντρο ενός μεγάλου κυλίνδρου από κατάλληλο υλικό με μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρογόνο, όπως είναι η παραφίνη (σχήμα 3.7). Τα νετρόνια σκεδάζονται από τους πυρήνες της παραφίνης χάνοντας ένα μέρος της ενέργειάς τους σε κάθε κρούση. Με τον τρόπο αυτό, τα νετρόνια που συγκρούονται με το B είναι πλέον θερμικά νετρόνια, καθώς έχουν χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους.



Σχήμα 3.7: Ανιχνευτής BF₃.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας Qvalue τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που μοιράζεται στα προϊόντα της αντίδρασης και επομένως, ο παλμός που καταγράφεται θα είναι μεγαλύτερος. Αυτό συμβαίνει, όπως συμπεραίνουμε από τις τιμές Qvalue των δύο αντιδράσεων, στην περίπτωση που ο πυρήνας ${}^7\text{Li}$ βρίσκεται στην βασική κατάσταση.



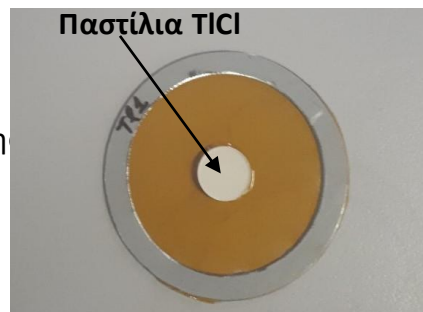
Σχήμα 3.7: Κινητικές ενέργειες προϊόντων νετρονικής αντίδρασης ${}^{10}\text{B}$ [18].

3.4 Τοποθέτηση των στόχων προς ακτινοβόληση

3.4.1 Ενέργεια ακτινοβόλησης 15.7MeV

Σε πρώτο στάδιο, καθαρίστηκαν προσεκτικά οι στόχοι που θα χρησιμοποιηθούν, έτσι ώστε να μην υπάρχουν ακαθαρσίες στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της μάζας των στόχων, χρησιμοποιώντας ζυγαριά ακριβείας και οι διαστάσεις των στόχων, χρησιμοποιώντας ψηφιακό όργανο ακριβείας.

Στο συγκεκριμένο πείραμα μελετώνται τα κανάλια εξόδου από την νετρονική ακτινοβόληση του Tl. Ως στόχος χρησιμοποιήθηκε παστίλια (pellet) **TlCl** όπου για την μετατροπή τη από σκόνη σε παστίλια χρησιμοποιήθηκε σελουλόζη $C_6H_{10}O_5$ συγκεκριμένης μάζας.



Σχήμα 3.8: Δίσκος στόχου TlCl.

Στην ίδια ακτινοβόληση μετρήθηκε και η ενεργός διατομή Ισοτόπων του Ge.

Για τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων στους στόχους προς μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν **4 στόχοι αναφοράς**:

- 2 στόχοι Au (Au_{11} και Au_x)
- 2 στόχοι Al (Al_6 και Al_7)

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι **αντιδράσεις αναφοράς**:

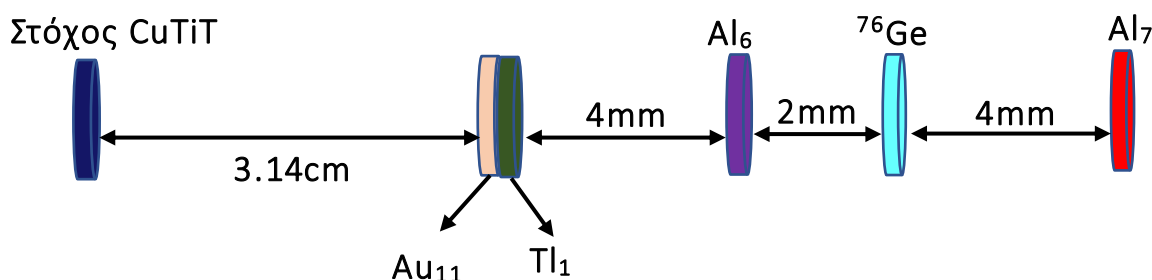
| Στόχος Αναφοράς | $\tau_{1/2}$ | $E_\gamma(\text{keV})$ | $I_\gamma(\%)$ |
|--|--------------|------------------------|----------------|
| $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ | 14.96h | 1368.63 | 100% |
| $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$ | 6.138d | 355.68 | 87% |

Πίνακας 3.1: Δεδομένα στόχων αναφοράς για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$.

Έπειτα, όλοι οι στόχοι τοποθετήθηκαν στη βάση (holder) με σκοπό την ακτινοβόλησή τους. Ο τρόπος που τοποθετήθηκαν οι στόχοι στο holder φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα (3.8)**.

Όπου οι στόχοι αναφοράς τοποθετούνται δεξιά και αριστερά από τον στόχο προς μελέτη, όπως απαιτεί η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης.

Η βάση με τους στόχους τοποθετήθηκε σε απόσταση **3.14cm** από τον στόχο του τριτίου:



Σχήμα 3.9: Τοποθέτηση στόχων στη βάση για ακτινοβόληση για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$

- Οι στόχοι που αφορούν τον στόχο προς μελέτη (TlCl), σύμφωνα με την μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης, είναι οι στόχοι που βρίσκονται μπροστά (Au₁₁) και πίσω (Al₆) από αυτόν.
- Η ακτινοβόληση διήρκησε 5 ώρες και 10 λεπτά.

Παρακάτω αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των στόχων:

| Στόχος | Πάχος±0.01 (mm) | Διάμετρος (mm) | Μάζα±0.001 (g) | Όγκος (cm ³) | Πυκνότητα (g/cm ³) |
|-------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|
| Al ₆ | 0.50 | 19.60 | 0.407 | 0.151 | 2.70 |
| Au ₁₁ | 0.27 | 12.86 | 0.677 | 0.035 | 19.32 |
| Tl ₁ * | 1.26 | 12.84 | 1.255 | 0.163 | 7.69 |
| Al ₇ | 0.50 | 19.60 | 0.407 | 0.151 | 2.70 |

Πίνακας 3.2: Δεδομένα στόχων ακτινοβόλησης, για ενέργεια E=15.7MeV.

*Όπου “Tl₁” εννοείται η παστίλια του στόχου (που περιέχει TlCl + σελουλόζη) και όχι η μάζα του φυσικού Tl.

Για τον υπολογισμό της μάζας του φυσικού Tl έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

$$\frac{m_{nat.Tl}}{M.B.(Tl^{nat})} = \frac{m_{TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη}}}{M.B.(TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη})}$$

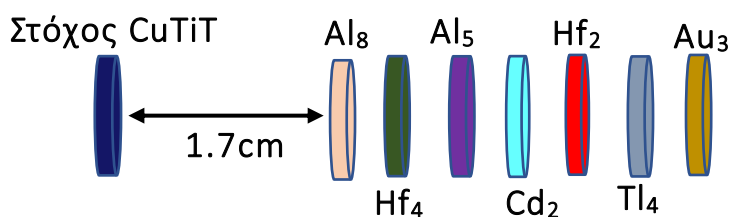
- $m_{nat.Tl} = m_{203Tl} / \text{Ισοτ. Αναλογία } (203Tl)$
- $m_{TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη}} = \text{Ποσοστό(σκόνης TlCl στην παστίλια)} * m_{\text{παστίλιας}}$

Προκύπτει:

- $m_{nat.Tl} = 1.01\text{g}$ (μάζα φυσικού Tl)
- $m_{203Tl} = 0.298\text{g}$ (μάζα ²⁰³Tl)

3.4.2 Ενέργεια ακτινοβόλησης 16MeV

Για την ακτινοβόληση σε ενέργεια **16MeV**, παράλληλα με το Tl, μετρήθηκαν και οι ενεργές διατομές των στόχων: Hf, Cd. Ο τρόπος τοποθέτησης των στόχων στη βάση (holder) φαίνεται στο **σχήμα 3.10**, ενώ στον **πίνακα 3.3** αναγράφονται τα χαρακτηριστικά όλων των στόχων.



Σχήμα 3.10: Τοποθέτηση στόχων στη βάση για ακτινοβόληση για ενέργεια E=16MeV.

| Στόχος | Πάχος±0.01 (mm) | Διάμετρος (mm) | Μάζα±0.001 (g) | Όγκος (cm ³) | Πυκνότητα (g/cm ³) |
|-------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|
| Al ₈ | 0.60 | 13.48 | 0.335 | 0.086 | 3.91 |
| Hf ₄ | 0.51 | 14.08 | 1.222 | 0.961 | 1.27 |
| Au ₃ | 0.27 | 13.38 | 0.796 | 0.038 | 20.86 |
| Tl ₄ * | 2.74 | 12.97 | 1.630 | 0.362 | 4.50 |
| Al ₅ | 0.55 | 13.83 | 0.344 | 0.083 | 4.16 |
| Cd ₂ | 1.52 | 13.82 | 2.110 | 0.228 | 9.25 |
| Hf ₂ | 0.54 | 13.02 | 0.962 | 0.072 | 13.38 |

Πίνακας 3.3: Δεδομένα στόχων ακτινοβόλησης, για ενέργεια E=16MeV.

*Όπου "Tl₂" εννοείται η παστίλια του στόχου (που περιέχει TlCl + σελουλόζη) και όχι η μάζα του φυσικού Tl.

Για τον υπολογισμό της μάζας του φυσικού Tl έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

$$\frac{m_{nat.Tl}}{M.B.(Tl^{nat})} = \frac{m_{TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη}}}{M.B.(TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη})}$$

- $m_{nat.Tl} = m_{203Tl} / \text{Ισοτ.Αναλογία } (203Tl)$
- $m_{TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη}} = \text{Ποσοστό(σκόνης TlCl στην παστίλια)} * m_{\text{παστίλιας}}$

Προκύπτει:

- $m_{nat.Tl} = 1.27\text{g}$ (μάζα φυσικού Tl)
- $m_{203Tl} = 0.375\text{g}$ (μάζα ²⁰³Tl)

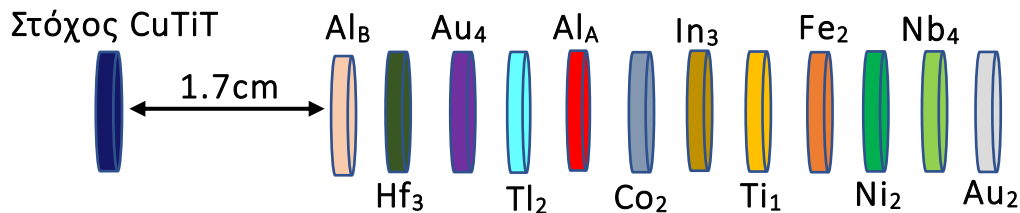
Ως στόχοι αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω αντιδράσεις:

| Στόχος Αναφοράς | τ _{1/2} | Eγ(keV) | Ιγ(%) |
|---|------------------|---------|-------|
| ²⁷ Al(n,α) ²⁴ Na | 14.96h | 1368.63 | 100% |
| ¹⁹⁷ Au(n,2n) ¹⁹⁶ Au | 6.138d | 355.68 | 87% |

Πίνακας 3.4: Δεδομένα στόχων αναφοράς για ενέργεια E=16MeV.

3.4.3 Ενέργεια ακτινοβολήσης 18MeV

Για την ακτινοβολήση σε ενέργεια **18MeV**, παράλληλα με το **Tl**, μετρήθηκαν και οι ενεργές διατομές των στόχων: **Hf, Co, In, Ti, Fe, Ni**. Ο τρόπος τοποθέτησης των στόχων στη βάση (holder) φαίνεται στο **σχήμα 3.11**, ενώ στον **πίνακα 3.5** αναγράφονται τα χαρακτηριστικά όλων των στόχων.



Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση στόχων στη βάση για ακτινοβολήση για ενέργεια $E=18\text{MeV}$.

| Στόχος | Πάχος ± 0.01 (mm) | Διάμετρος (mm) | Μάζα ± 0.001 (g) | Όγκος (cm^3) | Πυκνότητα (g/cm^3) |
|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------|---|
| Al _B | 0.51 | 14.42 | 0.221 | 0.083 | 2.66 |
| Hf ₃ | 0.50 | 13.02 | 0.829 | 0.067 | 12.37 |
| Au ₄ | 0.29 | 13.08 | 0.665 | 0.039 | 17.05 |
| Tl ₂ * | 2.00 | 12.82 | 1.224 | 0.258 | 4.74 |
| Al _A | 0.51 | 14.33 | 0.221 | 0.082 | 2.69 |
| Co ₂ | 0.22 | 14.21 | 0.324 | 0.035 | 9.26 |
| In ₃ | 1.02 | 13.48 | 1.002 | 0.144 | 6.96 |
| Ti ₁ | 0.29 | 14.30 | 0.188 | 0.046 | 4.09 |
| Fe ₂ | 0.51 | 14.95 | 0.692 | 0.089 | 7.77 |
| Ni ₂ | 0.29 | 14.25 | 0.358 | 0.046 | 7.78 |
| Nb ₄ | 0.32 | 14.18 | 0.341 | 0.049 | 6.96 |
| Au ₂ | 0.51 | 14.19 | 1.513 | 0.080 | 18.91 |

Πίνακας 3.5: Δεδομένα στόχων ακτινοβολήσης, για ενέργεια $E=18\text{MeV}$.

*Όπου "Tl₂" εννοείται η παστίλια του στόχου (που περιέχει TlCl + σελουλόζη) και όχι η μάζα του φυσικού Tl.

Για τον υπολογισμό της μάζας του φυσικού Tl έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

$$\frac{m_{nat.Tl}}{M.B.(Tl^{nat})} = \frac{m_{TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη}}}{M.B.(TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη})}$$

- $m_{nat.Tl} = m_{203Tl} / \text{Ισοτ.Αναλογία } (203Tl)$
- $m_{TlCl \text{ χωρίς σελουλόζη}} = \text{Ποσοστό(σκόνης TlCl στην παστίλια)} * m_{\text{παστίλιας}}$

Προκύπτει:

- $m_{nat.Tl} = 0.98\text{g}$ (μάζα φυσικού Tl)
- $m_{203Tl} = 0.29\text{g}$ (μάζα ^{203}Tl)

Ως στόχοι αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω αντιδράσεις:

| Στόχος Αναφοράς | $\tau_{1/2}$ | E _γ (keV) | I _γ (%) |
|--|--------------|----------------------|--------------------|
| $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ | 14.96h | 1368.63 | 100% |
| $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$ | 6.138d | 355.68 | 87% |
| $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nd}$ | 10.15d | 934.46 | 99% |

Πίνακας 3.6: Δεδομένα στόχων αναφοράς για ενέργεια E=18MeV.

3.5 Ανιχνευτής Υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe)

Μετά το τέλος της ακτινοβόλησης, και με σκοπό την μέτρηση των ακτίνων- γ (N_γ) που προκύπτουν από την αποδιέγερση των παραχθέντων πυρήνων χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές υπερκαθαρού Ge (HPGe).

Τρόπος κατασκευής HPGe

Ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχει ο κρύσταλλος του Ge, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- ανιχνευτές τύπου “p” (p-type), οι οποίοι περιέχουν παραμένουσες προσμίξεις από στοιχεία με σθένος 3 (π.χ. γάλλιο)
- ανιχνευτές τύπου “n” (n-type), οι οποίοι περιέχουν παραμένουσες προσμίξεις από στοιχεία με σθένος 5 (π.χ. φωσφόρος).

Ενώνοντας έναν κρύσταλλο τύπου p με έναν κρύσταλλο τύπου n σχηματίζεται μια επαφή p-n. Εφαρμόζοντας υψηλή τάση στα άκρα του κρυστάλλου, οπές τις περιοχές p διαχέονται προς την περιοχή n και ηλεκτρόνια της περιοχής n διαχέονται προς την περιοχή p. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων στο κέντρο του κρυστάλλου, δημιουργώντας μια περιοχή (περιοχή απογύμνωσης) ελεύθερη από φορείς n και p. Με τον τρόπο αυτό, οι περιοχές p και n συρρικνώνονται και όσο μεγαλύτερη είναι η τάση ή/και η καθαρότητα του κρυστάλλου (λιγότερες προσμίξεις), τόσο μεγαλύτερη είναι και η συρρίκνωση που θα υποστούν οι δύο περιοχές, αυξάνοντας την περιοχή απογύμνωσης, αλλά και τον ενεργό όγκο του κρυστάλλου - ο όγκος στον οποίο όταν εισέρχεται ένα ηλεκτρόνιο ανιχνεύεται.

Επομένως, λόγω του τρόπου κατασκευής του ανιχνευτή, ο ανιχνευτής γερμανίου αποτελείται από τις ακόλουθες **δύο περιοχές** [13]:

1) Την ενδογενή (intrinsic region) ή ενεργή περιοχή του ανιχνευτή, η οποία ταυτίζεται με την περιοχή απογύμνωσης όπου πραγματοποιείται ολοκληρωμένη αντιστάθμιση των προσμίξεων και δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς φορτίου. Στην περιοχή αυτή παράγεται σήμα, από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας (ακτίνων- γ ή ακτίνων-X) μέσω των τριών μηχανισμών: φωτοηλεκτρικού φαινομένου, της σκέδασης Compton και της δίδυμης γένεσης, με αποτέλεσμα την ανίχνευση της συγκεκριμένης ακτινοβολίας.

