



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**

**«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

**Μέτρηση της Ολικής Ενεργού Διατομής της αντίδρασης**  
 **$^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αλαμάνος Γεώργιος**

**ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2019**



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Επ. Καθηγητή Δρ. Μιχάλη Κόκκορη που με δέχτηκε στην ομάδα Πυρηνικής Φυσικής του Πολυτεχνείου και με βοήθησε να μπω στον «κόσμο» της πειραματικής φυσικής, δείχνοντας μου ιδιαίτερη εμπιστοσύνη και προθυμία να μοιραστεί μαζί μου την εμπειρία του και να απαντήσει σε ερωτήματα που γεννιούνταν κατά καιρούς, αντιμετωπίζοντας κάθε τί καινούριο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Δρ. Ρόζα Βλαστού- Ζάννη που προσέφερε απλόχερα τις γνώσεις της και την βοήθειά της είτε λύνοντας πειραματικά προβλήματα είτε απαντώντας σε ερωτήματα που είχα και με την οποία είχαμε μια εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ, θα ήθελα να πω και τον Ερευνητή Δρ. Αναστάσιο Λαγογιάννη και τον Ερευνητή Δρ. Μιχάλη Αξιώτη του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», για την καθοριστική συμμετοχή τους στην πειραματική διαδικασία, για την υπομονή που έδειξαν, αλλά και για την όρεξη με την οποία μας υποδέχτηκαν.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες τον Δρ. Κων/νο Κάλφα, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», για την ετοιμότητά του να βοηθήσει σε ό,τι θέμα προκύπτει. (Ο Δρ. Κάλφας ανέπτυξε τον κώδικα SPECTRW που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας).

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά της Ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Πολυτεχνείου για την τη συμπαράσταση, τη βοήθεια αλλά και την ενεργή συμμετοχή τους, τόσο στη διεξαγωγή της μέτρησης, όσο και στην πορεία της μελέτης. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Διδακτορικούς Αντιγόνη Καλαμαρά και Θανάση Σταματόπουλο, χωρίς τη συμμετοχή των οποίων τόσο σε θεωρητικά ζητήματα όσο και στην πειραματική διαδικασία, δεν θα μπορούσε να διεξαχθεί η μέτρηση.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την βοήθεια που μου δείχνουν όλο αυτό τον καιρό.



## Περίληψη

Η ολική ενεργός διατομή της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ , μετρήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας με τη μέθοδο της ενεργοποίησης, σε ενέργειες νετρονίων 17,7 MeV και 19,3 MeV, αναφορικά με τις αντιδράσεις  $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$  και  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ . Η μονοενεργιακή δέσμη νετρονίων παρήχθη στον επιταχυντή 5.5 MV Tandem του NCSR Demokritos, κάνοντας χρήση της αντίδρασης  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ . Η πειραματική διάταξη τοποθετήθηκε σε περίπου 2 cm από τον στόχο του τριτίου περιορίζοντας έτσι τη γωνιακή αποδοχή σε  $\pm 15^\circ$ , όπου τα παραγόμενα νετρόνια είναι πρακτικά ισοτροπικά και μονοενεργά. Η μεταβολή της ροής της δέσμης νετρονίων παρακολουθήθηκε με έναν ανιχνευτή BF3 τοποθετημένο σε απόσταση 3 m από την πηγή νετρονίων και έναν σπινθηριστή τύπου LIQUID BC501A.

Μετά το τέλος της ακτινοβόλησης, μετρήθηκε η αποδιέγερση των σύνθετων πυρήνων που δημιουργήθηκαν από τη δέσμη νετρονίων στον στόχο με έναν ανιχνευτή HPGe σχετικής απόδοσης 50%, ο οποίος ήταν κατάλληλα θωρακισμένος με μπλοκ μολύβδου προκειμένου να μειωθεί η συμβολή της φυσικής ραδιενέργειας. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo που εφαρμόζουν τον κώδικα MCNP έχουν πραγματοποιηθεί προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα αυτοαπορρόφησης με ακτίνες γάμα καθώς και η εκτίμηση της ροής νετρονίων μέσω των φύλλων αναφοράς.

## **Abstract**

The cross section of the reaction  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ , has been measured by the activation method, at neutron energies 17.7 MeV and 19.3 MeV, relative to the  $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$  and the  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  reference reaction cross sections. The monoenergetic neutron beam was produced at the 5.5 MV Tandem accelerator of NCSR Demokritos, by means of the  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$  reaction, implementing a Ti-tritiated target consisted of  $2.1\text{ mg/cm}^2$  Ti-t layer on a 1 mm thick Cu backing for good heat conduction. The target assembly was placed at about 2 cm from the tritium target thus limiting the angular acceptance to  $\pm 15^\circ$ , where the produced neutrons are practically isotropic and monoenergetic. The flux variation of the neutron beam was monitored by a  $\text{BF}_3$  detector placed at a distance of 3 m from the neutron source and a BC501A liquid scintillator.

After the end of the irradiation, the activity induced by the neutron beam at the target and reference foils was measured by a HPGe detector of 50% relative efficiency, which was properly shielded with lead blocks in order to reduce the contribution of the natural radioactivity. Monte Carlo simulations implementing the MCNP code have been carried out in order to account for gamma-ray self-absorption effects as well as for the estimation of the neutron flux by means of the reference foils.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες

Περίληψη

Abstract

Κεφάλαιο 1 .....	11
Η αντίδραση $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ και η μέθοδος μέτρησής της.....	11
1.1 Προηγούμενες μετρήσεις της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ .....	11
1.2 Είδη πυρηνικών αντιδράσεων.....	12
1.3 Διερεύνηση των δυνατών καναλιών εξόδου της αλληλεπίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ .....	14
1.4 Μέτρηση ενεργού διατομής με τη μέθοδο της ενεργοποίησης.....	18
Κεφάλαιο 2 .....	22
Πειραματική Διαδικασία.....	22
2.1 Παραγωγή δέσμης νετρονίων.....	22
2.2 Περιγραφή και τοποθέτηση των στόχων.....	25
2.3 Ανίχνευση Νετρονίων.....	28
2.3 Ανιχνευτές ακτίνων-γ.....	30
Κεφάλαιο 3 .....	36
Υπολογισμός της πειραματικής ενεργού διατομής .....	36
3.1 Λήψη και ανάλυση φασμάτων $^{202}\text{Tl}$ .....	36
3.1.1 Ενέργεια ακτίνας νετρονίων 19.3 MeV.....	36
3.1.2 Ενέργεια ακτίνας νετρονίων 17.7 MeV.....	40
3.2 Υπολογισμός Πειραματικής Ενεργού Διατομής για Ενέργεια 19.3MeV.....	44
3.3 Υπολογισμός Πειραματικής Ενεργού Διατομής για Ενέργεια 17.7MeV.....	51
Κεφάλαιο 4 .....	57
Υπολογισμός της συνολικής ροής νετρονίων $\Phi$ στον στόχο.....	57
4.1 Πειραματικός υπολογισμός της νετρονικής ροής $\Phi$ .....	57
4.2 Υπολογισμός της νετρονικής ροής $\Phi$ μέσω προσομοίωσης MCNP.....	58
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων και εύρεση τελικής τιμής του παράγοντα $\Phi$ για την κάθε ενέργεια.....	60
Κεφάλαιο 5 .....	64
Υπολογισμός της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για ενέργειες νετρονίων 17.7 MeV και 19.3 MeV και τελικά συμπεράσματα .....	64

5.1 Υπολογισμός της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για κάθε μια ενέργεια.....	64
5.2 Σύνοψη και Τελικά Συμπεράσματα.....	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	71
Τρόπος λειτουργίας προγράμματος MCNP5.....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	79
Κώδικας για την προσομοίωση της ακτινοβόλησης με MCNP5.....	79
Βιβλιογραφία.....	98



## Εισαγωγή

Το Θάλλιο (Tl) είναι ένα πολύ μαλακό, εύπλαστο, αργυρόλευκο, βαρύ μέταλλο με ατομικό αριθμό 81 και ανήκει στην ομάδα 13 του περιοδικού πίνακα ανάμεσα στον υδράργυρο (Hg) και τον μόλυβδο (Pb). Η μέση περιεκτικότητα του στερεού φλοιού της γης σε θάλλιο είναι περίπου 0,7 ppm και στη φύση απαντάται με μορφή σπάνιων ορυκτών τα οποία όμως δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα, το οποίο το καθιστά σήμερα το 9ο ακριβότερο μέταλλο. Παρά την υψηλή τοξικότητά του το θάλλιο έχει μια πληθώρα εφαρμογών σε πολλούς σύγχρονους τομείς της τεχνολογίας. Στα οπτικά υλικά οι κρύσταλλοι βρωμιούχου θαλλίου και ιωδιούχου θαλλίου, με το εμπορικό όνομα KRS-5 έχουν χρησιμοποιηθεί ως υπέρυθρα οπτικά υλικά γιατί είναι σκληρότερα από τα κοινά υπέρυθρα υλικά και επειδή έχουν μετάδοση σε σημαντικά μεγαλύτερα μήκη κύματος, ενώ το οξείδιο του θαλλίου έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή γυαλιών που έχουν υψηλό δείκτη διάθλασης. Στα ηλεκτρονικά η αγωγιμότητα του θειούχου θαλλίου,  $Tl_2S$ , μεταβάλλεται όταν αυτό εκτεθεί στο υπέρυθρο φως και αυτή η ιδιότητα το καθιστά χρήσιμο στους φωτοαγωγούς. Το σεληνιούχο θάλλιο,  $Tl_2Se$  έχει χρησιμοποιηθεί σε βολτόμετρα, που είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ακτινοβολούμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, για ανίχνευση υπέρυθρων ακτινοβολιών. Επίσης ο «εμβολιασμός» (doping) με θάλλιο χρησιμοποιείται και στους κρυστάλλους ιωδιούχου νατρίου (NaI) που βρίσκονται σε συσκευές ανίχνευσης ακτινοβολίας γάμμα. Τέλος μια πιο τις πιο σημαντικές χρήσεις του στοιχείου αυτού είναι στην πυρηνική ιατρική, όπου ραδιενεργό ισότοπο θαλλίου αποτελεί το κύριο διαγνωστικό εργαλείο της πυρηνικής ιατρικής και χρησιμοποιείται σε τεστ κοπώσεως όπου εγχέεται ενδοφλεβίως και συσσωρεύεται στο μυοκάρδιο, αποκαλύπτοντας τις περιοχές όπου υπάρχει έμφραγμα ή ισχαιμία.

Παρά την ευρεία χρήση του θαλλίου και των ισοτόπων του σε όλους τους παραπάνω τεχνολογικούς τομείς τα βιβλιογραφικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα σχετικά με τις νετρονικές αντιδράσεις του στοιχείου αυτού και την παραγωγή ασταθών ισοτόπων (ιδιαίτερως χρήσιμα στην πυρηνική ιατρική) από σταθερά, είναι σπάνια στη βιβλιογραφία και παρουσιάζουν πολλές αποκλίσεις μεταξύ τους κάτι που φαίνεται και στο επόμενο κεφάλαιο. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της ενεργού διατομής νετρονικών αντιδράσεων του θαλλίου μέσω ακτινοβόλησης στόχων φυσικού θαλλίου από μονοενεργειακές δέσμες νετρονίων διαφορετικών ενεργειών, ώστε να παραχθούν και να μελετηθούν τα ασταθή-ραδιενεργά ισότοπα που προκύπτουν από αυτές τις αντιδράσεις.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι από παλιότερα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ έχουν μελετηθεί η ενεργές

διατομές νετρονικών αντιδράσεων σε γειτονικά στοιχεία του θαλλίου, όπως ο υδράργυρος και ο χρυσός, ενώ έχουν γίνει επίσης θεωρητικές προβλέψεις και μοντέλα για την περιγραφή του πυρηνικού δυναμικού κάποιων από αυτά τα στοιχεία συνεπώς η παρούσα εργασία θα συμβάλει επίσης στις προσπάθειες της ομάδας για εμπλουτισμό των γνώσεών μας όσον αφορά την πυρηνική συμπεριφορά των στοιχείων που βρίσκονται σε αυτό το εύρος του περιοδικού πίνακα.

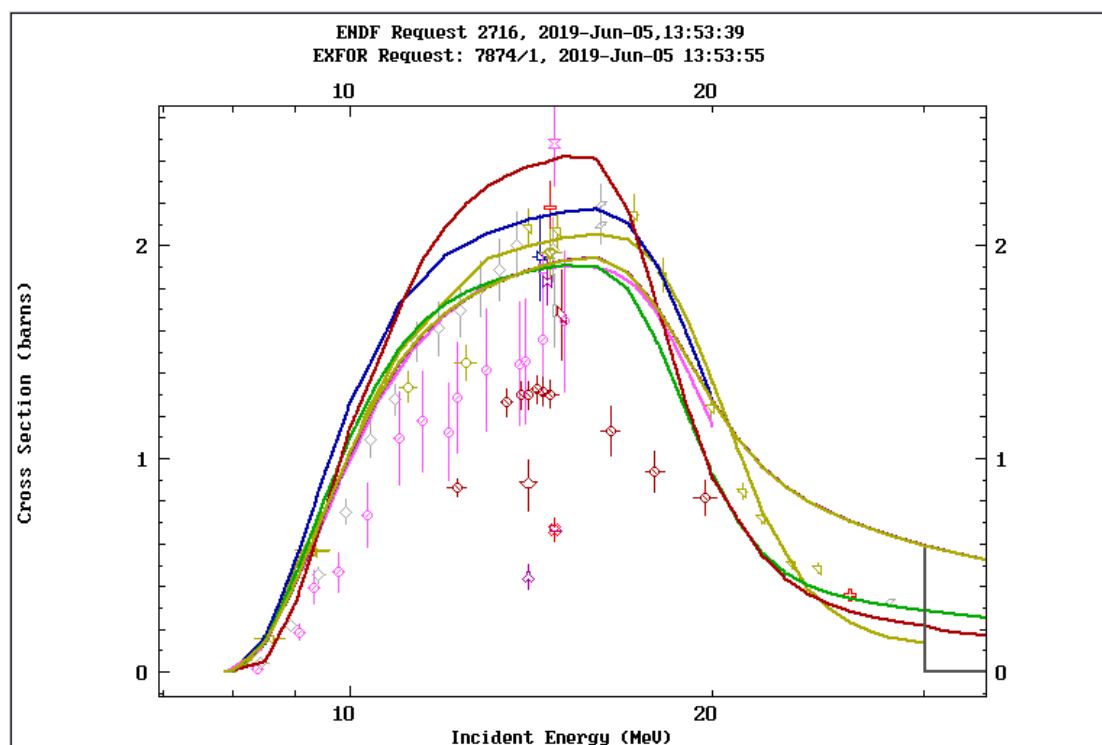
## Κεφάλαιο 1

### Η αντίδραση $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ και η μέθοδος μέτρησής της

#### 1.1 Προηγούμενες μετρήσεις της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$

Το Θάλλιο έχει δύο σταθερά ισότοπα, το  $^{203}\text{Tl}$  που εμφανίζεται με αφθονία 29.53% στη φύση και το  $^{205}\text{Tl}$  με 70.47% αφθονία. Παρ' όλα αυτά το ισότοπο  $^{205}\text{Tl}$ , αν και βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στο φυσικό Θάλλιο, δεν μπορεί να μετρηθεί εύκολα σε νετρονικές αντιδράσεις καθώς το κύριο ισότοπο που προκύπτει μετά από ακτινοβόληση με νετρονική δέσμη υψηλών ενεργειών είναι το  $^{204}\text{Tl}$ , το οποίο δεν αποδιεγείρεται με ακτίνες-γ, ενώ οι υπόλοιποι διεγερμένοι πυρήνες που προβλέπεται να προκύψουν είναι οι  $^{203}\text{Tl}$  και  $^{205}\text{Hg}$  οι οποίοι είναι σταθεροί. Συνεπώς μόνο το ισότοπο  $^{203}\text{Tl}$  ενδείκνυται για μέτρηση ολικής ενεργού διατομής νετρονικών αντιδράσεων.

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  έχει μετρηθεί μέχρι στιγμής από έντεκα ομάδες ερευνητών ανά τον κόσμο για ενέργειες νετρονίων από 8 μέχρι 29 MeV, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.1: Πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν στις βάσεις δεδομένων για την ενεργό διατομή της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων.

Για την περιοχή ενεργειών από τα 8 MeV έως τα 12 MeV υπάρχει σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών δεδομένων, ενώ οι θεωρητικές καμπύλες δεν αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους. Στην περιοχή ενεργειών από τα 12 MeV έως τα

15 MeV ξεκινάει η σταδιακά αυξανόμενη απόκλιση των θεωρητικών καμπύλων και μεγαλώνει η ασυμφωνία μεταξύ των πειραματικών δεδομένων. Τέλος στην περιοχή ενεργειών από τα 15 MeV έως τα 28 MeV σημειώνεται μεγάλη διαφοροποίηση των πειραματικών μετρήσεων των διαφόρων επιστημονικών ομάδων μεταξύ τους, ενώ η απόκλιση των θεωρητικών καμπύλων είναι εμφανής. Προκειμένου να διαλευκανθούν οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στις πειραματικές μετρήσεις στο εύρος ενεργειών από 15 MeV έως 28 MeV πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις που θα αναφερθούν στην επόμενη υποενότητα.

## 1.2 Είδη πυρηνικών αντιδράσεων

Μία πυρηνική αντίδραση προκαλείται με τον βομβαρδισμό ενός ακίνητου στόχου ( $A$  : πυρήνας στόχος) με μία δέσμη νετρονίων, φωτονίων ή φορτισμένων σωματίων συγκεκριμένης κινητικής ενέργειας ( $a$  : σωματίο δέσμης) και αποδίδεται με σύμβολα ως εξής :  $a+A \rightarrow b+B$  ή  $A(a,b)B$  , όπου  $b+B$  : μία ανακατάταξη των νουκλεονίων του συγκροτήματος ( $a+A$ ) .

Οι πυρηνικές αντιδράσεις χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση δύο κριτήρια:

**Κριτήριο 1:** ο χρόνος διεξαγωγής της αντίδρασης.

**Κριτήριο 2:** η διαθέσιμη ενέργεια, την οποία είτε εκλύουν, είτε απορροφούν.

Σύμφωνα με το "**Κριτήριο 1**", οι αντιδράσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- 1) τις άμεσες αντιδράσεις
- 2) τις αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα.

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των **άμεσων αντιδράσεων (direct reactions)** είναι ότι η όλη διεργασία συντελείται σε σχετικά μικρό χρόνο (της τάξης των  $10^{-22}$  s), δηλαδή το προσπίπτον σωματίο ( $a$ ) διανύει σχετικά γρήγορα το πεδίο του πυρήνα ( $A$ ), ενώ στις αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα ακόμα και οι ταχύτεροι χρόνοι διαφυγής ενός σωματίου ( $b$ ) από έναν πυρήνα ( $B$ ), είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από το χρόνο διάρκειας των άμεσων αντιδράσεων (της τάξεως των  $10^{-16}$ s) . Υπάρχουν τέσσερα είδη άμεσων αντιδράσεων:

α) Ελαστική σκέδαση (elastic scattering):  $A(a,a)A$  , δηλαδή  $b=a$  και  $B=A$  , οπότε το μόνο που αλλάζει κατά την ελαστική σκέδαση είναι η κινητική ενέργεια και η διεύθυνση του σωματίου  $a$ .

β) Μη ελαστική σκέδαση (inelastic scattering):  $A(a,a)A^*$  , δηλαδή  $b=a$  και  $B=A^*$ . Ο αστερίσκος (\*) υποδηλώνει ότι ο αρχικός πυρήνας μετά την αλληλεπίδραση με το προσπίπτον σωματίο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση.

γ) Αντιδράσεις απογύμνωσης (stripping reactions). Κατά τη διέλευση ενός σωματίου  $a$  από το πεδίο του πυρήνα  $A$  , ένα ή δύο νουκλεόνια του βλήματος αλληλεπιδρούν με ένα ή δύο νουκλεόνια του στόχου, αφήνοντας τα λοιπά νουκλεόνια του

πυρηνικού συστήματος ανεπηρέαστα. Αν για παράδειγμα, το σωματίο  $a$  είναι δευτέριο ( $d$ ), τότε το νετρόνιο του δευτερίου, που δε συναντά φράγμα δυναμικού λόγω αλληλεπίδρασης Coulomb μπορεί να εισχωρήσει στον πυρήνα  $A$ , αφήνοντας το πρωτόνιο να συνεχίσει μόνο την πορεία του.

δ) Αντιδράσεις υφαρπαγής (pick up reactions). Η αντίστροφη διαδικασία των αντιδράσεων απογύμνωσης, κατά την οποία το βλήμα συλλαμβάνει και απομακρύνει ένα ή δύο νουκλεόνια από τον πυρήνα  $A$ .

Από την άλλη, οι **αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα (compound nucleus reactions)** αποτελούν ένα διαφορετικό σενάριο σχετικά με την όλη διεργασία της αντίδρασης  $A(a,b)B$ , που συμπεριλαμβάνει δύο διακριτά βήματα.:  $a+A \rightarrow C^* \rightarrow b+B$ . Στο πρώτο βήμα, το σωματίο  $a$  απορροφάται από τον πυρήνα  $A$ , διαμορφώνοντας προσωρινά ένα σύνθετο πυρηνικό σύστημα  $C^*$ , με ατομικό και μαζικό αριθμό αντίστοιχα ίσο προς το άθροισμα των ατομικών και μαζικών αριθμών του βλήματος και του πυρήνα του στόχου, και στο δεύτερο βήμα, ο πυρήνας  $C^*$ , που όπως φαίνεται, σχηματίζεται σε κάποια διεγερμένη ενεργειακή του κατάσταση, αποδιεγείρεται εκπέμποντας ένα σωματίδιο  $b$  και έτσι δημιουργείται ο πυρήνας  $B$ .

Σύμφωνα με το "**Κριτήριο 2**", οι αντιδράσεις χωρίζονται και πάλι σε δύο κατηγορίες:

- 1) τις **εξώθερμες αντιδράσεις**
- 2) τις **ενδόθερμες αντιδράσεις**

Μία **εξώθερμη αντίδραση** πραγματοποιείται αυθόρμητα, καθώς τα προϊόντα βρίσκονται σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο από τα αντιδρώντα, άρα θεωρητικά, μπορεί να συμβεί ακόμα και με μηδενική κινητική ενέργεια του βλήματος. Ενώ σε μία ενδόθερμη αντίδραση, τα προϊόντα βρίσκονται σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο από τα αντιδρώντα και για το λόγο αυτό, απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, που παρέχεται υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας του βλήματος. Μία εξώθερμη αντίδραση χαρακτηρίζεται από θετική διαθέσιμη ενέργεια ( $Q > 0$ ), ενώ μία ενδόθερμη αντίδραση χαρακτηρίζεται από αρνητική διαθέσιμη ενέργεια ( $Q < 0$ ). Στην περίπτωση που η διαθέσιμη ενέργεια είναι μηδενική ( $Q = 0$ ), τότε πρόκειται για ελαστική σκέδαση, δηλαδή τα προϊόντα είναι ίδια με τα αντιδρώντα. Η διαθέσιμη ενέργεια, αναφερόμενη και ως τιμή  $Q$  ( $Q$ -value) προέρχεται από τη διαφορά των μαζών στην αρχική και στην τελική κατάσταση και δίνεται από τη σχέση:

$$Q=(m_A+m_a-m_B-m_b)*c^2 \quad (1.2.1)$$

ή συναρτήσει του ελλείμματος μάζας:

$$\Delta=m-A \quad (1.2.2)$$

Όπου

$m$  : μάζα του ουδέτερου ατόμου σε ατομικές μονάδες μάζας (amu)  
 $A$  : ο μαζικός αριθμός του ατόμου σε ατομικές μονάδες μάζας (amu)  
 από τη σχέση:

$$Q = \Delta_a + \Delta_A - \Delta_b - \Delta_B \quad (1.2.3)$$

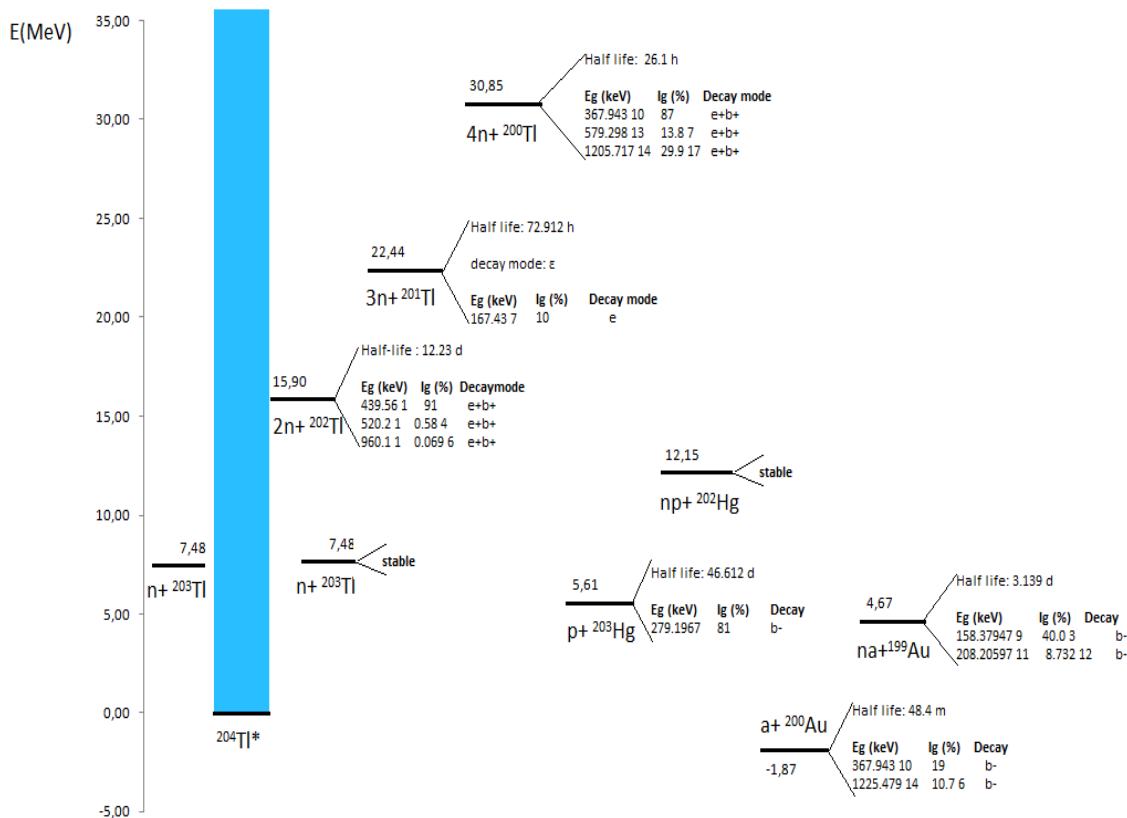
### 1.3 Διερεύνηση των δυνατών καναλιών εξόδου της αλληλεπίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$

Η αλληλεπίδραση ενός νετρονίου με έναν πυρήνα  $^{203}\text{Tl}$  είναι αντίδραση σύνθετου πυρήνα και τα δυνατά κανάλια εξόδου της φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Αλλ/ση Εισόδου	Αλλ/ση Εξόδου	Διαθέσιμο Ενέργειας (Q-value)
$n + ^{203}\text{Tl}$	$n + ^{203}\text{Tl}$	0,008amu 7,48MeV
	$2n + ^{202}\text{Tl}$	0,017amu 15,90MeV
	$3n + ^{201}\text{Tl}$	0,024amu 22,44MeV
	$4n + ^{200}\text{Tl}$	0,033amu 30,85MeV
	$p + ^{203}\text{Hg}$	0,006amu 5,61MeV
	$np + ^{202}\text{Hg}$	0,013amu 12,15MeV
	$a + ^{200}\text{Au}$	-0,002amu -1,87MeV
	$na + ^{199}\text{Au}$	0,005amu 4,67MeV

Πίνακας 1.1: Δυνατά κανάλια εξόδου από την αλληλεπίδραση  $n + ^{203}\text{Tl}$

Το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα είναι το εξής:



Σχήμα 1.2: Ενεργειακό διάγραμμα της αλληλεπίδρασης  $n+^{203}\text{Tl}$

Τα δυνατά κανάλια εξόδου που θα ανοίξουν κατά την διάρκεια της ακτινοβόλησης στις ενέργειες που έχουμε επιλέξει μπορούν να εκτιμηθούν αφού υπολογιστεί η ενέργεια κέντρου μάζας των νετρονίων της δέσμης, με την οποία θα γίνει η ακτινοβόληση. Η ενέργεια κέντρου μάζας ( $E_{CM}$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{CM} = E_{\text{εργαστηρίου}} \frac{A \text{ αντιδρώντος}}{A \text{ συνθ. πυρήνα}} \quad (1.2.4)$$

Όπου:

$E_{\text{εργαστηρίου}}$  : η ενέργεια της δέσμης νετρονίων με την οποία γίνεται η ακτινοβόληση (17.7 MeV και 19.3 MeV).

$A_{\text{αντιδρώντος}}$  : ο μαζικός αριθμός του πυρήνα που ακτινοβολείται (για τον  $^{203}\text{Tl}$  είναι 203).

$A_{\text{σύνθ. πυρήνα}}$  : ο μαζικός αριθμός του σύνθετου πυρήνα που δημιουργείται στο ενδιάμεσο στάδιο (για τον  $^{204}\text{Tl}^*$  είναι 204).

Προκύπτει:

$$E_{CM} = 17.61 \text{ MeV} \text{ για } E_{\text{εργαστηρίου}} = 17.7 \text{ MeV}$$

$$E_{CM} = 19.21 \text{ MeV} \text{ για } E_{\text{εργαστηρίου}} = 19.3 \text{ MeV}$$

Οπότε, από το ενεργειακό διάγραμμα προκύπτει ότι τα κανάλια που θα μπορέσουν να ανοίξουν για δέσμη νετρονίων ενέργειας 17.7 MeV και 19.3 MeV αντίστοιχα, είναι αυτά που βρίσκονται σε ενεργειακό επίπεδο χαμηλότερο από το επίπεδο στο οποίο έχει διεγερθεί ο σύνθετος πυρήνας ( 25.09 MeV για  $E_{\text{εργαστηρίου}} = 17.7 \text{ MeV}$  και 26.69 MeV για  $E_{\text{εργαστηρίου}} = 19.3 \text{ MeV}$  ).

Επειδή το  $^{204}\text{Tl}$  είναι βαρύς πυρήνας κι επομένως έχει την τάση να διώχνει νετρόνια, τα πιο προτιμητέα από τα παραπάνω κανάλια, δηλαδή τα κανάλια με τη μεγαλύτερη ενεργό διατομή, θα είναι τα κανάλια:  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  και  $^{203}\text{Tl}(n,3n)^{201}\text{Tl}$ . Παρόλα αυτά, το μόνο κανάλι που μελετήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι το  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  λόγω του μεγάλου χρόνου ημι-ζωής του παραγόμενου πυρήνα ( $^{202}\text{Tl}$ ) και του τρόπου αυτοδιέγερσης του, ακτίνες-γ υψηλής έντασης ( $I_{\gamma}=91\%$ ), τα οποία ευνοούν την μέτρηση.

Τα υπόλοιπα κανάλια δε μελετήθηκαν γιατί:

- Το κανάλι  $^{203}\text{Tl}(n,3n)^{201}\text{Tl}$  δεν μπόρεσε να μελετηθεί λόγω του χαμηλού αριθμού γεγονότων (counts) που κατέγραψε ο ανιχνευτής (χαμηλή ένταση ακτίνων-γ παραγόμενου πυρήνα  $I_{\gamma}=10\%$ ) και λόγω της μόλυνσης της ενεργειακής περιοχής στην οποία αποδιεγείρεται ο πυρήνας  $^{201}\text{Tl}$  (167.43keV) από ακτινοβολία περιβάλλοντος.
- Το κανάλι  $^{203}\text{Tl}(n,p)^{203}\text{Hg}$  δεν εξυπηρετεί την τάση του πυρήνα  $^{204}\text{Tl}$  να διώξει νετρόνια, επομένως δεν χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Επίσης κατά την ανάλυση των φασμάτων που προέκυψαν από την ακτινοβόληση διαπιστώσαμε ότι η ενεργειακή περιοχή των 279.19keV, στην οποία αποδιεγείρεται ο πυρήνας  $^{203}\text{Hg}$ , είναι μολυσμένη από ακτινοβολία περιβάλλοντος, ενώ τα επιπλέον γεγονότα (counts) που μετρήσαμε δεν είναι στατιστικά σημαντικά για την ανάλυση μας.
- Το κανάλι  $^{203}\text{Tl}(n,\alpha)^{199}\text{Au}$  δεν μελετήθηκε λόγω της χαμηλής ενεργού διατομής της αντίδρασης, της μόλυνσης των ενεργειακών περιοχών στις οποίες αποδιεγείρεται ο πυρήνας  $^{199}\text{Au}$  (158.37keV και 208.20 keV) από ακτινοβολία περιβάλλοντος και της μεγάλης ενεργειακής διαφοράς που έχει με τη διεγερμένη στάθμη του σύνθετου πυρήνα μετά την ακτινοβόληση.
- Το κανάλι  $^{203}\text{Tl}(n,\alpha)^{200}\text{Au}$  δεν προτιμάται λόγω της χαμηλής έντασης ακτίνων-γ του παραγόμενου πυρήνα ( $I_{\gamma}=19\%$  και  $I_{\gamma}=10.7\%$ ) και της μεγάλης ενεργειακής διαφοράς που έχει με τη διεγερμένη στάθμη του σύνθετου πυρήνα μετά την ακτινοβόληση.
- Το κανάλι  $^{203}\text{Tl}(n,np)^{202}\text{Hg}$  δεν ήταν δυνατόν να μελετηθεί λόγω του ότι ο παραγόμενος πυρήνας ( $^{202}\text{Hg}$ ) είναι σταθερός οπότε δεν μπορεί να μελετηθεί η αποδιέγερσή του.



#### 1.4 Μέτρηση ενεργού διατομής με τη μέθοδο της ενεργοποίησης

Η μέθοδος της πυρηνικής ενεργοποίησης στηρίζεται στο γεγονός ότι πολλές φορές σε μία αντίδραση της μορφής:  $x+X \rightarrow Y+\gamma$ , οι πυρήνες Y που παράγονται είναι ασταθείς και αποδιεγείρονται με αρκετά μεγάλους χρόνους ημιζωής. Έτσι, είναι δυνατόν:

- να προσδιοριστεί το πλήθος των πυρήνων Y που παράχθηκαν από την πυρηνική αντίδραση, με την ανίχνευση της ακτινοβολίας που συνοδεύει την αποδιέγερσή τους, μετά το πέρας της ακτινοβόλησης.
- και στη συνέχεια, να λυθούν τα εξής προβλήματα:

1.  $\{\Phi, N_t\}$ : γνωστά  $\rightarrow$  υπολογίζεται  $\rightarrow \sigma$

2.  $\{\sigma, N_t\}$ : γνωστά  $\rightarrow$  υπολογίζεται  $\rightarrow \Phi$

3.  $\{\Phi, \sigma\}$ : γνωστά  $\rightarrow$  υπολογίζεται  $\rightarrow N_t$

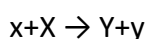
όπου

$\sigma$  : η ενεργός διατομή της αντίδρασης

$N_t$  : το πλήθος των πυρήνων του στόχου που ακτινοβολήθηκε

$\Phi$  : η συνολική ροή στην οποία εκτέθηκε το δείγμα κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης

Ο συλλογισμός που λύνει τα τρία παραπάνω προβλήματα είναι ο εξής: Για μία πυρηνική αντίδραση κατά την οποία δέσμη σωματίων τύπου x αλληλεπιδρά με τον πυρήνα X του στόχου και παράγεται ο ασταθής πυρήνας Y, δηλαδή της μορφής:



Ο ρυθμός παραγωγής  $dN/dt$  πυρήνων τύπου Y, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dN}{dt} = \sigma \cdot f(t) \cdot N_t - \lambda \cdot N$$

(1.4.1)

όπου  $\lambda$  : η σταθερά αποδιέγερσης του ασταθούς πυρήνα Y

$f(t)$  : η ροή των σωματίων x της δέσμης, συναρτήσει του χρόνου

$N$  : ο αριθμός των πυρήνων Y που ακόμα δεν έχουν αποδιεγερθεί

Ο πρώτος όρος  $\sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau$  περιγράφει τη δημιουργία πυρήνων  $Y$ , ενώ ο δεύτερος όρος  $\lambda \cdot N$  την αποδιέγερσή τους. Επομένως, όπως θα ήταν αναμενόμενο, ο ρυθμός παραγωγής πυρήνων είναι ένας συναγωνισμός ανάμεσα στην δημιουργία και στην αποδιέγερση πυρήνων. Αυτή η διαφορική εξίσωση επιλύεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \frac{dN}{dt} &= \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau - \lambda \cdot N && \Leftrightarrow \cdot e^{\lambda t} \\
 \Leftrightarrow \frac{dN}{dt} \cdot e^{\lambda t} &= \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\lambda t} - \lambda \cdot N \cdot e^{\lambda t} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{dN}{dt} \cdot e^{\lambda t} + \lambda \cdot N \cdot e^{\lambda t} &= \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\lambda t} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{dN}{dt} \cdot e^{\lambda t} + N \cdot \frac{de^{\lambda t}}{dt} &= \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\lambda t} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{d(N \cdot e^{\lambda t})}{dt} &= \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\lambda t} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \int \frac{d(N \cdot e^{\lambda t})}{dt} \cdot dt &= \int \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\lambda t} \cdot dt && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t) \cdot e^{\lambda t} &= \int \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\lambda t} \cdot dt + C && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t) \cdot e^{\int \lambda \cdot dt} &= \int \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\int \lambda \cdot dt} \cdot dt + C && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t) &= \frac{\int \sigma \cdot f(t) \cdot N_\tau \cdot e^{\int \lambda \cdot dt} \cdot dt + C}{e^{\int \lambda \cdot dt}} && \Leftrightarrow
 \end{aligned}$$

(1.4.2)

Συνεπώς για ακτινοβόληση που ξεκινάει από  $t=0$  (όπου  $N=0$  και  $C=0$ ) και έχει χρονική διάρκεια  $t_B$ , γίνεται:

$$\begin{aligned}
 N(t_B) &= \frac{N_\tau \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_B} e^{\lambda \cdot dt} \cdot f(t) \cdot dt}{e^{\lambda \cdot (t_B - 0)}} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t_B) &= \frac{N_\tau \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_B} e^{\lambda \cdot dt} \cdot f(t) \cdot dt}{e^{\lambda \cdot t_B}} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t_B) &= N_\tau \cdot \sigma \cdot \left( \int_0^{t_B} e^{\lambda \cdot t} \cdot f(t) \cdot dt \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t_B) &= N_\tau \cdot \sigma \cdot \left( \int_0^{t_B} e^{\lambda \cdot t} \cdot f(t) \cdot dt \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} \cdot \frac{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt} && \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N(t_B) &= N_\tau \cdot \sigma \cdot \left( \int_0^{t_B} f(t) \cdot dt \right) \cdot \frac{\int_0^{t_B} e^{\lambda \cdot t} \cdot f(t) \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} && \Leftrightarrow
 \end{aligned}$$

(1.4.3)

Σύμφωνα με αυτή, η συνολική ροή σωματίων  $\chi$  στην οποία εκτέθηκε το δείγμα  $\Phi$  δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \int_0^{t_B} f(t) \cdot dt$$

(1.4.4)

Οπότε, ο αριθμός των πυρήνων,  $N(t_B)$ , που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας ακτινοβόλησης με χρονική διάρκεια  $t_B$ , από τις σχέσεις (1.4.3) και (1.4.4) προκύπτει:

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

(1.4.5)

Ο κλασματικός όρος περιγράφει το ποσοστό των πυρήνων που δημιουργήθηκαν, αλλά αποδιεγέρθηκαν μέχρι το πέρας της ακτινοβόλησης και συμβολίζεται με τον όρο  $f_c$ , δηλαδή είναι:

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

(1.4.6)

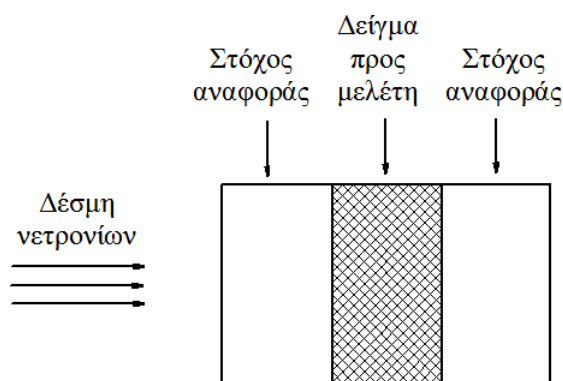
Με αντικατάσταση της σχέσης (1.4.6) στην (1.4.5), προκύπτει:

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

(1.4.7)

Η τελευταία σχέση, (1.4.7) είναι αυτή που λύνει τα 3 προβλήματα που τέθηκαν στην αρχή της ενότητας 1.4.

Μία πολύ χρήσιμη εφαρμογή της μεθόδου ενεργοποίησης είναι ο προσδιορισμός ενεργών διατομών νετρονικών αντιδράσεων. Κατά την ακτινοβόληση, ταυτόχρονα και στην ίδια θέση με το δείγμα, τοποθετούνται στόχοι αναφοράς στις διαστάσεις του δείγματος και από κατάλληλο υλικό (δηλαδή από υλικό για το οποίο είναι γνωστή, με ακρίβεια η ενεργός διατομή για κάποια νετρονική αντίδραση), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ροής ( $\Phi$ ) της δέσμης νετρονίων.



Σχήμα 1.3: Τοποθέτηση των στόχων με την "τεχνική σάντουιτς". Οι στόχοι αναφοράς τοποθετούνται εκατέρωθεν του δείγματος, του οποίου η ενεργός διατομή πρέπει να μετρηθεί και έτσι προσδιορίζεται η ροή νετρονίων στον στόχο.

Τόσο για το δείγμα, όσο και για τους στόχους αναφοράς, ισχύει η σχέση (1.4.7), η οποία αν επιλυθεί ως προς  $\Phi$ , γίνεται:

$$\Phi = \frac{Np}{N\tau} * \frac{1}{\sigma} * \frac{1}{fc} \quad (1.4.8)$$

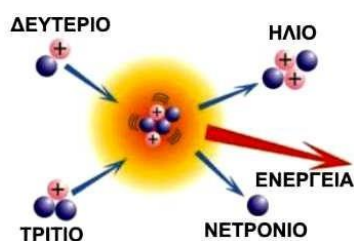
Με τον παραπάνω τύπο υπολογίζεται η ροή νετρονίων για τους στόχους αναφοράς, καθώς η ολική ενεργός διατομή της αντίδρασής τους είναι καλά ορισμένη. Η τιμή της ροής στο εσωτερικό του στόχου που μελετάμε μπορεί να προσεγγιστεί είτε με το μέσο όρο των ροών στους εκατέρωθεν στόχους αναφοράς, είτε με προσομοίωση της ακτινοβόλησης, όπως περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 2

### Πειραματική Διαδικασία

#### 2.1 Παραγωγή δέσμης νετρονίων

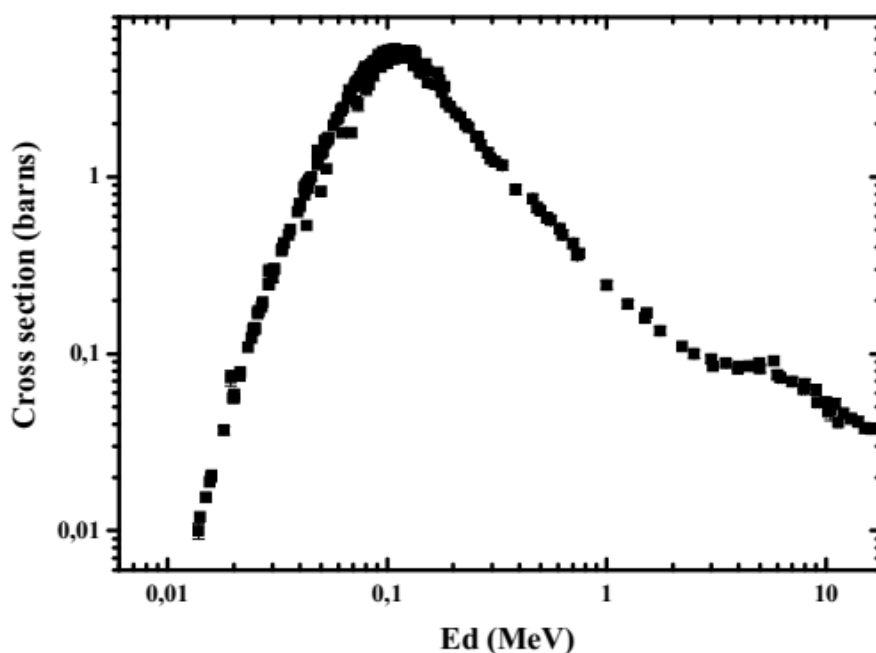
Επειδή η επιθυμητή ενέργεια των νετρονίων είναι μεγάλη, η παραγωγή της δέσμης δεν γίνεται μέσω της αντίδρασης  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  (D-D), που έχει χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες μετρήσεις στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», αλλά μέσω της αντίδρασης  ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$  (D-T). Κατά την αντίδραση D-T, ένας πυρήνας δευτερίου ( ${}^2\text{H}$ ) αλληλεπιδρά με έναν πυρήνα τριτίου ( ${}^3\text{H}$ ) και παράγεται ένας πυρήνας ηλίου ( ${}^4\text{He}$ ) και ένα νετρόνιο(n). Δηλαδή είναι:  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$  (βλ. Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Η αντίδραση D-T.

Η τιμή Q της αντίδρασης  ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$  (D-T) είναι +17.59 MeV και το πρόσημο "+" δηλώνει πως η αντίδραση είναι εξώθερμη. Αυτά τα 17.59 MeV, διατίθενται στα προϊόντα της αντίδρασης κι έτσι, με βλήματα μικρής ενέργειας, μπορούν να παραχθούν νετρόνια μεγάλης ενέργειας. Στη συγκεκριμένη μέτρηση, χρησιμοποιήθηκαν δευτέρια ενέργειας 2.5 MeV και 3.9 MeV, προκειμένου να παραχθούν νετρόνια ενέργειας 17.7 MeV και 19.3 MeV αντίστοιχα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι ένα άλλο πλεονέκτημα της αντίδρασης D-T, είναι ότι δίνει μία καθαρή δέσμη νετρονίων, μέχρι τα 20 MeV, χωρίς παρασιτικά νετρόνια. Αυτό, συμβαίνει επειδή οι αντιδράσεις διάλυσης του δευτερίου και του τριτίου αρχίζουν να γίνονται σημαντικές για βλήματα ενέργειας μεγαλύτερης των 4 MeV.

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης D-T συναρτήσει της ενέργειας των δευτερίων φαίνεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Η ενεργός διατομή της αντίδρασης D-T συναρτήσει της ενέργειας των δευτερίων

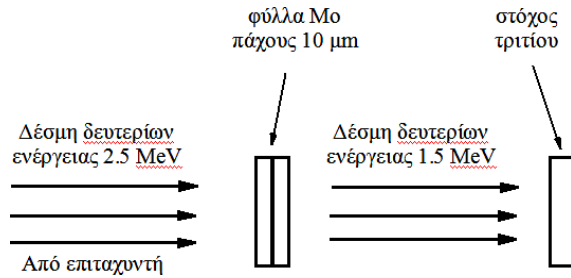
Όπως είναι φανερό, η μεγαλύτερη ενεργός διατομή (5.29 b), παρατηρείται για δευτέρια ενέργειας 109 keV, όμως πέφτει ραγδαία για μεγαλύτερες ενέργειες δευτερίων, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Συνεπώς δημιουργείται το εξής πρόβλημα :

- προτιμάται η δέσμη των δευτερίων να έχει μικρή ενέργεια, αφού όσο μικρότερη είναι η ενέργεια των δευτερίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός διατομή της αντίδρασης D-T (σύμφωνα με το σχήμα 2.1),
- όμως, όσο πιο μικρή είναι η ενέργεια των δευτερίων που αναμένεται να εξέλθει από τον επιταχυντή, τόσο μικρότερη είναι η ένταση της δέσμης που μπορεί να δώσει η μηχανή.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος δόθηκε η εξής λύση:

- από τον επιταχυντή εξέρχονται, με ικανοποιητική ένταση (0.7-1.1  $\mu\text{A}$ ), δευτέρια ενέργειας 2.9 MeV και 3.5 MeV για την κάθε μέτρηση αντίστοιχα
- στη συνέχεια, τα δευτέρια διέρχονται μέσα από δύο, διαδοχικά τοποθετημένα φύλλα μολυβδαινίου (Mo), πάχους 5  $\mu\text{m}$  το καθένα, προκειμένου να χάσουν ένα μέρος της ενέργειάς τους πριν φτάσουν στο στόχο του τρίτου.

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.2: Επιβράδυνση της δέσμης δευτερίων που εξέρχεται από τον επιταχυντή, μέσω δύο φύλλων Mo πάχους 5  $\mu\text{m}$  το καθένα, προκειμένου τα δευτέρια που προσπίπτουν στο στόχο του τριτίου να έχουν ακόμα μικρότερη ενέργεια κι έτσι, η αντίδραση D-T να έχει μεγαλύτερη ενεργό διατομή. Επισημαίνεται ότι τα φύλλα του Mo είναι σχεδόν σε επαφή με το στόχο του τριτίου (2 mm).

Η ακριβής απώλεια ενέργειας των δευτερίων, καθώς και η πορεία τους μέσα στα φύλλα του Mo, μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια του προγράμματος SRIM 2008. Προκύπτει ότι, η ενέργεια της δέσμης των δευτερίων είναι:

$$E_d = 2.9 \text{ MeV} \rightarrow 10 \mu\text{m Mo} \rightarrow E_d' = 2.0 \pm 0.062 \text{ MeV}$$

$$E_d = 3.5 \text{ MeV} \rightarrow 10 \mu\text{m Mo} \rightarrow E_d' = 2.7 \pm 0.105 \text{ MeV}$$

Το γωνιακό άνοιγμα  $\theta$  που αποκτά η δέσμη, εξαιτίας του Mo και για τις δύο ενέργειες δευτερίων υπολογίζεται επίσης μέσω του προγράμματος SRIM 2008 και δεν ξεπερνά το  $1\mu\text{m}$  και για τις δυο ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα ισχύει ότι :

Για ενέργεια δευτερίων  $E_d = 2.9 \text{ MeV}$  :

$$\theta = \arctan\left(\frac{1\mu\text{m}}{10\mu\text{m}}\right) \rightarrow \theta = \arctan(0.1) = 5.7^\circ$$

Για ενέργεια δευτερίων  $E_d = 3.5 \text{ MeV}$  :

$$\theta = \arctan\left(\frac{0.9\mu\text{m}}{10\mu\text{m}}\right) \rightarrow \theta = \arctan(0.09) = 4.9^\circ$$

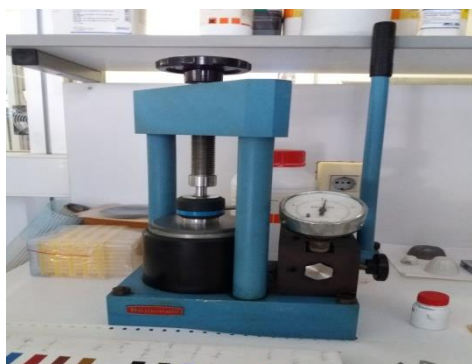
Άρα, δευτέρια ενέργειας 2.9 και 3.5 MeV αφού πρώτα περάσουν από τα φύλλα του Mo προσπίπτουν στον στόχο του τριτίου, ο οποίος βρίσκεται ουσιαστικά σε επαφή με το Mo, οπότε η διεύρυνση της διατομής της δέσμης δευτερίων πάνω στο τρίτιο, λόγω του Mo, είναι της τάξης των  $\mu\text{m}$  κι επομένως, αμελητέα.

Επίσης από τα δεδομένα της διαφορικής ενεργού διατομής που έχουμε από τη βάση δεδομένων ENDF βλέπουμε ότι για ενέργειες δευτερίων 2.0 MeV και 2.7 MeV η εκπομπή νετρονίων είναι σχεδόν ισοτροπική, ιδιαίτερα σε γωνιακή απόκλιση  $\pm 15^\circ$ , γύρω από τη διεύθυνση της δέσμης των δευτερίων. Επομένως, το γωνιακό άνοιγμα της δέσμης νετρονίων, που δέχεται η διάταξη των στόχων βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το στόχο του τριτίου (περίπου 3 cm), οπότε δεν προκαλείται

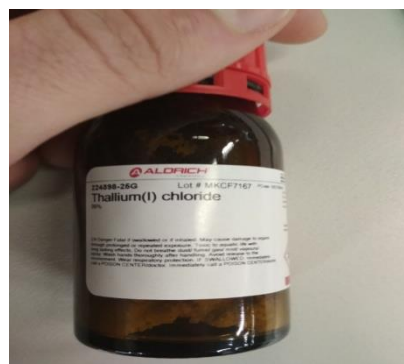
ανομοιογένεια στην ένταση της δέσμης των νετρονίων που προκύπτουν από την αντίδραση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί μονοενεργειακή.

## 2.2 Περιγραφή και τοποθέτηση των στόχων

Για τη μέτρηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  χρησιμοποιήσαμε σκόνη  $\text{TlCl}$  την οποία μετατρέψαμε σε παστίλια μέσω προσθήκης σελουλόζης  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$  συγκεκριμένης μάζας και συμπίεσης του μίγματος με υδραυλική πρέσα ώστε να στερεοποιηθεί σε μορφή παστίλιας.

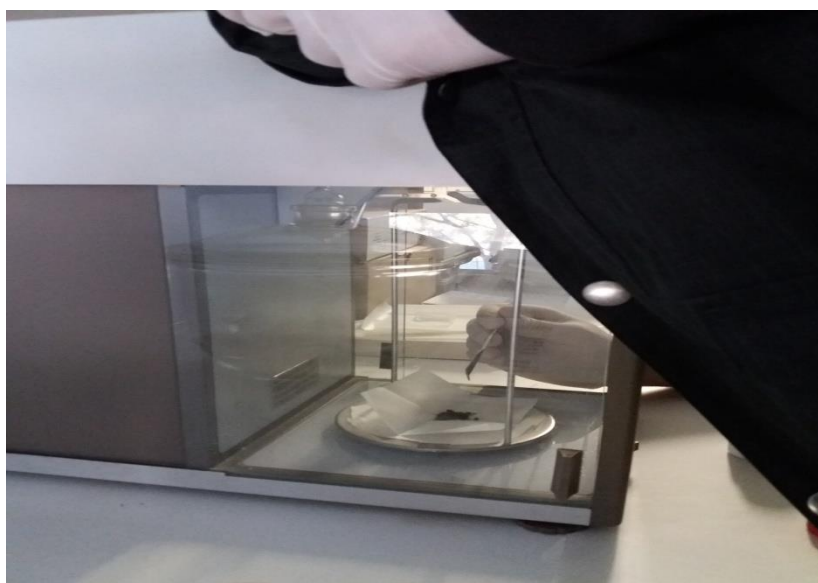


Εικόνα 2.1: Υδραυλική πρέσα



Εικόνα 2.2 : Σκόνη  $\text{TlCl}$

Στη συνέχεια έγινε μέτρηση σε ζυγαριά ακριβείας της μάζας της παστίλιας και μετρήθηκαν οι ακριβείς διαστάσεις της με παχύμετρο ώστε να έχουμε σαφή εικόνα όλων των χαρακτηριστικών της, τα οποία θα χρησιμεύσουν μετά στην ανάλυση.



Εικόνα 2.1: Μέτρηση μάζας σκόνης  $\text{TlCl}$  που χρησιμοποιήθηκε για την παστίλια πριν από την συμπίεση στην υδραυλική πρέσα.



Στην ίδια ακτινοβόληση μετρήθηκαν επίσης και ενεργές διατομές σε στόχους Ge και Hg , οι οποίοι μετατράπηκαν από σκόνη σε παστίλες μέσω της ίδιας ακριβώς διαδικασίας και μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά τους.

Για την εφαρμογή της μεθόδου ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις στόχοι αναφοράς. Δύο στόχοι αλουμινίου ( $^{27}\text{Al}$ ), ένας στόχος χρυσού ( $^{197}\text{Au}$ ) και ένας στόχος νιοβίου ( $^{93}\text{Nb}$ ), των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στους παρακάτω πίνακες για την κάθε μέτρηση.