2) Τη νεκρή ή ανενεργή (inactive germanium layer ή dead layer) περιοχή του ανιχνευτή, όπου οι προσμίξεις δεν έχουν αντισταθμιστεί και συνήθως περιβάλλει την ενδογενή περιοχή. Στην περιοχή αυτή, δεν είναι εφικτή η ανίχνευση φωτονίων. Επομένως, είναι η απαραίτητη η μέγιστη συρρίκνωση των περιοχών p και n.

Χρησιμοποιούνται ευρέως στην φασματοσκοπία- γ για τους εξής λόγους:

- Πρόκειται για ανιχνευτές υψηλής καθαρότητας καθώς περιέχουν προσμίξεις σε πολύ μικρό ποσοστό και ανήκουν στην κατηγορία των ημιαγωγικών ανιχνευτών [13].
- το Ge έχει υψηλό Z (32) σε σύγκριση με ένα άλλο ευρέως χρησιμοποιούμενο ημιαγωγικό στοιχείο, το Si (πυρίτιο) (14), και συνεπώς μεγαλύτερη ενεργό διατομή για φωτοηλεκτρική απορρόφηση,
- έχουν πολύ καλύτερη ενεργειακή ανάλυση, σε σύγκριση με τους ανιχνευτές σπινθηρισμού, λόγω της χαμηλής ενέργειας ιονισμού (3 eV). Για τον λόγο αυτό, διατηρείται στην επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας που είναι οι 77K, καθώς υπό διαφορετικές συνθήκες παράγεται πολύ μεγάλο ρεύμα διαρροής οφειλόμενο σε διέγερση θερμικών ηλεκτρονίων. Η ψύξη των ανιχνευτών πραγματοποιείται με υγρό άζωτο [5].

3.6 Ηλεκτρονικά

Η συνδεσμολογία του ανιχνευτή Ge περιλαμβάνει:

1. **Τροφοδοτικό υψηλής τάσης (της τάξης των 10^3V):** Δημιουργεί το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, υπεύθυνο για την περιοχή απογύμνωσης και για την συλλογή των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από την πρόσπτωση ακτίνων- γ στο εσωτερικό του κρυστάλλου.
2. **Προενισχυτή:** βρίσκεται στο εσωτερικό του ανιχνευτή και ενισχύει το αρχικό σήμα που προέρχεται κατευθείαν από τον ανιχνευτή, δημιουργώντας ένα σήμα της τάξης των mV.
3. **Ενισχυτή:** ενισχύει περαιτέρω το σήμα που προέρχεται από τον προενισχυτή, το σήμα που προκύπτει είναι της τάξης των V.
4. **Σύστημα ADC/MCA:** μετατρέπει το σήμα από τον ενισχυτή σε ψηφιακή πληροφορία με τη χρήση υπολογιστή.

3.7 Απόδοση Ανιχνευτή

Με τον όρο απόδοση ενός ανιχνευτή(ϵ , detector efficiency) χαρακτηρίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας που καταγράφεται από αυτόν ανά μονάδα χρόνου και σε συγκεκριμένη απόσταση πηγής και ανιχνευτή [5].

Για φωτόνια, η ανιχνευτική ικανότητα εξαρτάται από:

- την ενέργεια των ακτίνων- γ
- τον τύπο του κρυστάλλου του ανιχνευτή
- τη γεωμετρία του συστήματος, δηλαδή το μέγεθος του κρυστάλλου, τις διαστάσεις της πηγής και την σχετική θέση πηγής- κρυστάλλου.

Η απόδοση του ανιχνευτή μπορεί να οριστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Απόλυτη Απόδοση του ανιχνευτή (Absolute/Total efficiency)
- Εσωτερική Απόδοση (Internal Peak efficiency)

Απόλυτη Απόδοση του ανιχνευτή (Absolute/Total efficiency)

Ορίζεται ως:

$$\epsilon = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}}$$

Όπου,

- **Νκορυφής:** ο αριθμός των φωτονίων που ανιχνεύθηκαν σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα έχοντας μία συγκεκριμένη ενέργεια
- **Νεκπεμπόμενα:** ο αριθμός των συνολικών φωτονίων που εξέπεμψε η πηγή στο ίδιο χρονικό διάστημα. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από τη γεωμετρία της πηγής και του ανιχνευτή.

Εσωτερική Απόδοση (Internal Peak efficiency)

Ορίζεται ως:

$$\epsilon = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εισερχόμενα}}}$$

Όπου,

- **N_{κορυφής}**: ο αριθμός των φωτονίων που ανιχνεύθηκαν σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα έχοντας μία συγκεκριμένη ενέργεια
- **N_{εισερχόμενα}**: ο αριθμός των φωτονίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή στο διάστημα αυτό.

Οι δύο αποδόσεις, για ισοτροπική πηγή, συνδέονται με τη σχέση:

$$\epsilon_{\text{εσωτερική}} = \epsilon_{\text{απόλυτη}} \cdot \frac{4\pi}{\Omega}$$

Όπου,

- **Ω**: η στερεά γωνία μεταξύ πηγής και ανιχνευτή.

Ανιχνευτική ικανότητα Ge σε σχέση με σπινθηριστή NaI

Καθώς, η απόλυτη απόδοση, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, εξαρτάται από την γεωμετρία του συστήματος δεν έχει απόλυτο χαρακτήρα και δεν χαρακτηρίζει έναν ανιχνευτή. Επομένως, για την καλύτερη περιγραφή της απόδοσης του ανιχνευτή Ge χρησιμοποιείται συχνά η έννοια της **σχετικής ανιχνευτικής ικανότητας** ενός ανιχνευτή Ge σε σχέση με την ανιχνευτική ικανότητα ενός κρυστάλλου NaI διαστάσεων 3"×3" τοποθετημένου σε απόσταση 25cm από μία πηγή ⁶⁰Co και για την φωτοκορυφή 1332.5keV ακτίνας- γ του ⁶⁰Co. Στην ίδια απόσταση από την πηγή τοποθετείται και ο ανιχνευτής Ge.

Η **σχετική ανιχνευτική ικανότητα (relative efficiency)** ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\epsilon_{\text{σχετική}} = \frac{\epsilon_{\text{απόλυτη}}(\text{Ge})}{\epsilon_{\text{απόλυτη}}(\text{NaI})} = \frac{N_{\text{κορυφής}}(\text{Ge})}{N_{\text{κορυφής}}(\text{NaI})} \quad (3.1)$$

Η απόλυτη απόδοση ενός ανιχνευτή NaI διαστάσεων 3"×3" για πηγή ⁶⁰Co με κορυφή 1332.5keV του ⁶⁰Co σε απόσταση 25cm από τον ανιχνευτή είναι γνωστή:

$$\epsilon_{\text{απόλυτη}}(\text{NaI}) \approx 1.2 \cdot 10^{-3} \quad (3.2)$$

Επομένως, υπολογίζοντας και την απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή Ge, και κάνοντας χρήση των εξισώσεων (3.1) και (3.2) μπορεί να βρεθεί η σχετική ανιχνευτική του ικανότητα ως προς αυτήν

ενός κρυστάλλου NaI. Η τιμή της κυμαίνεται από 10-120%, δηλαδή μικρότερη ή συγκρίσιμη με αυτήν ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών.

Στο πείραμα αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δύο **ανιχνευτές Ge** με σχετική ανιχνευτική ικανότητα **80%**.

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι υπολογισμοί που έγιναν με σκοπό τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης.

4.1 Τρόπος Υπολογισμού Διορθωτικών Παραγόντων

Ο υπολογισμός της ενεργού διατομής προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{N_p}{N_t} \cdot \frac{1}{\Phi} \quad (4.1)$$

Όπου,

- N_p : το πλήθος των πυρήνων που παράχθηκαν από τη δέσμη στο χρόνο tB .
- N_t : το πλήθος των πυρήνων του στόχου που ακτινοβολήθηκε.
- Φ : η συνολική ροή των νετρονίων που προσέπεσαν στο στόχο κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης.

Αναλυτικότερα, το πλήθος των πυρήνων N_p που παράγονται από τη δέσμη δίνεται από τη σχέση:

$$N_p = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot f_c} \quad (4.2)$$

Όπου,

- $N\gamma$: ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, που υπολογίζεται με ολοκλήρωση των κορυφών στο φάσμα του δείγματος μετά την ακτινοβολήση.
- ϵ : η απόλυτη απόδοση του κάθε ανιχνευτή για τις ενέργειες των φωτοκορυφών που αναλύονται κάθε φορά.
- F : διορθωτικός παράγοντας για την εκτεταμένη γεωμετρία της μέτρησης και την ενδοαπορρόφηση στα υλικά του στόχου.
- $I\gamma$: η ένταση των ακτινών-γ.
- D : διορθωτικός παράγοντας μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη η αποδιέγερση των παραχθέντων πυρήνων, από το πέρας της ακτινοβολήσης, μέχρι το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας.

Παρακάτω γίνεται αναλυτικός υπολογισμός των διορθωτικών παραγόντων και όλων των υπολογισμών που απαιτούνται για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης.

Υπολογισμός διορθωτικού παράγοντα D

Ο διορθωτικός παράγοντας D λαμβάνει υπόψη την αποδιέγερση των παραχθέντων πυρήνων μετά το τέλος της ακτινοβολήσης και για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η μέτρηση.

Από τον ορισμό της ενεργότητας, ο ρυθμός αποδιέγερσης $\frac{dN}{dt}$ (διασπάσεις ανά μονάδα χρόνου) των ασταθών πυρήνων που προκύπτουν κατά την ακτινοβόληση δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

Όπου,

- N : ο ολικός αριθμός των πυρήνων που παράγονται κατά την ακτινοβόληση.
- λ : σταθερά αποδιέγερσης του πυρήνα. Ισχύει: $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$, με $\tau_{1/2}$: χρόνος ημιζωής του ασταθούς πυρήνα.

Ολοκληρώνοντας τη σχέση ως προς t , προκύπτει:

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} &= -\int_0^t \lambda \cdot N dt \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_0^t dt \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow [\ln N]_{N_0}^{N(t)} &= -\lambda \cdot [t]_0^t \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln[N(t)] - \ln N_0 &= -\lambda \cdot (t - 0) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln \left[\frac{N(t)}{N_0} \right] &= -\lambda \cdot t \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{N(t)}{N_0} &= e^{-\lambda \cdot t} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow N(t) &= N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \end{aligned}$$

Όπου,

- $N(t)$: ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων μετά την πάροδο χρόνου t .
- N_0 : ο αρχικός πληθυσμός των ασταθών πυρήνων.

Στον ίδιο χρόνο t , ο αριθμός των πυρήνων που έχουν αποδιεγερθεί δίνεται από την σχέση:

$$N(t) = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

Επομένως, αν από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης της ενεργότητας παρήλθε χρόνος t_1 , τότε στον χρόνο αυτό ο αριθμός των πυρήνων N_1 που αποδιεγέρθηκαν είναι:

$$N_1 = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_1}), \text{ όπου: } t_1 = (\text{αρχή μέτρησης ενεργότητας}) - (\text{τέλος ακτινοβόλησης}).$$

Και αν από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την τέλος της μέτρησης της ενεργότητας παρήλθε χρόνος t_2 , τότε στον χρόνο αυτό ο αριθμός των πυρήνων N_2 που αποδιεγέρθηκαν είναι:

$$N_2 = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_2}), \quad \text{όπου: } t_2 = (\text{τέλος μέτρησης ενεργότητας}) - (\text{τέλος ακτινοβολήσης}) = t_1 + (\text{διάρκεια μέτρησης}).$$

Επομένως, για χρονικό διάστημα $t=t_2-t_1$, ο αριθμός των πυρήνων N_γ που αποδιεγέρθηκαν είναι:

$$\begin{aligned} N_\gamma = N_2 - N_1 &\Leftrightarrow N_\gamma = N_0 \cdot [(1 - e^{-\lambda \cdot t_2}) - (1 - e^{-\lambda \cdot t_1})] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow N_\gamma = N_0 \cdot [e^{-\lambda \cdot t_1} - e^{-\lambda \cdot t_2}] \end{aligned}$$

Ορίζουμε, λοιπόν, τον διορθωτικό παράγοντα D ως:

$$D = e^{-\lambda \cdot t_1} - e^{-\lambda \cdot t_2} \quad (4.3)$$

Υπολογισμός διορθωτικού παράγοντα f_c

Ο διορθωτικός παράγοντας f_c υπολογίζεται, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, μέσω της σχέσης:

$$f_c = \frac{\int_0^{t_B} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} \quad (4.4)$$

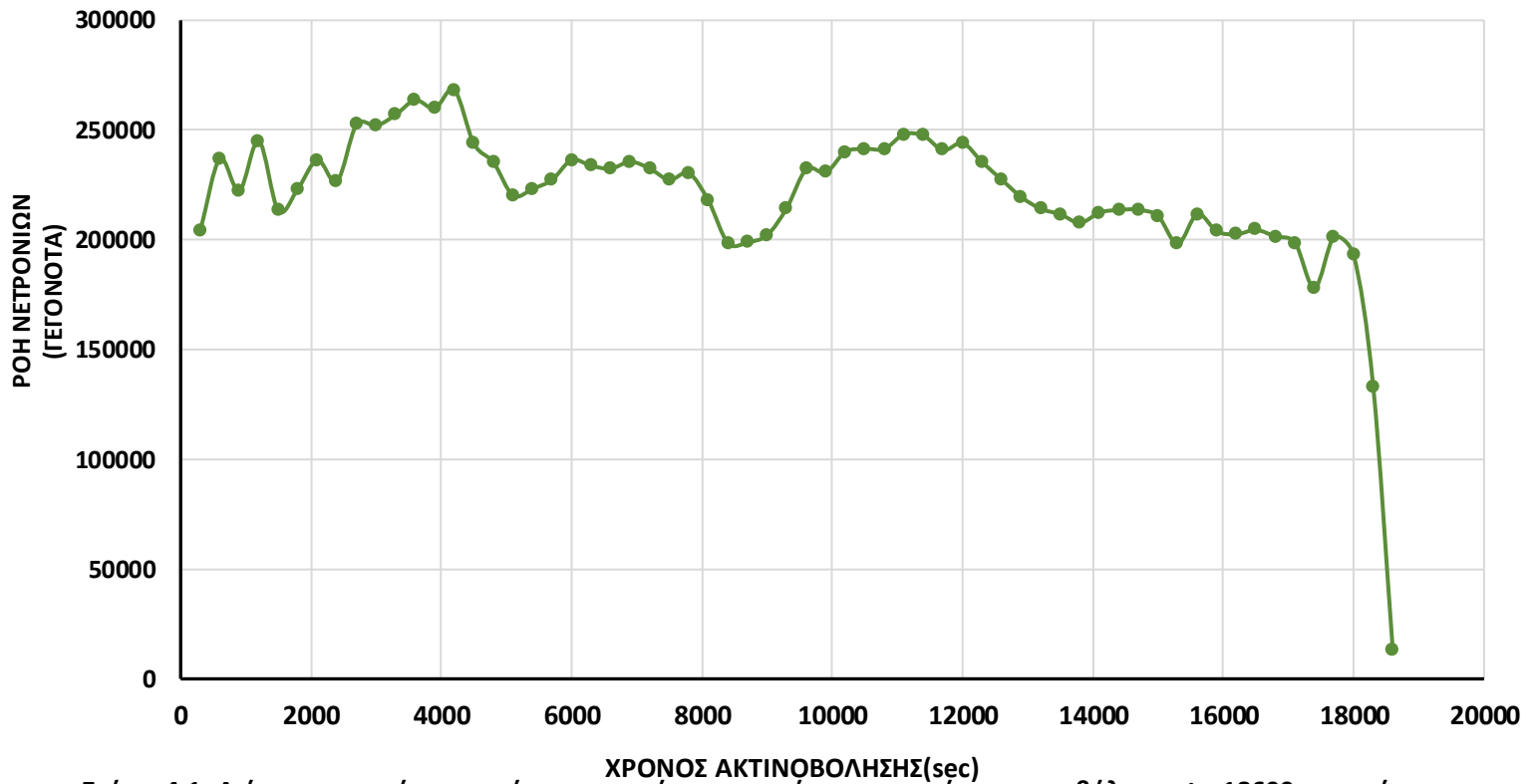
Όπου:

- λ : η σταθερά αποδιέγερσης του πυρήνα
- $f(t)$: η ροή των νετρονίων της δέσμης, συναρτήσεως του χρόνου
- t_B : η χρονική διάρκεια της ακτινοβολήσης