18Mev	d(cm)	h(cm)	m(g)	V(cm3)	d(g/cm3)
Hg3	1.3045	0.2035	1.7411	0.271846	6.40474
Alc	1.42	0.055	0.2209	0.087058	2.537387
Au2	1.42	0.053	1.5111	0.083892	18.01238
Tl3	1.297	0.274	1.5467	0.361826	4.501
Nb4	1.41	0.039	0.3404	0.060866	5.592643
Ge1	1.309	0.3335	1.5529	0.448585	3.46
Ala	1.434	0.055	0.22	0.088783	2.477947

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά της κάθε παστίλας για την μέτρηση στα 18 MeV

19Mev	d(cm)	h(cm)	m(g)	V(cm3)	d(g/cm3)
Al1	1.309	0.055	0.1812	0.07398	2.449326
Hg2	1.3025	0.274	2.0104	0.364902	5.507
Au11	1.33	0.027	0.678	0.037492	18.08394
Tl1	1.284	0.126	1.2548	0.163069	7.691
Nb11	1.412	0.028	0.3356	0.043822	7.658168
Ge2	1.309	0.3335	1.3839	0.448585	3.085
Al4	1.393	0.054	0.2061	0.082256	2.505603

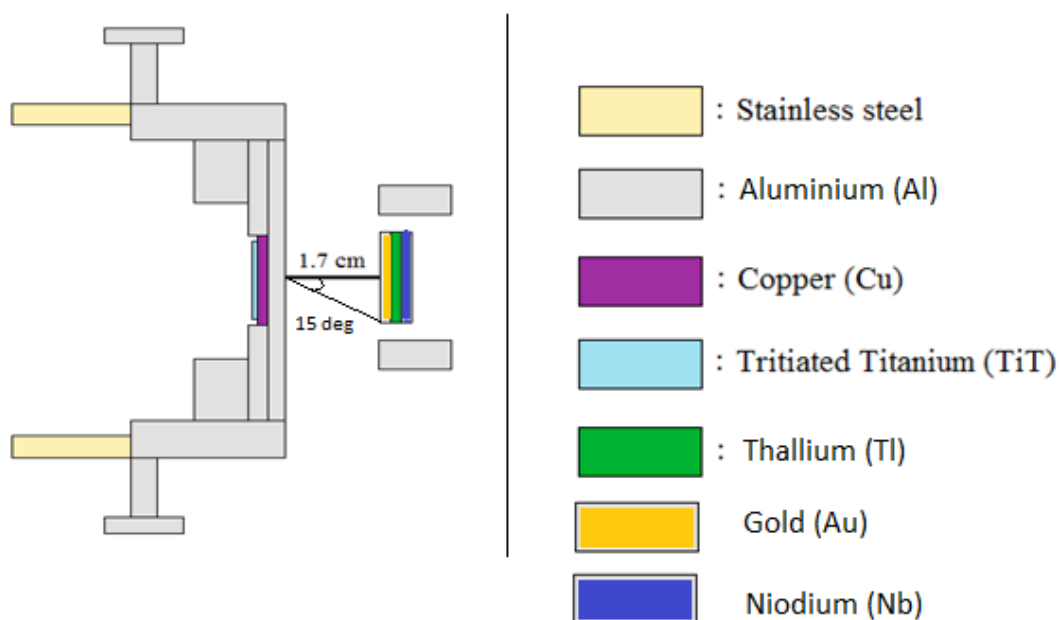
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά της κάθε παστίλας για την μέτρηση στα 19 MeV

Οι παραπάνω παστίλες τοποθετήθηκαν σε holder (εικόνα 2.3) με την εξής ακολουθία : Al, Hg, Au, Tl, Nb, Ge, Al .



Εικόνα 2.3: Holder με παστίλες τοποθετημένες σε σειρά Al, Hg, Au, Tl, Nb, Ge, Al

Εν συνεχεία το holder για την κάθε μέτρηση τοποθετήθηκε σε απόσταση 2cm από το άκρο της γραμμής ακτινοβολήσης ώστε όλοι οι στόχοι δέχονται τη δέσμη νετρονίων σε εύρος γωνίας μικρότερης των 15° καθώς όπως προαναφέρθηκε και στην υποενότητα 2.1, αυτό σημαίνει ότι η εκπομπή των νετρονίων είναι σχεδόν ισοτροπική και ότι το γωνιακό άνοιγμα της δέσμης δεν προκαλεί ανομοιογένεια στην ενέργεια και την έντασή της. Η δέσμη των νετρονίων μπορεί να θεωρηθεί μονοενεργειακή, εντός των 15°, και με μία αβεβαιότητα 1% γύρω από την κεντρική τιμή σύμφωνα με τα δεδομένα της διαφορικής ενεργού διατομής της αντίδρασης D-T που δίνονται από το ENDF.



Εικόνα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των στόχων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης

### 2.3 Ανίχνευση Νετρονίων

Όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο 1, είναι αναγκαίο κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης να παρακολουθείται και να καταγράφεται η διακύμανση της δέσμης των νετρονίων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός απαριθμητή τριφθοριούχου βορίου ( $\text{BF}_3$ ) και ενός οργανικού σπινθηριστή (Liquid Scintillator).

Τα νετρόνια δεν διαθέτουν φορτίο οπότε η ανίχνευσή τους γίνεται με έμμεσο τρόπο, δηλαδή με την ανίχνευση των προϊόντων των αλληλεπιδράσεων στις οποίες συμμετέχουν.

Στον ανιχνευτή τύπου  $\text{BF}_3$ , οι αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:



Τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με το  ${}^{10}\text{B}$  του ανιχνευτή και οι παραγόμενοι πυρήνες  ${}^7\text{Li}$  και  ${}^4\text{He}$ , ανιχνεύονται καθώς χάνουν ενέργεια μέσα στο αέριο. Η αντίδραση αυτή έχει ιδιαίτερα μεγάλη ενεργό διατομή για θερμικά νετρόνια ( $\approx 0.025\text{eV}$ ), γεγονός που σημαίνει ότι ο ανιχνευτής έχει πολύ μεγάλη απόδοση σε πολύ χαμηλές ενέργειες νετρονίων. Αντιθέτως για υψηλές ενέργειες νετρονίων, η απόδοση μειώνεται δραματικά, καθώς η ενεργός διατομή της αντίδρασης μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα προς την ταχύτητα των νετρονίων. Για το σκοπό αυτό, ο απαριθμητής  $\text{BF}_3$  τοποθετείται στο κέντρο ενός ευμεγέθους κυλίνδρου από κατάλληλο υλικό, με μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρογόνο, όπως η παραφίνη. Τα νετρόνια σκεδάζονται στους ελαφρείς πυρήνες της παραφίνης χάνοντας μεγάλο μέρος της αρχικής τους ενέργειας σε κάθε κρούση. Έτσι, μετά από κάποιον αριθμό κρούσεων φτάνουν στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή θερμοποιημένα.



Εικόνα 2.5: ανιχνευτή τύπου  $\text{BF}_3$

Στον οργανικό σπινθηριστή (Liquid Scintillator) τα νετρόνια υψηλών ενεργειών αντιδρούν με τις ενώσεις οι οποίες έχουν υψηλή συγκέντρωση υδρογόνου (H), όπως οι οργανικές ενώσεις, μέσω ελαστικής σκέδασης με αποτέλεσμα να μεταδίδουν ένα ποσοστό της κινητικής τους ενέργειας στα πρωτόνια, τα οποία με την σειρά τους προκαλούν σπινθηρισμό της ένωσης. Τα θερμικά νετρόνια μπορούν να ανιχνευτούν μέσω πυρηνικών αντιδράσεων με τα άτομα  ${}^6\text{Li}$  που περιέχει η ένωση, οι οποίες παράγουν τρίτιο και σωματίδια-α.



Εικόνα 2.6: Οργανικός Σπινθηριστής (Liquid Scintillator)

Οι δύο ανιχνευτές τοποθετήθηκαν σε απόσταση 3m από τον στόχο τρίτιου, ώστε να εξασφαλίσουμε κάποια μείωση της ροής των παραγόμενων νετρονίων, προκειμένου να μην δέχονται οι ανιχνευτές υπερβολικά μεγάλο αριθμό νετρονίων και να μην εισέρχονται πίσω στο holder σκεδαζόμενα νετρόνια, ενώ παράλληλα η γωνιακή απόκλιση από αυτόν να μην ξεπερά τις  $15^\circ$ , γεγονός που διατηρεί την δέσμη μας μονοεργειακή.



Εικόνα 2.7: Τοποθέτηση των ανιχνευτών σε απόσταση απόσταση 3m από τον στόχο τρίτιου για την καλύτερη καταγραφή της διακύμανσης της έντασης της δέσμης νετρονίων κατά την διάρκεια της μέτρησης

### 2.3 Ανιχνευτές ακτίνων-γ

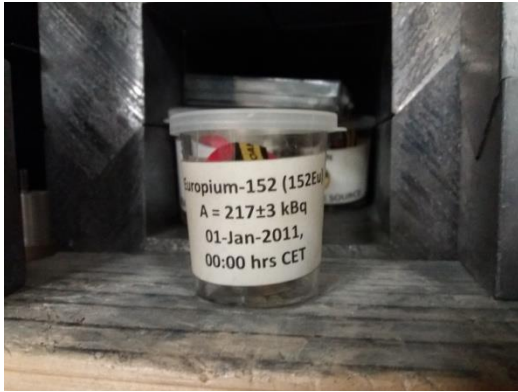
Για τις μετρήσεις των αποδιεγέρσεων των στόχων μετά την ακτινοβόληση χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (HPGes) σχετικής ανιχνευτικής απόδοσης 50%. Τα foils των Tl, Au και Nb μετρήθηκαν στον παραπάνω ανιχνευτή, ενώ τα foils των Hg, Al και Ge τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις ολικής ενεργού διατομής άλλων αντιδράσεων από ομάδες που συμμετείχαν στην ίδια ακτινοβόληση μετρήθηκαν επίσης από ανιχνευτές HPGes σχετικής ανιχνευτικής απόδοσης 100% και 16%. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών χρησιμοποιήθηκαν επίσης στην παρούσα εργασία για σύγκριση με τα αποτελέσματα του δικού μας ανιχνευτή και καλύτερο προσδιορισμό της ροής και της μέσης τιμής ενέργειας της παραγόμενης από την αντίδραση D-T δέσμης νετρονίων.



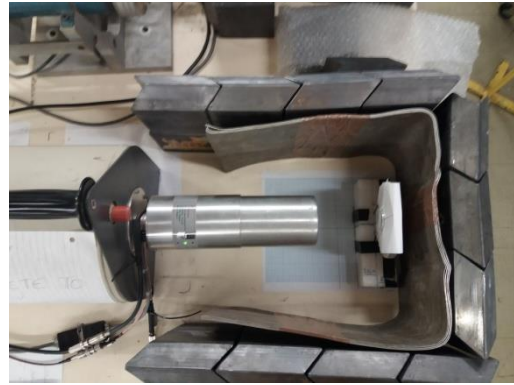
Εικόνα 2.5: Ανιχνευτής με σχετική ανιχνευτική απόδοση 50% στον οποίο μετρήθηκαν οι στόχοι των Tl, Au και Nb μετά την ακτινοβόληση.

Επειδή η απόλυτη απόδοση εξαρτάται από τη γεωμετρία του συστήματος, δεν έχει απόλυτο χαρακτήρα και δεν χαρακτηρίζει έναν ανιχνευτή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται συχνά η έννοια της σχετικής απόδοσης ενός ανιχνευτή Ge. Η απόδοση του ανιχνευτή,  $\epsilon$ , προσδιορίστηκε με τη χρήση σημειακής πηγής  $^{152}\text{Eu}$ . Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε, κατασκευάστηκε την 1/1/2011, με αρχική ενεργότητα  $217 \pm 3$  kBq. Για τη λήψη του φάσματος, η πηγή τοποθετήθηκε σε απόσταση 10 cm από τον ανιχνευτή Ge, απόσταση ίση με αυτή στην οποία τοποθετήθηκαν και οι στόχοι μετά την ακτινοβόληση.





Εικόνα 2.6: Πηγή  $^{152}\text{Eu}$  αρχικής ενεργότητας  $217 \pm 3 \text{ kBq}$



Εικόνα 2.7: Λήψη φάσματος πηγής  $^{152}\text{Eu}$  από ανιχνευτή Ge απόλυτης απόδοσης 50%

Για την εύρεση της σχετικής απόδοσης (efficiency) του ανιχνευτή, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Ανάλυση των κορυφών του φάσματος για κάποιες χαρακτηριστικές ακτίνες- $\gamma$  του  $^{152}\text{Eu}$ . Η εύρεση των γεγονότων (ακτίνων- $\gamma$ ) της κάθε φωτοκορυφής έγινε σύμφωνα με τη βοήθεια του προγράμματος SPECTRW.

•

Φάσμα $^{152}\text{Eu}$ πριν την ακτινοβόληση, με live time = 4117 sec				
E $\gamma$ (keV)	I $\gamma$ (%)	FWHM (keV)	N $\gamma$ (counts)	$\delta N\gamma$ (counts)
121.78	28.58	1.53	1311937	1706
244.7	7.58	1.62	297540	901
344.28	26.5	1.73	826119	1344
411.12	2.23	1.79	59936	469
778.9	12.94	2.25	220359	736
867.37	4.25	2.39	67455	482
964.08	14.61	2.49	215238	704
1085.9	10.21	2.86	144852	591
1112.1	13.64	2.71	182997	651
1408	21.01	3.03	234581	604

Πίνακας 2.3: Ανάλυση των κορυφών που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της απόδοσης του ανιχνευτή

- Υπολογισμός της ενεργότητας της πηγής  $^{152}\text{Eu}$ , την ημέρα λήψης του φάσματος. Το φάσμα λήφθηκε την 5/3/2019, επομένως από την ημέρα κατασκευής της πηγής παρήλθαν:  $t = 257817600 \text{ sec}$ . Ισχύουν οι εξής τύποι:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda * N \quad (2.4.1)$$

Όπου:

-N = ο ολικός αριθμός πυρήνων

-λ = η σταθερά αποδιέγερσης του πυρήνα (  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ , όπου  $T_{1/2}$ : ο χρόνος ημιζωής του ασταθούς πυρήνα)

-το αρνητικό πρόσημο δηλώνει τη μείωση του αριθμού N με την πάροδο του χρόνου t

Έστω ότι, μετά την πάροδο χρόνου t , ο αριθμός των πυρήνων που παραμένουν αδιάσπαστοι είναι N(t) . Τότε με ολοκλήρωση της σχέσης (2.4.1) ως προς t προκύπτει ότι :

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

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

(2.4.2)

όπου

N(t) : ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων μετά την πάροδο χρόνου t

N<sub>0</sub> : ο αρχικός πληθυσμός των ασταθών πυρήνων

Από τις σχέσεις (2.4.1) και (2.4.2) προκύπτει ότι:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Leftrightarrow -\frac{dN(t)}{dt} = \frac{dN(0)}{dt} \cdot e^{-\lambda t} \Leftrightarrow R(t) = R_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

(2.4.3)

Για το χρόνο ημιζωής του  $^{152}\text{Eu}$  ( $T_{1/2} = 13.537\gamma$ ), που αντιστοιχεί σε σταθερά αποδιέγερσης  $\lambda = 1.62 \cdot 10^{-9} \text{ sec}$  και με διάδοση σφαλμάτων, προκύπτει ότι η

ενεργότητα της σημειακής πηγής  $^{152}\text{Eu}$  , την ημέρα λήψης του φάσματος ήταν:  
 $R = 142777.5 \pm 1973.8 \text{ bq} \Leftrightarrow R = 142777.5 \pm 1973.8 \text{ διασπάσεις/sec.}$

- Εύρεση του αριθμού των πυρήνων  $^{152}\text{Eu}$  που διασπάστηκαν κατά την διάρκεια λήψης του φάσματος. Η ενεργότητα της πηγής είναι:  $142777.5 \pm 1973.8 \text{ bq}$ . Αυτό σημαίνει ότι, κάθε  $1 \text{ sec}$  , γίνονται  $142777.5 \pm 1973.8$  διασπάσεις . Άρα σε live-time  $4117 \text{ sec}$  , θα έχουν συμβεί  $5.88 \cdot 10^8 \pm 8126478$  διασπάσεις.
- Υπολογισμός του πλήθους των ακτίνων-  $\gamma$  , που έχουν παραχθεί από την πηγή του  $^{152}\text{Eu}$ , κατά την διάρκεια λήψης του φάσματος, για την κάθε ενέργεια χωριστά. Η έκφραση ότι «η ένταση μιας ακτίνας- $\gamma$  είναι  $I\%$  » σημαίνει ότι: στις 100 διασπάσεις, θα εκπεμφθούν  $I\%$  (στο πλήθος) ακτίνες- $\gamma$ , της συγκεκριμένης ενέργειας.

Άρα:

στις 100 διασπάσεις , θα εκπεμφθούν  $I\%$  ακτίνες- $\gamma$

σε  $5.88 \cdot 10^8 \pm 8126478$  διασπάσεις , θα εκπεμφθούν  $N_{\text{εκπεμπ}}$  ακτίνες-  $\gamma$ .

Έτσι, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$N_{\text{εκπεμπ}} = \text{αριθμός συνολικών διασπάσεων} \cdot \frac{I\%}{100} \quad (2.3.4)$$

Με την εφαρμογή της σχέσης (2.4.4) για κάθε ακτίνα-  $\gamma$  , προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Ακτίνες- $\gamma$ που εκπέμπονται θεωρητικά από το $^{152}\text{Eu}$ , σε live-time = 4117 sec				
E $\gamma$ (keV)	I $\gamma$ (%)	FWHM (keV)	N $_{\text{εκπεμπ}}$ (counts)	$\delta N_{\text{εκπεμπ}}$ (counts)
121.78	28.58	1.53	1.68E+08	2322547
244.7	7.58	1.62	44556395	615987
344.28	26.5	1.73	1.56E+08	2153517
411.12	2.23	1.79	13108280	181220.5
778.9	12.94	2.25	76063292	1051566
867.37	4.25	2.39	24982148	345375.3
964.08	14.61	2.49	85879807	1187278
1085.9	10.21	2.86	60015936	829713.4
1112.1	13.64	2.71	80177999	1108452
1408	21.01	3.03	1.23E+08	1707373

Πίνακας 2.4 : Θεωρητικοί υπολογισμοί για το πλήθος των ακτίνων-  $\gamma$  που αναμένεται να εκπεμφθούν από πηγή  $^{152}\text{Eu}$  , σε χρόνο 4117 sec

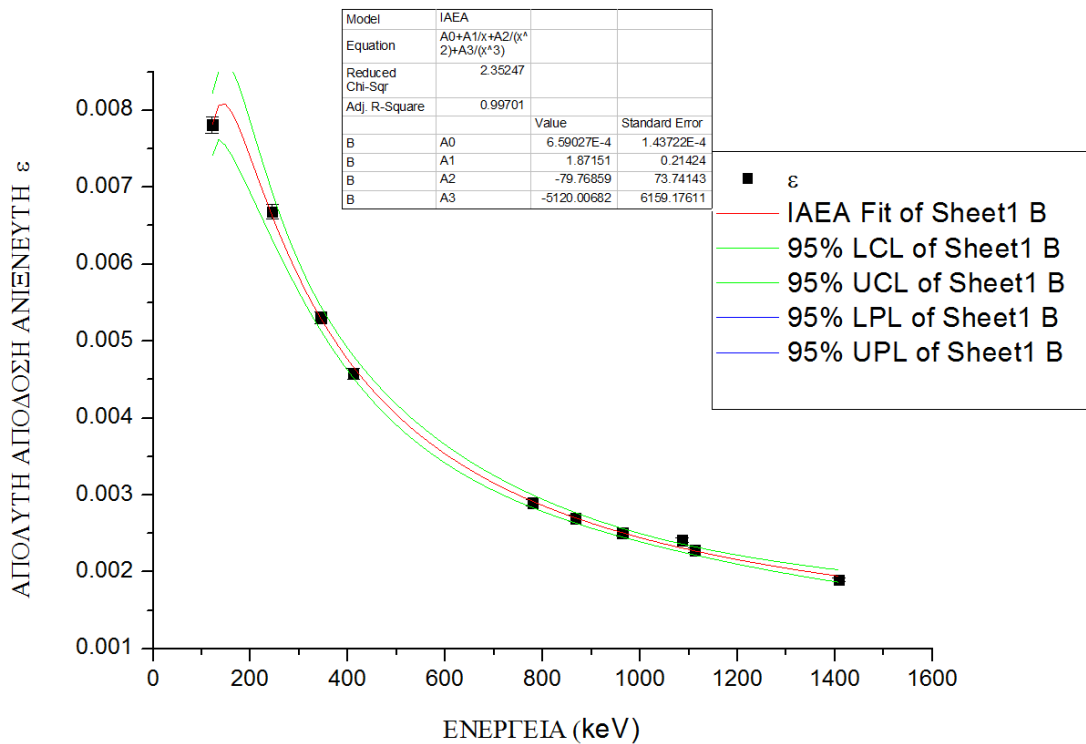


- Υπολογισμός της απόδοσης ( $\epsilon$ ) του ανιχνευτή από τη σχέση:

$$\epsilon = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} = \frac{N_{\gamma}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} \quad (2.4.5)$$

όπου τα  $N_{\gamma}$  είναι τα δεδομένα από το πειραματικό φάσμα του  $^{152}\text{Eu}$  και φαίνονται στον πίνακα 2.3, και τα  $N_{\text{εκπεμπ}}$  είναι οι θεωρητικοί υπολογισμοί για την εκπομπή των ακτίνων-  $\gamma$  και φαίνονται στον πίνακα 2.4

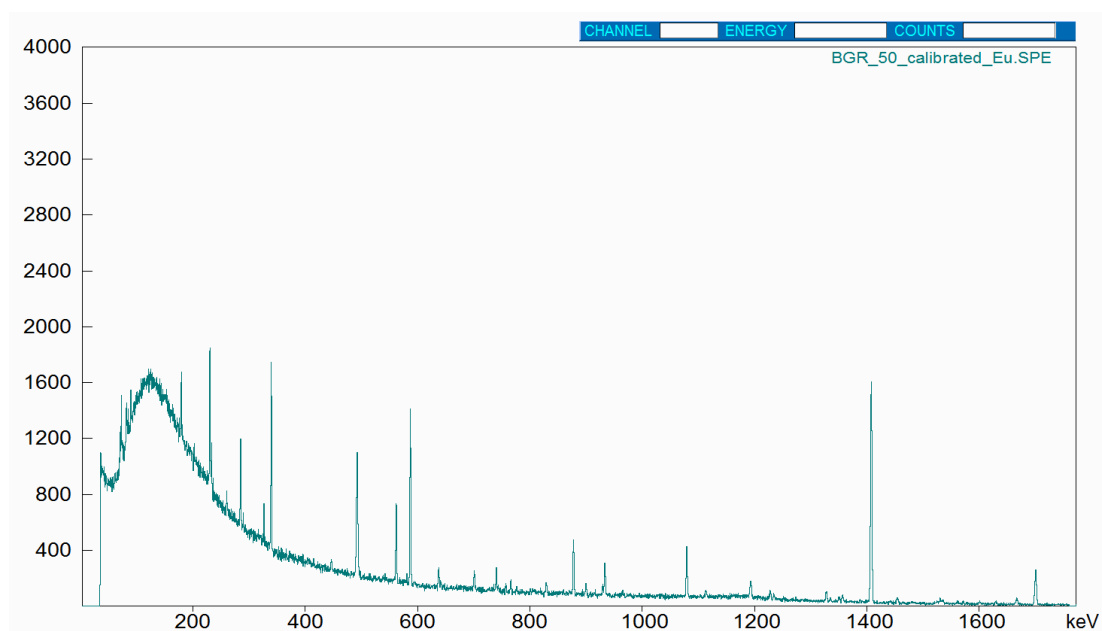
Τα αποτελέσματα για την απόδοση του ανιχνευτή  $\epsilon$ , συναρτήσει της ενέργειας, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.5: Απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή Ge (50%), συναρτήσει της ενέργειας. Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από φάσμα  $^{152}\text{Eu}$ .

Για την εύρεση της καμπύλης, την οποία ακολουθεί η απόλυτη απόδοση  $\epsilon$  του ανιχνευτή, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη η οποία ενδείκνυται από την IAEA την εξίσωση της οποίας και τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων όπου χρησιμοποιήθηκαν μπορούμε να δούμε στο παραπάνω σχήμα. Επίσης με χρήση του μαθηματικού προγράμματος Origin υπολογίστηκε και το εύρος της περιοχής σφάλματος της καμπύλης με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Μετά το πέρας της ακτινοβολήσης, της μέτρησης απόδοσης  $\epsilon$  του ανιχνευτή και της μέτρησης ενεργότητας των στόχων, ο ανιχνευτής HPGe χρησιμοποιήθηκε επίσης για την λήψη φάσματος υποβάθρου (background), ώστε να μπορούμε να διαπιστώσουμε αν η εκάστοτε κορυφή που μελετάμε είναι μολυσμένη από ακτινοβολία υποβάθρου ή όχι. Σε περίπτωση που η κορυφή μας είναι μολυσμένη τότε κάνουμε τις απαραίτητες διορθώσεις με τον ακόλουθο τρόπο : Για να συγκριθούν τα counts των κορυφών των δύο φασμάτων, πρέπει να αντιστοιχούν σε φάσματα που έχουν το ίδιο live time. Για το λόγο αυτό, τα counts που προέρχονται από το φάσμα που έχει το μεγαλύτερο live time, ανάγονται στο χρόνο του άλλου φάσματος με το μικρότερο live time και στην συνέχεια αφαιρούμε τα counts που προήλθαν από την μέτρηση ενεργότητας των στόχων με τα counts του background και ανάγουμε την διαφορά στο live time του φάσματος της μέτρησης ενεργότητας.



Σχήμα 2.5 : Φάσμα ακτινοβολίας φυσικού background από τον ανιχνευτή Ge (50%)

## Κεφάλαιο 3

### Υπολογισμός της πειραματικής ενεργού διατομής

#### 3.1 Λήψη και ανάλυση φασμάτων $^{202}\text{Tl}$

Τα φάσματα των στόχων Tl μετά την κάθε ακτινοβόληση λήφθηκαν στον ανιχνευτή γερμανίου με σχετική ανιχνευτική απόδοση 50%. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10 cm από τον ανιχνευτή Ge, απόσταση ίση με αυτή στην οποία τοποθετήθηκε η σημειακή πηγή  $^{152}\text{Eu}$  για τον προσδιορισμό της απόλυτης απόδοσης του ανιχνευτή. Για λόγους ακτινοπροστασίας και για λόγους μείωσης της συνεισφοράς της φυσικής ακτινοβολίας στο φάσμα που θα λάβουμε σχηματίστηκε θωράκιση με τούβλα μολύβδου και φύλλο καδμίου, σε σχήμα διαδρόμου, μπροστά από τον ανιχνευτή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

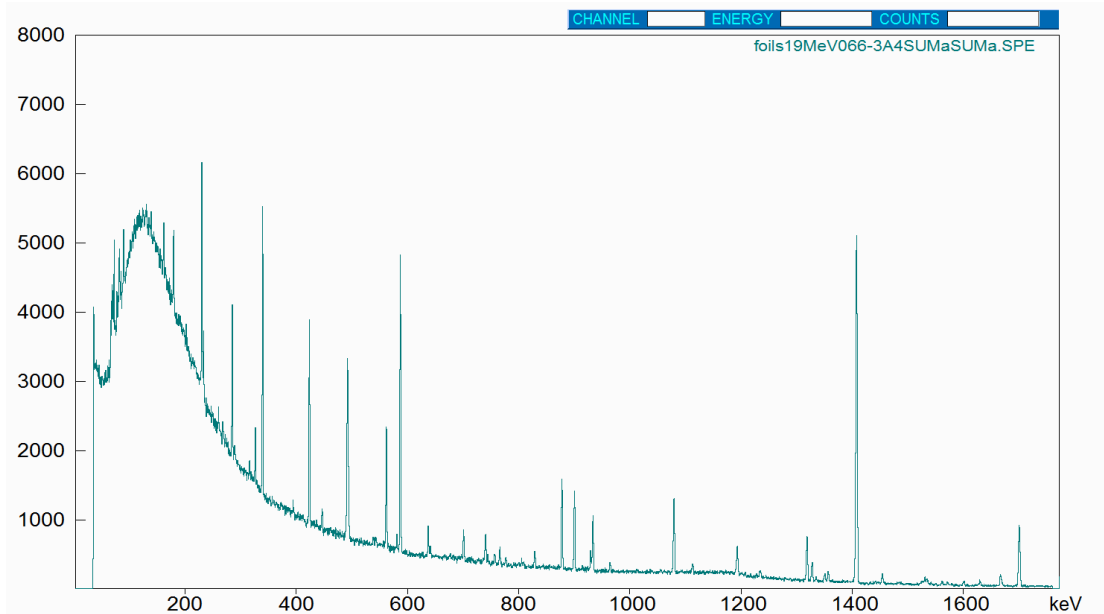


Εικόνα 3.1 : Θωράκιση με τούβλα μολύβδου και φύλλο καδμίου γύρω από τον ανιχνευτή

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την λήψη των φασμάτων και την επαλήθευση ότι η κορυφή που μελετάμε ανήκει στο ισότοπο  $^{202}\text{Tl}$  το οποίο παράγεται από την αντίδραση  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  φαίνεται παρακάτω για την κάθε ενέργεια ακτινοβόλησης ξεχωριστά

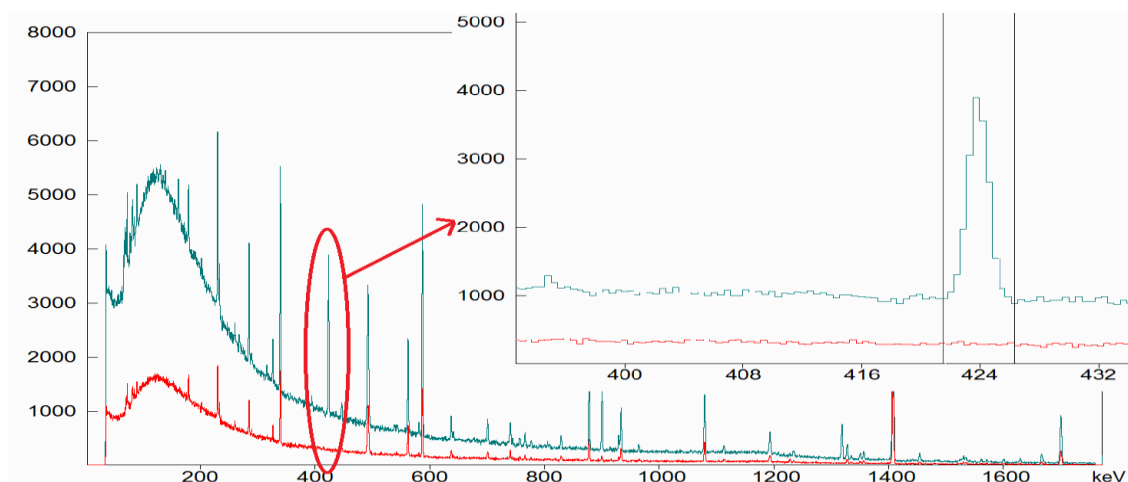
#### 3.1.1 Ενέργεια ακτίνας νετρονίων 19.3 MeV

Μετά το πέρας της ακτινοβόλησης με ενέργεια νετρονίων 19.3 MeV η παστίλια του στόχου του θαλλίου μετρήθηκε στον ανιχνευτή για διάρκεια 65.98 h όπου το φάσμα αποθηκευόταν σε αρχείο στον υπολογιστή κάθε 5 λεπτά (300 sec). Το συνολικά αθροισμένο φάσμα των παραπάνω πεντάλεπτων φασμάτων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 3.1 : Συνολικά αθροισμένο φάσμα ενεργότητας στόχου Tl μετά την ακτινοβόληση ενέργειας 19.3MeV

Στη συνέχεια ελέγχουμε τις κορυφές του φάσματος που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή αυτές στις οποίες αποδιηγείται το ισότοπο  $^{202}\text{Tl}$  (439.56keV, 520.21keV και 960.11keV) και συγκρίνουμε το φάσμα μας με το φάσμα ακτινοβολίας background που είχαμε λάβει για να δούμε αν η κορυφή που αντιστοιχεί σε κάποια από τις ενέργειες που αναφέραμε είναι καθαρή ή μολυσμένη από κάποια άλλη κορυφή. Στο παραπάνω φάσμα μπορέσαμε να δούμε μόνο την κορυφή 439.56keV καθώς οι υπόλοιπες έχουν πολύ μικρή ένταση (0.58% και 0.06%) και τα γεγονότα που καταγράφηκαν δεν ήταν στατιστικά επαρκή για να γίνει ανάλυση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σύγκριση του φάσματος του στόχου θαλλίου με το φάσμα ακτινοβολίας background, από το οποίο διαπιστώνουμε ότι η κορυφή 439.56keV είναι καθαρή.



Σχήμα 3.2 : Σύγκριση του φάσματος του στόχου θαλλίου με το φάσμα ακτινοβολίας background για ενέργειες νετρονίων 19.3 MeV. Έμφαση στην κορυφή 439.56keV.

Όπως διαπιστώνουμε και από το παραπάνω σχήμα η βαθμονόμηση του ανιχνευτή παρουσιάζει κάποια μετατόπιση προς τα αριστερά όμως ο δείκτης αυτός μετατόπισης που παρουσιάζεται είναι συστηματικός και συνάδει με αυτόν που παρατηρήθηκε και στα υπόλοιπα φάσματα που μετρήθηκαν, συνεπώς δεν επηρεάζει την μέτρησή μας.

Έπειτα από την λήψη και ανάλυση των φασμάτων για την επιπλέον ταυτοποίηση των διεγερμένων πυρήνων που δημιουργήθηκαν κατά την ακτινοβόληση μελετήσαμε το decay curve που προκύπτει από την αποδιέγερσή τους, η οποία φαίνεται στα φάσματα που λάβαμε και το συγκρίναμε με το θεωρητικό decay curve που θα έπρεπε να έχει το στοιχείο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

- Πήραμε τα counts των πυρήνων που αποδιηγείρονταν για κάθε 50386 sec . Ο χρόνος ημιζωής του  $^{202}\text{Tl}$  είναι πολύ μεγάλος (12.23 μέρες) οπότε χωρίσαμε την συνολική μας μέτρηση σε πέντε μέρη για λόγους στατιστικής και καλύτερης σύγκρισης. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

<b>N<sub>γ</sub></b>	<b>live time</b>	<b>t</b>
2838	50386	0
2669	50386	50386
2614	50386	100772
2468	50386	151158
1678	35990	201544

Πίνακας 3.1: Counts των πυρήνων που αποδιηγείρονταν για κάθε 50386 sec

- Υπολογίσαμε τα θεωρητικά counts που θα έπρεπε να έχουμε αν στα πρώτα 50386 sec αποδιηγείρονταν 2838 πυρήνες σύμφωνα με τους εξής τύπους:

αριθμός πυρήνων που αποδιηγείρονται σε χρόνο t

$$N(t) = N_0 * (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.1.1)$$

αριθμός πυρήνων που αποδιεγέρθηκαν σε χρονικό διάστημα t της μέτρησης

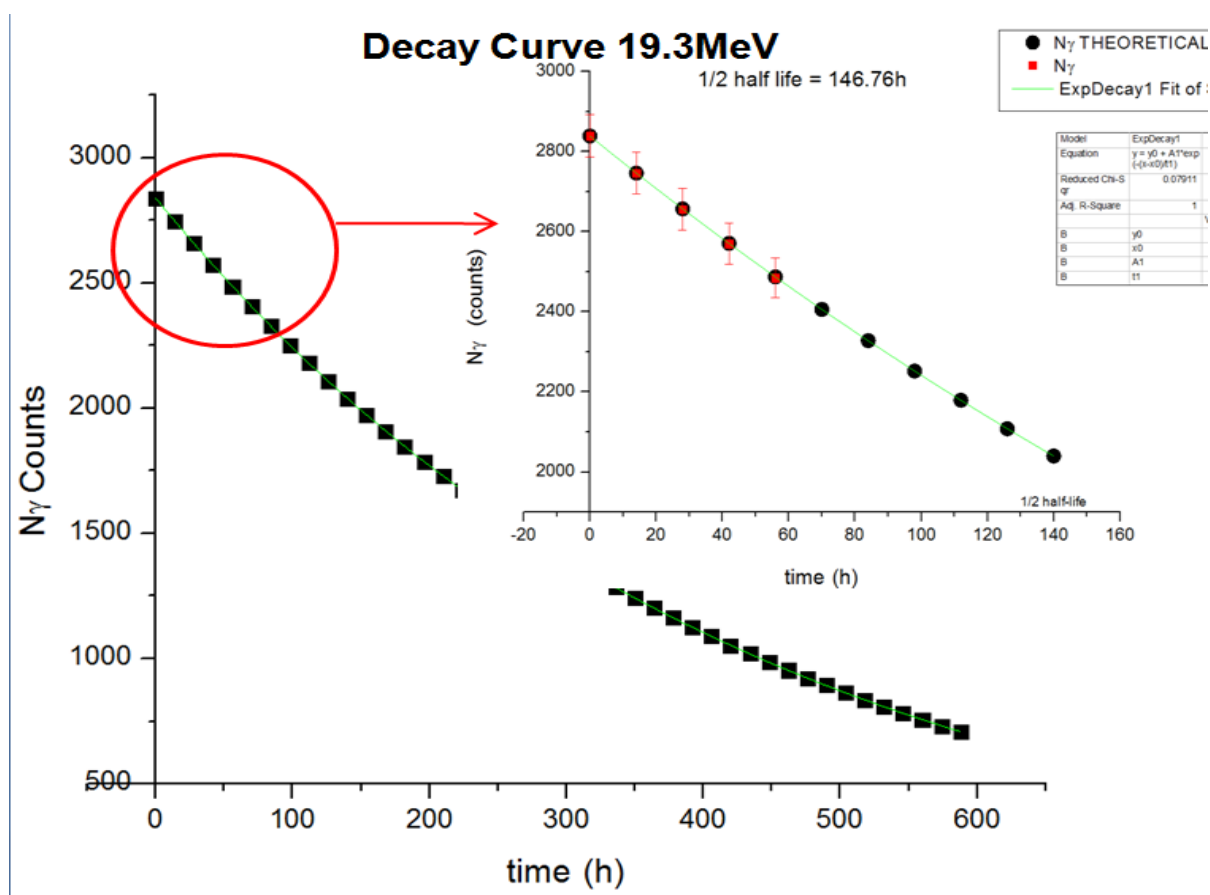
$$N_{\gamma} = N_0 * (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (3.1.2)$$

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής :

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ COUNTS			
N <sub>γ</sub>	live time	t	N <sub>γ</sub> /sec
2838	50386	0	0.0566
2745	50386	50386	0.0548
2656	50386	100772	0.0521
2570	50386	151158	0.0515
1784	35990	201544	0.0492

Πίνακας 3.2: Θεωρητικά counts των πυρήνων για κάθε 50386 sec

- Συγκρίνουμε τα θεωρητικά counts με αυτά που καταγράψαμε φτιάχνουμε τα decay curves και τα συγκρίνουμε όπως φαίνεται παρακάτω:

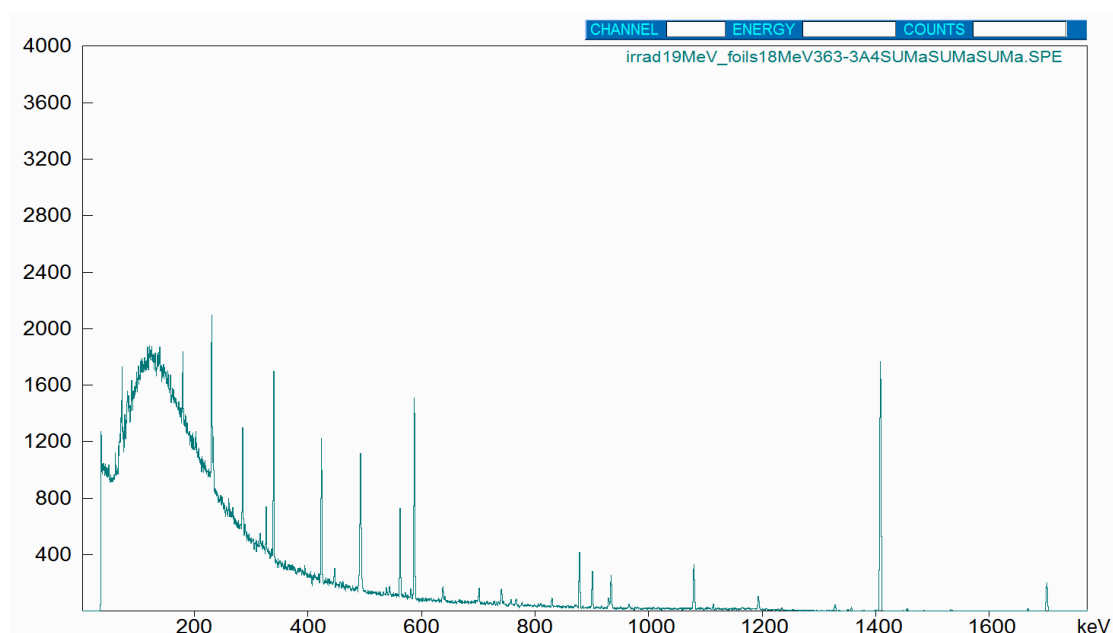


Σχήμα 3.3 : Decay curve για αποδιέγερση του στοιχείου  $^{202}\text{Tl}$  που παρήχθη μετά την ακτινοβόληση για ενέργειες νετρονίων 19.3MeV. Πάνω δεξιά φαίνεται η σύγκριση των counts που λήφθηκαν από τον ανιχνευτή με τα θεωρητικά.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι τα μετρούμενα counts έχουν μεγάλη συμφωνία με τα θεωρητικά. Από όλα τα παραπάνω μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι το στοιχείο που μελετάμε είναι όντως το ισότοπο  $^{202}\text{Tl}$  το οποίο παρήχθη από την αντίδραση  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ .

### 3.1.2 Ενέργεια ακτίνας νετρονίων 17.7 MeV

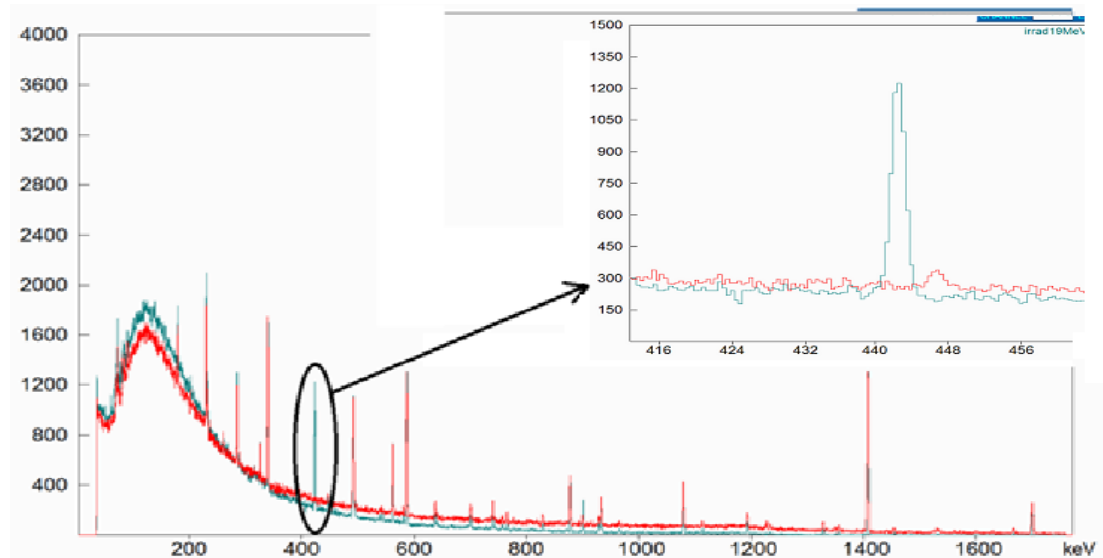
Μετά το πέρας της ακτινοβόλησης με ενέργεια νετρονίων 17.7 MeV, η παστίλια του στόχου του θαλλίου μετρήθηκε στον ανιχνευτή για διάρκεια 24.25 h όπου το φάσμα αποθηκευόταν σε αρχείο στον υπολογιστή κάθε 5 λεπτά (300 sec). Ο χρόνος λήψης του φάσματος ήταν μικρότερος σε αυτή τη μέτρηση γιατί η τάση του ανιχνευτή Ge είχε αρχικά οριστεί στα 3500V στα οποία ενημερωθήκαμε αργότερα ότι ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δεν λειτουργούσε με τον βέλτιστο ρυθμό με αποτέλεσμα να μην απαριθμεί κάποια από τα γεγονότα (counts) του πυρήνα που αποδιεγειρόταν. Το γεγονός αυτό μας ανάγκασε να μειώσουμε την τάση στα 2500V και να απορρίψουμε τις μετρήσεις που είχαν γίνει όλο αυτό το διάστημα ως μη αξιόπιστες. Το συνολικά αθροισμένο φάσμα των παραπάνω πεντάλεπτων φασμάτων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 3.4 : Συνολικά αθροισμένο φάσμα ενεργότητας στόχου Tl μετά την ακτινοβόληση ενέργειας 17.7MeV

Στη συνέχεια ελέγχουμε τις κορυφές του φάσματος που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή αυτές στις οποίες αποδιεγείρεται το ισότοπο  $^{202}\text{Tl}$  (439.56keV, 520.21keV και 960.11keV) και συγκρίνουμε το φάσμα μας με το φάσμα ακτινοβολίας background που είχαμε λάβει για να δούμε αν η κορυφή που αντιστοιχεί σε κάποια από τις ενέργειες που αναφέραμε είναι καθαρή ή μολυσμένη από κάποια άλλη κορυφή. Στο παραπάνω φάσμα μπορέσαμε να δούμε μόνο την κορυφή 439.56keV καθώς οι υπόλοιπες έχουν πολύ μικρή ένταση (0.58% και 0.06%) και τα γεγονότα που καταγράφηκαν δεν ήταν στατιστικά επαρκή για να γίνει ανάλυση. Στο παρακάτω

σχήμα φαίνεται η σύγκριση του φάσματος του στόχου θαλλίου με το φάσμα ακτινοβολίας background, από το οποίο διαπιστώνουμε ότι η κορυφή 439.56keV είναι καθαρή.



Σχήμα 3.5 : Σύγκριση του φάσματος του στόχου θαλλίου με το φάσμα ακτινοβολίας background για ενέργειες νετρονίων 17.7MeV. Έμφαση στην κορυφή 439.56keV.

Έπειτα για την επιπλέον ταυτοποίηση των διεγερμένων πυρήνων που δημιουργήθηκαν κατά την ακτινοβόληση μελετήσαμε το decay curve που προκύπτει από την αποδιέγερσή τους, η οποία φαίνεται στα φάσματα που λάβαμε και το συγκρίναμε με το θεωρητικό decay curve που θα έπρεπε να έχει το στοιχείο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

- Πήραμε τα counts των πυρήνων που αποδιηγείρονταν για κάθε 29400 sec . Ο χρόνος ημιζωής του  $^{202}\text{Tl}$  είναι πολύ μεγάλος (12.23 μέρες) οπότε χωρίσαμε την συνολική μας μέτρηση σε τρία μέρη για λόγους στατιστικής και καλύτερης σύγκρισης. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

N <sub>γ</sub>	live time	t
1534	29400	0
1387	29400	29400
1336	28580	58800

Πίνακας 3.3: Counts των πυρήνων που αποδιηγείρονταν για κάθε 29400 sec

- Υπολογίσαμε τα θεωρητικά counts που θα έπρεπε να έχουμε αν στα πρώτα 50386 sec αποδιηγείρονταν 1534 πυρήνες σύμφωνα με τους εξής τύπους:

αριθμός πυρήνων που αποδιηγείρονται σε χρόνο t

$$N(t) = N_0 * (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.1.1)$$



αριθμός πυρήνων που αποδιεγέρθηκαν σε χρονικό διάστημα t της μέτρησης

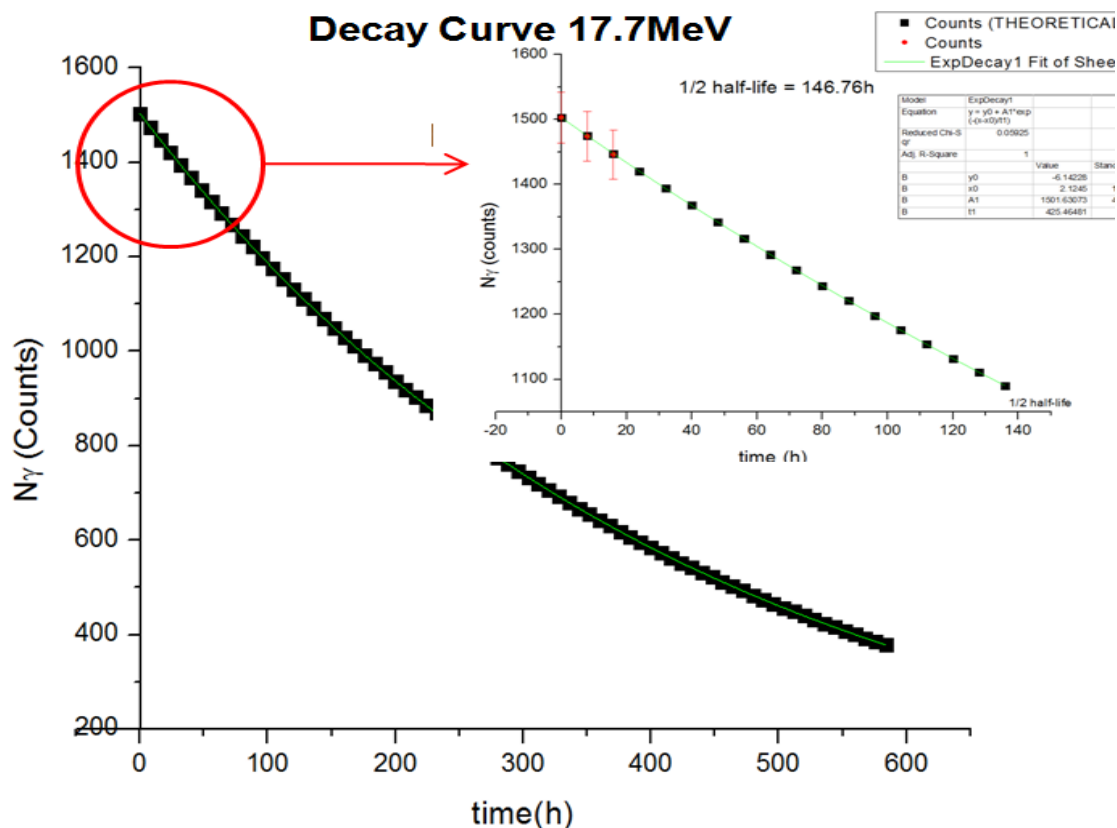
$$N_{\gamma} = N_0 * (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (3.1.2)$$

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής :

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ COUNTS			
$N_{\gamma}$	live time	t	$N_{\gamma}/\text{sec}$
1534	29400	0	0.05217
1504	29400	29400	0.05118
1435	28580	58800	0.05021

Πίνακας 3.4: Θεωρητικά counts των πυρήνων για κάθε 29400 sec

- Συγκρίνουμε τα θεωρητικά counts με αυτά που καταγράψαμε ετοιμάζουμε τα decay curves και τα συγκρίνουμε όπως στο Σχήμα 3.6 :



Σχήμα 3.6 : Decay curve για αποδιέγερση του στοιχείου  $^{202}\text{Tl}$  που παρήχθη μετά την ακτινοβόληση για ενέργειες νετρονίων 17.7MeV. Πάνω δεξιά φαίνεται η σύγκριση των counts που λήφθηκαν από τον ανιχνευτή με τα θεωρητικά αναμενόμενα.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι τα μετρούμενα counts έχουν μεγάλη συμφωνία με τα θεωρητικά. Από όλα τα παραπάνω μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι το στοιχείο που μελετάμε είναι όντως το ισότοπο  $^{202}\text{Tl}$  το οποίο παρήχθη από την αντίδραση  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ .

### **3.2 Υπολογισμός Πειραματικής Ενεργού Διατομής για Ενέργεια 19.3MeV**

Για τον υπολογισμό της πειραματικής ενεργού διατομής από τα στοιχεία που έχουμε για το πείραμα και την ανάλυση των φασμάτων των στόχων μετά την ακτινοβολήση χρησιμοποιήθηκε ο εξής τύπος:

$$\sigma = \frac{N\gamma}{\epsilon * F * I\gamma * D * f_c} * \frac{1}{N_t} * \frac{1}{\Phi} \quad (3.2.1)$$

όπου:

$N\gamma$ : ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, που υπολογίζεται με ολοκλήρωση της κορυφής του  $^{202}\text{Tl}$  (439.56keV) στο φάσμα του δείγματος μετά την ακτινοβολήση

$\epsilon$ : η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή (50%) για την ενέργεια 439.56keV

$F$ : διορθωτικός παράγοντας για την εκτεταμένη γεωμετρία της μέτρησης και την ενδοαπορρόφηση στα υλικά του στόχου

$I\gamma$ : η ένταση της ακτίνας-  $\gamma$ ,  $E\gamma=439.56\text{keV} \Leftrightarrow I\gamma=91\%$

$D$ : διορθωτικός παράγοντας μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη η αποδιέγερση των παραχθέντων πυρήνων  $^{202}\text{Tl}$ , από το πέρας της ακτινοβολήσης, μέχρι το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας

$f_c$ : ένας διορθωτικός παράγοντας με τον οποίο υπολογίζεται το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και την αποδιέγερση πυρήνων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης.

$N_t$ : το πλήθος των πυρήνων  $^{203}\text{Tl}$  του στόχου που ακτινοβολήθηκε

$\Phi$ : Η συνολική ροή νετρονίων που προσέπεσε στον στόχο κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης

Παρακάτω αναλύεται κάθε ένας από τους παραπάνω παράγοντες και εκτιμάται η τιμή τους σύμφωνα με τα δεδομένα του πειράματος

### Προσδιορισμός του παράγοντα D

Η αποδιέγερση των πυρήνων στο χρονικό διάστημα από το τέλος της ακτινοβολήσης ως το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας των στόχων, υπολογίζεται αναλυτικά από τις σχέσεις που περιγράφουν την πυρηνική αποδιέγερση.

Από τον ορισμό της ενεργότητας, ο ρυθμός αποδιέγερσης  $dN/dt$  (διασπάσεις ανά μονάδα χρόνου) ενός ασταθούς πυρήνα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (3.2.2)$$

όπου

$N$  : ο ολικός αριθμός πυρήνων

$\lambda$  : η σταθερά αποδιέγερσης του πυρήνα ( $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ , όπου  $T_{1/2}$ : ο χρόνος ημιζωής του ασταθούς πυρήνα) και το αρνητικό πρόσημο δηλώνει τη μείωση του αριθμού  $N$  με την πάροδο του χρόνου  $t$ .

Έστω ότι, μετά την πάροδο χρόνου  $t$ , ο αριθμός των πυρήνων που παραμένουν αδιάσπαστοι είναι  $N(t)$ . Τότε με ολοκλήρωση της σχέσης (3.2.2) ως προς  $t$ , θα είναι:

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} dt &= -\int_0^t \lambda \cdot N dt \Leftrightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} dt = -\lambda \int_0^t dt \\ \Leftrightarrow [\ln N]_{N_0}^{N(t)} &= -\lambda \cdot [t]_0^t \Leftrightarrow \ln(N(t)) - \ln(N_0) = -\lambda \cdot (t - 0) \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) &= -\lambda \cdot t \Leftrightarrow \frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t} \\ \Leftrightarrow N(t) &= N_0 \cdot e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

όπου

$N(t)$  : ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων μετά την πάροδο χρόνου  $t$

$N_0$  : ο αρχικός πληθυσμός των ασταθών πυρήνων.