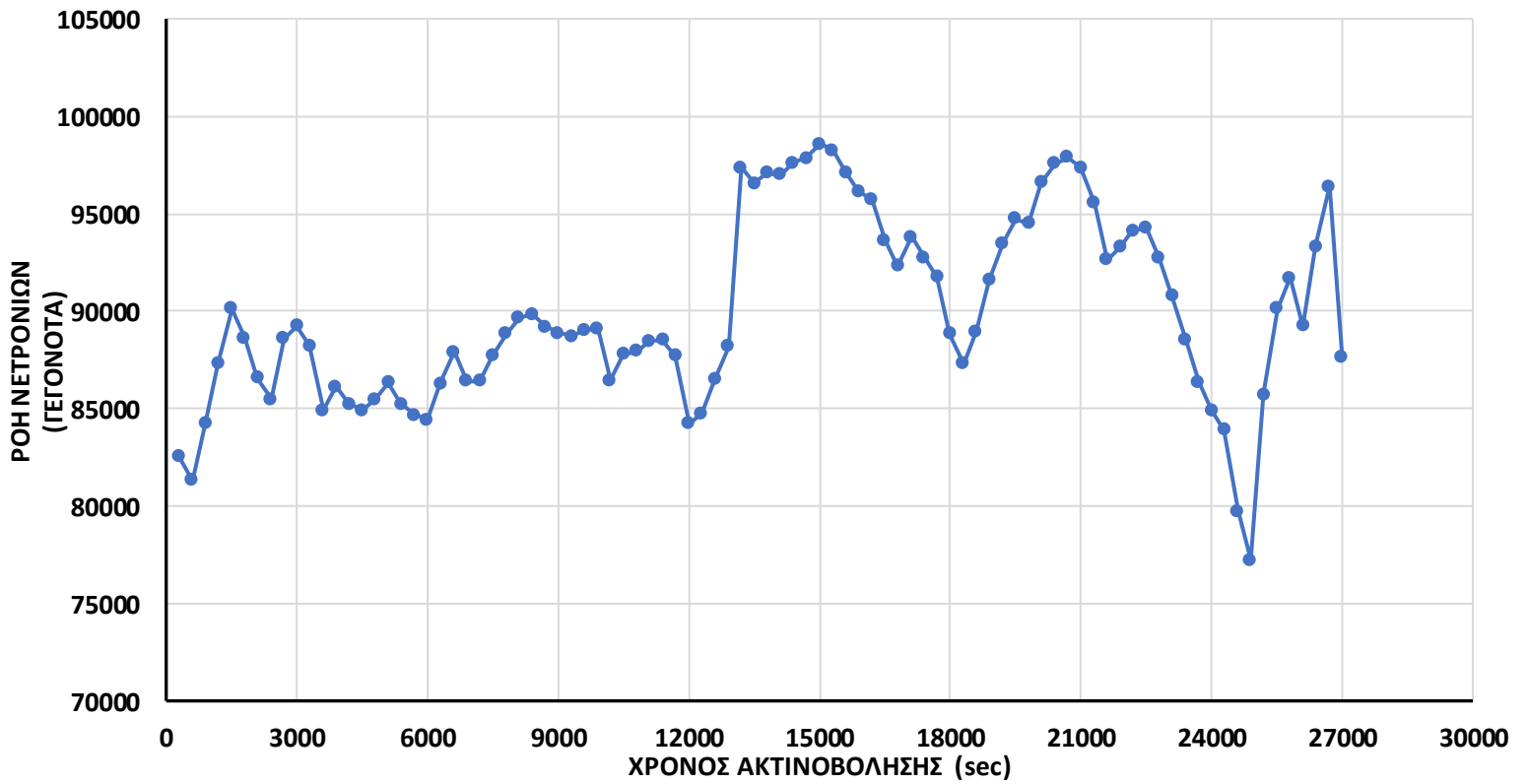
Μέσω αυτού λαμβάνεται υπόψη το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και την αποδιέγερση των παραχθέντων πυρήνων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης.

Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται το φάσμα από την διάταξη ελέγχου της δέσμης που προκύπτει μέσω του ανιχνευτή BF_3 και η διάταξη του οποίου περιεγράφηκε στην ενότητα (3.3). Τα ολοκληρώματα στην σχέση (4.4) υπολογίζονται αριθμητικά από τα αντίστοιχα αθροίσματα πάνω στα κανάλια του φάσματος των διακυμάνσεων.

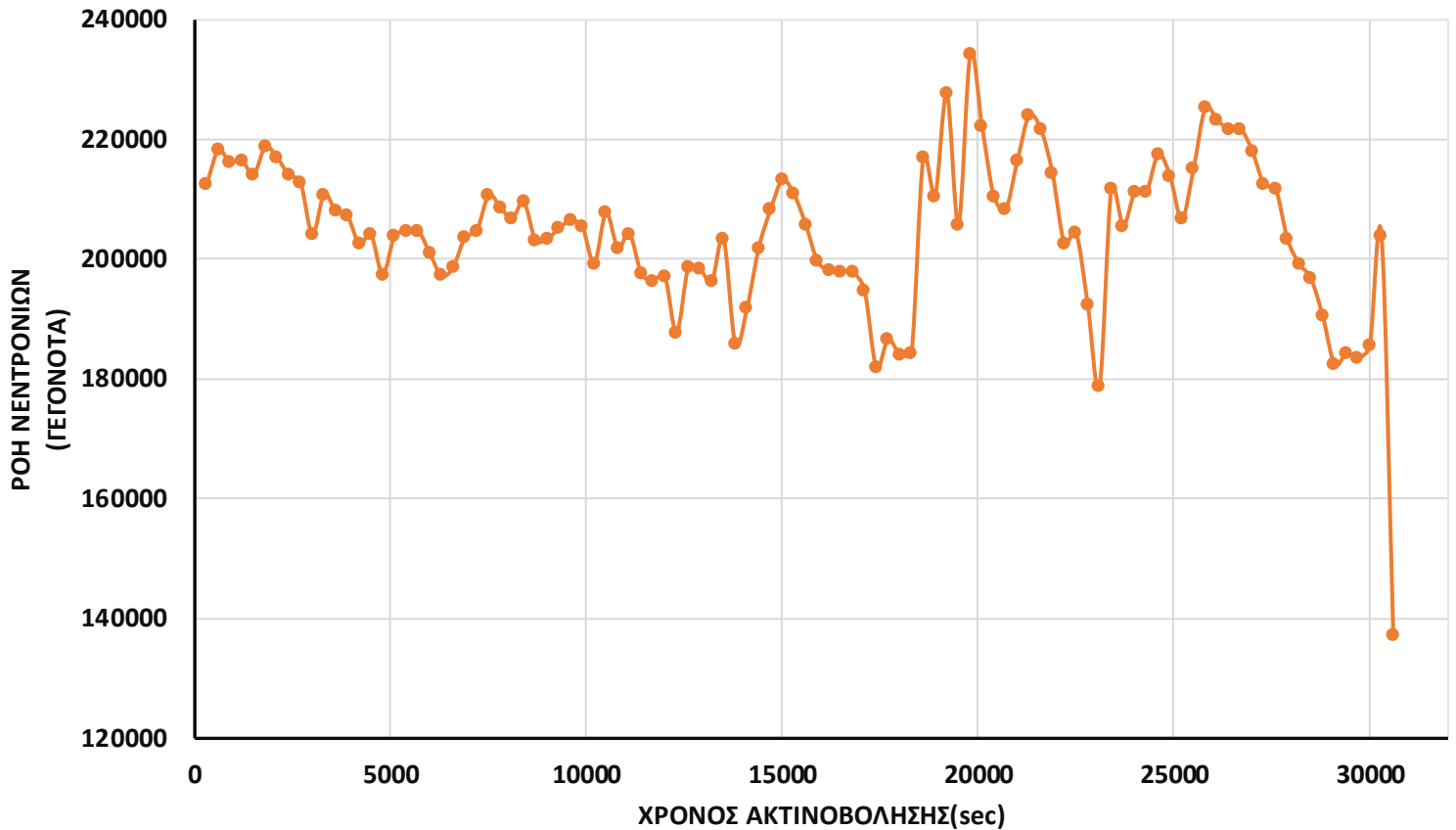
Στα παρακάτω σχήματα (4.1) και (4.2) φαίνονται τα διαγράμματα ροής νετρονίων για τις δύο διαφορετικές ακτινοβολήσεις σε ενέργειες νετρονίων $E=15.7\text{MeV}$ και $E=18\text{MeV}$ και αντίστοιχα για χρόνους ακτινοβολήσης $t_B=18600\text{s}$ και $t_B=27000\text{s}$.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής νετρονίων συναρτήσει του χρόνου, για χρόνο ακτινοβολήσης $t_B=18600s$ με ενέργεια νετρονίων $E=15.7MeV$.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής νετρονίων συναρτήσει του χρόνου, για χρόνο ακτινοβολήσης $t_B=27000s$ με ενέργεια νετρονίων $E=18MeV$.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής νετρονίων συναρτήσει του χρόνου, για χρόνο ακτινοβόλησης $t_B=30600s$ με ενέργεια νετρονίων $E=16MeV$.

Υπολογισμός διορθωτικού παράγοντα F

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x} \quad (4.5)$$

Όπου:

- μ_0 : ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης (cm^2/gr)
- ρ : η πυκνότητα του υλικού (gr/cm^3)
- x : το μισό πάχος του δείγματος

Υπολογισμός παράγοντα N_t

Ο υπολογισμός του παράγοντα N_t , γίνεται μέσω της σχέσης (2.2): $N_t = \frac{m \cdot N_A \cdot K}{AB}$

4.2 Υπολογισμός Ενεργού Διατομής για ενέργεια $E=18\text{MeV}$ και $E=16\text{MeV}$

Υπολογισμός απόδοσης ανιχνευτή

Στο συγκεκριμένο πείραμα, με σκοπό την μέτρηση της ενεργότητας των πηγών χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές με σχετική ανιχνευτική ικανότητα 80%.

Για τον προσδιορισμό της απόλυτης απόδοσης και των δύο ανιχνευτών χρησιμοποιήθηκε σημειακή πηγή ^{152}Eu . Τα χαρακτηριστικά της πηγής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| | |
|--|-----------------------|
| Ημερομηνία κατασκευής | 01/01/2011 |
| Αρχική Ενεργότητα ($R_0 \pm \delta R_0$) | 217 ± 3 (kBq) |
| Χρόνος Ημιζωής $\tau_{1/2}$ | $4.26\text{E}+08$ (s) |

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά πηγής ^{152}Eu

Και για τους δύο ανιχνευτές η πηγή τοποθετήθηκε σε **απόσταση $\approx 10\text{cm}$** .

Οι **χρόνοι λήψης του φάσματος** για τον ανιχνευτή Α και Β είναι αντίστοιχα 900s και 1200s. Κάνοντας χρήση του προγράμματος *tn* αναλύθηκαν συγκεκριμένες κορυφές του φάσματος που αντιστοιχούν σε κάποιες χαρακτηριστικές ακτίνες- γ του ^{152}Eu . Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

| $E_\gamma(\text{keV})$ | I_γ | Ανιχνευτής Α | | | Ανιχνευτής Β | | |
|------------------------|------------|----------------|------------------------|------|-----------------|------------------------|------|
| | | Live time=900s | | | Live time=1200s | | |
| | | N γ | $\delta\text{N}\gamma$ | FWHM | N γ | $\delta\text{N}\gamma$ | FWHM |
| 121.78 | 28.58 | 610357 | 808 | 2.40 | 824273 | 941 | 2.75 |
| 244.7 | 7.6 | 113346 | 398 | 2.63 | 150530 | 446 | 2.97 |
| 344.28 | 26.5 | 328191 | 583 | 2.83 | 437079 | 686 | 3.18 |
| 367.79 | 0.9 | 10680 | 150 | 3.05 | 14264 | 200 | 3.43 |
| 411.12 | 2.2 | 23600 | 184 | 2.99 | 31963 | 219 | 3.43 |
| 443.96 | 3.1 | 30796 | 233 | 3.06 | 41391 | 258 | 3.41 |
| 778.9 | 12.9 | 88248 | 318 | 3.96 | 118508 | 370 | 4.24 |
| 867.37 | 4.2 | 26287 | 196 | 4.35 | 35874 | 197 | 4.69 |
| 964.08 | 14.6 | 83512 | 303 | 4.50 | 114129 | 355 | 4.82 |
| 1212.95 | 1.4 | 7045 | 123 | 5.21 | 9374 | 129 | 5.60 |
| 1299.1 | 1.6 | 7517 | 100 | 5.71 | 10397 | 99 | 6.04 |

| | | | | | | | |
|------|----|-------|-----|------|--------|-----|------|
| 1408 | 21 | 97564 | 316 | 5.68 | 127829 | 361 | 6.09 |
|------|----|-------|-----|------|--------|-----|------|

Πίνακας 4.2: Υπολογισμός των καταγεγραμμένων γεγονότων(Nγ) από τους ανιχνευτές A και B και του FWHM ύστερα από ανάλυση συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu .

Το φάσμα λήφθηκε στις **3/4/2023 5:07:00 PM**, επομένως από την ημέρα κατασκευής της πηγής παρήλθε χρόνος **t= 381258420s**.

Σύμφωνα με τον ορισμό της ενεργότητας προκύπτει: $R = R_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, όπου: $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$ και με διάδοση σφαλμάτων προκύπτει το σφάλμα της ενεργότητας: $\delta R = \delta R_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

Επομένως, η τιμή της ενεργότητας την ημέρα λήψης του φάσματος ισούται με:

$$R \pm \delta R = 117010 \pm 1618 \text{ (Bq) ή (διασπάσεις/sec)}$$

Για την χρονική διάρκεια της μέτρησης (live time) οι διασπάσεις είναι:

$$R' \pm \delta R' = (R \pm \delta R) \cdot (\text{live time}), \text{ με live time} = 1200\text{s.}$$

Κατά την διάρκεια λήψης του φάσματος, το πλήθος των ακτινών-γ που παράγονται από την πηγή του ^{152}Eu ισούται με:

$$N_{\text{εκπεμπόμενα}} = R' \cdot \frac{I\gamma}{100}$$

Με σφάλμα που προκύπτει από διάδοση σφαλμάτων: $\delta N_{\text{εκπεμπόμενα}} = \delta R' \cdot \frac{I\gamma}{100}$

Ενώ, η απόδοση (ε) του ανιχνευτή δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} = \frac{N_{\gamma}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}}$$

Με σφάλμα που προκύπτει από διάδοση σφαλμάτων:

$$\delta \varepsilon = \left[\left(\frac{1}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} \cdot \delta N_{\gamma} \right)^2 + \left(-\frac{N_{\gamma}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}^2} \cdot \delta N_{\text{εκπεμπόμενα}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| Eγ(keV) | Iγ | Ανιχνευτής A | | | Ανιχνευτής B | | |
|---------|-------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| | | Live time=900s | | | Live time=1200s | | |
| | | $N_{\text{εκπεμπ}}$ | $\varepsilon \cdot 10^{-3}$ | $\delta \varepsilon \cdot 10^{-3}$ | $N_{\text{εκπεμπ}}$ | $\varepsilon \cdot 10^{-3}$ | $\delta \varepsilon \cdot 10^{-3}$ |
| 121.78 | 28.58 | 30097291 | 20.28 | 0.28 | 40129722 | 20.54 | 0.28 |

| | | | | | | | |
|---------|------|----------|-------|------|----------|-------|------|
| 244.7 | 7.6 | 8003478 | 14.16 | 0.20 | 10671305 | 14.11 | 0.20 |
| 344.28 | 26.5 | 27906866 | 11.76 | 0.16 | 37209154 | 11.75 | 0.16 |
| 367.79 | 0.9 | 947780.3 | 11.27 | 0.22 | 1263707 | 11.29 | 0.22 |
| 411.12 | 2.2 | 2316796 | 10.19 | 0.16 | 3089062 | 10.34 | 0.16 |
| 443.96 | 3.1 | 3264577 | 9.43 | 0.15 | 4352769 | 9.50 | 0.14 |
| 778.9 | 12.9 | 13584852 | 6.50 | 0.09 | 18113136 | 6.54 | 0.09 |
| 867.37 | 4.2 | 4422975 | 5.94 | 0.09 | 5897300 | 6.08 | 0.09 |
| 964.08 | 14.6 | 15375103 | 5.43 | 0.08 | 20500138 | 5.57 | 0.08 |
| 1212.95 | 1.4 | 1474325 | 4.78 | 0.11 | 1965767 | 4.77 | 0.09 |
| 1299.1 | 1.6 | 1684943 | 4.46 | 0.09 | 2246590 | 4.63 | 0.08 |
| 1408 | 21 | 22114875 | 4.41 | 0.06 | 29486500 | 4.33 | 0.06 |

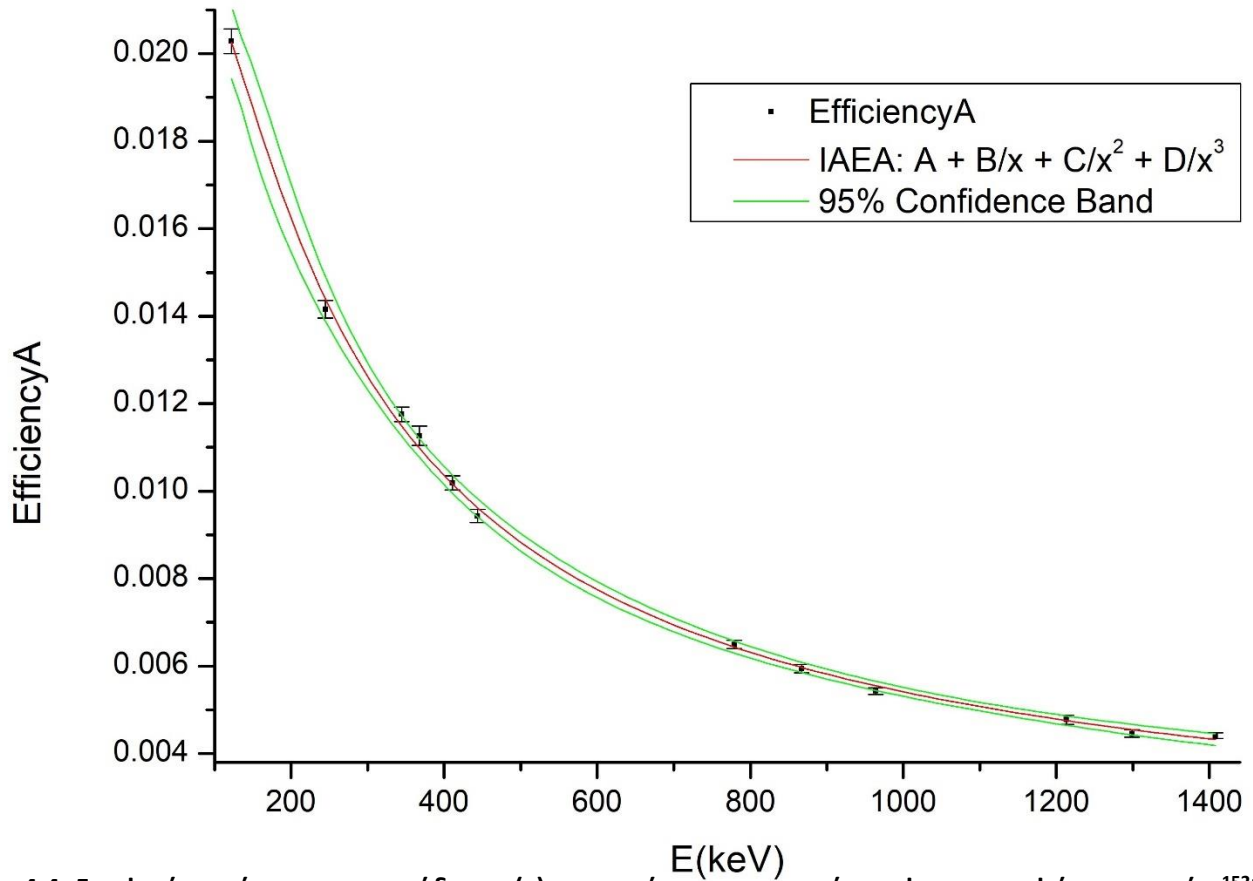
Πίνακας 4.3: Υπολογισμός απόδοσης ανιχνευτών Α και Β.