Από τον αριθμό των αδιάσπαστων πυρήνων μετά την πάροδο χρόνου  $t$ , προκύπτει και ο αριθμός των πυρήνων που έχουν αποδιεγερθεί στο ίδιο χρονικό διάστημα, από τη σχέση:

$$N(t) = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad (3.2.4)$$

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

$$N_1 = N_0 * (1 - e^{-\lambda * t_1}) \quad (3.2.5)$$

Ομοίως, αν από το πέρας της ακτινοβόλησης μέχρι το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας πέρασε χρονικό διάστημα  $t_2$ , τότε ο συνολικός αριθμός πυρήνων που αποδιεγέρθηκαν θα δίνεται από τη σχέση:

$$N_2 = N_0 * (1 - e^{-\lambda * t_2}) \quad (3.2.6)$$

Έτσι, ο αριθμός των πυρήνων που αποδιεγέρθηκαν στο χρονικό διάστημα της μέτρησης  $t = t_2 - t_1$ , θα είναι:

$$N_{\gamma} = N_2 - N_1 \rightarrow N_{\gamma} = N_0 * [(1 - e^{-\lambda * t_2}) - (1 - e^{-\lambda * t_1})] \rightarrow$$

$$N_{\gamma} = N_0 * (e^{-\lambda * t_1} - e^{-\lambda * t_2}) \quad (3.2.7)$$

Επομένως, ο παράγοντας διόρθωσης για την αποδιέγερση του αρχικού πληθυσμού πυρήνων  $^{202}\text{Tl}$ , που δημιουργήθηκε κατά την ακτινοβόληση, δίνεται από τη σχέση:

$$D = e^{-\lambda * t_1} - e^{-\lambda * t_2} \quad (3.2.8)$$

Από τη σχέση (3.2.8) αντικαθιστώντας τις παρακάτω τιμές:

- Χρόνος που παρήλθε από το πέρας της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης της ενεργότητας:

$$t_1 = |(\text{αρχή μέτρησης}) - (\text{τέλος ακτινοβόλησης})| \Leftrightarrow t_1 = (18:29:00 - 17:42:00) \Leftrightarrow t_1 = 2820\text{sec}$$

- Χρόνος που παρήλθε από το πέρας της ακτινοβόλησης μέχρι το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας:

$$t_2 = t_1 + (\text{διάρκεια μέτρησης}) \Leftrightarrow t_2 = 2820 + 237534 \Leftrightarrow t_2 = 240354\text{sec}$$

- Σταθερά αποδιέγερσης του  $^{202}\text{Tl}$ :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{0.693}{1056672} \rightarrow \lambda = 6.56 * 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$$

Συνεπώς προκύπτει ότι :

$$D = 0.14$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα $f_c$

Με τον παράγοντα  $f_c$ , υπολογίζεται το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και την αποδιέγερση πυρήνων  $^{202}\text{Tl}$  κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης. Η αποδιέγερση των πυρήνων  $^{202}\text{Tl}$  κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης, δίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_c = \frac{\int_0^{t_B} e^{-\lambda t} \cdot f(t) \cdot dt}{\int_0^{t_B} f(t) \cdot dt} \cdot e^{-\lambda t_B} \quad (3.2.9)$$

όπου

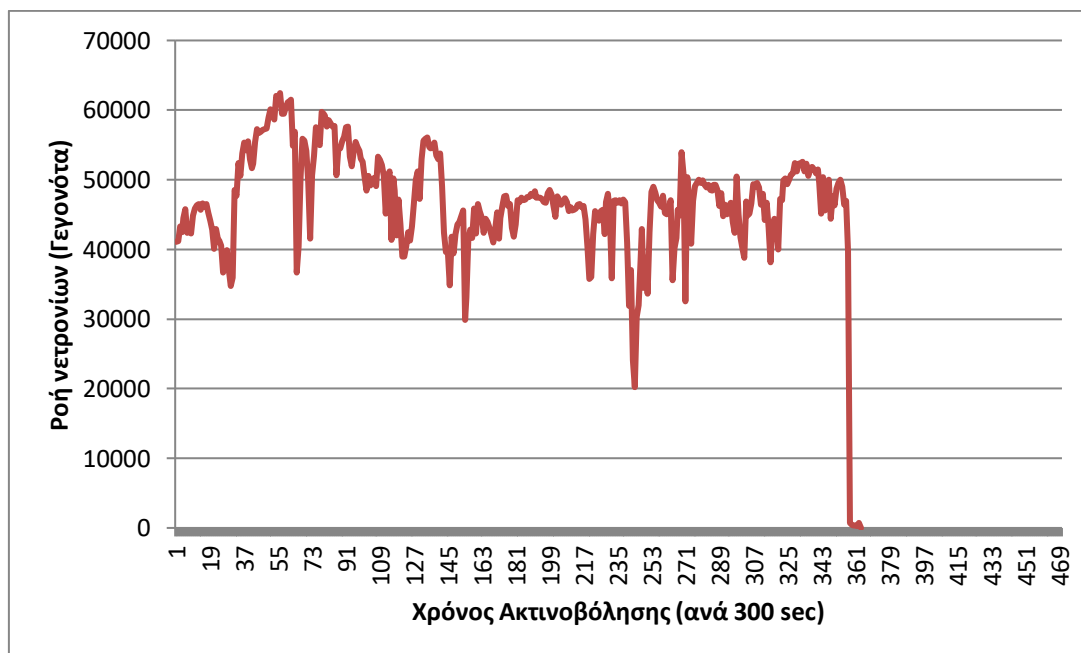
$\lambda$  : η σταθερά αποδιέγερσης του πυρήνα  $^{202}\text{Tl}$

$f(t)$  : η ροή των νετρονίων της δέσμης, συναρτήσει του χρόνου

$t_B$  : η χρονική διάρκεια της ακτινοβόλησης (30h)

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα  $f_c$ , χρησιμοποιήθηκε το φάσμα από τη διάταξη ελέγχου της δέσμης. Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα (2.3), το φάσμα αυτό λήφθηκε με χρήση του ανιχνευτή liquid. Τα ολοκληρώματα στη σχέση (3.2.9), υπολογίστηκαν αριθμητικά, από τα αντίστοιχα αθροίσματα πάνω στα κανάλια του φάσματος των διακυμάνσεων και η τιμή που προέκυψε είναι :

$$f_c = 0.965$$



Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα των διακυμάνσεων της δέσμης νετρονίων, που έχει ληφθεί από τη διάταξη ελέγχου της δέσμης για την ακτινοβόληση σε ενέργεια νετρονίων 19.3 MeV

### Προσδιορισμός του παράγοντα ε

Όπως προαναφέραμε και στην υποενότητα 2.3 και σύμφωνα με την διαδικασία που ακολουθήθηκε εκεί η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή (50%) για την ενέργεια 439.56keV είναι :

$$\varepsilon = 0.00444 \pm 0.00014$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα F

Ο διορθωτικός παράγοντας F για την εκτεταμένη γεωμετρία της μέτρησης και την ενδοαπορρόφηση στα υλικά του στόχου προέκυψε μέσω της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo και του λογισμικού MCNP (**M**onte **C**arlo **N**eutral **P**articles)

Για την διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην μέτρηση ενέργειας 19.3MeV, την γεωμετρία και την σύνθεση του στόχου η τιμή F προέκυψε :

$$F = 0.923$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα Nτ

Το πλήθος των πυρήνων  $^{203}\text{Tl}$  του στόχου που ακτινοβολήθηκε προσδιορίζεται από τη μάζα του, σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_{\tau} = \frac{m \cdot N_A}{A} \quad (3.2.10)$$

Όπου:

m : η μάζα του στόχου αναφοράς

A : ο ατομικός αριθμός του πυρήνα  $^{203}\text{Tl}$  δηλ 203

N<sub>A</sub> : ο αριθμός του Avogadro

Η μάζα m του ισότοπου  $^{203}\text{Tl}$  ( το οποίο μας ενδιαφέρει ) στην παστίλια του στόχου υπολογίζεται ως εξής:

m = Μάζα παστίλιας \* ποσοστό TlCl στην παστίλια\* μοριακό βάρος (Tl)/μοριακό βάρος (TlCl) \* ποσοστό ισότοπου στο φυσικό θάλλιο

Από τα παραπάνω και τα στοιχεία σύνθεσης της κάθε παστίλιας που αναφέραμε στην υποενότητα (2.2) υπολογίζουμε

$$N_{\tau} = (8.849 \pm 0.265) \cdot 10^{20} \text{ πυρήνες}$$

## Προσδιορισμός του παράγοντα Φ

Η συνολική ροή νετρονίων Φ που προσέπεσε στον στόχο κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης υπολογίζεται με δυο μεθόδους στην παρούσα εργασία: πειραματικά και μέσω προσομοίωσης Monte Carlo. Για την πειραματική εύρεση της τιμής του Φ βρίσκουμε σύμφωνα με την μέθοδο της ενεργοποίησης την συνολική ροή νετρονίων Φ στους στόχους αναφοράς. Καθώς η ακτινοβόληση έγινε με σκοπό τη μέτρηση της ολικής ενεργού διατομής όχι μόνο για νετρονικές αντιδράσεις στο θάλλιο αλλά και για νετρονικές αντιδράσεις στο γερμάνιο (Ge) και στον υδράργυρο (Hg) οι στόχοι αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και οι οποίοι αναφέρονται στην υποενότητα 2.2 μετρήθηκαν σε διαφορετικούς ανιχνευτές. Οι στόχοι που μετρήθηκαν στον δικό μας ανιχνευτή, ταυτόχρονα με την μέτρηση της ενεργότητας του θαλλίου είναι ο μπροστινός στόχος αλουμινίου (Al1) και ο στόχος νιοβίου (Nb11). Τα συνολικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων όλων των στόχων αναφοράς και ο τελικός προσδιορισμός της συνολικής ροής νετρονίων Φ μελετούνται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Ο πειραματικός προσδιορισμός του παράγοντα Φ των στόχων Al1 και Nb11 φαίνεται παρακάτω :

### - Ροή νετρονίων στο Al

Ο νέος πυρήνας, που δημιουργείται με την ακτινοβόληση του  $^{27}\text{Al}$ , είναι ο πυρήνας  $^{24}\text{Na}$ . Κατά την αποδιέγερση του  $^{24}\text{Na}$  εκπέμπεται μία ακτίνα- γ, στα 1368.63 keV, με ένταση  $I_\gamma=100\%$ . Έτσι, με ολοκλήρωση της κορυφής στα 1368.63 keV, στο φάσμα του AIF μετά την ακτινοβόληση προκύπτει :

$$N_\gamma = 4452 \pm 128 \text{ counts}$$

$$I_\gamma = 100\%$$

Η απόδοση του ανιχνευτή υπολογίζεται από τη συνάρτηση προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα του σχήματος (2.5), για την ενέργεια στα 1368.63 keV είναι :

$$\epsilon = (1.98 \pm 0.075) * 10^{-3}$$

Ο παράγοντας D υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.8), όπως ακριβώς και με τον στόχο θαλλίου αλλά με αντικατάσταση της τιμής  $\lambda = 1.28 * 10^{-5}$  (καθώς ο χρόνος ημιζωής του  $^{24}\text{Na}$  είναι  $T_{1/2} = 53989.20 \text{ sec}$ ). Προκύπτει :

$$D = 0.920$$

Ο παράγοντας  $f_c$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.9) ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε παραπάνω, με μόνη διαφορά τη χρήση της σταθεράς αποδιέγερσης του  $^{24}\text{Na}$ , αντί του  $^{202}\text{Tl}$ . Προκύπτει:

$$f_c = 0.531$$

Το πλήθος των πυρήνων του Al1 προσδιορίζεται από τη μάζα του, σύμφωνα με τη σχέση (3.2.10) και σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 2.2. Προκύπτει :

$$N_t = (4.041 \pm 0.121) \cdot 10^{+21} \text{ πυρήνες } ^{27}\text{Al}$$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  είναι γνωστή με ακρίβεια, για αυτό άλλωστε χρησιμοποιήθηκε και το αλουμίνιο σαν στόχος αναφοράς. Από βιβλιοθήκες δεδομένων στο διαδίκτυο (Evaluated Nuclear Data File- ENDF), για δέσμη νετρονίων ενέργειας 19.3 MeV είναι:

$$\sigma = 42.1 \pm 12.6 \text{ mbarn (1barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα στην (3.2.1) και για αμελητέα ενδοαπορρόφηση στο εσωτερικό του στόχου Al1, προκύπτει:

$$\Phi_{\text{Al1}} = (2.717 \pm 0.173) \cdot 10^{+10} \text{ (n/cm}^2)$$

#### - Ροή νετρονίων στο Nb

Ο νέος πυρήνας, που δημιουργείται με την ακτινοβόληση του  $^{93}\text{Nb}$ , είναι ο πυρήνας  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ . Κατά την αποδιέγερση του  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ , η πιο ισχυρή ακτίνα γ που εκπέμπεται, είναι στα 934.46 keV, με ένταση  $I_\gamma=99\%$ . Έτσι με ολοκλήρωση της κορυφής στα 934.46 keV, στο φάσμα του Nb μετά την ακτινοβόληση προκύπτει :

$$N_\gamma = 4586 \pm 166 \text{ counts}$$

$$I_\gamma = 99\%$$

Η απόδοση του ανιχνευτή υπολογίζεται από τη συνάρτηση προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα του σχήματος (2.5), για την ενέργεια στα 934.46 keV είναι :

$$\varepsilon = (2.57 \pm 0.06) \cdot 10^{-3}$$

Ο παράγοντας D υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.8), όπως ακριβώς και με τον στόχο θαλλίου αλλά με αντικατάσταση της τιμής  $\lambda = 7.90 \cdot 10^{-7}$  (καθώς ο χρόνος ημιζωής του  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  είναι  $T_{1/2} = 876960 \text{ sec}$ ). Προκύπτει :

$$D = 0.170$$

Ο παράγοντας fc υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.9) ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε παραπάνω, με μόνη διαφορά τη χρήση της σταθεράς αποδιέγερσης του  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ , αντί του  $^{202}\text{Tl}$ . Προκύπτει:

$$fc = 0.957$$



Το πλήθος των πυρήνων του Nb11 προσδιορίζεται από τη μάζα του, σύμφωνα με τη σχέση (3.2.10) και σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 2.2. Προκύπτει :

$$N_t = (2.173 \pm 0.065) * 10^{+21} \text{ πυρήνες } {}^{93}\text{Nb}$$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης  ${}^{93}\text{Nb}(n,2n){}^{92m}\text{Nb}$  είναι γνωστή με ακρίβεια, γι αυτό άλλωστε χρησιμοποιήθηκε και το αλουμίνιο σαν στόχος αναφοράς. Από βιβλιοθήκες δεδομένων στο διαδίκτυο (Evaluated Nuclear Data File- ENDF), για δέσμη νετρονίων ενέργειας 19.3 MeV είναι:

$$\sigma = 327 \pm 9.81 * 10 \text{ mbarn} \text{ (1barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2\text{)}$$

Έτσι, αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα στην (3.2.1) και για αμελητέα ενδοαπορρόφηση στο εσωτερικό του στόχου Al1, προκύπτει:

$$\Phi_{\text{Nb11}} = (1.56 \pm 0.09) * 10^{+10} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

### **3.3 Υπολογισμός Πειραματικής Ενεργού Διατομής για Ενέργεια 17.7MeV**

Για τον υπολογισμό της πειραματικής ενεργού διατομής χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι τύποι και οι ίδιοι παράγοντες με αυτούς στην υποενότητα 3.2.

Παρακάτω αναλύεται κάθε ένας από τους παράγοντες αυτούς ξεχωριστά και εκτιμάται η τιμή τους σύμφωνα με τα δεδομένα του πειράματος.

#### Προσδιορισμός του παράγοντα D

Από τη σχέση (3.2.8) αντικαθιστώντας τις παρακάτω τιμές:

- Χρόνος που παρήλθε από το πέρας της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης της ενεργότητας:

$$t_1 = |(\text{αρχή μέτρησης}) - (\text{τέλος ακτινοβόλησης})| \Leftrightarrow t_1 = (14:45:00 - 17:06:00) \Leftrightarrow t_1 = 82200\text{sec}$$

- Χρόνος που παρήλθε από το πέρας της ακτινοβόλησης μέχρι το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας:

$$t_2 = t_1 + (\text{διάρκεια μέτρησης}) \Leftrightarrow t_2 = 82200 + 87300 \Leftrightarrow t_2 = 169500\text{sec}$$

- Σταθερά αποδιέγερσης του  ${}^{202}\text{Tl}$ :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{0.693}{1056672} \rightarrow \lambda = 6.56 * 10^7 \text{ sec}^{-1}$$

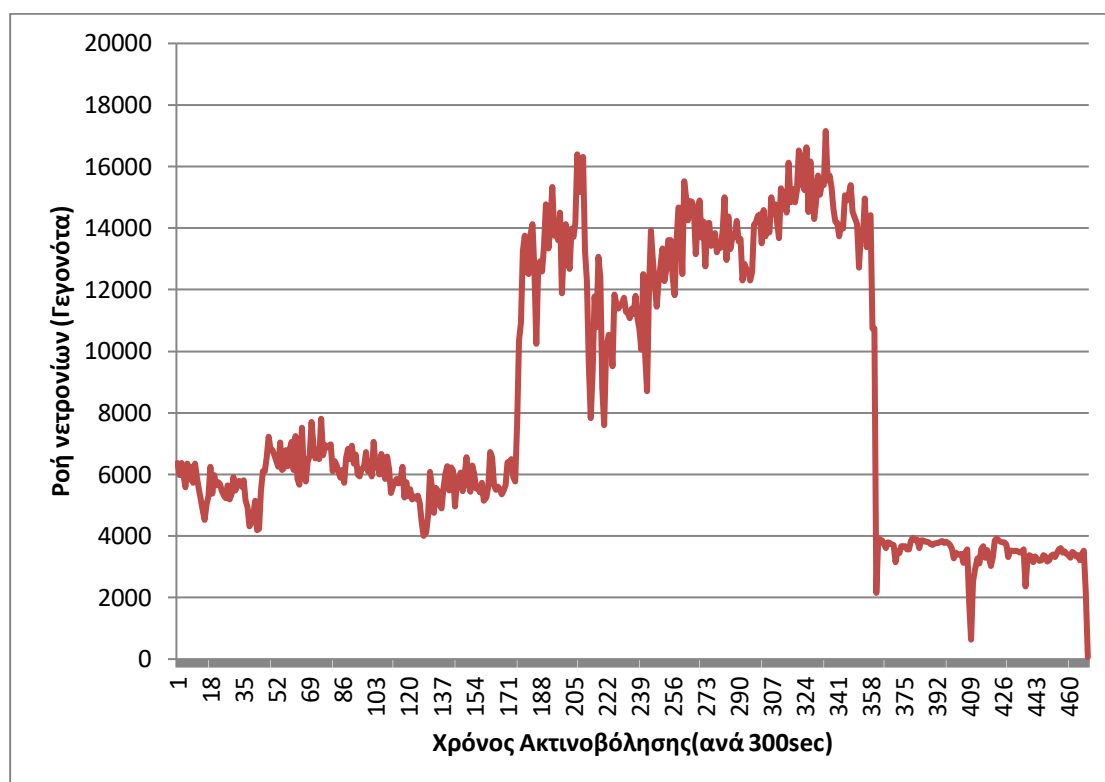
Συνεπώς προκύπτει ότι :

$$D = 0.051$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα $f_c$

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα  $f_c$ , χρησιμοποιήθηκε το φάσμα από τη διάταξη ελέγχου της δέσμης. Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα (2.3), το φάσμα αυτό λήφθηκε με χρήση του ανιχνευτή liquid. Τα ολοκληρώματα στη σχέση (3.2.9), υπολογίστηκαν αριθμητικά, από τα αντίστοιχα αθροίσματα πάνω στα κανάλια του φάσματος των διακυμάνσεων και η τιμή που προέκυψε είναι :

$$f_c = 0.972$$



Σχήμα 3.8 : Διάγραμμα των διακυμάνσεων της δέσμης νετρονίων, που έχει ληφθεί από τη διάταξη ελέγχου της δέσμης για την ακτινοβόληση σε ενέργεια νετρονίων 17.7 MeV

### Προσδιορισμός του παράγοντα $\epsilon$

Όπως προαναφέραμε και στην υποενότητα 2.3 και σύμφωνα με την διαδικασία που ακολουθήθηκε εκεί η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή (50%) για την ενέργεια 439.56keV είναι :

$$\epsilon = 0.00444 \pm 0.00014$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα F

Ο διορθωτικός παράγοντας F για την εκτεταμένη γεωμετρία της μέτρησης και την ενδοαπορρόφηση στα υλικά του στόχου προέκυψε μέσω της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo και του λογισμικού MCNP (**M**onte **C**arlo **N**eutral **P**articles)

Για την διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην μέτρηση ενέργειας 17.7MeV, την γεωμετρία και την σύνθεση του στόχου η τιμή F προέκυψε :

$$F = 0.907$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα Nτ

Το πλήθος των πυρήνων  $^{203}\text{Tl}$  του στόχου που ακτινοβολήθηκε προσδιορίζεται από τη μάζα του, σύμφωνα με τη σχέση:

$$N\tau = \frac{m \cdot N_A}{A} \quad (3.2.10)$$

Όπου:

m : η μάζα του στόχου αναφοράς

A : ο ατομικός αριθμός του πυρήνα  $^{203}\text{Tl}$  δηλ 203

N<sub>A</sub> : ο αριθμός του Avogadro

Η μάζα m του ισότοπου  $^{203}\text{Tl}$  ( το οποίο μας ενδιαφέρει ) στην παστίλια του στόχου υπολογίζεται ως εξής:

m = Μάζα παστίλιας \* ποσοστό TlCl στην παστίλια\* μοριακό βάρος (Tl)/μοριακό βάρος (TlCl) \* ποσοστό ισότοπου στο φυσικό θάλλιο

Από τα παραπάνω και τα στοιχεία σύνθεσης της κάθε παστίλιας που αναφέραμε στην υποενότητα (2.2) υπολογίζουμε

$$N\tau = (1.136 \pm 0.034) \cdot 10^{21} \text{ πυρήνες}$$

### Προσδιορισμός του παράγοντα Φ

Η συνολική ροή νετρονίων Φ που προσέπεσε στον στόχο κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης υπολογίζεται με δυο μεθόδους στην παρούσα εργασία: πειραματικά και μέσω προσομοίωσης Monte Carlo. Για την πειραματική εύρεση της τιμής του Φ βρίσκουμε σύμφωνα με την μέθοδο της ενεργοποίησης την συνολική ροή νετρονίων Φ στους στόχους αναφοράς. Καθώς η ακτινοβόληση έγινε με σκοπό την μέτρησης της ολικής ενεργού διατομής όχι μόνο για νετρονικές αντιδράσεις στο θάλλιο αλλά

και για νετρονικές αντιδράσεις στο γερμάνιο (Ge) και στον υδράργυρο (Hg) οι στόχοι αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και οι οποίοι αναφέρονται στην υποενότητα 2.2 μετρήθηκαν σε διαφορετικούς ανιχνευτές. Οι στόχοι που μετρήθηκαν στον δικό μας ανιχνευτή, ταυτόχρονα με την μέτρηση της ενεργότητας του θαλλίου είναι ο στόχος χρυσού (Au2) και ο στόχος νιοβίου (Nb4). Τα συνολικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων όλων των στόχων αναφοράς και ο τελικός προσδιορισμός της συνολικής ροής νετρονίων  $\Phi$  μελετούνται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Ο πειραματικός προσδιορισμός του παράγοντα  $\Phi$  των στόχων Au2 και Nb4 φαίνεται παρακάτω :

- **Ροή νετρονίων στο Au**

Ο νέος πυρήνας, που δημιουργείται με την ακτινοβόληση του  $^{197}\text{Au}$ , είναι ο πυρήνας  $^{196}\text{Au}$ . Κατά την αποδιέγερση του  $^{196}\text{Au}$ , η πιο ισχυρή ακτίνα  $\gamma$  που εκπέμπεται, είναι στα 355.68 keV, με ένταση  $I_\gamma=87\%$ . Έτσι, με ολοκλήρωση της κορυφής στα 355.68 keV, στο φάσμα του Au μετά την ακτινοβόληση προκύπτει :

$$N_\gamma = 24172 \pm 260 \text{ counts}$$

$$I_\gamma = 87\%$$

Η απόδοση του ανιχνευτή υπολογίζεται από τη συνάρτηση προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα του σχήματος (2.5), για την ενέργεια στα 355.68 keV είναι :

$$\varepsilon = (5.181 \pm 0.155) \cdot 10^{-3}$$

Ο παράγοντας D υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.8), όπως ακριβώς και με τον στόχο θαλλίου αλλά με αντικατάσταση της τιμής  $\lambda = 1.30 \cdot 10^{-6}$  (καθώς ο χρόνος ημιζωής του  $^{196}\text{Au}$  είναι  $T_{1/2} = 533952 \text{ sec}$ ). Προκύπτει :

$$D = 0.076$$

Ο παράγοντας  $f_c$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.9) ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε παραπάνω, με μόνη διαφορά τη χρήση της σταθεράς αποδιέγερσης του  $^{196}\text{Au}$ , αντί του  $^{202}\text{Tl}$ . Προκύπτει:

$$f_c = 0.988$$

Το πλήθος των πυρήνων του Au2 προσδιορίζεται από τη μάζα του, σύμφωνα με τη σχέση (3.2.10) και σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 2.2. Προκύπτει :

$$N_t = (4.619 \pm 0.138) \cdot 10^{+21} \text{ πυρήνες } ^{197}\text{Au}$$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης  $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$  είναι γνωστή με ακρίβεια, γι αυτό άλλωστε χρησιμοποιήθηκε και το αλουμίνιο σαν στόχος αναφοράς. Από

βιβλιοθήκες δεδομένων στο διαδίκτυο (Evaluated Nuclear Data File- ENDF), για δέσμη νετρονίων ενέργειας 17.7 MeV είναι:

$$\sigma = 2.254 \pm 0.067 \text{ barn} \quad (1\text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα στην (3.2.1) και για αμελητέα ενδοαπορρόφηση στο εσωτερικό του στόχου Al1, προκύπτει:

$$\Phi_{\text{Au2}} = (7.810 \pm 0.414) * 10^{+09} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

#### - Ροή νετρονίων στο Nb

Ο νέος πυρήνας, που δημιουργείται με την ακτινοβόληση του  $^{93}\text{Nb}$ , είναι ο πυρήνας  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ . Κατά την αποδιέγερση του  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ , η πιο ισχυρή ακτίνα  $\gamma$  που εκπέμπεται, είναι στα 934.46 keV, με ένταση  $I_\gamma=99\%$ . Έτσι με ολοκλήρωση της κορυφής στα 934.46 keV, στο φάσμα του Nb μετά την ακτινοβόληση προκύπτει :

$$N_\gamma = 790 \pm 52 \text{ counts}$$

$$I_\gamma = 99\%$$

Η απόδοση του ανιχνευτή υπολογίζεται από τη συνάρτηση προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα του σχήματος (2.5), για την ενέργεια στα 934.46 keV είναι :

$$\varepsilon = (2.57 \pm 0.06) * 10^{-3}$$

Ο παράγοντας D υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.8), όπως ακριβώς και με τον στόχο θαλλίου αλλά με αντικατάσταση της τιμής  $\lambda = 7.90 * 10^{-7}$  (καθώς ο χρόνος ημιζωής του  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  είναι  $T_{1/2} = 876960 \text{ sec}$ ). Προκύπτει :

$$D = 0.069$$

Ο παράγοντας  $f_c$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.2.9) ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε παραπάνω, με μόνη διαφορά τη χρήση της σταθεράς αποδιέγερσης του  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ , αντί του  $^{202}\text{Tl}$ . Προκύπτει:

$$f_c = 0.966$$

Το πλήθος των πυρήνων του Nb11 προσδιορίζεται από τη μάζα του, σύμφωνα με τη σχέση (3.2.10) και σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 2.2. Προκύπτει :

$$N_t = (2.204 \pm 0.066) * 10^{+21} \text{ πυρήνες } ^{93}\text{Nb}$$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  είναι γνωστή με ακρίβεια, γι αυτό άλλωστε χρησιμοποιήθηκε και το αλουμίνιο σαν στόχος αναφοράς. Από

βιβλιοθήκες δεδομένων στο διαδίκτυο (Evaluated Nuclear Data File- ENDF), για δέσμη νετρονίων ενέργειας 17.7 MeV είναι:

$$\sigma = 32.71 \cdot 10^{-25} \pm 9.83 \text{ mbarn} \text{ (1barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2\text{)}$$

Έτσι, αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα στην (3.2.1) και για αμελητέα ενδοαπορρόφηση στο εσωτερικό του στόχου Al1, προκύπτει:

$$\Phi_{\text{Nb11}} = (7.129 \pm 0.583) \cdot 10^{+09} \text{ (n/cm}^2\text{)}$$

## Κεφάλαιο 4

### Υπολογισμός της συνολικής ροής νετρονίων Φ στον στόχο

Όπως αναφέραμε και στα παραπάνω κεφάλαια η συνολική ροή νετρονίων Φ στον στόχο θαλλίου, η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ , υπολογίστηκε με δυο τρόπους : α) πειραματικά μέσω του υπολογισμού της νετρονικής ροής στους στόχους αναφοράς β) μέσω της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo και του λογισμικού MCNP (**M**onte **C**arlo **N**eutral **P**articles). Παρακάτω αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε μια από αυτές τις μεθόδους ξεχωριστά και προσδιορίζεται η τελική τιμή της νετρονικής ροής στον στόχο για κάθε μια από τις δυο ενέργειες ακτινοβόλησης.