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της απόδοσης(ε) συναρτήσει των φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu και για τους δύο ανιχνευτές.

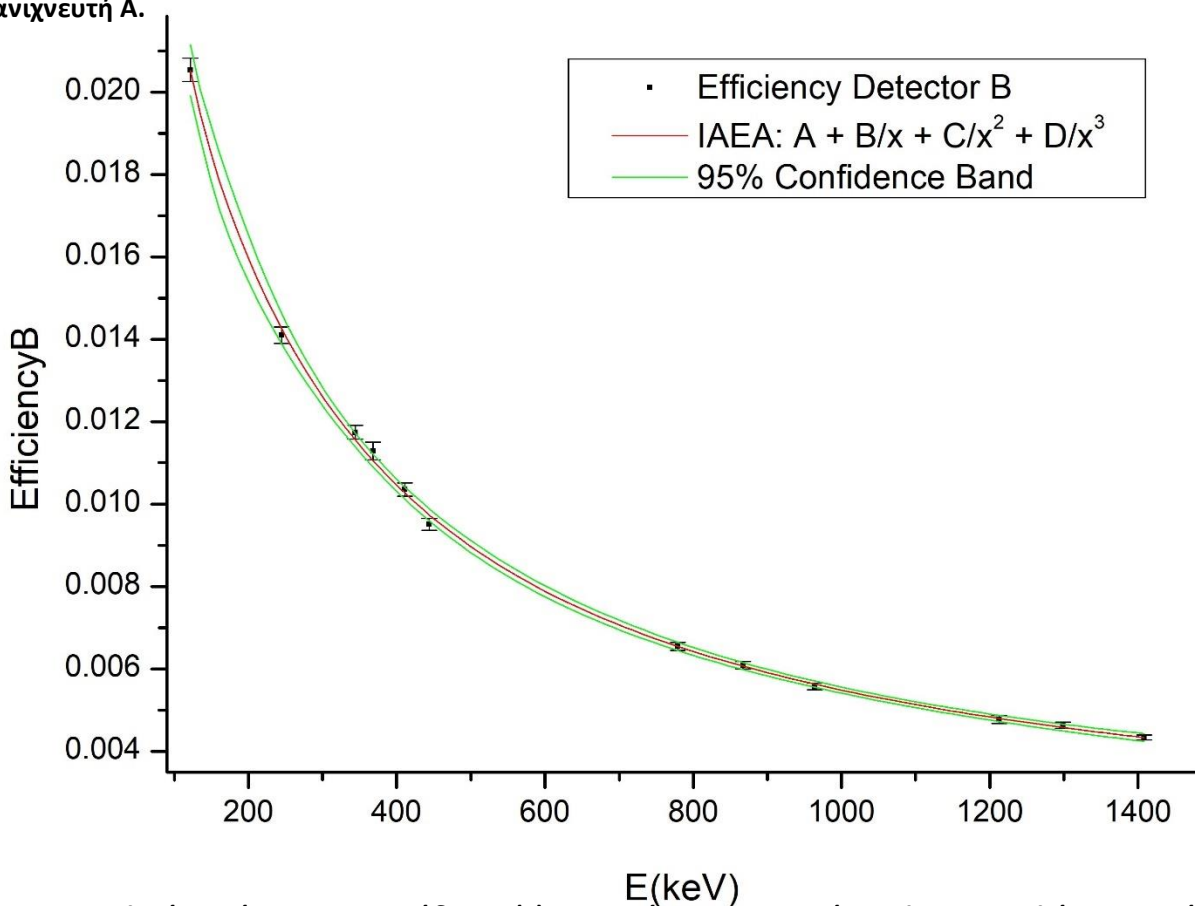
Και στις δύο γραφικές παραστάσεις, η προσομοίωση των καμπυλών που προέκυψαν έγινε με χρήση της εξίσωσης της **IAEA**: $A + \frac{B}{x} + \left(\frac{C}{x^2}\right) + \left(\frac{D}{x^3}\right)$ χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα «OriginPro 8.5».

Οι συντελεστές "A,B,C,D" υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος και δίνονται στον παρακάτω πίνακα για τους δύο ανιχνευτές:

| | Ανιχνευτής Α | Ανιχνευτής Β |
|----------|---------------------|---------------------|
| A | 0.00145 | 0.00137 |
| B | 4.23741 | 6.54538 |
| C | -285.73433 | -684.65504 |
| D | 5918.88582 | 33280.37325 |

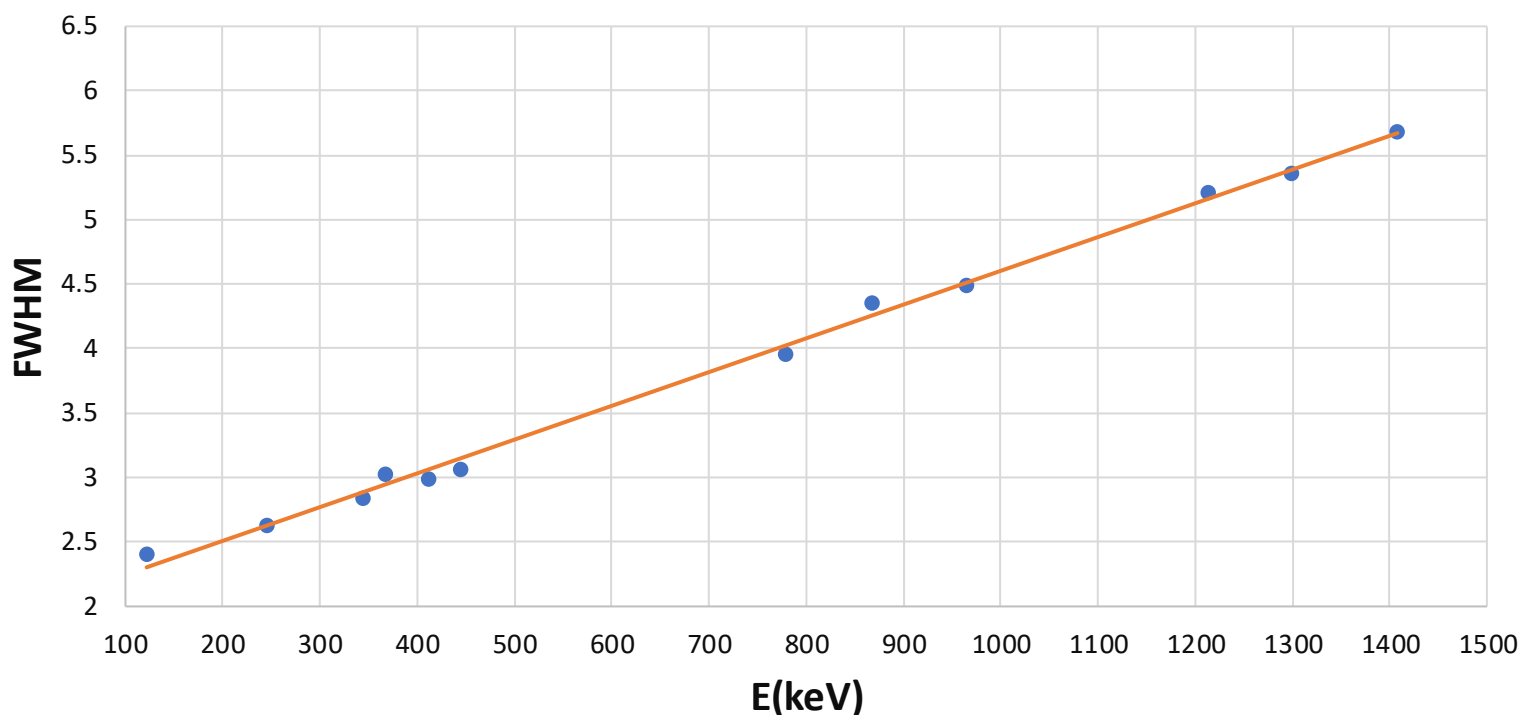


Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση της απόδοσης (ϵ) συναρτήσει συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή Α.



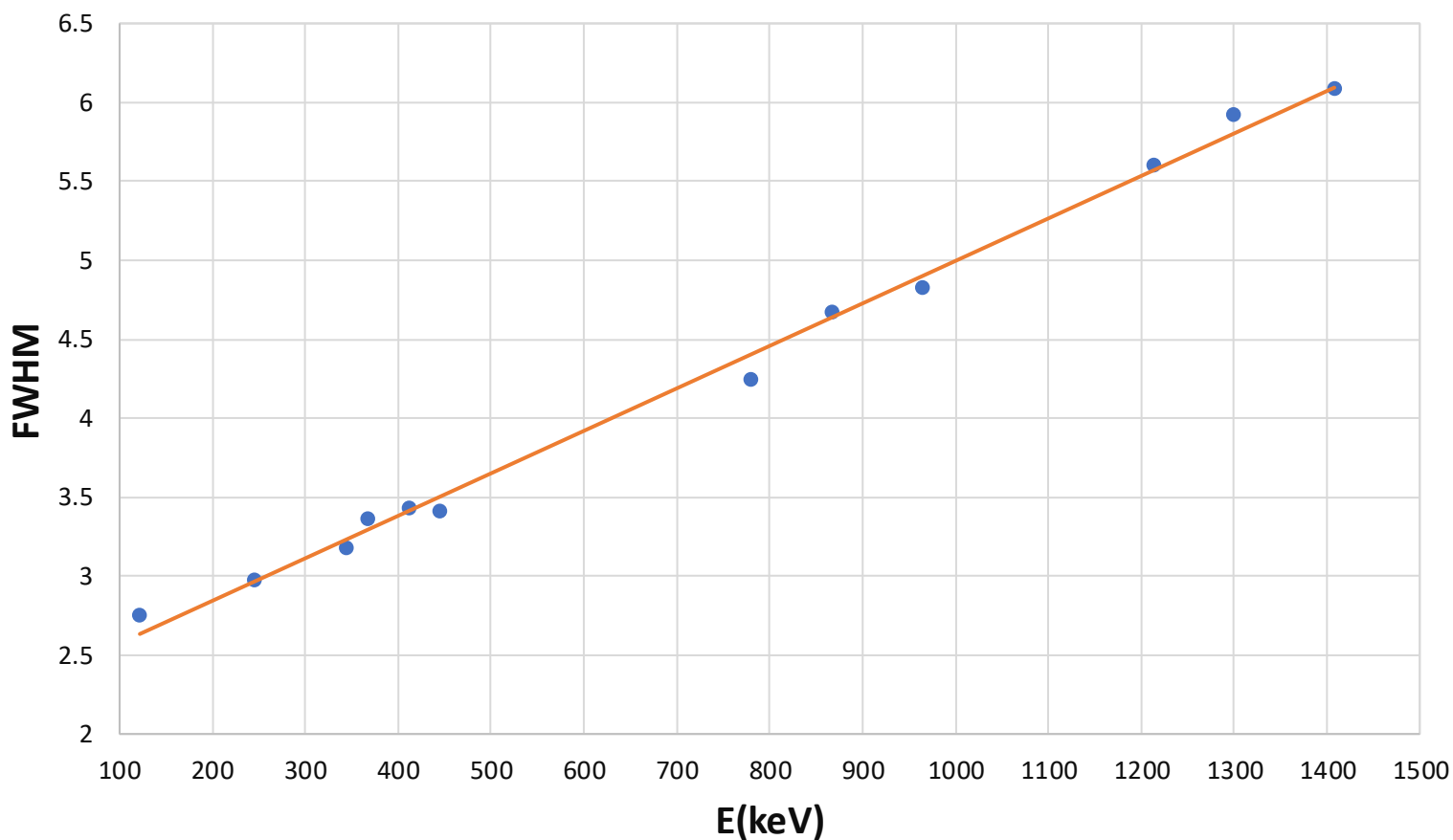
Σχήμα 4.5: Γραφική παράσταση της απόδοσης (ϵ) συναρτήσει συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή Β.

FWHM-Detector A



Σχήμα 4.6: Γραφική παράσταση του FWHM συναρτήσει συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή A.

FWHM-Detector B



Σχήμα 4.7: Γραφική παράσταση του FWHM συναρτήσει συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή A.

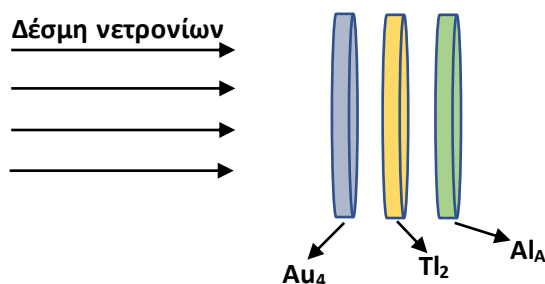
4.2.1 Υπολογισμός ενεργού διατομής για ενέργεια E=18MeV

Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ

Για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων (Φ) στον στόχο του Tl χρησιμοποιούνται οι πειραματικές ροές των στόχων αναφοράς σε συνδυασμό με τις τιμές των ροών που προκύπτουν από προσομοιώσεις με το πρόγραμμα MCNP. Αναλυτικότερα, οι πειραματικές τιμές χρησιμοποιούνται για την κανονικοποίηση των θεωρητικών τιμών που προκύπτουν από προσομοίωση του MCNP. Με τον τρόπο αυτόν, μπορεί να πραγματοποιηθεί και σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών, έτσι ώστε να ελεγχθούν τυχόν λάθη, αλλά και το κατά πόσο συμφωνούν οι δύο τρόποι.

Ο πειραματικός υπολογισμός της ροής νετρονίων των στόχων αναφοράς περιλαμβάνει την "τεχνική σάντουιτς" όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα (2.4):

- ❖ **Πειραματικός τρόπος υπολογισμού ροής Φ:** Οι στόχοι αναφοράς που αφορούν το συγκεκριμένο πείραμα είναι ο στόχος Au₄ που τοποθετήθηκε μπροστά από τον στόχο του Tl₂ και κολλητά με αυτόν και ο στόχος Al_A που τοποθετήθηκε πίσω από τον στόχο του Tl₂.



Σχήμα 4.8: Τρόπος τοποθέτησης των στόχων αναφοράς συγκριτικά με τον στόχο προς μελέτη σύμφωνα με την "τεχνική σάντουιτς".

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Al_A

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ²⁴Na έχει χρόνο ημιζωής τ_{1/2}=14.96h και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 1368keV.

➤ Υπολογισμός Nt:

$$(Nt \pm \delta Nt) = (4.93 \pm 0.02) * 10^{21} \text{ (πυρήνες Al}_A\text{)}$$

Το φάσμα λήφθηκε από τον ανιχνευτή A ύστερα από χρόνο t_w=1500s από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκεσε για χρόνο t_m=48190s.

➤ **Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων $N\gamma$:**

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N\gamma \pm \delta N\gamma) = (11099 \pm 118)$$

➤ **Απόδοση (ϵ):**

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή B για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (4.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D = e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D = 0.45$$

➤ **Παράγοντας fc:**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα fc χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $fc = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ^{24}Na ισχύει: $\lambda = 1.28 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

$$fc = 0.85$$

➤ **Παράγοντας F :**

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 5.25 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 1368keV.
- $\rho = 2.692 \text{ g/cm}^3$

$$F = 0.996$$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ^{24}Na :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot fc}$

$$(Np \pm \delta Np) = (677 \pm 35) \cdot 10^4 \text{ (πυρήνες } ^{24}\text{Na)}$$

- **Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{27}\text{Al} (n, a) ^{24}\text{Na}$ για ενέργεια $E=18\text{MeV}$:**

Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{27}\text{Al} (n, a) ^{24}\text{Na}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E=18\text{MeV}$) και από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF) προκύπτει:

$$\sigma = 0.062 \text{ barn}$$

- **Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{27}\text{Al} (n, a) ^{24}\text{Na}$:**

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{Np}{\sigma \cdot N\tau}$
Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta\Phi) = (2.22 \pm 0.11) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Au4

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ^{24}Na έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=6.18\text{d}$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 355.68keV .