#### 4.1 Πειραματικός υπολογισμός της νετρονικής ροής Φ

Ο πειραματικός προσδιορισμός του παράγοντα Φ στον στόχο θαλλίου έγινε μέσω του υπολογισμού του παράγοντα Φ στους στόχους αναφοράς σύμφωνα με την μέθοδο που αναφέρθηκε στις υποενότητες 3.2 και 3.3. Στις ακτινοβολήσεις των στόχων που γίνανε, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις στόχοι αναφοράς δυο εκ των οποίων μετρήθηκαν στον δικό μας ανιχνευτή γερμανίου (HPGe σχετικής ανιχνευτικής απόδοσης 50%) και δυο σε άλλους ανιχνευτές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς του παράγοντα Φ στους στόχους αναφοράς φαίνονται στους παρακάτω πίνακες για την κάθε ενέργεια ξεχωριστά :

Στόχοι	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ 19.3MeV	
	Φ(n/cm <sup>2</sup> )	δΦ(n/cm <sup>2</sup> )
<b>Al1</b>	2.71E+10	1.73E+09
<b>Au11</b>	2.13E+10	9.00E+08
<b>Nb11</b>	1.56E+10	9.44E+08
<b>Al4</b>	1.07E+10	7.00E+08

Πίνακας 4.1 : Πειραματικές ροές νετρονίων Φ στους στόχους αναφοράς για ενέργεια ακτινοβόλησης 19.3MeV

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ 17.7MeV		
Στόχοι	$\Phi(n/cm^2)$	$\delta\Phi(n/cm^2)$
<b>Alc</b>	8.87E+09	6.00E+08
<b>Au2</b>	7.81E+09	4.14E+08
<b>Nb4</b>	7.13E+09	5.83E+08
<b>Ala</b>	5.89E+09	3.60E+08

Πίνακας 4.2 : Πειραματικές ροές νετρονίων  $\Phi$  στους στόχους αναφοράς για ενέργεια ακτινοβολήσης 17.7MeV

Από τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων σε συνδυασμό με τα δεδομένα που προέκυψαν από την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo προσδιορίζουμε τις τελικές ροές νετρονίων  $\Phi$  που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυσή μας και την εύρεση της ολικής ενεργού διατομής μας, για την κάθε ενέργεια ξεχωριστά.

#### **4.2 Υπολογισμός της νετρονικής ροής $\Phi$ μέσω προσομοίωσης MCNP**

Ο δεύτερος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του παράγοντα  $\Phi$  είναι μέσω της μεθόδου Monte Carlo και του προγράμματος MCNP, όπου μέσω προσομοίωσης της διάταξης της ακτινοβολήσης υπολογίζεται η συνολική ροή των νετρονίων που προσέπεσαν τόσο στο δείγμα όσο και στους στόχους αναφοράς κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης. Το λογισμικό MCNP (**M**onte **C**arlo **N**eutral **P**articles) αναπτύχθηκε στο Los Alamos National Laboratory του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, σε συνεργασία με το U.S Department of Energy. Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση MCNP5. Το MCNP, μέσω της στατιστικής μεθόδου των τυχαίων αριθμών Monte Carlo, έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει πειραματικές διατάξεις και να προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα νετρόνια, τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια, με την ύλη. Η προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων στηρίζεται σε βάσεις δεδομένων που είναι ενσωματωμένες στο πρόγραμμα και περιλαμβάνουν διεθνώς αναγνωρισμένες βιβλιοθήκες ενεργών διατομών για τις διάφορες αλληλεπιδράσεις. Για τις ενεργειακές περιοχές, για τις οποίες δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται κατάλληλα μοντέλα. Ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος καθώς και τα αρχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν και περιέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για μία λεπτομερή περιγραφή της πειραματικής διάταξης και τις κατάλληλες εντολές που καθορίζουν ποιό είναι το μέγεθος που επιθυμείται να προσδιοριστεί με την προσομοίωση, δίνονται αναλυτικά σε παράρτημα που ακολουθεί στο τέλος της παρούσας εργασίας.



Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση φαίνονται παρακάτω για κάθε μία από τις ενέργειες ακτινοβολήσης:

<b>MCNP 19.3MeV</b>		
<b>Στόχοι</b>	<b><math>\Phi(n/cm^2)</math></b>	<b><math>\delta\Phi(n/cm^2)</math></b>
<b>Al1</b>	2.53E+10	-
<b>Hg2</b>	2.26E+10	-
<b>Au11</b>	2.00E+10	-
<b>Nb11</b>	1.71E+10	-
<b>Ge2</b>	1.61E+10	-
<b>Al4</b>	1.39E+10	-

Πίνακας 4.3 : Ροές νετρονίων  $\Phi$  που προκύπτουν μέσω προσομοίωσης MCNP για ενέργεια ακτινοβολήσης 19.3 MeV

<b>MCNP 17.7MeV</b>		
<b>Στόχοι</b>	<b><math>\Phi(n/cm^2)</math></b>	<b><math>\delta\Phi(n/cm^2)</math></b>
<b>Alc</b>	1.00E+10	-
<b>Hg3</b>	9.34E+09	-
<b>Au2</b>	8.12E+09	-
<b>Nb4</b>	6.41E+09	-
<b>Ge1</b>	5.71E+09	-
<b>Ala</b>	4.87E+09	-

Πίνακας 4.4 : Ροές νετρονίων  $\Phi$  που προκύπτουν μέσω προσομοίωσης MCNP για ενέργεια ακτινοβολήσης 17.7 MeV

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, αυτό που είναι σημαντικό, δεν είναι η απόλυτη τιμή της ροής νετρονίων ανά  $cm^2$ , αλλά ο τρόπος με τον οποίο φθίνει η ροή από τον ένα στόχο στον άλλο. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων για την κάθε ενέργεια ξεχωριστά ώστε να μπορέσουμε να δώσουμε την πιο ρεαλιστική τιμή της νετρονικής ροής για τον στόχο του θαλλίου, την οποία θα χρησιμοποιήσουμε και για την ανάλυσή μας στην εύρεση της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ .

#### 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων και εύρεση τελικής τιμής του παράγοντα $\Phi$ για την κάθε ενέργεια

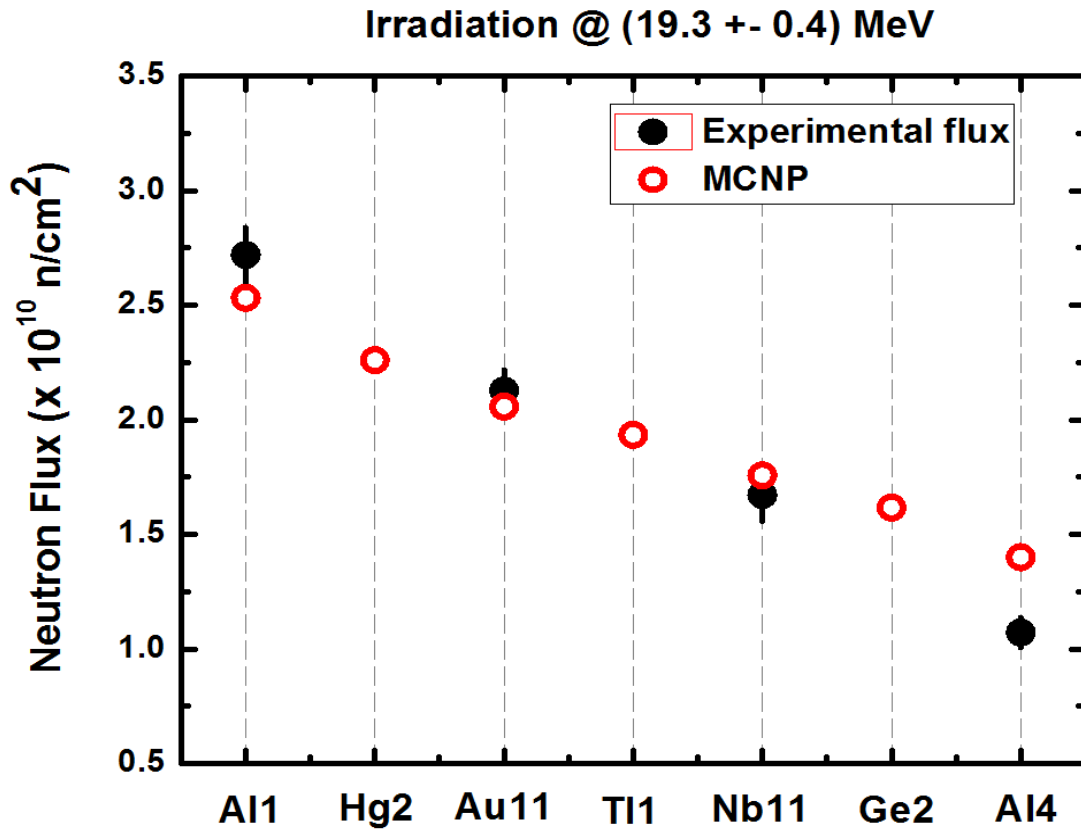
Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε μία από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω, προσδιορίζεται η τελική τιμή του παράγοντα  $\Phi$  που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  και αιτιολογείται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την κάθε μέτρηση.

##### - Ενέργεια νετρονίων 19.3 MeV

Οι νετρονικές ροές που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και την προσομοίωση MCNP για ενέργεια ακτινοβολήσης 19.3 MeV φαίνονται συγκριτικά στον παρακάτω πίνακα και το αντίστοιχο γράφημα :

Στόχος	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ		MCNP
	$\Phi$ ( $\times 10^{10}$ n/cm <sup>2</sup> )	$\delta\Phi$ ( $\times 10^{10}$ n/cm <sup>2</sup> )	$\Phi$ ( $\times 10^{10}$ n/cm <sup>2</sup> )
Al1	2.71	0.17	2.53
Hg2	-	-	2.26
Au11	2.13	0.09	2.00
Tl1	-	-	1.83
Nb11	1.56	0.09	1.71
Ge2	-	-	1.61
Al4	1.07	0.07	1.39

Πίνακας 4.5 : Συγκριτικές ροές νετρονίων  $\Phi$  για ενέργεια ακτινοβολήσης 19.3 MeV



Σχήμα 4.1 : Συγκριτικό γράφημα νετρονικών ροών που προέκυψαν από ανάλυση πειραματικών δεδομένων και προσομοιώσεις MCNP για ενέργεια ακτινοβόλησης 19.3 MeV.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω γράφημα αποφασίσαμε να κανονικοποιήσουμε τις νετρονικές ροές που προέκυψαν από την προσομοίωση MCNP με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές αυτές να συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα, εντός των ορίων σφαλμάτων που υπολογίσαμε και παράλληλα να μην αποκλίνουν σημαντικά και από τις πειραματικές τιμές που υπολογίστηκαν και από τους άλλους στόχους αναφοράς που μετρήθηκαν σε άλλους ανιχνευτές.

Παίρνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω και θέλοντας να δώσουμε περισσότερη βαρύτητα στα πειραματικά αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα στο Νιόβιο (Nb11), το οποίο ήταν ο στόχος αναφοράς που ήταν πιο κοντά στο θάλλιο κατά την ακτινοβόληση και μετρήθηκε στον ίδιο με το θάλλιο χρόνο και ανιχνευτή, καταλήγουμε ότι η τιμή του παράγοντα  $\Phi$  της νετρονικής ροής την οποία θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυσή μας για την εύρεση της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  για ενέργεια νετρονίων 19.3 MeV είναι :

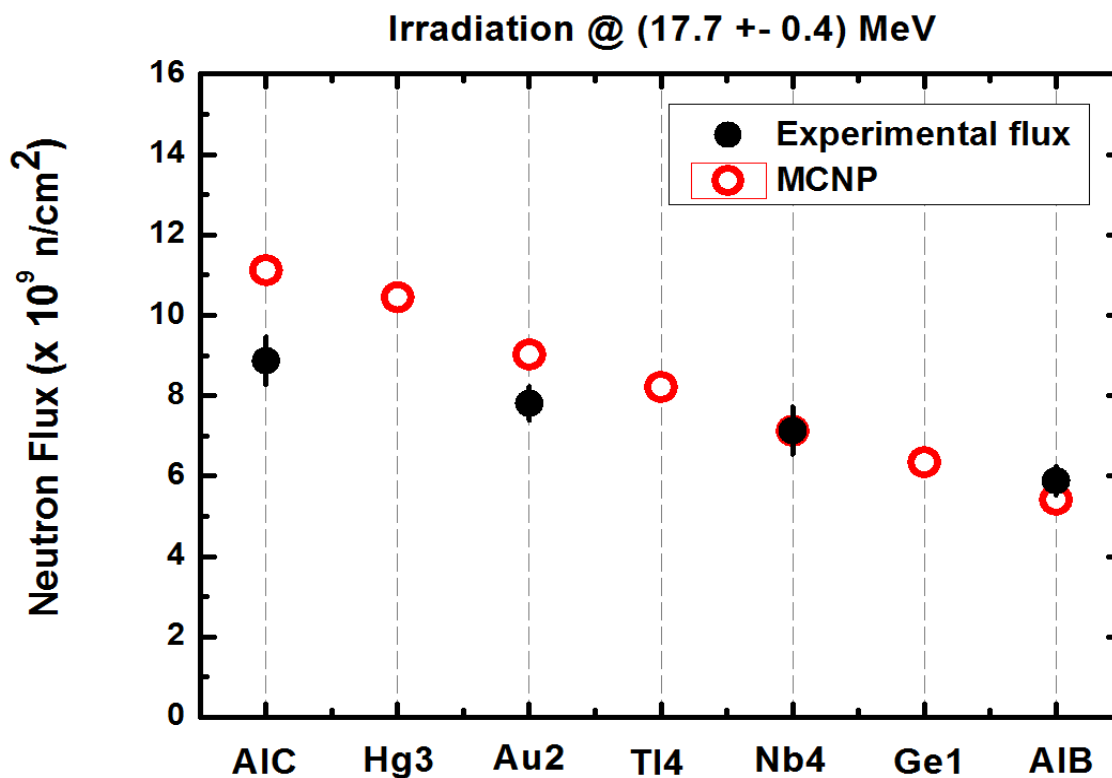
$$\Phi_{\text{Tl1}} = 1.80 \cdot 10^{10} \text{ n/cm}^2$$

- Ενέργεια νετρονίων 17.7 MeV

Οι νετρονικές ροές που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και την προσομοίωση MCNP για ενέργεια ακτινοβολήσης 17.7 MeV φαίνονται συγκριτικά στον παρακάτω πίνακα και το αντίστοιχο γράφημα :

Στόχος	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ		MCNP
	$\Phi$ ( $\times 10^9 \text{n/cm}^2$ )	$\delta\Phi$ ( $\times 10^9 \text{n/cm}^2$ )	$\Phi$ ( $\times 10^9 \text{n/cm}^2$ )
AIC	8.87	0.60	11.12
Hg3	-	-	10.44
Au2	7.81	0.41	9.02
Tl4	-	-	8.21
Nb4	7.12	0.58	7.12
Ge1	-	-	6.34
AIB	5.89	0.36	5.41

Πίνακας 4.6 : Συγκριτικές ροές νετρονίων  $\Phi$  για ενέργεια ακτινοβολήσης 17.7 MeV



Σχήμα 4.2 : Συγκριτικό γράφημα νετρονικών ροών που προέκυψαν από ανάλυση πειραματικών δεδομένων και προσομοιώσεις MCNP για ενέργεια ακτινοβολήσης 17.7 MeV.

Στην περίπτωση των 17.7 MeV και λόγω της πτώσης της τάσης από τα 3500V (στα οποία ο συγκεκριμένος ανιχνευτής δεν λειτουργούσε στον βέλτιστο ρυθμό και πιθανολογείται να έδινε λιγότερα από τα πραγματικά γεγονότα) στα 2500V (υποενότητα 3.1.2), αποφασίστηκε να δοθεί περισσότερη έμφαση στα πειραματικά δεδομένα και πιο συγκεκριμένα στο Νιόβιο (Nb4). Η απόφαση αυτή έγινε λόγω του ότι ο στόχος Νιοβίου μετρήθηκε μαζί με τον στόχο Θαλλίου στον ίδιο ανιχνευτή την ίδια χρονική στιγμή μετά το πέρας της ακτινοβολήσης και για την ίδια διάρκεια. Επίσης η μέτρηση ενεργότητας των δύο αυτών στόχων έγινε λίγο μετά την πτώση της τάσης που αναφέρθηκε, γεγονός που μας οδήγησε να δώσουμε επιπλέον βαρύτητα στον συγκεκριμένο στόχο αναφοράς καθώς οποιοδήποτε συστηματικό σφάλμα που μπορεί να προέκυψε στην καταγραφή των counts λόγω της πτώσης της τάσης θα είχε επίπτωση τόσο στα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση του στόχου Nb4 όσο και σε αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση του Tl4 .

Παίρνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω και κανονικοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν από την προσομοίωση MCNP στα πειραματικά του στόχου αναφοράς Nb4 για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, καταλήγουμε ότι η τιμή του παράγοντα  $\Phi$  της νετρονικής ροής την οποία θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυσή μας για την εύρεση της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  για ενέργεια νετρονίων 17.7 MeV είναι :

$$\Phi_{\text{Tl4}} = 8.20 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2$$

## Κεφάλαιο 5

### Υπολογισμός της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για ενέργειες νετρονίων 17.7 MeV και 19.3 MeV και τελικά συμπεράσματα

#### 5.1 Υπολογισμός της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$ για κάθε μια ενέργεια.

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3 ο υπολογισμός της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  έγινε σύμφωνα με την μέθοδο της ενεργοποίησης και πιο συγκεκριμένα για τον ακριβή προσδιορισμό της τιμής αυτής χρησιμοποιήθηκε ο εξής τύπος:

$$\sigma = \frac{N\gamma}{\varepsilon * F * I\gamma * D * fc} * \frac{1}{N\tau} * \frac{1}{\Phi} \quad (3.2.1)$$

όπου:

$N\gamma$ : ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, που υπολογίζεται με ολοκλήρωση της κορυφής του  $^{202}\text{Tl}$  (439.56keV) στο φάσμα του δείγματος μετά την ακτινοβόληση

$\varepsilon$ : η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή (50%) για την ενέργεια 439.56keV

$F$ : διορθωτικός παράγοντας για την εκτεταμένη γεωμετρία της μέτρησης και την ενδοαπορρόφηση στα υλικά του στόχου

$I\gamma$ : η ένταση της ακτίνας-  $\gamma$ ,  $E\gamma=439.56\text{keV} \Leftrightarrow I\gamma=91\%$

$D$ : διορθωτικός παράγοντας μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη η αποδιέγερση των παραχθέντων πυρήνων  $^{202}\text{Tl}$ , από το πέρας της ακτινοβόλησης, μέχρι το τέλος της μέτρησης της ενεργότητας

$fc$ : ένας διορθωτικός παράγοντας με τον οποίο υπολογίζεται το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και την αποδιέγερση πυρήνων κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης.

$N\tau$ : το πλήθος των πυρήνων  $^{203}\text{Tl}$  του στόχου που ακτινοβολήθηκε

$\Phi$ : Η συνολική ροή νετρονίων που προσέπεσε στον στόχο κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης

Ο υπολογισμός κάθε ενός από τους παραπάνω παράγοντες έγινε στις υποενότητες 3.2 και 3.3, ενώ στο κεφάλαιο 4 έγινε η τελική επιλογή της τιμής του παράγοντα  $\Phi$  για κάθε μια από τις ενέργειες ακτινοβόλησης.

Παρακάτω φαίνεται ο ακριβής υπολογισμός της τιμής της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  για ενέργειες ακτινοβόλησης 17.7 MeV και 19.3 MeV αντίστοιχα

- Ενέργεια νετρονίων 19.3 MeV

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της υποενότητας 3.2 οι τιμές των απαιτούμενων από τον τύπο 3.2.1 παραγόντων είναι :

$$D = 0.14$$

$$fc = 0.964$$

$$\varepsilon = 0.00444 \pm 0.00014$$

$$F = 0.923$$

$$I\gamma = 91\%$$

$$N\gamma = 11858 \text{ counts}$$

$$N\tau = (8.849 \pm 0.265) * 10^{20} \text{ πυρήνες}$$

$$\Phi = 1.80 * 10^{10} \text{ n/cm}^2$$

Άρα σύμφωνα με τον τύπο 3.2.1 :

$$\sigma = \frac{N\gamma}{\varepsilon * F * I\gamma * D * fc} * \frac{1}{N\tau} * \frac{1}{\Phi}$$

$$\sigma = \underline{1440 \pm 93 \text{ mbarns}} \quad (1\text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$

$$\sigma = \underline{1.440 \pm 0.093 \text{ barns}}$$

- Ενέργεια νετρονίων 17.7 MeV

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της υποενότητας 3.3 οι τιμές των απαιτούμενων από τον τύπο 3.2.1 παραγόντων είναι :

$$D = 0.05$$

$$fc = 0.972$$

$$\varepsilon = 0.00444 \pm 0.00014$$

$$F = 0.907$$

$$I\gamma = 91\%$$

$$N\gamma = 4319 \text{ counts}$$

$$N\tau = (1.136 \pm 0.034) * 10^{+21} \text{ πυρήνες}$$

$$\Phi = 8.21 * 10^9 \text{ n/cm}^2$$

Άρα σύμφωνα με τον τύπο 3.2.1 :

$$\sigma = \frac{N\gamma}{\varepsilon * F * I\gamma * D * fc} * \frac{1}{N\tau} * \frac{1}{\Phi}$$

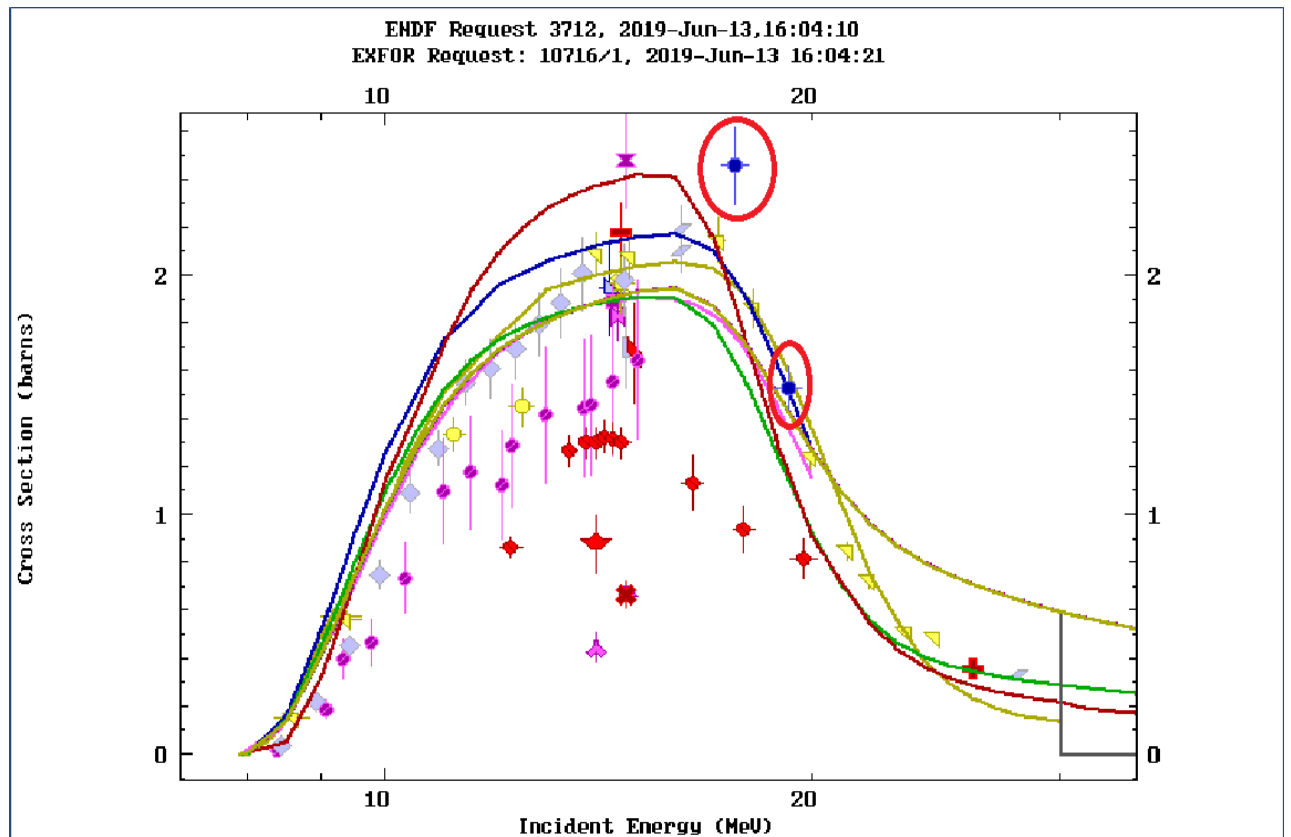
$$\sigma = \underline{\underline{2463 \pm 168 \text{ mbarns}}} \quad (1\text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$

$$\sigma = \underline{\underline{2.463 \pm 0.168 \text{ barns}}}$$

Τα αποτελέσματά μας φαίνονται συνοπτικά στο παρακάτω γράφημα μαζί με τα πειραματικά δεδομένα και τις θεωρητικές καμπύλες που υπάρχουν σε διεθνείς βάσεις δεδομένων για την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων.

Τα δικά μας αποτελέσματα σημειώνονται στο γράφημα κυκλικά με μπλε χρώμα, ενώ επίσης έχουν σημειωθεί και τα εύρη των σφαλμάτων της ενέργειας της δέσμης και των τελικών αποτελεσμάτων μας, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.





Γράφημα 5.1 : Συγκριτική απεικόνιση των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων που υπάρχουν σε διεθνείς βάσεις δεδομένων για την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων με τα δικά μας

Η σύγκριση αυτή των δικών μας αποτελεσμάτων με αυτά άλλων πειραματικών και θεωρητικών ομάδων μας βοηθάει να δούμε κατά πόσο συμφωνούν τα δεδομένα αυτά μεταξύ τους και να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα, ειδικά στην ενεργειακή περιοχή την οποία μελετάμε και στην οποία υπάρχει μεγάλη ασυμφωνία μεταξύ των ήδη υπαρχόντων αποτελεσμάτων .

## 5.2 Σύνοψη και Τελικά Συμπεράσματα

Είναι φανερό από το γράφημα 5.1 ότι στην περιοχή ενεργειών από τα 15 MeV έως τα 28 MeV σημειώνεται μεγάλη διαφοροποίηση των πειραματικών μετρήσεων των διαφόρων επιστημονικών ομάδων μεταξύ τους, ενώ η απόκλιση των θεωρητικών καμπύλων είναι εμφανής τόσο ποσοτικά όσο και στην κλίση την οποία ακολουθούν. Οι τιμές της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης που υπολογίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας φαίνεται να έχουν σχετικά καλή συμφωνία με τα προηγούμενα αποτελέσματα άλλων ομάδων που μέτρησαν υψηλές τιμές της ολικής ενεργού διατομής στις συγκεκριμένες ενέργειες, ενώ επίσης φαίνεται να υπάρχει καλή συμφωνία και με τις περισσότερες θεωρητικές καμπύλες.

Πιο συγκεκριμένα η τιμή που υπολογίσαμε για ενέργεια νετρονίων 19.3 MeV ( $\sigma = 1440 \pm 92.6$  mbarns) παρουσιάζει σχετικά μικρό σφάλμα και έχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της ομάδας του Bayhurst (κίτρινο χρώμα) που είχε εκτελέσει στο παρελθόν πειραματικές μετρήσεις σε παραπλήσιες ενέργειες. Επίσης συμφωνεί και με τις προβλεπόμενες τιμές από τα θεωρητικά μοντέλα TENDL, JENDL και ENDF (κίτρινο, μπλε, σκούρο κίτρινο), εντός των επιτρεπόμενων ορίων σφαλμάτων.