- **Υπολογισμός $N\tau$:**

$$(N\tau \pm \delta N\tau) = (2.03 \pm 0.003) \cdot 10^{21} \text{ (πυρήνες Au}_4\text{)}$$

Το φάσμα λήφθηκε από τον **ανιχνευτή A** ύστερα από χρόνο $t_w=52380\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο $t_m=28321\text{s}$.

- **Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων $N\gamma$:**

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N\gamma \pm \delta N\gamma) = (30525 \pm 252)$$

- **Απόδοση (ϵ) :**

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή B για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (11.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D = e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_m + t_w)}$

Προκύπτει: $D = 0.34 \cdot 10^{-1}$

➤ **Παράγοντας fc:**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα fc χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $fc = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ^{24}Na ισχύει: $\lambda = 1.30 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Επομένως: $fc = 0.98$

➤ **Παράγοντας F :**

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 2.9 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 2.69 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 355.68keV.
- $\rho = 17.169 \text{ g/cm}^3$

Επομένως: $F = 0.935$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ^{196}Au :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot fc}$

Προκύπτει: $(Np \pm \delta Np) = (102 \pm 4) \cdot 10^6$ (πυρήνες ^{196}Au)

➤ **Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n, 2n)^{196}\text{Au}$ για ενέργεια $E = 18 \text{ MeV}$:**
Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n, 2n)^{196}\text{Au}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E = 18 \text{ MeV}$) και από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF) προκύπτει:

$$\sigma = 1.844 \text{ barn}$$

➤ Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{197}\text{Au} (n, 2n) ^{196}\text{Au}$:

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{Np}{\sigma \cdot N\tau}$
Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta\Phi) = (2.71 \pm 0.11) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

❖ Υπολογισμός Ροής Φ μέσω MCNP

Οι τιμές που προέκυψαν από το MCNP κανονικοποιήθηκαν με βάση την πειραματική τιμή του στόχου αναφοράς Al_A , χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\Phi_{\text{foil}}^{\text{MCNP}} \cdot \frac{\Phi_{\text{Al}}^{\text{πειραματικό}}}{\Phi_{\text{Al}}^{\text{MCNP}}}$$

Συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές για την ροή Φ , με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από το MCNP, συμπεραίνουμε:

| | $(\Phi_{\text{πειραματικό}} \pm \delta\Phi) \cdot 10^{10}$ | $\Phi_{\text{MCNP}} \cdot 10^{-2}$ | $(\Phi_{\text{MCNP/ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ}} \pm \delta\Phi^*) \cdot 10^{10}$ |
|---------------|--|------------------------------------|--|
| Al_A | 2.22 ± 0.11 | 1.71 | 2.22 ± 0.11 |
| Au_4 | 2.71 ± 0.11 | 2.12 | 2.83 ± 0.14 |
| Tl_2 | - | 1.96 | 2.53 ± 0.13 |

Πίνακας 4.4: Σύγκριση πειραματικών τιμών ροής νετρονίων (Φ) με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το MCNP, για ενέργεια ακτινοβολήσης $E=18\text{MeV}$.

* Το σφάλμα της κανονικοποιημένης τιμής προέκυψε λαμβάνοντας υπόψιν το σφάλμα της πειραματικής τιμής του Al_A .

Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για ενέργεια $E=18\text{MeV}$

Το μόνο κανάλι που μπόρεσε να μελετηθεί είναι το (n,2n), και συγκεκριμένα η φωτοκορυφή 439.56keV με $I_\gamma=91\%$ του ^{202}Tl ($\tau_{1/2}=12.23\text{d}$ και $\lambda=6.60\cdot 10^{-7}\text{ s}^{-1}$). Παρακάτω φαίνεται το φάσμα του Tl σε σύγκριση με το φάσμα υποβάθρου φυσικής ραδιενέργειας (background):

➤ Υπολογισμός N_t :

$$(N_t \pm \delta N_t) = (8.61 \pm 0.003) \cdot 10^{21} \text{ (πυρήνες Tl}_2\text{)}$$

*Όπου για τον υπολογισμό του N_t , στον τύπο (2.2) ($N_t = \frac{m \cdot N_A \cdot K}{AB}$), η μάζα αντιστοιχεί στην μάζα του ^{nat}Tl (φυσικό θάλλιο) και $K=0.295$ (ισοτοπική αναλογία ^{203}Tl).

Το φάσμα λήφθηκε από τον ανιχνευτή B ύστερα από $t_w=52380\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβόλησης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο $t_m=28321\text{s}$.

➤ Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_γ :

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N_\gamma \pm \delta N_\gamma) = (5632 \pm 107)$$

➤ Απόδοση (ϵ):

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή A για την ενέργεια 439.56keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta \epsilon) = (9.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ Παράγοντας D :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D=e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D=0.18 \cdot 10^{-1}$$

➤ Παράγοντας f_c :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα f_c χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $f_c = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το Tl ισχύει: $\lambda=6.60 \cdot 10^{-7}\text{ s}^{-1}$

$$f_c=0.99$$

➤ Παράγοντας F :

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x=2 \cdot 10^{-1}$ cm
- $\mu_0= 1.93 \cdot 10^{-1}$ cm²/gr. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 439.56keV.
- $\rho=1.12$ g/cm³ ($\rho=\rho(\text{natTi}) \cdot (\text{Ισοτ. Αναλογία } ^{203}\text{Ti}) = \frac{m_{\text{nat}}}{V_{\text{παστίλιας}}} \cdot 0.295$)

$$F=0.978$$

➤ Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ²⁰²Tl :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot fc}$

$$(Np \pm \delta Np) = (368 \pm 16) \cdot 10^3 \text{ (πυρήνες } ^{202}\text{Tl)}$$

➤ Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ(n/cm²) :

Η τιμή της ροής των νετρονίων (Φ) για τον στόχο του Tl, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπολογίστηκε κάνοντας χρήση του προγράμματος MCNP:

$$\Phi \pm \delta\Phi = (2.53 \pm 0.13) \cdot 10^{10} \text{ n/cm}^2 .$$

➤ Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης ²⁰³Tl(n,2n)²⁰²Tl:

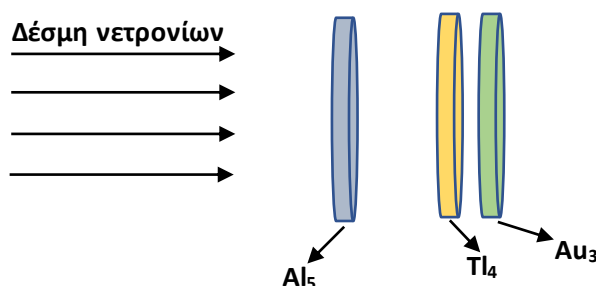
$$\sigma \pm \delta\sigma = (1.67 \pm 0.11) \text{ barn} .$$

4.2.2 Υπολογισμός ενεργού διατομής για ενέργεια E=16MeV

Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ

Ομοίως και σε αυτήν την περίπτωση, ο πειραματικός υπολογισμός της ροής νετρονίων των στόχων αναφοράς περιλαμβάνει την "τεχνική σάντουιτς" και προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- ❖ **Πειραματικός τρόπος υπολογισμού ροής Φ:** Οι στόχοι αναφοράς που αφορούν το συγκεκριμένο πείραμα είναι ο στόχος Al_5 που τοποθετήθηκε μπροστά από τον στόχο του Tl_4 και κολλητά με αυτόν και ο στόχος Au_3 που τοποθετήθηκε πίσω από τον στόχο του Tl_4 .



Σχήμα 4.9: Τρόπος τοποθέτησης των στόχων αναφοράς συγκριτικά με τον στόχο προς μελέτη σύμφωνα με την "τεχνική σάντουιτς".

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Al_5

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ${}^{24}Na$ έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=14.96h$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 1368keV.

➤ Υπολογισμός N_t :

$$(N_t \pm \delta N_t) = (4.49 \pm 0.02) \cdot 10^{21} \text{ (πυρήνες } Al_5)$$

Το φάσμα λήφθηκε από τον ανιχνευτή Β ύστερα από χρόνο $t_w=1260s$ από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκεσε για χρόνο $t_m=68450s$.

➤ Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_γ :

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N\gamma \pm \delta N\gamma) = (101957 \pm 328)$$

➤ **Απόδοση (ε) :**

Η απόδοση(ε) του ανιχνευτή B για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\varepsilon \pm \delta\varepsilon) = (4.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D = e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D = 0.57$$

➤ **Παράγοντας fc:**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα fc χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $fc = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ^{24}Na ισχύει: $\lambda = 1.28 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

$$fc = 0.84$$

➤ **Παράγοντας F :**

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 5.5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 5.25 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 1368keV.
- $\rho = 2.436 \text{ g/cm}^3$

$$F = 0.996$$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ^{24}Na :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{N\gamma}{\varepsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot fc}$

$$(Np \pm \delta Np) = (481 \pm 24) \cdot 10^5 \text{ (πυρήνες } ^{24}\text{Na)}$$

➤ **Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{27}\text{Al} (n, a) ^{24}\text{Na}$ για ενέργεια $E=16\text{MeV}$:**

Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{27}\text{Al} (n, a) ^{24}\text{Na}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E=18\text{MeV}$) και από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF) προκύπτει:

$$\sigma = 0.096 \text{ barn}$$

➤ **Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{27}\text{Al} (n, a) ^{24}\text{Na}$:**

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{Np}{\sigma \cdot N\tau}$
Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta\Phi) = (11.20 \pm 0.60) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Au_3

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ^{24}Na έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=6.18\text{d}$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 355.68keV .

➤ **Υπολογισμός $N\tau$:**

$$(N\tau \pm \delta N\tau) = (1.99 \pm 0.003) \cdot 10^{21} \text{ (πυρήνες Au}_3\text{)}$$

Το φάσμα λήφθηκε από τον **ανιχνευτή B** ύστερα από χρόνο $t_w=1260\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο $t_m=68450\text{s}$.

➤ **Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων $N\gamma$:**

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N\gamma \pm \delta N\gamma) = (228609 \pm 509)$$

➤ **Απόδοση (ϵ) :**

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή B για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (11.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D=e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_m + t_w)}$

Προκύπτει: $D=0.85 \cdot 10^{-1}$

➤ Παράγοντας f_c :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα f_c χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $f_c = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ^{24}Na ισχύει: $\lambda = 1.30 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Επομένως: $f_c = 0.98$

➤ Παράγοντας F :

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 2.69 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων- γ 355.68keV.
- $\rho = 17.183 \text{ g/cm}^3$

Επομένως: $F = 0.939$

➤ Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων N_p ^{196}Au :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα N_p χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $N_p = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot f_c}$

Προκύπτει: $(N_p \pm \delta N_p) = (305 \pm 12) \cdot 10^6$ (πυρήνες ^{196}Au)

➤ Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n, 2n)^{196}\text{Au}$ για ενέργεια $E = 16 \text{ MeV}$:

Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n, 2n)^{196}\text{Au}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E = 16 \text{ MeV}$) και από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF) προκύπτει:

$$\sigma = 2.23 \text{ barn}$$

➤ Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n, 2n)^{196}\text{Au}$:

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{Np}{\sigma \cdot N\tau}$
 Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta\Phi) = (6.85 \pm 0.27) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

❖ Υπολογισμός Ροής Φ μέσω MCNP

Οι τιμές που προέκυψαν από το MCNP κανονικοποιήθηκαν με βάση την πειραματική τιμή του στόχου αναφοράς Au_3 , χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\Phi_{foil}^{MCNP} \cdot \frac{\Phi_{Au}^{πειραματικό}}{\Phi_{Au}^{MCNP}}$$

Συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές για την ροή Φ , με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από το MCNP, συμπεραίνουμε:

| | $(\Phi_{πειραματικό} \pm \delta\Phi) \cdot 10^{10}$ | $\Phi_{MCNP} \cdot 10^4$ | $(\Phi_{MCNP/ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ} \pm \delta\Phi^*) \cdot 10^{10}$ |
|---------------|---|--------------------------|---|
| Al_5 | 11.2 ± 0.6 | 1.86 | 10.3 ± 0.6 |
| Au_3 | 6.85 ± 0.27 | 1.24 | 6.85 ± 0.4 |
| Ti_4 | - | 1.37 | 7.57 ± 0.4 |

Πίνακας 4.5: Σύγκριση πειραματικών τιμών ροής νετρονίων (Φ) με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το MCNP, για ενέργεια ακτινοβολήσης $E=16\text{MeV}$.

* Το σφάλμα της κανονικοποιημένης τιμής προέκυψε λαμβάνοντας υπόψιν το σφάλμα της πειραματικής τιμής του Au_3 .

Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για ενέργεια $E=16\text{MeV}$

Το μόνο κανάλι που μπόρεσε να μελετηθεί είναι το (n,2n), και συγκεκριμένα η φωτοκορυφή 439.56keV με $I_\gamma=91\%$ του ^{202}Tl ($\tau_{1/2}=12.23\text{d}$ και $\lambda=6.60\cdot 10^{-7}\text{ s}^{-1}$). Παρακάτω φαίνεται το φάσμα του Tl σε σύγκριση με το φάσμα υποβάθρου φυσικής ραδιενέργειας (background):

➤ Υπολογισμός N_τ :

$$(N_\tau \pm \delta N_\tau) = (1.11 \pm 0.003) \cdot 10^{21} \text{ (πυρήνες Tl}_4\text{)}$$

*Όπου για τον υπολογισμό του N_τ , στον τύπο (2.2) ($N_\tau = \frac{m \cdot N_A \cdot K}{AB}$), η μάζα αντιστοιχεί στην μάζα του ^{nat}Tl (φυσικό θάλλιο) και $K=0.295$ (ισοτοπική αναλογία ^{203}Tl).

Το φάσμα λήφθηκε από τον ανιχνευτή B ύστερα από $t_w=1260\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβόλησης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο $t_m=68450\text{s}$.

➤ Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_γ :

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N_\gamma \pm \delta N_\gamma) = (600190 \pm 290)$$

➤ Απόδοση (ϵ):

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή A για την ενέργεια 439.56keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (9.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ Παράγοντας D :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D=e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D=0.44 \cdot 10^{-1}$$

➤ Παράγοντας f_c :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα f_c χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $f_c = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το Tl ισχύει: $\lambda=6.60 \cdot 10^{-7}\text{ s}^{-1}$

$$f_c=0.98$$

➤ Παράγοντας F :

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 2.74 \cdot 10^{-1}$ cm
- $\mu_0 = 1.93 \cdot 10^{-1}$ cm²/gr. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 439.56keV.
- $\rho = 1.04$ g/cm³ ($\rho = \rho(\text{natTi}) \cdot (\text{Ισοτ. Αναλογία } ^{203}\text{Ti}) = \frac{m_{\text{nat}}}{V_{\text{παστίλιας}}} \cdot 0.295$)

$$F = 0.973$$

➤ Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ²⁰²Tl :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot f \cdot c}$

$$(Np \pm \delta Np) = (160 \pm 6) \cdot 10^5 \text{ (πυρήνες } ^{202}\text{Tl)}$$

➤ Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ (n/cm²) :

Η τιμή της ροής των νετρονίων (Φ) για τον στόχο του Tl, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπολογίστηκε κάνοντας χρήση του προγράμματος MCNP:

$$\Phi \pm \delta\Phi = (7.57 \pm 0.30) \cdot 10^{10} \text{ n/cm}^2.$$

➤ Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης ²⁰³Tl(n,2n)²⁰²Tl:

$$\sigma \pm \delta\sigma = (1.91 \pm 0.11) \text{ barn}.$$

4.3 Υπολογισμός Ενεργού Διατομής για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$

Υπολογισμός απόδοσης ανιχνευτών

Για την μέτρηση των στόχων χρησιμοποιήθηκαν οι ανιχνευτές (σχετικής ανιχνευτικής απόδοσης 80%) του προηγούμενου πειράματος, ενώ χρησιμοποιήθηκε και η ίδια πηγή ^{152}Eu για τον προσδιορισμό της απόλυτης απόδοσης και των δύο ανιχνευτών.

| | |
|--|-------------------|
| Ημερομηνία κατασκευής | 01/01/2011 |
| Αρχική Ενεργότητα ($R_0 \pm \delta R_0$) | 217 \pm 3 (kBq) |
| Χρόνος Ημιζωής $\tau_{1/2}$ | 4.26E+08 (s) |

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά πηγής ^{152}Eu .

Και για τους δύο ανιχνευτές η πηγή τοποθετήθηκε σε απόσταση $\approx 10\text{cm}$.

Οι χρόνοι λήψης του φάσματος για τον ανιχνευτή A και B είναι αντίστοιχα 900s και 900s. Κάνοντας χρήση του προγράμματος *tn* αναλύθηκαν συγκεκριμένες κορυφές του φάσματος που αντιστοιχούν σε κάποιες χαρακτηριστικές ακτίνες- γ του ^{152}Eu . Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

| E γ (keV) | I γ | Ανιχνευτής A | | | Ανιχνευτής B | | |
|------------------|------------|----------------|------------------|------|----------------|------------------|------|
| | | Live time=900s | | | Live time=900s | | |
| | | N γ | $\delta N\gamma$ | FWHM | N γ | $\delta N\gamma$ | FWHM |
| 121.78 | 28.58 | 591716 | 791 | 1.81 | 598290 | 810 | 3.36 |
| 244.7 | 7.6 | 108778 | 380 | 1.87 | 111940 | 377 | 3.61 |
| 344.28 | 26.5 | 312428 | 605 | 1.95 | 323827 | 589 | 3.71 |
| 367.79 | 0.9 | 10143 | 152 | 2.18 | 10771 | 166 | 4.26 |
| 411.12 | 2.2 | 22730 | 176 | 1.98 | 24307 | 197 | 4.04 |
| 443.96 | 3.1 | 30285 | 221 | 1.98 | 31517 | 229 | 4.00 |
| 778.9 | 12.9 | 86151 | 318 | 2.15 | 87694 | 324 | 4.62 |
| 867.37 | 4.2 | 26163 | 195 | 2.20 | 27164 | 227 | 5.13 |
| 964.08 | 14.6 | 82473 | 297 | 2.26 | 84753 | 307 | 5.01 |
| 1212.95 | 1.4 | 6596 | 101 | 2.34 | 6776 | 113 | 5.34 |
| 1299.1 | 1.6 | 7545 | 97 | 2.47 | 7692 | 100 | 5.88 |
| 1408 | 21 | 92835 | 310 | 2.62 | 90702 | 308 | 6.19 |

Πίνακας 4.7: Υπολογισμός των καταγεγραμμένων γεγονότων(N γ) από τους ανιχνευτές A και B και του FWHM ύστερα από ανάλυση συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu .

Σε πρώτο στάδιο, υπολογίστηκε η **ενεργότητα της πηγής ^{152}Eu την ημέρα της λήψης του φάσματος**. Το φάσμα λήφθηκε στις **9/1/2023**, επομένως από την ημέρα κατασκευής της πηγής παρήλθε χρόνος $t = 378460800\text{s}$.

Σύμφωνα με τον ορισμό της ενεργότητας προκύπτει: $R = R_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, όπου: $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$ και με διάδοση σφαλμάτων προκύπτει το σφάλμα της ενεργότητας: $\delta R = \delta R_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
Επομένως, η τιμή της ενεργότητας την ημέρα λήψης του φάσματος ισούται με:

$$R \pm \delta R = 117541 \pm 1620 \text{ (Bq) ή (διασπάσεις/sec)}$$

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι διασπάσεις των πυρήνων ^{152}Eu κατά την διάρκεια λήψης του φάσματος. Από την ενεργότητα της πηγής την ημέρα λήψης του φάσματος συμπεραίνουμε ότι σε κάθε 1sec πραγματοποιούνται 117541 διασπάσεις. Επομένως για την χρονική διάρκεια της μέτρησης (live time) οι διασπάσεις είναι:

$$R' \pm \delta R' = (R \pm \delta R) \cdot (\text{live time}), \text{ με live time} = 900\text{s}.$$

Επομένως, κατά την διάρκεια λήψης του φάσματος, **το πλήθος των ακτινών-γ που παράγονται από την πηγή του ^{152}Eu ισούται με:**

$$N_{\text{εκπεμπόμενα}} = R' \cdot \frac{I_\gamma}{100}$$

Με σφάλμα που προκύπτει από διάδοση σφαλμάτων: $\delta N_{\text{εκπεμπόμενα}} = \delta R' \cdot \frac{I_\gamma}{100}$

Ενώ, η απόδοση (ϵ) του ανιχνευτή δίνεται από την σχέση:

$$\epsilon = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} = \frac{N_\gamma}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}}$$

Με σφάλμα που προκύπτει από διάδοση σφαλμάτων:

$$\delta \epsilon = \left[\left(\frac{1}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} \cdot \delta N_\gamma \right)^2 + \left(-\frac{N_\gamma}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}^2} \cdot \delta N_{\text{εκπεμπόμενα}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| Eγ(keV) | ly | Ανιχνευτής Α | | | Ανιχνευτής Β | | |
|---------|-------|----------------|-------------|--------------|----------------|-------------|--------------|
| | | Live time=900s | | | Live time=900s | | |
| | | $N_{εκπεμπ}$ | $ε*10^{-3}$ | $δε*10^{-3}$ | $N_{εκπεμπ}$ | $ε*10^{-3}$ | $δε*10^{-3}$ |
| 121.78 | 28.58 | 30234006 | 19.57 | 0.27 | 30234006 | 19.8 | 0.27 |
| 244.7 | 7.6 | 8039833.7 | 13.52 | 0.19 | 8039833.7 | 13.9 | 0.20 |
| 344.28 | 26.5 | 28033631 | 11.14 | 0.16 | 28033631 | 11.6 | 0.16 |
| 367.79 | 0.9 | 952085 | 10.65 | 0.22 | 952085 | 11.3 | 0.23 |
| 411.12 | 2.2 | 2327320 | 9.77 | 0.15 | 2327320 | 10.4 | 0.17 |
| 443.96 | 3.1 | 3279405 | 9.23 | 0.14 | 3279405 | 9.61 | 0.15 |
| 778.9 | 12.9 | 13646560 | 6.31 | 0.09 | 13646560 | 6.43 | 0.09 |
| 867.37 | 4.2 | 4443066 | 5.89 | 0.09 | 4443066 | 6.11 | 0.10 |
| 964.08 | 14.6 | 15444944 | 5.34 | 0.08 | 15444944 | 5.49 | 0.08 |
| 1212.95 | 1.4 | 1481022 | 4.45 | 0.09 | 1481022 | 4.58 | 0.10 |
| 1299.1 | 1.6 | 1692596 | 4.46 | 0.08 | 1692596 | 4.54 | 0.09 |
| 1408 | 21 | 22215330 | 4.18 | 0.06 | 22215330 | 4.08 | 0.06 |

Πίνακας 4.8: Υπολογισμός απόδοσης ανιχνευτών Α και Β.

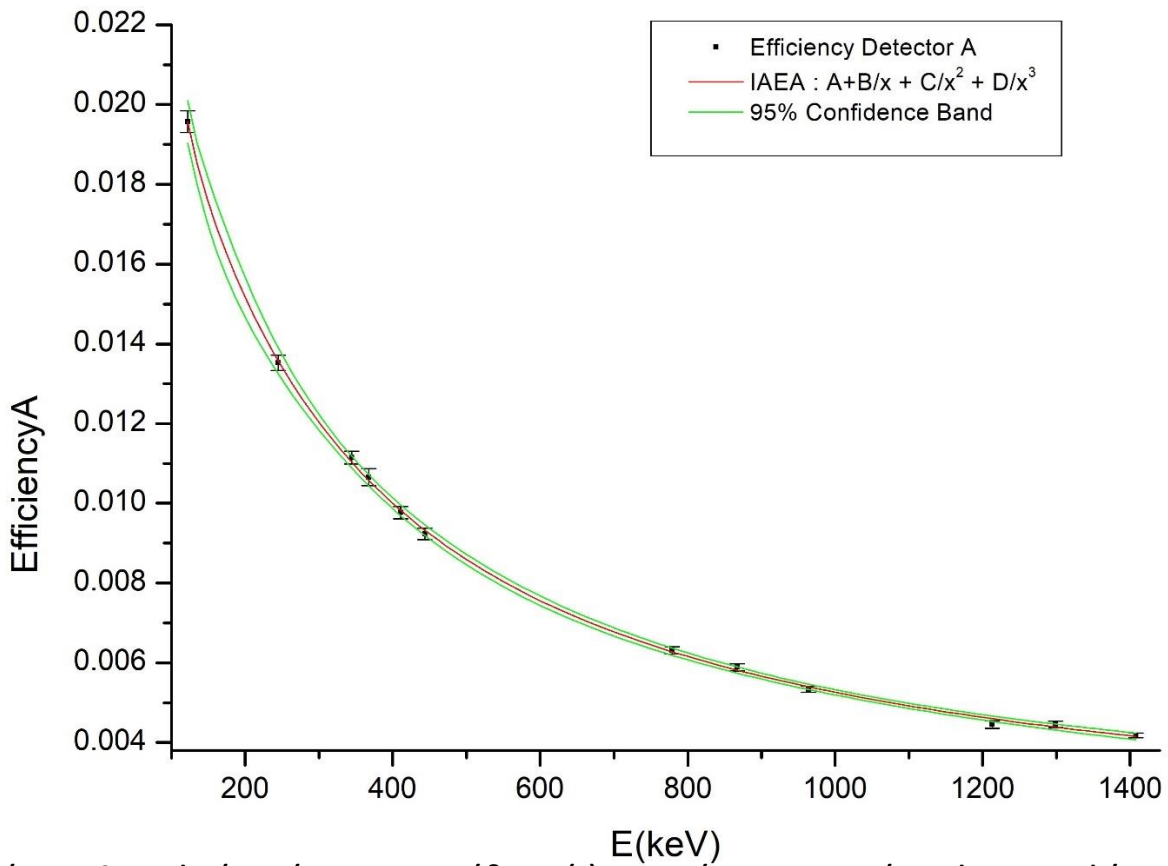
Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της απόδοσης(ε) συναρτήσει των φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu και για τους δύο ανιχνευτές.

Και στις δύο γραφικές παραστάσεις, η προσομοίωση των καμπυλών που προέκυψαν έγινε με χρήση της εξίσωσης της **IAEA**: $A + \frac{B}{x} + \left(\frac{C}{x^2}\right) + \left(\frac{D}{x^3}\right)$ χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα «OriginPro 8.5».

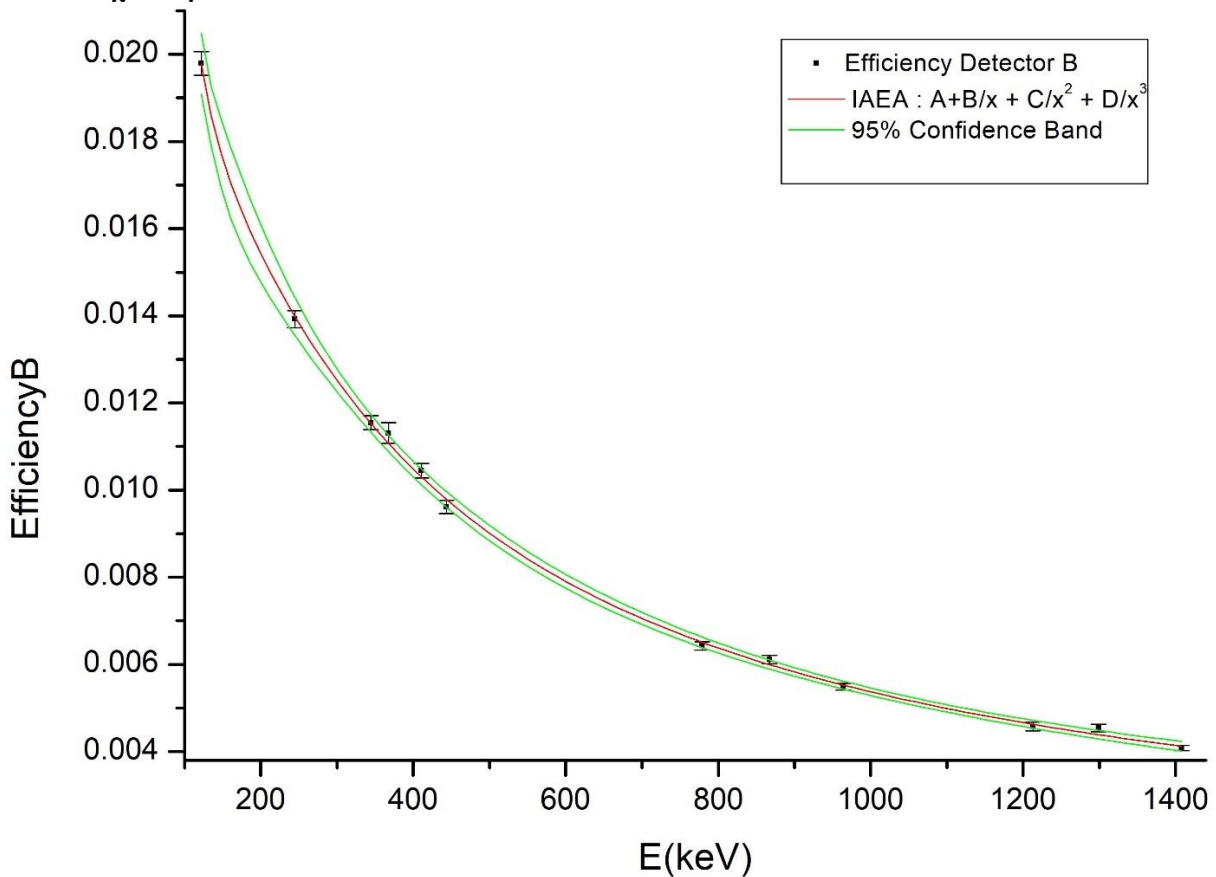
Οι συντελεστές "A,B,C,D" υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος και δίνονται στον παρακάτω πίνακα για τους δύο ανιχνευτές:

| | Ανιχνευτής Α | Ανιχνευτής Β |
|----------|--------------|--------------|
| A | 0.00115 | 6.39701E-4 |
| B | 4.53749 | 5.35017 |
| C | -451.81092 | -650.49947 |
| D | 20985.28336 | 34447.67445 |

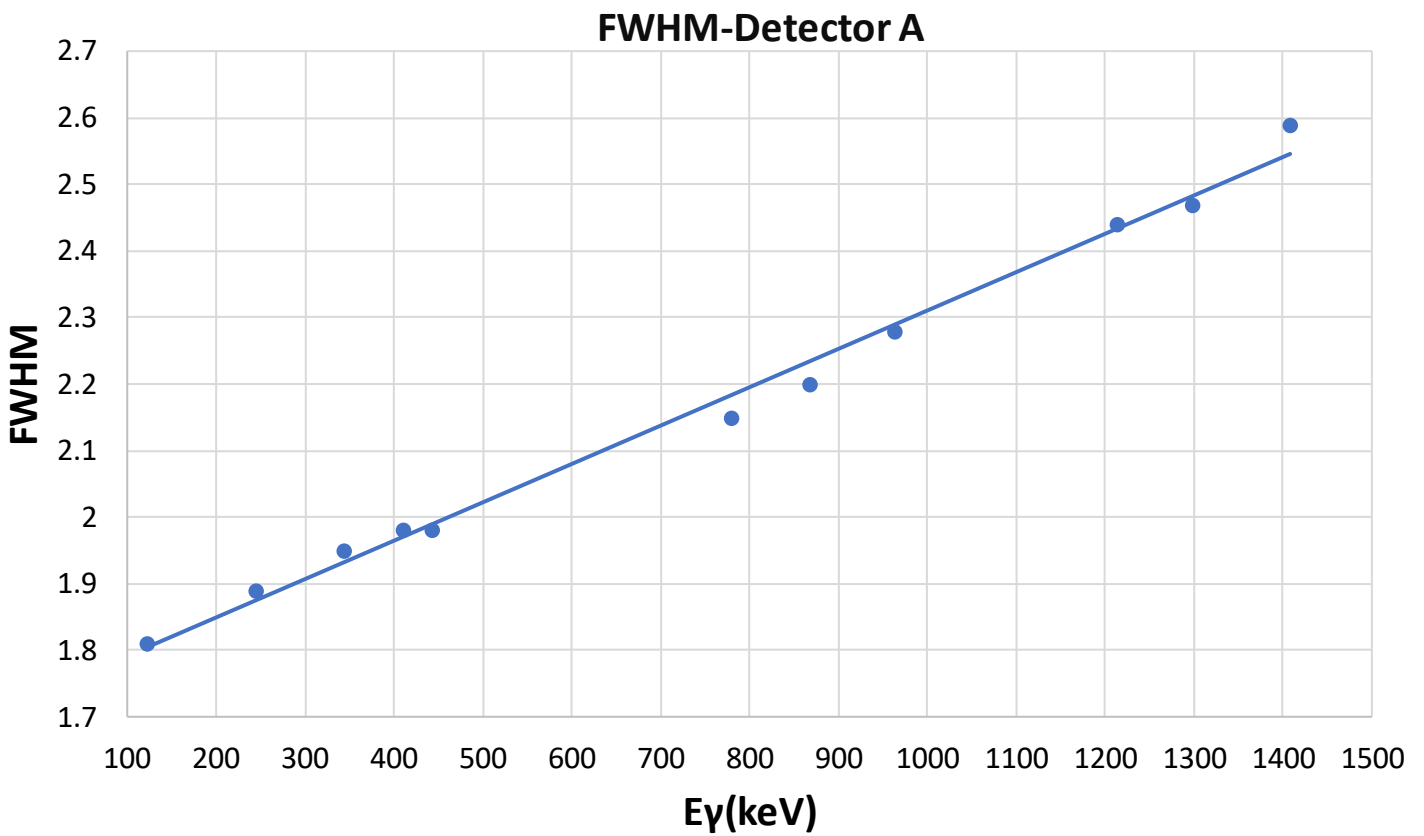
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της απόδοσης(ε) και του Full Width at Half Maximum συναρτήσει των φωτοκορυφών του ^{152}Eu για τους δύο ανιχνευτές:



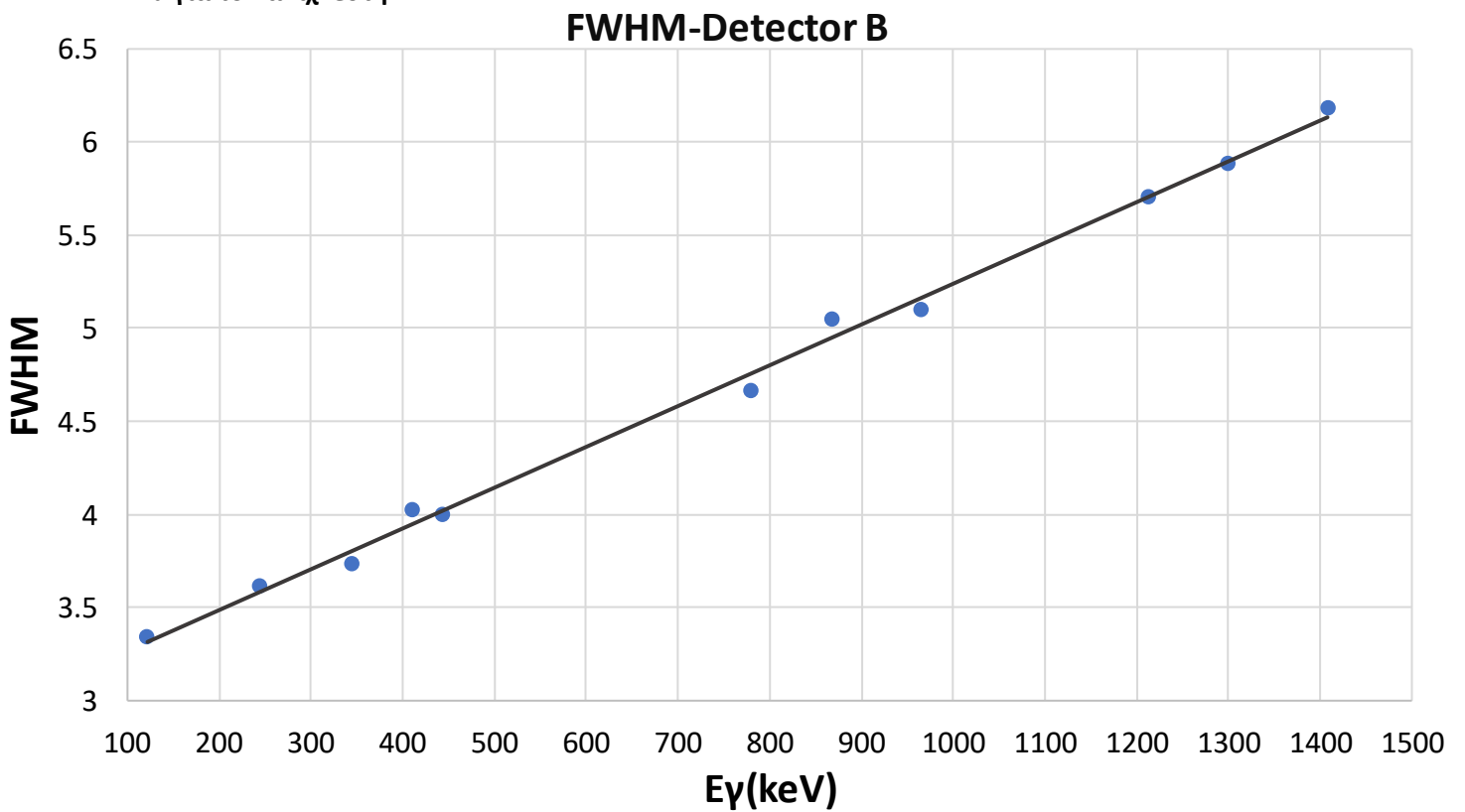
Σχήμα 4.10: Γραφική παράσταση της απόδοσης (ϵ) συναρτήσεως συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή A.



Σχήμα 4.11: Γραφική παράσταση της απόδοσης (ϵ) συναρτήσεως συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή B.



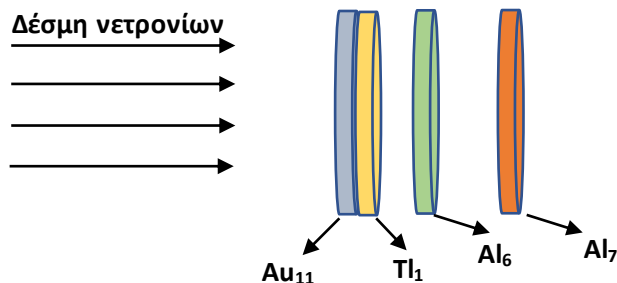
Σχήμα 4.12: Γραφική παράσταση του FWHM συναρτήσει συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή A.



Σχήμα 4.13: Γραφική παράσταση του FWHM συναρτήσει συγκεκριμένων φωτοκορυφών της πηγής ^{152}Eu για τον ανιχνευτή B.

Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ

- ❖ **Πειραματικός τρόπος υπολογισμού ροής Φ στους στόχους αναφοράς:** Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η τεχνική sandwich όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.4. Αναλυτικότερα, οι στόχοι αναφοράς που αφορούν το συγκεκριμένο πείραμα είναι ο στόχος Au₁₁ που τοποθετήθηκε μπροστά από τον στόχο του Tl₁ και κολλητά με αυτόν και ο στόχος Al₆ που τοποθετήθηκε πίσω από τον στόχο του Tl₁.



Σχήμα 4.14: Τρόπος τοποθέτησης των στόχων αναφοράς συγκριτικά με τον στόχο προς μελέτη σύμφωνα με την "τεχνική σάντουιτς".

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Al₆

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ²⁴Na έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=14.96\text{h}$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 1368keV.

Το φάσμα λήφθηκε από τον **ανιχνευτή Β** ύστερα από χρόνο $t_w=15300\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο $t_m=60600\text{s}$.

➤ **Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_γ:**

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N_\gamma \pm \delta N_\gamma) = (27243 \pm 181)$$

➤ **Απόδοση (ε) :**

Η απόδοση(ε) του ανιχνευτή Β για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\varepsilon \pm \delta\varepsilon) = (4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D=e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D=0.44$$

➤ **Παράγοντας fc:**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα f_c χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $f_c = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ^{24}Na ισχύει: $\lambda = 1.28 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

$$f_c = 0.88$$

➤ **Παράγοντας F :**

Ο παράγοντας F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 5.25 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 1368keV [14].
- $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$

$$F = 1$$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων N_p ^{24}Na :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα N_p χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $N_p = \frac{N_\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I_\gamma \cdot D \cdot f_c}$

$$(N_p \pm \delta N_p) = (166 \pm 8) \cdot 10^5$$

➤ **Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ για ενέργεια $E = 15.7 \text{ MeV}$:**

Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E = 15.7 \text{ MeV}$) και από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF) προκύπτει:

$$\sigma = 0.099 \text{ (barn)}$$

➤ **Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$:**

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{N_p}{\sigma \cdot N \tau}$

Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta \Phi) = (1.85 \pm 0.09) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Au11

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ${}^{24}\text{Na}$ έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=6.18\text{d}$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 355.68keV .

Το φάσμα λήφθηκε από τον **ανιχνευτή B** ύστερα από χρόνο $t_w=7200\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο $t_m=7200\text{s}$.

➤ Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_γ :

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N_\gamma \pm \delta N_\gamma) = (8532 \pm 106)$$

➤ Απόδοση (ϵ):

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή B για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (11.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ Παράγοντας D :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D=e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_m + t_w)}$

Προκύπτει: $D=0.92 \cdot 10^{-2}$

➤ Παράγοντας f_c :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα f_c χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $f_c = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ${}^{24}\text{Na}$ ισχύει: $\lambda=1.30 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Επομένως: $f_c=0.99$

➤ Παράγοντας F :

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x=5 \cdot 10^{-2}$ cm
- $\mu_0=2.69 \cdot 10^{-1}$ cm²/gr. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 355.68keV.
- $\rho=19.32$ g/cm³

Επομένως: $F=0.932$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ^{196}Au :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot f \cdot c}$

Προκύπτει: $(Np \pm \delta Np) = (104 \pm 5) \cdot 10^6$ (πυρήνες ^{196}Au)

➤ **Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{197}\text{Au} (n, 2n) ^{196}\text{Au}$ για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$:**

Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{197}\text{Au} (n, 2n) ^{196}\text{Au}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E=15.7\text{MeV}$), κάνοντας χρήση των δεδομένων από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF):

$$\sigma = 2.239 \text{ (barn)}$$

➤ **Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{197}\text{Au} (n, 2n) ^{196}\text{Au}$:**

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{Np}{\sigma \cdot N\tau}$
Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta\Phi) = (2.24 \pm 0.10) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

Υπολογισμός ροής νετρονίων στον στόχο Al_7

Η αντίδραση που μελετάται είναι η:



Όπου, ο παραγόμενος πυρήνας ^{24}Na έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2}=14.96\text{h}$ και η ενεργός διατομή της αντίδρασης(σ) είναι υπολογισμένη με μεγάλη ακρίβεια. Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ που μελετάται είναι 1368keV.

Το φάσμα λήφθηκε από τον **ανιχνευτή A** ύστερα από χρόνο $t_w=15300\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκεσε για χρόνο $t_m=60600\text{s}$.

➤ **Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_{γ} :**

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N_{\gamma} \pm \delta N_{\gamma}) = (21415 \pm 151)$$

➤ **Απόδοση (ϵ):**

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή B για την ενέργεια 1368keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D = e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D = 0.44$$

➤ **Παράγοντας fc:**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα fc χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $fc = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το ^{24}Na ισχύει: $\lambda = 1.28 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

$$fc = 0.88$$

➤ **Παράγοντας F :**

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 5.25 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 1368keV [14].
- $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$

$$F = 1$$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων N_p ^{24}Na :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα N_p χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $N_p = \frac{N_{\gamma}}{\epsilon \cdot F \cdot I_{\gamma} \cdot D \cdot fc}$

$$(N_p \pm \delta N_p) = (130 \pm 7) \cdot 10^5 \text{ (πυρήνες } ^{24}\text{Na)}$$

➤ Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, a)^{24}\text{Na}$ για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$:

Η ενεργός διατομή (σ) της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, a)^{24}\text{Na}$ έχει υπολογιστεί με ακρίβεια για την συγκεκριμένη ενέργεια ($E=15.7\text{MeV}$) και από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες δεδομένων (Evaluated Nuclear Data File-ENDF) προκύπτει:

$$\sigma = 0.099 \text{ (barn)}$$

➤ Υπολογισμός ροής νετρονίων της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, a)^{24}\text{Na}$:

Για τον υπολογισμό της αντίδρασης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση: $\Phi = \frac{Np}{\sigma \cdot N\tau}$

Έχοντας υπολογίσει όλα τα δεδομένα προκύπτει:

$$(\Phi \pm \delta\Phi) = (1.45 \pm 0.07) \cdot 10^{10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

❖ Υπολογισμός Ροής Φ μέσω MCNP

Οι τιμές που προέκυψαν από το MCNP κανονικοποιήθηκαν με βάση την πειραματική τιμή του στόχου αναφοράς Al_6 , χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\Phi_{\text{foil}}^{\text{MCNP}} \cdot \frac{\Phi_{\text{Al}_6}^{\text{πειραματικό}}}{\Phi_{\text{Al}_6}^{\text{MCNP}}}$$

Συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές για την ροή Φ , με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από το MCNP, συμπεραίνουμε:

| | $(\Phi_{\text{πειραματικό}} \pm \delta\Phi) \cdot 10^{10}$ | $(\Phi_{\text{MCNP}} \pm \delta\Phi) \cdot 10^5$ | $(\Phi_{\text{MCNP}/\text{ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ}} \pm \delta\Phi^*) \cdot 10^{10}$ |
|------------------|--|--|---|
| Al_7 | 1.45 ± 0.07 | 7.32 ± 0.22 | 1.53 ± 0.10 |
| Au_{11} | 2.24 ± 0.10 | 10.60 ± 0.41 | 2.21 ± 0.15 |
| Tl_1 | - | 10.50 ± 0.27 | 2.20 ± 0.13 |
| Al_6 | 1.85 ± 0.09 | 8.84 ± 0.22 | 1.85 ± 0.11 |

Πίνακας 4.9: Σύγκριση πειραματικών τιμών ροής νετρονίων (Φ) με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το MCNP, για ενέργεια ακτινοβολήσης $E=15.7\text{MeV}$.

* Στο σφάλμα της κανονικοποιημένης τιμής υπεισέρχονται τα σφάλμα του MCNP για τον κάθε στόχο και το σφάλμα της πειραματικής τιμής του Al_6 .

Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για ενέργεια $E=15.7\text{MeV}$

Για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$, λήφθηκαν 2 διαφορετικά φάσματα. Συγκεκριμένα, προέκυψαν 2 μετρήσεις από τον ανιχνευτή A. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι χρονικές διάρκειες μέτρησης και αναμονής μέχρι την έναρξη της μέτρησης:

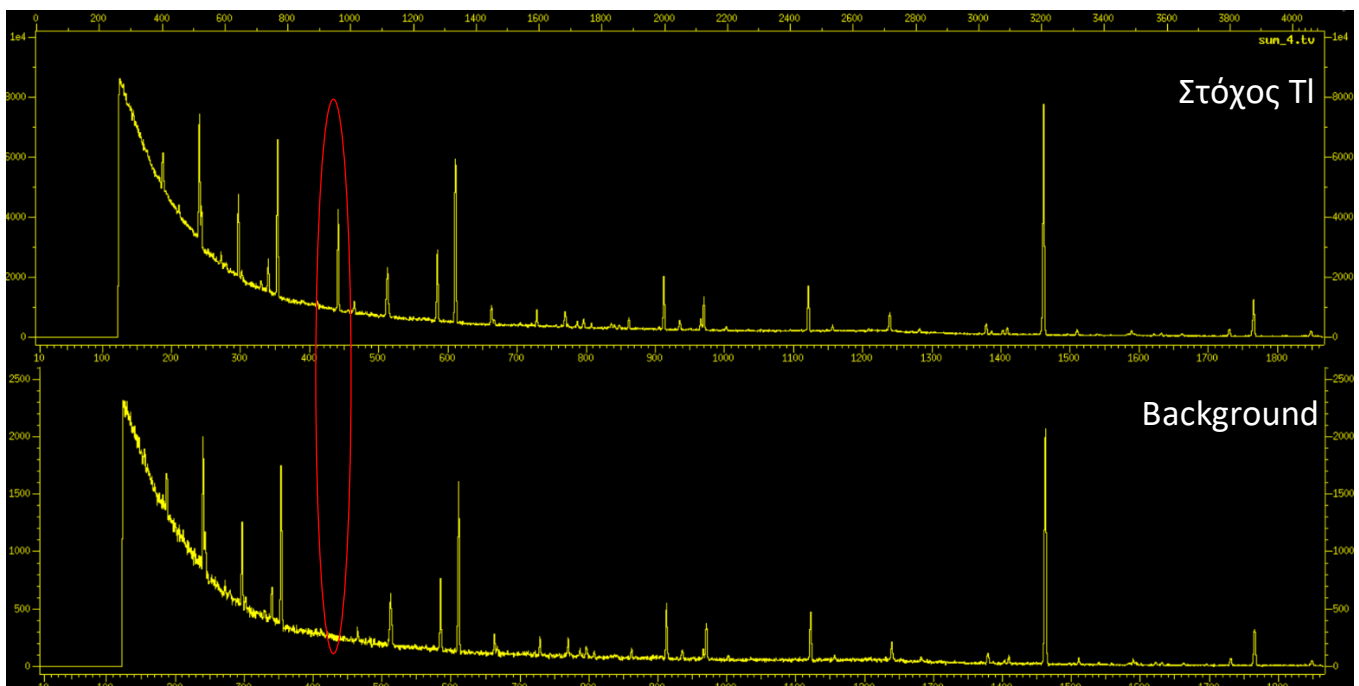
| 1 ^η Ακτινοβόληση: E=15.7MeV | | |
|--|-----------------|-----------------|
| | Ανιχνευτής A | Ανιχνευτής A |
| | Tl ₁ | Tl ₁ |
| t _m (s) | 82200 | 7200 |
| t _w (s) | 76800 | 7200 |

Πίνακας 4.10: Χρονική διάρκεια που παρήλθε από το τέλος της ακτινοβόλησης(t_w) και χρονική διάρκεια της μέτρησης(t_m) για τα τρία φάσματα που λήφθηκαν από τον εκάστοτε ανιχνευτή.

Όπου,

- t_m: η χρονική διάρκεια της μέτρησης του στόχου από τον ανιχνευτή.
- t_w: η χρονική διάρκεια που παρήλθε από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι και την έναρξη της μέτρησης.

Και στις δύο μετρήσεις το μόνο κανάλι που μπόρεσε να μελετηθεί είναι το (n,2n), και συγκεκριμένα η φωτοκορυφή 439.56keV με I_γ=91% του ^{202}Tl (τ_{1/2}= 12.23d και λ=6.60*10⁻⁷ s⁻¹). Παρακάτω φαίνεται ένα από τα τρία φάσματα του Tl σε σύγκριση με το φάσμα υποβάθρου φυσικής ραδιενέργειας (background):



Σχήμα 4.15: Φάσμα στόχου Tl, όπως λήφθηκε από την ανιχνευτή, σε σύγκριση με το φάσμα ραδιενέργειας περιβάλλοντος.

Για τις δύο μετρήσεις ισχύει:

➤ Υπολογισμός N_t :

$$(N_t \pm \delta N_t) = (8.83 \pm 0.009) \cdot 10^{20} \text{ (πυρήνες Tl2)}$$

*Όπου για τον υπολογισμό του N_t , στον τύπο (2.2) ($N_t = \frac{m \cdot N_A \cdot K}{AB}$), η μάζα αντιστοιχεί στην μάζα του ^{nat}Tl (φυσικό θάλλιο) και $K=0.295$ (ισοτοπική αναλογία ^{203}Tl).

1^η Μέτρηση

Το 1^ο φάσμα λήφθηκε από τον ανιχνευτή A ύστερα από $t_w=76800\text{s}$ από το τέλος της ακτινοβόλησης, ενώ η μέτρηση διήρκεσε για χρόνο $t_m=82200\text{s}$.