Η τιμή που υπολογίσαμε για ενέργεια νετρονίων 17.7 MeV ( $\sigma = 2463 \pm 168$  mbarns) παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα και βρίσκεται υψηλότερα από τις υπόλοιπες πειραματικές τιμές άλλων ομάδων στην ίδια ενέργεια. Παρ' όλα αυτά η ασυμφωνία της δεν είναι όσο μεγάλη όση η ασυμφωνία μεταξύ των ομάδων του Bayhurst και του Scheimbauer (κίτρινο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα) και συμφωνεί περισσότερο με τις τιμές της ομάδας του Bayhurst, με τις οποίες είχαμε καλή συμφωνία και στα 19.3 MeV. Επίσης βρίσκεται κοντά στις προβλεπόμενες τιμές από το θεωρητικό μοντέλο ROSFOND (κόκκινη καμπύλη) αλλά λίγο υψηλότερα. Η ανεβασμένη τιμή του σημείου μας στα 17.7 MeV ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι μειώσαμε την τάση του ανιχνευτή γερμανίου από τα 3500V στα 2500V κατά την διάρκεια της μέτρησης με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερους χρόνους μέτρησης στην συγκεκριμένη ενέργεια και συνεπώς χειρότερη στατιστική, ενώ παράλληλα ο ανιχνευτής ίσως να μην λειτουργούσε στον βέλτιστο ρυθμό αμέσως μετά την πτώση της τάσης. Επίσης αν συγκρίνουμε το αποτέλεσμά μας στα 17.7 MeV με αυτό στα 19.3 MeV βλέπουμε ότι η πτώση της καμπύλης της αντίδρασης συμφωνεί σημαντικά με την κλίση που παρουσιάζει το θεωρητικό μοντέλο ROSFOND (κόκκινη καμπύλη).

Συμπερασματικά διαπιστώνουμε ότι η χρησιμότητα των μετρήσεων είναι μεγάλη, διότι:

- Το Θάλλιο και τα ισότοπα του είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε πολλούς τεχνολογικούς τομείς και τα βιβλιογραφικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα σχετικά με τις νετρονικές αντιδράσεις του στοιχείου αυτού και την παραγωγή ασταθών ισωτόπων (ιδιαίτέρως χρήσιμα στην πυρηνική ιατρική) από σταθερά είναι σπάνια στη λογοτεχνία και παρουσιάζουν πολλές αποκλίσεις μεταξύ τους.
- Τα πειραματικά δεδομένα προηγούμενων ομάδων που μέτρησαν την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ειδικά στην ενεργειακή περιοχή από τα 15 MeV έως τα 28 MeV.
- Υπάρχουν πολλά θεωρητικά μοντέλα για την ενεργό διατομή της αντίδρασης, τα οποία έχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους. Ο μόνος τρόπος να προσδιοριστούν καλύτερα οι παράμετροι αυτών των μοντέλων είναι με τη μέτρηση, όσο το δυνατόν, περισσότερων και ακριβέστερων πειραματικών δεδομένων.
- Τα σημεία μας παρουσιάζουν καλή συμφωνία με τα πειραματικά και θεωρητικά δεδομένων πολλών προηγούμενων ομάδων κυρίως στην ενεργειακή περιοχή των 19.3 MeV
- Το γεγονός ότι μετρήσαμε σε δύο διαφορετικές ενέργειες νετρονίων μπορεί να μας δώσει στοιχεία και για την κλίση της καμπύλης που ακολουθεί η τιμή της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης και το πόσο ομαλά ή απότομα πέφτει μετά τα 15 MeV

#### Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα :

- Ως συνέχεια της ερευνητικής δουλειάς που πραγματοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία κρίνεται χρήσιμη η μέτρηση της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{203}\text{Tl}(n,2n)^{202}\text{Tl}$  και σε άλλες ενέργειες μεταξύ των 15 και 28 MeV ώστε να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα του τι γίνεται στην συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή

- Επίσης τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυσή μας καθώς και τα τελικά μας αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον θεωρητικό υπολογισμό της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης με τους κώδικες EMPIRE και TALYS.
- Ακόμα ένας τομέας που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και με τον ασχολείται η ερευνητική ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής του ΕΜΠ είναι η μελέτη του τρόπου αποδιέγερσης των πυρήνων που βρίσκονται σε κοντινή περιοχή του περιοδικού πίνακα με το Θάλλιο, όταν αυτοί έχουν φτάσει στο συνεχές ενεργειακό φάσμα (ενεργειακά επίπεδα δεν είναι πλέον διακριτά μεταξύ τους λόγω της πολύ μικρής ενεργειακής απόστασής τους). Στο παρελθόν έχει μελετηθεί ο τρόπος αποδιέγερσης ισοτόπων του υδραργύρου και του χρυσού στο συνεχές φάσμα, οπότε τα αποτελέσματά μας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει η παραπάνω ανάλυση και στο θάλλιο το οποίο βρίσκεται κοντά στα στοιχεία αυτά στον περιοδικό πίνακα και να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν ομοιότητες στον τρόπο αποδιέγερσης των στοιχείων που βρίσκονται στην συγκεκριμένη περιοχή όταν φτάσουν το συνεχές φάσμα και να αντλήσουμε κάποια γενικά συμπεράσματα.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Τρόπος λειτουργίας προγράμματος MCNP5

Το λογισμικό MCNP (**M**onte **C**arlo **N**eutral **P**articles) αναπτύχθηκε στο Los Alamos National Laboratory του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, σε συνεργασία με το U.S Department of Energy. Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση MCNP5. Το MCNP, μέσω της στατιστικής μεθόδου των τυχαίων αριθμών Monte Carlo, έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει πειραματικές διατάξεις και να προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα νετρόνια, τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια, με την ύλη. Η προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων στηρίζεται σε βάσεις δεδομένων που είναι ενσωματωμένες στο πρόγραμμα και περιλαμβάνουν διεθνώς αναγνωρισμένες βιβλιοθήκες ενεργών διατομών για τις διάφορες αλληλεπιδράσεις. Για τις ενεργειακές περιοχές, για τις οποίες δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται κατάλληλα μοντέλα.

#### Αρχείο Εισόδου

Το αρχείο εισόδου περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για μία λεπτομερή περιγραφή της πειραματικής διάταξης, καθώς και τις κατάλληλες εντολές, που καθορίζουν ποιό είναι το μέγεθος που επιθυμείται να προσδιοριστεί με την προσομοίωση. Έχει τη μορφή κειμένου με λέξεις - μεταβλητές και απαιτείται να έχει συγκεκριμένη μορφή και δομή, όπως ορίζεται από το συντακτικό του προγράμματος. Η δομή του κώδικα είναι η εξής:

#### **Προαιρετικά σχόλια**

- 1. Ορισμοί κελιών (cell cards)**  
**[κενή γραμμή]**
- 2. Ορισμοί επιφανειών (surface cards)**  
**[κενή γραμμή]**
- 3. Ορισμοί άλλων παραμέτρων (data cards)**

#### **Σχόλια**

Εξ' ορισμού, από το πρόγραμμα, παρατίθεται στην αρχή του κώδικα, η ημερομηνία δημιουργίας του αρχείου, π.χ:

c Created on: Wednesday, September 04, 2019 at 20:00

Όμως, σχόλια μπορούν να παρεμβληθούν σε οποιοδήποτε σημείο του κώδικα, όχι μόνο στην αρχή του. Για κάποιο σχόλιο που καταλαμβάνει ολόκληρη τη γραμμή, χρησιμοποιείται η εντολή «c», (comment), π.χ:

c -----Source definition-----

Για σχόλιο που παρατίθεται στο τέλος της γραμμής, αφού οριστεί μία μεταβλητή του προβλήματος, χρησιμοποιείται το σύμβολο «\$» , π.χ:

15 9 -4.506 -36 \$ TiT (tritium target)

Τα σχόλια δεν «διαβάζονται» από το πρόγραμμα.

### **Ορισμοί κελιών (cell cards)**

Ως κελιά, ορίζονται οι στοιχειώδεις όγκοι που απαρτίζουν τα αντικείμενα που συμμετέχουν στην προσομοίωση. Για παράδειγμα, στην προσομοίωση της διάταξης της ακτινοβολήσης, αντικείμενο αποτελεί ο πρώτος στόχος αναφοράς, το AIF . Η δημιουργία ενός κελιού (ο ορισμός ενός αντικειμένου), γίνονται ως εξής:

25 2 -2.7 -57 \$ Al front

Ο πρώτος αριθμός είναι η ταυτότητα του κελιού. Η παραπάνω περιγραφή αναφέρεται στο κελί υπ' αριθμόν 25 (cell 25).

Ο δεύτερος αριθμός προσδιορίζει το υλικό από το οποίο αποτελείται το αντικείμενο που προσομοιώνεται ως κελί 25. Δηλαδή, το «Al front» αποτελείται από το υλικό 2 (material 2).

Ο τρίτος αριθμός προσδιορίζει την πυκνότητα του υλικού που περιέχεται στο κελ 25. Δηλαδή, το 2.7 είναι η πυκνότητα του υλικού 2. Όταν η πυκνότητα έχει αρνητικό πρόσημο, τότε η τιμή της είναι εκφρασμένη σε μονάδες  $\text{g/cm}^3$ , ενώ όταν έχει θετικό πρόσημο είναι εκφρασμένη σε μονάδες  $\text{atoms/cm}^3$ .

Οι αριθμοί που ακολουθούν (στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι μόνο ένας, αλλά δεν είναι πάντα έτσι) περιγράφουν τις επιφάνειες από τις οποίες περικλείεται το αντικείμενο. Όταν ο αριθμός αναφέρεται σε κλειστή επιφάνεια (π.χ σφαίρα, κύβος, παραλληλεπίπεδο κτλ), τότε:

- θετικό πρόσημο, σημαίνει το εξωτερικό της επιφάνειας
  - αρνητικό πρόσημο, σημαίνει το εσωτερικό της επιφάνειας.
- Όταν ο αριθμός αναφέρεται π.χ σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα x, τότε:

α) θετικό πρόσημο, σημαίνει τον χώρο προς την κατεύθυνση που αυξάνεται το  $x$

β) αρνητικό πρόσημο, σημαίνει τον χώρο προς την κατεύθυνση που μειώνεται το  $x$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το «Al front» βρίσκεται στο εσωτερικό της κλειστής επιφάνειας 57.

Ένας άλλος τρόπος, με τον οποίο μπορεί να οριοθετηθεί ένα αντικείμενο, είναι να οριστεί ως ο χώρος έξω από ένα ή περισσότερα άλλα κελιά. Αυτό επιτυγχάνεται με το σύμβολο «#», ως εξής:

1 1 -0.001225 -1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 \$ Room

Δηλαδή, το κελί 1 αποτελείται από το υλικό 1, πυκνότητας  $0.001225 \text{ g/cm}^3$ , βρίσκεται στο εσωτερικό της κλειστής επιφάνειας 1 και ταυτόχρονα έξω από τα κελιά 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 και 14.

Προσοχή! Είναι απαραίτητο σε κάθε προσομοίωση να οριστεί:

- Το κελί που θα οριοθετεί τον «κόσμο» του προβλήματος. Αυτό το κελί, είναι συνήθως το εσωτερικό μίας κλειστής επιφάνειας, που περικλείει όλα τα άλλα αντικείμενα του προβλήματος. Κάθε σωματίδιο, όταν φτάσει στο σύνορό της, παύει να παρακολουθείται π.χ:

1 1 -0.001225 -1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 \$ Room

- Το κελί που θα αναφέρεται στον «έξω κόσμο». Αυτό το κελί, είναι το εξωτερικό της κλειστής επιφάνειας που περικλείει όλα τα άλλα αντικείμενα του προβλήματος.

30 0 1 \$ Outside world

### Ορισμοί επιφανειών (surface cards)

Σε αυτό το τμήμα του κώδικα υλοποιούνται όλες οι επιφάνειες που είναι απαραίτητες για την περιγραφή της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης και τη δημιουργία όλων των κελιών. Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολλών διαφορετικών επιφανειών, όπως σφαιρών, παραλληλεπιπέδων, κυλίνδρων, κώνων και άλλων. Αφού επιλεγεί ο τύπος της επιφάνειας, αρκεί να οριστούν:

- για μία ανοιχτή επιφάνεια, οι παράμετροι της γεωμετρικής της εξίσωσης
- για μία κλειστή επιφάνεια, οι διαστάσεις της.

Ο πιο φιλικός προς τον χρήστη τρόπος κατασκευής μίας επιφάνειας είναι από το μενού του προγράμματος. Για παράδειγμα, έστω ότι σκοπός είναι η δημιουργία μιας σφαίρας με ακτίνα 2 m, η οποία θα παίξει το ρόλο του «κόσμου». Η διαδικασία είναι η εξής:

- Επιλογή του «Surface», στο αρχικό παράθυρο. Εμφανίζεται αυτομάτως ένα καινούριο παράθυρο με το όνομα «Surface», στο οποίο γίνεται η επεξεργασία της επιφάνειας.
- Επιλογή του «Wizard» στο καινούριο παράθυρο. Εμφανίζεται αυτομάτως ένα καινούριο παράθυρο με το όνομα «Surface Wizard», στο οποίο γίνεται η επιλογή του τύπου της επιφάνειας. Για τη σφαίρα, αρκεί να επιλεγθεί το «Sphere» και στη συνέχεια να οριστούν το κέντρο και η ακτίνα της σφαίρας. Έτσι, προκύπτει για παράδειγμα:

1 so 100 \$ Room

Επιφάνεια υπ' αριθμόν 1, έχει το σχήμα σφαίρας, με κέντρο το σημείο (0, 0, 0) και ακτίνα 100 cm.

#### Σημείωση

\* Όλοι οι αριθμοί εισάγονται σε cm.

\* Είναι πολύ χρήσιμη η επιλογή «Macrobodies» στο παράθυρο «Surface Wizard», έχει πολλούς τύπους επιφανειών (box, rcc, trc, κτλ).

#### **Ορισμοί άλλων παραμέτρων (data cards)**

Σε αυτό το τμήμα του κώδικα προσδιορίζονται όλοι οι παράγοντες που είναι απαραίτητοι για την προσομοίωση και έχουν παραλειφθεί μέχρι στιγμής.

##### α) Περιγραφή υλικών (Materials)

Εδώ ορίζονται όλα τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα αντικείμενα της προσομοίωσης. Για τον ορισμό ενός υλικού χρησιμοποιείται η εντολή «m» (material). Για παράδειγμα:

```
m1 7014.60c -0.755636          $ Air
    8016.60c -0.231475 18000.59c -0.012889
```

Μετά την εντολή «m» ακολουθεί ο αριθμός - ταυτότητα του στοιχείου, δηλαδή εδώ πρόκειται για το υλικό υπ' αριθμόν 1. Στη συνέχεια, ορίζεται η σύσταση του υλικού. Το κάθε στοιχείο που περιέχεται μέσα στο υλικό κωδικοποιείται στη μορφή ZZAAA, όπου Z ο ατομικός και A ο μαζικός του αριθμός. Για παράδειγμα, το οξυγόνο που υπάρχει στον αέρα περιγράφεται ως «008016», ή ως «8016». Η συνέχεια της



εντολής «.60c» αναφέρεται στη βιβλιοθήκη από την οποία έχει ληφθεί η σύσταση του αέρα (επειδή ο αέρας υπάρχει μέσα στα προκαθορισμένα υλικά του προγράμματος). Η φυσική ισοτοπική σύσταση ενός στοιχείου δηλώνεται με περιγραφή της μορφής ZZZ000. Για παράδειγμα, για το Ge θα είναι «32000». Εκτός από τον ορισμό των στοιχείων που αποτελούν ένα υλικό, πολύ σημαντικό είναι να ορισθεί και η αναλογία τους. Όταν οι αριθμοί που ακολουθούν την ταυτότητα του στοιχείου «ZZZAAA» έχουν:

- Αρνητικό πρόσημο, τότε αναφέρονται σε ποσοστιαία αναλογία μαζών των στοιχείων. Έτσι, ο αέρας σύμφωνα με το προηγούμενο παράδειγμα, έχει σε αναλογία μαζών 76% άζωτο, 23% οξυγόνο και 1% αργό.
- Θετικό πρόσημο, τότε αναφέρονται σε ατομική αναλογία. Για παράδειγμα, ο στόχος του τριτίου (TiT), που το 61% των πυρήνων του είναι τρίτιο και το 39% είναι τιτάνιο, μπορεί να περιγραφεί ως:

```
m9 22000. 0.39324      $      TiT
    1003. 0.60676
```

## β) Περιγραφή πηγής (Source definition)

Μια πηγή ορίζεται με την εντολή «sdef» (source definition). Επειδή οι μεταβλητές, που πρέπει να καθοριστούν για την ακριβή περιγραφή της, είναι πολλές, για ευκολότερη κατανόηση, θα αναλυθεί η περιγραφή του στόχου του τριτίου ως πηγής νετρονίων, με κεντρική ενέργεια 17.5 MeV. Ο ορισμός της πηγής ξεκινά ως εξής:

```
sdef pos=-0.53015 0 0 axs=1 0 0 rad=d1 ext=d2 erg=d3 vec=1 0 0 dir=ferg=d4 par=1
```

Αρχικά, ορίζεται η θέση (pos) της πηγής να είναι στο σημείο (-0.53015, 0, 0). Στη συνέχεια, δηλώνεται ότι η ακτίνα της πηγής (rad) θα οριστεί από την κατανομή 1 (distribution 1), d1, που θα δοθεί αργότερα. Το πάχος της πηγής (ext) θα οριστεί από την κατανομή 2 και κατά τον ίδιο τρόπο, θα οριστούν και οι ενέργειες (erg) των σωματίων που εκπέμπονται από την πηγή, από την κατανομή 3. Η κατανομή που θα χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει το πάχος της πηγής (ext) θα εκτείνεται κατά μήκος του άξονα x, σύμφωνα με το «axs=1 0 0». Οι διευθύνσεις των σωματίων που θα εκπέμπονται (dir) θα είναι συναρτήσει της ενέργειας (ferg) και θα ορίζονται από την κατανομή 4. Τέλος, ο τύπος των σωματίων που θα εκπέμπονται από την πηγή θα είναι νετρόνια (par=1). Για φωτόνια είναι par=2, ενώ για ηλεκτρόνια είναι par=3.

```
c Beam spot
si1 0 0.4
```

Ακολουθεί ο ορισμός της κατανομής 1 (source information 1). Η ακτίνα της πηγής θα εκτείνεται από το 0 έως το 0.4 (σε cm).

```
c TiT thick
si2 -0.000154 0.000154
```

Από την κατανομή 2 (source information 2) ορίζεται το πάχος της πηγής. Από τη θέση που βρίσκεται το κέντρο της πηγής (pos), η πηγή εκτείνεται 0.000154 cm προς

τα αρνητικά  $x$  και 0.000154 cm προς τα θετικά  $x$ . Δηλαδή έχει πάχος 0.000308 cm. Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή των νετρονίων, δηλαδή, ποιές θα είναι οι ενέργειές τους, με ποιά γωνιακή κατανομή θα εκπέμπονται και με ποιά πιθανότητα. Οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για αυτά τα ζητήματα, υπάρχουν σε μελέτες που έχουν γίνει με θέμα την κινηματική της αντίδρασης D-T .

c Energies

si3	h	12.191	12.2	12.225	12.267	12.325	12.4	12.491	12.598
12.72	12.857	13.008	13.173	13.35	13.539	13.739	13.949		
14.167	14.392	14.622	14.857	15.093	15.329	15.563	15.793		
16.017	16.233	16.439	16.633	16.812	16.975	17.121	17.247		
17.352	17.435	17.495	17.531	17.543					

Με την εντολή «si3» καθορίζονται οι ενέργειες (erg) των νετρονίων (κατανομή 3, d3) που εκπέμπονται από την πηγή. Οι ενέργειες δίνονται σε MeV. Το γράμμα «h» σημαίνει ότι οι ενέργειες θα περιγραφούν σε μορφή ιστογράμματος. Στη συνέχεια, δίνονται κάποιοι αριθμοί που αναφέρονται στο ποσοστό που καταλαμβάνει η γωνία στην οποία εκπέμπεται το νετρόνιο, σε σχέση με τη στερεά γωνία 4π.

c Fractional solid angle for each bin

sp3	d	0	0.0020	0.0058	0.0095	0.0132	0.0167	0.0202	0.0235	0.0266
0.0295	0.0322	0.0346	0.0368	0.0387	0.0403	0.0416	0.0426	0.0432	0.0432	0.0432
0.0432	0.040	0.0432	0.0426	0.0416	0.0403	0.0387	0.0368	0.0346	0.0321	0.0294
0.0321	0.0294	0.0265	0.0234	0.0201	0.0167	0.0131	0.0094	0.0057	0.0019	

Ακολουθούν οι (κανονικοποιημένες στη μονάδα) πιθανότητες που αντιστοιχούν σε κάθε γωνία εκπομπής και σε κάθε ενέργεια νετρονίου (βλ. Παράρτημα Ζ).

c Normalized differential cross section(mb/Sr)

sb3	d	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.021	0.021
0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.024	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028
0.028	0.029	0.03	0.031	0.031	0.032	0.033	0.033	0.034	0.034	0.035
0.035	0.036	0.036	0.036	0.036						

Και τέλος, ορίζονται οι γωνίες εκπομπής σε μορφή συνημίτονου.

c Gwnia ekpompis apo 180 -> 0 degrees

ds4	a	-1	-0.996058551	-0.984545442	-0.965546939	-0.939207484	-0.905727334
-0.865361036	-0.818415488	-0.765247615	-0.706261645	-0.641906042	-0.572670096	-0.499080199	-0.421695849
-0.341105390	-0.257921542	-0.172776744	-0.086318343	0	0.087904943	0.174345226	0.259459982
0.342602091	0.423139432	0.500459689	0.573975004	0.643126448	0.707388269	0.766271892	0.819329632
0.866158094	0.906401249	0.939753130	0.965960169	0.984823114	0.996198553	1	

### γ) Importances

Προτού ξεκινήσουν να ορίζονται οι παράμετροι που έχουν αναφερθεί σε αυτήν την υποενότητα μέχρι στιγμής, με μία εντολή ορίζεται το ποιά είναι τα σωματίδια που τίθενται υπό παρακολούθηση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η εντολή αυτή είναι η εξής:

mode n

Σε αυτήν την περίπτωση επιλέγεται να παρακολουθούνται τα νετρόνια.

imp: n 1 28r 0 \$ 1, 30

Στη συνέχεια, με την εντολή «imp» ορίζονται τα κελιά, στα οποία θα επικεντρωθεί η παρακολούθηση. Στο παράδειγμα, ο συνολικός αριθμός των κελιών είναι 30, όμως, το τελευταίο κελί που παίζει το ρόλο του «κόσμου» δεν πρέπει να παρακολουθείται.

Έτσι, τίθενται σε παρακολούθηση τα κελιά από το 1ο μέχρι και τα 28 επόμενα (1 28r), δηλαδή μέχρι και το 29ο κελί.

### δ) Tally card

Εδώ ορίζονται οι πληροφορίες που επιθυμεί ο χρήστης να αποτυπωθούν στο αρχείο εξόδου. Η εντολή που χρησιμοποιείται είναι το «f» και ανάλογα με τον αριθμό που ακολουθεί, δίνεται η εντολή για τον υπολογισμό άλλου μεγέθους. Στην συγκεκριμένη εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί δύο εντολές:

- f4, για τον υπολογισμό της μέσης ροής σωματίων σε κάποιο κελί
- f8, για τον υπολογισμό της κατανομής του ύψους των παλμών που εισέρχονται σε ένα κελί.

Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων στα κελιά 25, 24, 26, 27, 28 και 29, η εντολή είναι:

f4:n 25 24 26 27 28 29 \$ Average neutron flux

Η ροή των νετρονίων παρακολουθείται παράλληλα με την ενέργειά τους. Με την εντολή:

e0 0 40i 20 \$ Energy bins for tally

ορίζονται 40 διαστήματα μεταξύ των ενεργειών 0 - 18 MeV. Έτσι, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτουν σε στήλες τη μορφής:

cell 25		
energy		
0.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.3902E-01	4.69009E-04	0.0054
[...]	[...]	[...]
1.7561E+01	1.30037E-02	0.0004
1.8000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	1.61043E-02	0.0005

όπου, στην 1η στήλη είναι οι ενέργειες των νετρονίων από 0-18 MeV και στην 2η στήλη η ροή των νετρονίων ανά νετρόνιο που εκπέμπεται από την πηγή και ανά cm<sup>2</sup>.

#### ε) Τερματισμός εκτέλεσης αρχείου

Συνήθως, στο τέλος του αρχείου εισόδου ορίζεται η χρονική διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης . Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Με καθορισμό του συνολικού αριθμού των γεγονότων που επιθυμεί ο χρήστης να παραχθούν από την πηγή. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή «nps» (n- particles), π.χ:

nps 100000000                      § The usual method for limiting how long MCNP runs.

- Με ορισμό της επιθυμητής χρονικής διάρκειας (σε min), απευθείας, με την εντολή «ctme», π.χ:

ctme 60

Το αρχείο εισόδου, για την εύρεση της ροής νετρονίων σε όλους τους στόχους κατά την διάρκεια της ακτινοβόλησης και η περιγραφή της πειραματικής διάταξης, βρίσκονται στο παράρτημα Β.