➤ Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων N_g :

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(N_g \pm \delta N_g) = (15418 \pm 183)$$

➤ Απόδοση (ϵ):

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή A για την ενέργεια 439.56keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (9.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ Παράγοντας D :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D=e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D=0.50 \cdot 10^{-1}$$

➤ Παράγοντας f_c :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα f_c χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $f_c = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το Tl ισχύει: $\lambda=6.60 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

$$f_c=0.99$$

➤ Παράγοντας F :

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x=1.26 \cdot 10^{-1}$ cm
- $\mu_0= 1.93 \cdot 10^{-1}$ cm²/gr. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 439.56keV.
- $\rho=1.82$ g/cm³

$$F=0.978$$

❖ Ο άλλος τρόπος για τον υπολογισμό του F είναι μέσω του προγράμματος MCNP5.

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Np ²⁰²Tl :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Np χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Np = \frac{Ny}{\epsilon \cdot F \cdot I \gamma \cdot D \cdot f \cdot c}$

$$(Np \pm \delta Np) = (370 \pm 15) \cdot 10^3 \text{ (πυρήνες } ^{202}\text{Tl)}$$

➤ **Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ (n/cm²) :**

Η τιμή της ροής των νετρονίων (Φ) για τον στόχο του Tl, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπολογίστηκε κάνοντας χρήση του προγράμματος MCNP:

$$\Phi \pm \delta\Phi = (2.20 \pm 0.13) \cdot 10^{10} \text{ n/cm}^2.$$

➤ **Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$:**

$$\sigma \pm \delta\sigma = (1.90 \pm 0.12) \text{ barn}.$$

2^η Μέτρηση

Το 2^ο φάσμα λήφθηκε από τον **ανιχνευτή A** ύστερα από **$t_m=7200s$** από το τέλος της ακτινοβολήσης, ενώ η μέτρηση διήρκησε για χρόνο **$t_w=7200s$** .

➤ **Αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων Ny :**

Ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, όπως προέκυψε ύστερα από ανάλυση του φάσματος ισούται με:

$$(Ny \pm \delta Ny) = (1537 \pm 61)$$

➤ **Απόδοση (ϵ) :**

Η απόδοση(ϵ) του ανιχνευτή A για την ενέργεια 439.56keV είναι:

$$(\epsilon \pm \delta\epsilon) = (9.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

➤ **Παράγοντας D :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα D χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $D = e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot (t_2 + t_w)}$

$$D = 0.47 \cdot 10^{-2}$$

➤ **Παράγοντας fc:**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα fc χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $fc = \frac{\int_0^{tB} f(t) \cdot e^{\lambda t} \cdot dt}{\int_0^{tB} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot tB}$

Για το Tl ισχύει: $\lambda = 6.60 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

$$fc = 0.99$$

➤ **Παράγοντας F :**

Ο παράγοντα F υπολογίστηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$F = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-\mu_0 \cdot \rho \cdot x}$$

Όπου,

- $x = 1.26 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$
- $\mu_0 = 1.93 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{gr}$. Η τιμή αυτή προκύπτει κάνοντας χρήση του προγράμματος «xcom nist» για ενέργεια ακτίνων-γ 439.56keV.
- $\rho = 1.82 \text{ g/cm}^3$

$$F = 0.978$$

➤ **Υπολογισμός παραγόμενων πυρήνων Nr ²⁰²Tl :**

Για τον υπολογισμό του παράγοντα Nr χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $Nr = \frac{N\gamma}{\epsilon \cdot F \cdot I\gamma \cdot D \cdot fc}$

$$(Nr \pm \delta Nr) = (392 \pm 22) \cdot 10^3 \text{ (πυρήνες } ^{202}\text{Tl)}$$

➤ **Υπολογισμός ροής νετρονίων Φ (n/cm²) :**

Η τιμή της ροής των νετρονίων (Φ) για τον στόχο του Tl, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπολογίστηκε κάνοντας χρήση του προγράμματος MCNP:

$$\Phi \pm \delta\Phi = (2.20 \pm 0.13) \cdot 10^{10} \text{ n/cm}^2.$$

➤ Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$:

$$\sigma \pm \delta\sigma = (2.02 \pm 0.13) \text{ barn}.$$

Υπολογισμός ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$

Έχοντας υπολογίσει προηγουμένως όλους τους παράγοντες, για τις δύο μετρήσεις προκύπτει:

1^η Μέτρηση

$$(\sigma \pm \delta\sigma) = (1.90 \pm 0.12) \text{ (barn)}$$

2^η Μέτρηση

$$(\sigma \pm \delta\sigma) = (2.02 \pm 0.13) \text{ (barn)}$$

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο “**Weighted Averages**”, προκύπτει για την ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ η παρακάτω τιμή:

$$(\sigma \pm \delta\sigma) = (1.96 \pm 0.09) \text{ (barn)}$$

Όπου:

$$\text{➤ } \sigma = \frac{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{\delta\sigma_i^2} \cdot \sigma_i}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{\delta\sigma_i^2}}$$

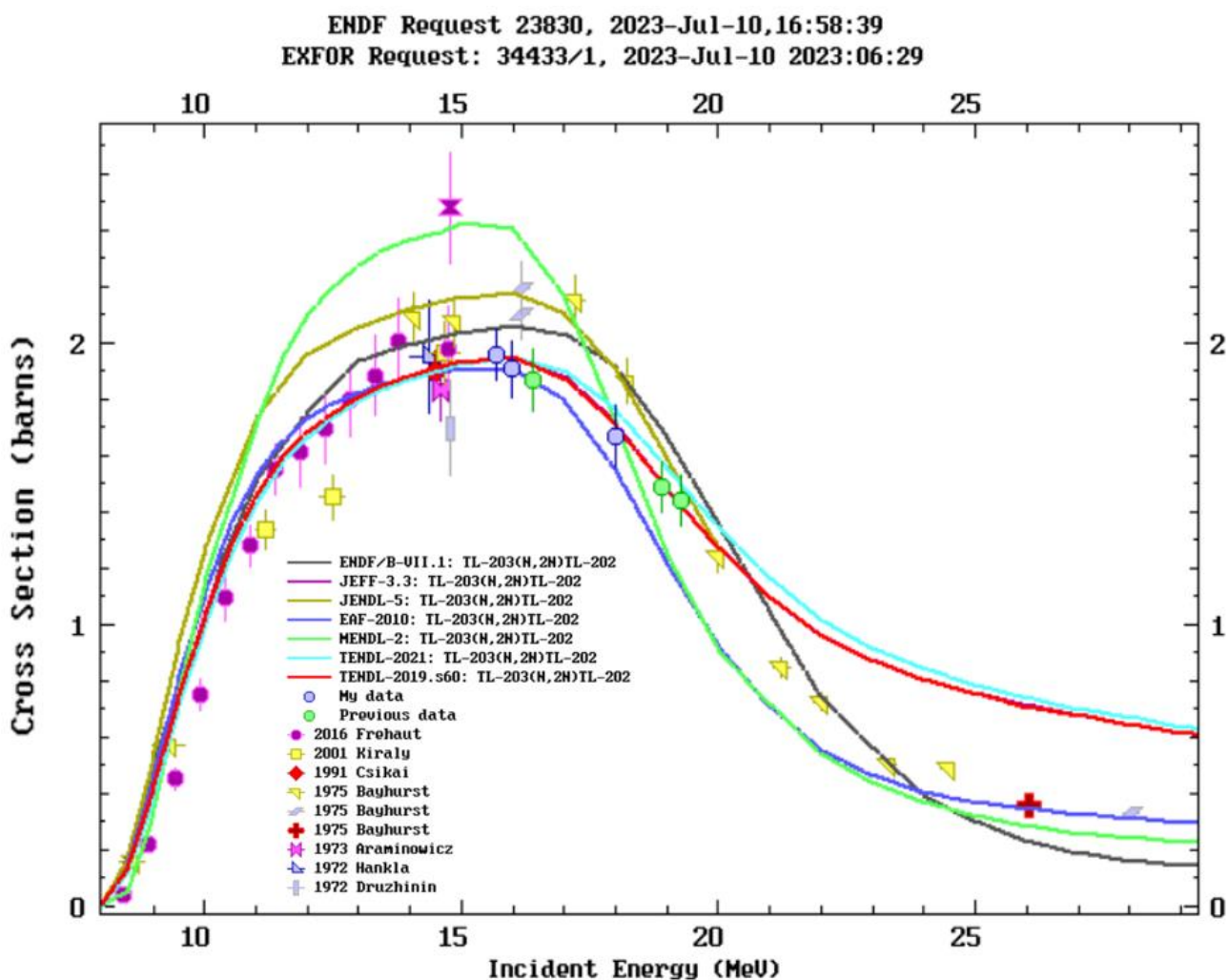
$$\text{➤ } \delta\sigma = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^2 \frac{1}{\delta\sigma_i^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, για την μελέτη της αντίδρασης “ $n+^{203}\text{Tl}$ ”, μπόρεσε να μελετηθεί μόνο το κανάλι $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$, ενώ στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα αποτελέσματα της ενεργού διατομής για τις τρεις ενέργειες ($E=15,7\text{MeV}, 16\text{MeV}, 18\text{MeV}$), σε συνδυασμό με προηγούμενες πειραματικές μελέτες που έγιναν από την ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την συγκεκριμένη αντίδραση σε ενέργειες $E=16.4\text{MeV}, 18.9\text{MeV}, 19.3\text{MeV}$:

| Ενέργεια(MeV) | 15.7 | 16 | 18 | 16.4* | 18.9* | 19.3* |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\sigma \pm \delta\sigma$ (barn) | 1.96 ± 0.09 | 1.91 ± 0.10 | 1.67 ± 0.11 | 1.87 ± 0.11 | 1.49 ± 0.09 | 1.44 ± 0.09 |



Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα μετρήσεων της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ που αφορούν την συγκεκριμένη εργασία, σε συνδυασμό με προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις της ομάδας της Πυρηνικής Φυσικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αλλά και άλλων ερευνητικών ομάδων, καθώς και οι θεωρητικοί υπολογισμοί, όπως προκύπτουν από τις διαδικτυακές βιβλιοθήκες ENDF.

Από την **εικόνα 5.1** παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις, τόσο της ομάδας της Πυρηνικής Φυσικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, όσο και με τις μετρήσεις άλλων ερευνητικών ομάδων, αλλά και με τους θεωρητικούς υπολογισμούς της ENDF, εντοπίζοντας την μεγαλύτερη συμφωνία κυρίως με τις εκτιμήσεις των βιβλιοθηκών της **TENDL**.

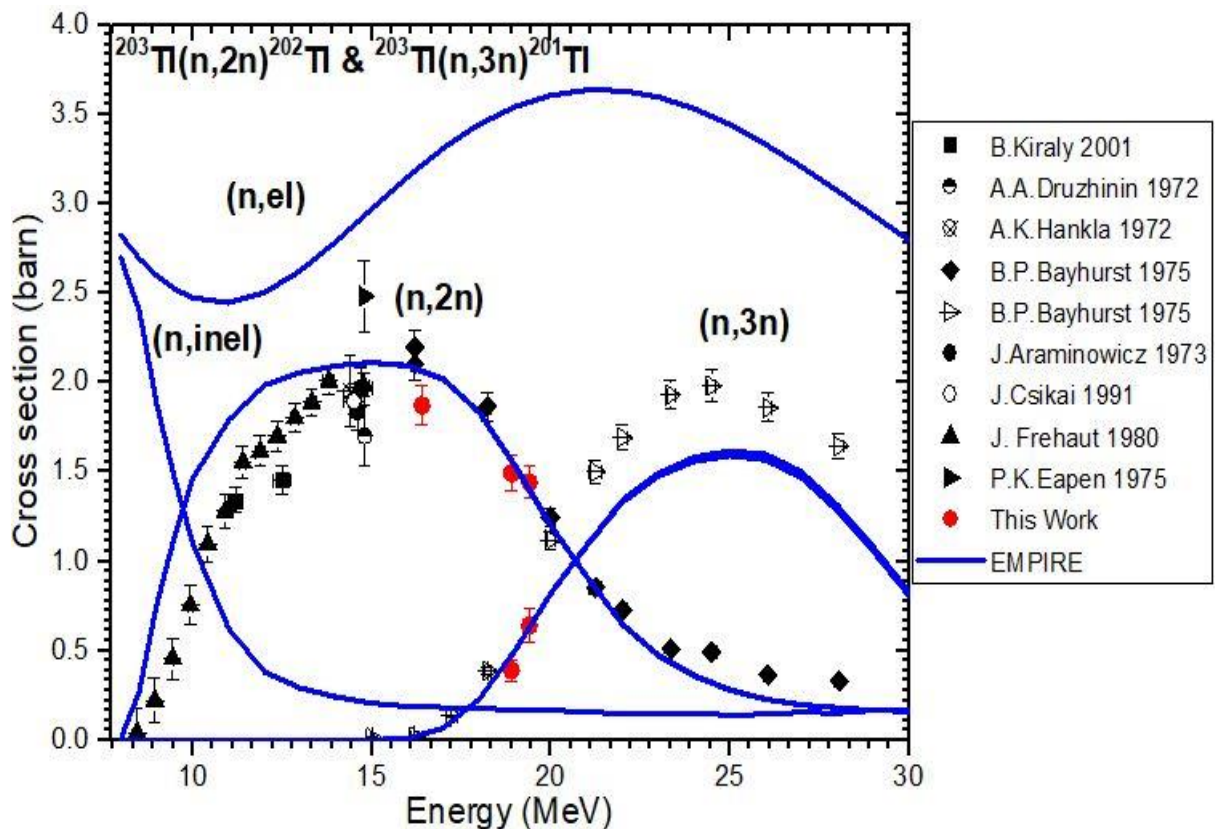
Μελλοντικές Προοπτικές

✓ Ερευνητικό Επίπεδο

Οι επόμενοι ερευνητικοί στόχοι της ομάδας της Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ αποσκοπούν σε μετρήσεις της νετρονικής αντίδρασης του Φυσικού Θαλλίου σε χαμηλότερες ενέργειες $\approx 9 - 15\text{MeV}$, καθώς και στην ενεργειακή περιοχή $17-18\text{MeV}$, όπου δεν έχουν πραγματοποιηθεί προηγούμενες μετρήσεις της ομάδας, ενώ οι ήδη υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζουν αποκλίσεις κυρίως στην περιοχή των $17-18\text{MeV}$.

✓ Θεωρητικό Επίπεδο

Προηγούμενοι θεωρητικοί υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ με σκοπό την προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων των αντιδράσεων $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ και $^{203}\text{Tl}(n,3n)^{201}\text{Tl}$ κάνοντας χρήση του προγράμματος EMPIRE (εικόνα 5.2). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.2, τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα στην περίπτωση του καναλιού $(n,3n)$ παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση, ενώ παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε και στην περίπτωση του καναλιού $(n,2n)$ στην ενεργειακή περιοχή $0-15\text{MeV}$.



Σχήμα 5.2: Προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις της ομάδας της Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ σε συνδυασμό με τα θεωρητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από το EMPIRE. [19]

Συνεπώς, ο επόμενος στόχος αφορά σε θεωρητικούς υπολογισμούς, με σκοπό την καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων, μειώνοντας τις αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Wikiwand, «Thallium»: <https://www.wikiwand.com/en/Thallium>.
- [2] "Introduction to nuclear reaction models", 2003.
- [3] Thompson I., *Nuclear Theory and Modeling Group*, Lawrence Livermore National Laboratory.
- [4] A. Koning και H. Akkemanns, "PRE-EQUILIBRIUM NUCLEAR REACTIONS: An introduction to classical and quantum-mechanical models", 1999.
- [5] Καλαμαρά Α., "Μέτρηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{241}\text{Am}(n, 2n)^{240}\text{Am}$ ", Ε.Μ.Π., 2011.
- [6] B. Shyam and R. Chatterjee, *BREAKUP REACTIONS*, 2003.
- [7] Young J., "The Theory of Direct Nuclear Knock-out Reactions", Department of Physics University of North Carolina, Chapel Hill, N. C., U.S.A.
- [8] Kalamara A., "Neutron induced reactions on Ir and Au" PhD Thesis NTUA, 2019.
- [9] Σπηλιώτης Α., Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία "Μέτρηση της ενεργού διατομής των πυρηνικών αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$ και $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ σε ενέργειες 15.3 και 17.1 MeV", Ε.Μ.Π., 2015.
- [10] Λαουτάρης Α., Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, "ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΓΥΜΝΩΣΗΣ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΟΝ 5.5 MV ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗ TANDEM VAN DE GRAFF ΤΟΥ Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος" ", Ε.Μ.Π. 2016.
- [11] Μαραγγούλη Γ., Μεταπτυχιακή Εργασία, "ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ $^2_1\text{H}(d, n)^3_1\text{He}$ ", Ε.Μ.Π. , 2015.
- [12] Βρυώνης Χ., Πτυχιακή Εργασία, "ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ" , ΑΥΤΗ, 2011.
- [13] Σπανίδης Θ., Διπλωματική Εργασία, "ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΦΟΡΗΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ BEGe ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO", Ε.Μ.Π. , 2021.
- [14] "Q-value calculator": <http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/qcalc/>.
- [15] "Nuclear Data Search": <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/>.
- [16] "XCOM NIST": <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.
- [17] "ENDF": <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
- [18] Zinovia E., Master Thesis, "Study of (n,x) reactions for Erbium isotopes at energies higher than 17 MeV", University of Ioannina, 2017.
- [19] M. Diakaki, R. Vlastou, S. Patas, S. Chasapoglou, M. Kokkoris, G. Alamanos, V. Michalopoulou, M. Axiotis, S. Harissopoulos, and A. Lagoyannis, "Activation Cross Section Measurement of the (n,2n) Reaction on ^{203}Tl ", EPJ Web of Conferences , 2023.