#### Visual Editor

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει Visual Editor, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης της διάταξης που προσομοιώνεται. Πολύ χρήσιμα για τη δημιουργία του σωστού κώδικα μιας προσομοίωσης είναι:

- η απεικόνιση σε τρεις διαστάσεις (3D View), που μπορεί να παρουσιάσει μεμονωμένα κάθε αντικείμενο- κελί
- ο μεταφραστής (Compiler → Save -- Update) που ελέγχει την ορθότητα του συντακτικού στο αρχείο εισόδου (Input).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### Κώδικας για την προσομοίωση της ακτινοβόλησης με MCNP5

#### Ενέργεια Δέσμης Νετρονίων 17.7 MeV

c Created on: Monday, March 20, 2017 at 16:55

c

c -----Cells-----

c

1 1 -0.001225 -1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 \$ Room  
#15 #16 #17 #18

c

c -----Flantza-----

2 2 -2.7 -2 \$ Al (cylinder 1)

3 2 -2.7 -3 4 5 -6 \$ Al (ring 4)

4 2 -2.7 -7 8 9 -5 \$ Al (ring 5)

5 2 -2.7 -10 11 12 -13 \$ Al (ring 6)

6 1 -0.001225 -14 15 62 -16 \$ Al (ring 7)

7 1 -0.001225 -17 18 19 -20 \$ Al (ring 8)

c

c -----Telos grammis-----

8 4 -8 -21 22 23 -12 \$ Stainless steel (ring 9)

c

c -----Holder-----

9 2 -2.7 -27 26 -29 28 \$ Al

c

c -----Tritium target-----

10 3 -8.9 -35 \$ Cu (cylinder 2)

11 7 -4.506 -36 \$ TiT (cylinder 3)

c

c -----Reference foils-----

12 2 -2.5373 -57 \$ Alc

13 12 -6.4047 -58 \$ Hg3

14 5 -18.012 -59 \$ Au2

15 11 -4.5010 -60 \$ TI4

16 6 -5.5926 -61 \$ Nb4

17 10 -3.4600 -63 \$ Ge1

18 2 -2.4779 -64 \$ Ala

c

c -----Outside world-----

19 0 1 \$ Outside world

c

c -----Surfaces-----

c

1 so 9 \$ Room

c

c -----Flantza-----

2 rcc -0.2 0 0 0.2 0 0 4.5 \$ Al (cylinder 1)

3 rcc -0.7 0 0 0.5 0 0 4.5 \$ Al (ring 4-outer surface)

4 rcc -0.7 0 0 0.5 0 0 1.425 \$ Al (ring 4-inner surface)

5 px -0.7 \$ auxilliary surfaces

6 px -0.2 \$ auxilliary surfaces

7 rcc -2 0 0 1.3 0 0 4.5 \$ Al (ring 5-outer surface)

8 rcc -2 0 0 1.3 0 0 2.5 \$ Al (ring 5-inner surface)

9 px -2 \$ auxilliary surfaces

10 rcc -2.7 0 0 2.7 0 0 5.7 \$ Al (ring 6-outer surface)

11 rcc -2.7 0 0 2.7 0 0 4.5 \$ Al (ring 6-inner surface)

12 px -2.7 \$ auxilliary surfaces

13 px 0 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Daxtilidi-----

14 rcc -3.88 0 0 0.68 0 0 7.6 \$ Al (ring 7-outer surface)

15 rcc -3.88 0 0 0.68 0 0 5.7 \$ Al (ring 7-inner surface)

16 px -3.2 \$ auxilliary surfaces

17 rcc -3.36 0 0 2 0 0 8.1 \$ Al (ring 8-outer surface)

18 rcc -3.36 0 0 2 0 0 7.6 \$ Al (ring 8-inner surface)

19 px -3.36 \$ auxilliary surfaces

20 px -1.36 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Telos grammis-----

21 rcc -5.7 0 0 3 0 0 5.7 \$ Stainless Steel (ring 9-outer surface)

22 rcc -5.7 0 0 3 0 0 4.985 \$ Stainless Steel (ring 9-inner surface)

23 px -5.7 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Tritium target-----

35 rcc -0.3 0 0 0.1 0 0 1.425 \$ Cu (cylinder 2)

36 rcc -0.31 0 0 0.01 0 0 1.27 \$ TiT (cylinder 3)

c

c -----Extra for cylinder 7-----

62 px -3.88 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Reference foils-----

57 rcc 1.65 0 0 0.055 0 0 1.42 \$Alc

58 rcc 1.705 0 0 0.204 0 0 1.305 \$Hg3

59 rcc 1.909 0 0 0.053 0 0 1.42 \$Au2

60 rcc 1.962 0 0 0.274 0 0 1.297 \$Ti4  
 61 rcc 2.236 0 0 0.039 0 0 1.402 \$Nb4  
 63 rcc 2.275 0 0 0.355 0 0 1.324 \$Ge1  
 64 rcc 2.63 0 0 0.055 0 0 1.434 \$Ala

c

c -----Holder-----

26 rcc 1 0 0 1.793 0 0 1.509  
 27 rcc 1 0 0 1.793 0 0 2.271  
 28 px 1  
 29 px 2.793

mode n

c -----Materials-----

c

m1	7014.	-0.755636	\$		Air
	8016.	-0.231475	18000.	-0.012889	
m2	13027.	-1	\$		Al
m3	29065.	-1	\$		Cu
m4	26056.	-0.74	\$		Stainless steel
	28000.	-0.18	24000.	-0.08	
m5	79197.	-1	\$		Au
m6	41093.	-1	\$		Nb
m7	22000.	0.39324	\$		TiT
	1003.	0.60676			
c	m8	77000.	-1	\$	Ir
c	m9	72000.	0.6	\$	Er2O3(Hf instead of
c	8016.	0.4			
m10	31000.	-0.952	\$		Ge(31Ga)
	6000.66c	-0.022	1001.62c	-0.003	8016.62c -0.023



m11 82000. -0.772 \$ Tl(82Pb)  
 17000.66c -0.134 6000.66c -0.041 1001.62c -0.005  
 8016.62c -0.048

m12 80000.42c -0.816 \$ Hg  
 16000.62c -0.131 6000.66c -0.023 1001.62c -0.003  
 8016.62c -0.027

c

c -----Importances-----

c

imp:n 1 17r 0 \$ 1, 19

c

c

c -----Source definition-----

c

sdef pos=d1 vec=1.0000 0.0000 0.0000 dir=fpos d2 erg=fpos=d453

si1 L -0.3001E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 -0.3001E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

sp1 0.8855E-04 0.2651E-03 0.4399E-03 0.6121E-03 0.7807E-03 &  
 0.9447e-03 0.1104E-02 0.1257E-02 0.1404E-02 0.1544E-02 0.1679E-02 &  
 0.1806e-02 0.1928E-02 0.2043E-02 0.2153E-02 0.2257E-02 0.2356E-02 &  
 0.2450e-02 0.2540E-02 0.2625E-02 0.2706E-02 0.2783E-02 0.2857E-02 &  
 0.2926e-02 0.2991E-02 0.3052E-02 0.3108E-02 0.3160E-02 0.3207E-02 &  
 0.3249e-02 0.3286E-02 0.3318E-02 0.3343E-02 0.3364E-02 0.3379E-02 &  
 0.3388e-02 0.3391E-02 0.3389E-02 0.3382E-02 0.3369E-02 0.3351E-02 &  
 0.3329e-02 0.3302E-02 0.3270E-02 0.3235E-02 0.3195E-02 0.3152E-02 &  
 0.3106e-02 0.3056E-02 0.3004E-02 0.2949E-02 0.2892E-02 0.2832E-02 &  
 0.2770e-02 0.2706E-02 0.2641E-02 0.2574E-02 0.2505E-02 0.2435E-02 &  
 0.2364e-02 0.2291E-02 0.2218E-02 0.2143E-02 0.2068E-02 0.1992E-02 &  
 0.1916e-02 0.1839E-02 0.1761E-02 0.1683E-02 0.1605E-02 0.1527E-02 &  
 0.1448e-02 0.1369E-02 0.1290E-02 0.1211E-02 0.1133E-02 0.1054E-02 &

0.9751e-03 0.8965E-03 0.8180E-03 0.7396E-03 0.6613E-03 0.5831E-03 &  
0.5051e-03 0.4272E-03 0.3494E-03 0.2716E-03 0.1940E-03 0.1164E-03 &  
0.3878e-04 0.8897E-04 0.2664E-03 0.4422E-03 0.6156E-03 0.7855E-03 &  
0.9513e-03 0.1112E-02 0.1268E-02 0.1417E-02 0.1561E-02 0.1699E-02 &  
0.1830e-02 0.1955E-02 0.2075E-02 0.2189E-02 0.2297E-02 0.2401E-02 &  
0.2500e-02 0.2594E-02 0.2683E-02 0.2769E-02 0.2851E-02 0.2928E-02 &  
0.3001e-02 0.3070E-02 0.3135E-02 0.3194E-02 0.3250E-02 0.3300E-02 &  
0.3345e-02 0.3384E-02 0.3418E-02 0.3446E-02 0.3469E-02 0.3485E-02 &  
0.3496e-02 0.3501E-02 0.3500E-02 0.3494E-02 0.3482E-02 0.3465E-02 &  
0.3443e-02 0.3416E-02 0.3384E-02 0.3348E-02 0.3308E-02 0.3264E-02 &  
0.3216e-02 0.3165E-02 0.3111E-02 0.3054E-02 0.2995E-02 0.2933E-02 &  
0.2868e-02 0.2802E-02 0.2734E-02 0.2664E-02 0.2592E-02 0.2519E-02 &  
0.2445e-02 0.2369E-02 0.2293E-02 0.2215E-02 0.2137E-02 0.2058E-02 &  
0.1978e-02 0.1898E-02 0.1817E-02 0.1736E-02 0.1655E-02 0.1574E-02 &  
0.1492e-02 0.1411E-02 0.1329E-02 0.1247E-02 0.1166E-02 0.1085E-02 &  
0.1003e-02 0.9222E-03 0.8413E-03 0.7605E-03 0.6799E-03 0.5995E-03 &  
0.5192e-03 0.4390E-03 0.3590E-03 0.2791E-03 0.1993E-03 0.1196E-03 &  
0.3985e-04 0.8960E-04 0.2683E-03 0.4456E-03 0.6205E-03 0.7923E-03 &  
0.9601e-03 0.1123E-02 0.1282E-02 0.1434E-02 0.1581E-02 0.1723E-02 &  
0.1858e-02 0.1988E-02 0.2112E-02 0.2230E-02 0.2344E-02 0.2452E-02 &  
0.2555e-02 0.2654E-02 0.2749E-02 0.2839E-02 0.2925E-02 0.3007E-02 &  
0.3084e-02 0.3157E-02 0.3225E-02 0.3289E-02 0.3347E-02 0.3401E-02 &  
0.3449e-02 0.3491E-02 0.3527E-02 0.3558E-02 0.3583E-02 0.3602E-02 &  
0.3614e-02 0.3621E-02 0.3621E-02 0.3616E-02 0.3605E-02 0.3588E-02 &  
0.3566e-02 0.3539E-02 0.3507E-02 0.3471E-02 0.3430E-02 0.3385E-02 &  
0.3336e-02 0.3284E-02 0.3228E-02 0.3169E-02 0.3107E-02 0.3043E-02 &  
0.2976e-02 0.2907E-02 0.2836E-02 0.2763E-02 0.2688E-02 0.2612E-02 &  
0.2534e-02 0.2456E-02 0.2376E-02 0.2295E-02 0.2213E-02 0.2131E-02 &  
0.2048e-02 0.1964E-02 0.1880E-02 0.1796E-02 0.1712E-02 0.1627E-02 &

0.1542e-02 0.1458E-02 0.1373E-02 0.1288E-02 0.1204E-02 0.1120E-02 &  
0.1036e-02 0.9516E-03 0.8680E-03 0.7845E-03 0.7012E-03 0.6182E-03 &  
0.5353e-03 0.4527E-03 0.3701E-03 0.2877E-03 0.2055E-03 0.1232E-03 &  
0.4107e-04 0.9046E-04 0.2709E-03 0.4500E-03 0.6270E-03 0.8010E-03 &  
0.9713e-03 0.1137E-02 0.1299E-02 0.1455E-02 0.1606E-02 0.1751E-02 &  
0.1891e-02 0.2025E-02 0.2154E-02 0.2277E-02 0.2396E-02 0.2509E-02 &  
0.2618e-02 0.2722E-02 0.2821E-02 0.2916E-02 0.3007E-02 0.3093E-02 &  
0.3175e-02 0.3252E-02 0.3324E-02 0.3392E-02 0.3454E-02 0.3511E-02 &  
0.3562e-02 0.3607E-02 0.3647E-02 0.3680E-02 0.3707E-02 0.3728E-02 &  
0.3742e-02 0.3750E-02 0.3752E-02 0.3748E-02 0.3738E-02 0.3722E-02 &  
0.3701e-02 0.3674E-02 0.3641E-02 0.3605E-02 0.3563E-02 0.3517E-02 &  
0.3467e-02 0.3413E-02 0.3355E-02 0.3294E-02 0.3230E-02 0.3163E-02 &  
0.3094e-02 0.3022E-02 0.2948E-02 0.2872E-02 0.2794E-02 0.2715E-02 &  
0.2634e-02 0.2551E-02 0.2468E-02 0.2384E-02 0.2298E-02 0.2212E-02 &  
0.2126e-02 0.2038E-02 0.1951E-02 0.1863E-02 0.1775E-02 0.1687E-02 &  
0.1599e-02 0.1511E-02 0.1423E-02 0.1335E-02 0.1247E-02 0.1160E-02 &  
0.1072e-02 0.9853E-03 0.8986E-03 0.8120E-03 0.7258E-03 0.6397E-03 &  
0.5539e-03 0.4683E-03 0.3829E-03 0.2977E-03 0.2125E-03 0.1275E-03 &  
0.4249e-04 0.9179E-04 0.2750E-03 0.4569E-03 0.6368E-03 0.8140E-03 &  
0.9877e-03 0.1158E-02 0.1323E-02 0.1483E-02 0.1639E-02 0.1789E-02 &  
0.1934e-02 0.2074E-02 0.2208E-02 0.2337E-02 0.2461E-02 0.2580E-02 &  
0.2695e-02 0.2805E-02 0.2910E-02 0.3010E-02 0.3106E-02 0.3198E-02 &  
0.3284e-02 0.3366E-02 0.3443E-02 0.3515E-02 0.3581E-02 0.3641E-02 &  
0.3696e-02 0.3745E-02 0.3787E-02 0.3823E-02 0.3853E-02 0.3876E-02 &  
0.3893e-02 0.3903E-02 0.3906E-02 0.3903E-02 0.3894E-02 0.3879E-02 &  
0.3858e-02 0.3831E-02 0.3799E-02 0.3761E-02 0.3719E-02 0.3671E-02 &  
0.3620e-02 0.3564E-02 0.3505E-02 0.3442E-02 0.3375E-02 0.3306E-02 &  
0.3233e-02 0.3158E-02 0.3081E-02 0.3001E-02 0.2920E-02 0.2837E-02 &  
0.2752e-02 0.2666E-02 0.2578E-02 0.2490E-02 0.2400E-02 0.2310E-02 &

0.2219e-02 0.2128E-02 0.2036E-02 0.1944E-02 0.1852E-02 0.1760E-02 &  
0.1668e-02 0.1576E-02 0.1484E-02 0.1392E-02 0.1300E-02 0.1209E-02 &  
0.1118e-02 0.1027E-02 0.9362E-03 0.8460E-03 0.7560E-03 0.6663E-03 &  
0.5769e-03 0.4877E-03 0.3988E-03 0.3100E-03 0.2213E-03 0.1327E-03 &  
0.4424e-04

ds2 s 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 &  
16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 &  
30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 &  
44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 &  
58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 &  
72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 &  
86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 &  
100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 &  
114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 &  
128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 &  
142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 &  
156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 &  
170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 &  
184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 &  
198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 &  
212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 &  
226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 &  
240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 &  
254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 &  
268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 &  
282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 &  
296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 &  
310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 &  
324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 &

338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 &  
352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 &  
366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 &  
380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 &  
394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 &  
408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 &  
422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 &  
436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 &  
450 451 452

c

c

c -----Tally-----

c

f4:n 12 13 14 15 16 17 18 \$ Average neutron flux

e0 0 1e-3 1000i 20 \$ Energy bins for tally

fc4 Neutron flux

c

c -----History cutoff-----

c

nps 100000000 \$ The usual method for limiting how long MCNP run

### Ενέργεια Δέσμης Νετρονίων 19.3 MeV

c Created on: Monday, March 20, 2017 at 16:55

c

c -----Cells-----

c

1 1 -0.001225 -1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 \$ Room  
#15 #16 #17 #18

c

c -----Flantza-----

2 2 -2.7 -2 \$ Al (cylinder 1)

3 2 -2.7 -3 4 5 -6 \$ Al (ring 4)

4 2 -2.7 -7 8 9 -5 \$ Al (ring 5)

5 2 -2.7 -10 11 12 -13 \$ Al (ring 6)

6 1 -0.001225 -14 15 62 -16 \$ Al (ring 7)

7 1 -0.001225 -17 18 19 -20 \$ Al (ring 8)

c

c -----Telos grammis-----

8 4 -8 -21 22 23 -12 \$ Stainless steel (ring 9)

c

c -----Holder-----

9 2 -2.7 -27 26 -29 28 \$ Al

c

c -----Tritium target-----

10 3 -8.9 -35 \$ Cu (cylinder 2)

11 7 -4.506 -36 \$ TiT (cylinder 3)

c

c -----Reference foils-----

12 2 -2.2293 -57 \$ Al1

13 12 -5.5070 -58 \$ Hg2

14 5 -18.083 -59 \$ Au11

15 11 -7.6991 -60 \$ Tl1

16 6 -7.6581 -61 \$ Nb11

17 10 -3.0850 -63 \$ Ge2

18 2 -2.5056 -64 \$ Al4

c

c -----Outside world-----

19 0 1 \$ Outside world

c

c -----Surfaces-----

c

1 so 9 \$ Room

c

c -----Flantza-----

2 rcc -0.2 0 0 0.2 0 0 4.5 \$ Al (cylinder 1)

3 rcc -0.7 0 0 0.5 0 0 4.5 \$ Al (ring 4-outer surface)

4 rcc -0.7 0 0 0.5 0 0 1.425 \$ Al (ring 4-inner surface)

5 px -0.7 \$ auxilliary surfaces

6 px -0.2 \$ auxilliary surfaces

7 rcc -2.0 0 1.3 0 0 4.5 \$ Al (ring 5-outer surface)

8 rcc -2.0 0 1.3 0 0 2.5 \$ Al (ring 5-inner surface)

9 px -2 \$ auxilliary surfaces

10 rcc -2.7 0 0 2.7 0 0 5.7 \$ Al (ring 6-outer surface)

11 rcc -2.7 0 0 2.7 0 0 4.5 \$ Al (ring 6-inner surface)

12 px -2.7 \$ auxilliary surfaces

13 px 0 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Daxtilidi-----

14 rcc -3.88 0 0 0.68 0 0 7.6 \$ Al (ring 7-outer surface)

15 rcc -3.88 0 0 0.68 0 0 5.7 \$ Al (ring 7-inner surface)

16 px -3.2 \$ auxilliary surfaces

17 rcc -3.36 0 0 2.0 0 8.1 \$ Al (ring 8-outer surface)

18 rcc -3.36 0 0 2.0 0 7.6 \$ Al (ring 8-inner surface)

19 px -3.36 \$ auxilliary surfaces

20 px -1.36 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Telos grammis-----

21 rcc -5.7 0 0 3 0 0 5.7 \$ Stainless Steel (ring 9-outer surface)

22 rcc -5.7 0 0 3 0 0 4.985 \$ Stainless Steel (ring 9-inner surface)

23 px -5.7 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Tritium target-----

35 rcc -0.3 0 0 0.1 0 0 1.425 \$ Cu (cylinder 2)

36 rcc -0.31 0 0 0.01 0 0 1.27 \$ TiT (cylinder 3)

c

c -----Extra for cylinder 7-----

62 px -3.88 \$ auxilliary surfaces

c

c -----Reference foils-----

57 rcc 1.7 0 0 0.055 0 0 1.309 \$Al1

58 rcc 1.755 0 0 0.274 0 0 1.303 \$Hg2

59 rcc 2.029 0 0 0.026 0 0 1.33 \$Au11

60 rcc 2.055 0 0 0.126 0 0 1.284 \$Ti1

61 rcc 2.181 0 0 0.028 0 0 1.402 \$Nb11

63 rcc 2.209 0 0 0.334 0 0 1.309 \$Ge2

64 rcc 2.543 0 0 0.054 0 0 1.393 \$Al4

c

c -----Holder-----

26 rcc 1 0 0 1.793 0 0 1.509

27 rcc 1 0 0 1.793 0 0 2.271

28 px 1

29 px 2.793

mode n



c -----Materials-----

c

m1	7014.	-0.755636	\$	Air		
	8016.	-0.231475	18000.	-0.012889		
m2	13027.	-1	\$	Al		
m3	29065.	-1	\$	Cu		
m4	26056.	-0.74	\$	Stainless steel		
	28000.	-0.18	24000.	-0.08		
m5	79197.	-1	\$	Au		
m6	41093.	-1	\$	Nb		
m7	22000.	0.39324	\$	TiT		
	1003.	0.60676				
c m8	77000.	-1	\$	Ir		
c m9	72000.	0.6	\$	Er2O3(Hf instead of		
c	8016.	0.4				
m10	31000.	-0.9521	\$	Ge(31Ga)		
	6000.66c	-0.0212	1001.62c	-0.0029	8016.62c	-0.0238
m11	82000.	-0.805	\$	Tl(82Pb)		
	17000.66c	-0.140	6000.66c	-0.024	1001.62c	-0.003
	8016.62c	-0.028				
m12	80000.42c	-0.816	\$	Hg		
	16000.62c	-0.131	6000.66c	-0.023	1001.62c	-0.003
	8016.62c	-0.027				

c

c -----Importances-----

c

imp:n      1 17r      0 \$ 1, 19

c

c

c -----Source definition-----

c

sdef pos=d1 vec=1.0000 0.0000 0.0000 dir=fpos d2 erg=fpos=d453

si1 L -0.3001E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 -0.3001E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

sp1 0.1207E-03 0.3608E-03 0.5969E-03 0.8267E-03 0.1048E-02 &

0.1258e-02 0.1457E-02 0.1643E-02 0.1814E-02 0.1972E-02 0.2116E-02 &

0.2246e-02 0.2364E-02 0.2471E-02 0.2566E-02 0.2653E-02 0.2732E-02 &

0.2803e-02 0.2869E-02 0.2930E-02 0.2986E-02 0.3038E-02 0.3087E-02 &

0.3132e-02 0.3173E-02 0.3211E-02 0.3245E-02 0.3275E-02 0.3300E-02 &

0.3321e-02 0.3337E-02 0.3347E-02 0.3353E-02 0.3354E-02 0.3349E-02 &

0.3340e-02 0.3326E-02 0.3308E-02 0.3286E-02 0.3260E-02 0.3231E-02 &

0.3199e-02 0.3165E-02 0.3128E-02 0.3090E-02 0.3050E-02 0.3008E-02 &

0.2965e-02 0.2921E-02 0.2876E-02 0.2830E-02 0.2783E-02 0.2735E-02 &

0.2686e-02 0.2635E-02 0.2584E-02 0.2531E-02 0.2476E-02 0.2421E-02 &

0.2364e-02 0.2305E-02 0.2244E-02 0.2182E-02 0.2119E-02 0.2053E-02 &

0.1986e-02 0.1918E-02 0.1847E-02 0.1776E-02 0.1702E-02 0.1628E-02 &

0.1552e-02 0.1475E-02 0.1396E-02 0.1317E-02 0.1236E-02 0.1155E-02 &

0.1072e-02 0.9892E-03 0.9053E-03 0.8209E-03 0.7359E-03 0.6504E-03 &

0.5645e-03 0.4782E-03 0.3917E-03 0.3049E-03 0.2179E-03 0.1308E-03 &

0.4361e-04 0.1192E-03 0.3564E-03 0.5899E-03 0.8172E-03 0.1036E-02 &

0.1245e-02 0.1443E-02 0.1628E-02 0.1800E-02 0.1958E-02 0.2103E-02 &

0.2236e-02 0.2356E-02 0.2465E-02 0.2563E-02 0.2653E-02 0.2735E-02 &

0.2810e-02 0.2879E-02 0.2943E-02 0.3003E-02 0.3059E-02 0.3110E-02 &

0.3159e-02 0.3203E-02 0.3244E-02 0.3281E-02 0.3313E-02 0.3341E-02 &

0.3364e-02 0.3383E-02 0.3396E-02 0.3403E-02 0.3406E-02 0.3403E-02 &

0.3396e-02 0.3384E-02 0.3367E-02 0.3346E-02 0.3321E-02 0.3292E-02 &

0.3261e-02 0.3226E-02 0.3189E-02 0.3150E-02 0.3109E-02 0.3067E-02 &

0.3023e-02 0.2977E-02 0.2930E-02 0.2883E-02 0.2833E-02 0.2783E-02 &

0.2731e-02 0.2679E-02 0.2625E-02 0.2569E-02 0.2513E-02 0.2454E-02 &

0.2395e-02 0.2334E-02 0.2271E-02 0.2207E-02 0.2141E-02 0.2073E-02 &  
0.2004e-02 0.1934E-02 0.1862E-02 0.1789E-02 0.1714E-02 0.1638E-02 &  
0.1561e-02 0.1482E-02 0.1403E-02 0.1323E-02 0.1241E-02 0.1159E-02 &  
0.1076e-02 0.9922E-03 0.9078E-03 0.8229E-03 0.7376E-03 0.6517E-03 &  
0.5656e-03 0.4791E-03 0.3923E-03 0.3053E-03 0.2182E-03 0.1310E-03 &  
0.4367e-04 0.1178E-03 0.3521E-03 0.5828E-03 0.8077E-03 0.1025E-02 &  
0.1232e-02 0.1429E-02 0.1613E-02 0.1785E-02 0.1945E-02 0.2091E-02 &  
0.2225e-02 0.2347E-02 0.2459E-02 0.2561E-02 0.2654E-02 0.2739E-02 &  
0.2817e-02 0.2890E-02 0.2958E-02 0.3021E-02 0.3080E-02 0.3135E-02 &  
0.3186e-02 0.3234E-02 0.3277E-02 0.3317E-02 0.3352E-02 0.3383E-02 &  
0.3409e-02 0.3429E-02 0.3445E-02 0.3455E-02 0.3459E-02 0.3459E-02 &  
0.3453e-02 0.3442E-02 0.3426E-02 0.3406E-02 0.3382E-02 0.3354E-02 &  
0.3323e-02 0.3289E-02 0.3252E-02 0.3212E-02 0.3171E-02 0.3127E-02 &  
0.3081e-02 0.3034E-02 0.2986E-02 0.2936E-02 0.2885E-02 0.2832E-02 &  
0.2778e-02 0.2723E-02 0.2667E-02 0.2609E-02 0.2550E-02 0.2489E-02 &  
0.2427e-02 0.2363E-02 0.2298E-02 0.2232E-02 0.2164E-02 0.2094E-02 &  
0.2024e-02 0.1951E-02 0.1878E-02 0.1803E-02 0.1726E-02 0.1649E-02 &  
0.1570e-02 0.1491E-02 0.1410E-02 0.1329E-02 0.1247E-02 0.1164E-02 &  
0.1080e-02 0.9955E-03 0.9106E-03 0.8253E-03 0.7395E-03 0.6533E-03 &  
0.5668e-03 0.4800E-03 0.3931E-03 0.3059E-03 0.2186E-03 0.1312E-03 &  
0.4374e-04 0.1163E-03 0.3478E-03 0.5758E-03 0.7983E-03 0.1013E-02 &  
0.1219e-02 0.1415E-02 0.1599E-02 0.1771E-02 0.1931E-02 0.2079E-02 &  
0.2215e-02 0.2339E-02 0.2453E-02 0.2558E-02 0.2654E-02 0.2743E-02 &  
0.2825e-02 0.2901E-02 0.2972E-02 0.3039E-02 0.3101E-02 0.3160E-02 &  
0.3215e-02 0.3265E-02 0.3312E-02 0.3355E-02 0.3393E-02 0.3426E-02 &  
0.3454e-02 0.3478E-02 0.3495E-02 0.3507E-02 0.3514E-02 0.3515E-02 &  
0.3511e-02 0.3502E-02 0.3488E-02 0.3469E-02 0.3446E-02 0.3418E-02 &  
0.3388e-02 0.3353E-02 0.3316E-02 0.3276E-02 0.3233E-02 0.3189E-02 &  
0.3142e-02 0.3094E-02 0.3043E-02 0.2992E-02 0.2938E-02 0.2884E-02 &

0.2828e-02 0.2770E-02 0.2711E-02 0.2651E-02 0.2589E-02 0.2526E-02 &  
0.2461e-02 0.2395E-02 0.2328E-02 0.2259E-02 0.2189E-02 0.2117E-02 &  
0.2044e-02 0.1970E-02 0.1895E-02 0.1818E-02 0.1740E-02 0.1661E-02 &  
0.1581e-02 0.1501E-02 0.1419E-02 0.1336E-02 0.1253E-02 0.1169E-02 &  
0.1085e-02 0.9997E-03 0.9142E-03 0.8283E-03 0.7420E-03 0.6554E-03 &  
0.5685e-03 0.4814E-03 0.3941E-03 0.3067E-03 0.2192E-03 0.1315E-03 &  
0.4385e-04 0.1151E-03 0.3441E-03 0.5699E-03 0.7905E-03 0.1004E-02 &  
0.1209e-02 0.1404E-02 0.1588E-02 0.1761E-02 0.1922E-02 0.2071E-02 &  
0.2209e-02 0.2336E-02 0.2453E-02 0.2561E-02 0.2661E-02 0.2753E-02 &  
0.2839e-02 0.2918E-02 0.2993E-02 0.3063E-02 0.3129E-02 0.3191E-02 &  
0.3249e-02 0.3304E-02 0.3353E-02 0.3399E-02 0.3440E-02 0.3476E-02 &  
0.3507e-02 0.3533E-02 0.3553E-02 0.3567E-02 0.3576E-02 0.3579E-02 &  
0.3577e-02 0.3569E-02 0.3556E-02 0.3539E-02 0.3516E-02 0.3490E-02 &  
0.3459e-02 0.3425E-02 0.3387E-02 0.3347E-02 0.3303E-02 0.3257E-02 &  
0.3209e-02 0.3159E-02 0.3107E-02 0.3054E-02 0.2998E-02 0.2941E-02 &  
0.2883e-02 0.2823E-02 0.2761E-02 0.2698E-02 0.2634E-02 0.2568E-02 &  
0.2501e-02 0.2433E-02 0.2363E-02 0.2291E-02 0.2219E-02 0.2145E-02 &  
0.2070e-02 0.1993E-02 0.1916E-02 0.1837E-02 0.1758E-02 0.1677E-02 &  
0.1596e-02 0.1513E-02 0.1430E-02 0.1347E-02 0.1262E-02 0.1177E-02 &  
0.1092e-02 0.1006E-02 0.9196E-03 0.8329E-03 0.7460E-03 0.6588E-03 &  
0.5713e-03 0.4837E-03 0.3960E-03 0.3081E-03 0.2201E-03 0.1321E-03 &  
0.4404e-04

ds2 s 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 &  
16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 &  
30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 &  
44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 &  
58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 &  
72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 &  
86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 &

100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 &  
114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 &  
128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 &  
142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 &  
156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 &  
170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 &  
184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 &  
198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 &  
212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 &  
226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 &  
240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 &  
254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 &  
268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 &  
282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 &  
296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 &  
310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 &  
324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 &  
338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 &  
352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 &  
366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 &  
380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 &  
394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 &  
408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 &  
422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 &  
436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 &  
450 451 452

c

c

c -----Tally-----

c

f4:n 12 13 14 15 16 17 18 \$ Average neutron flux

e0 0 1e-3 1000i 20 \$ Energy bins for tally

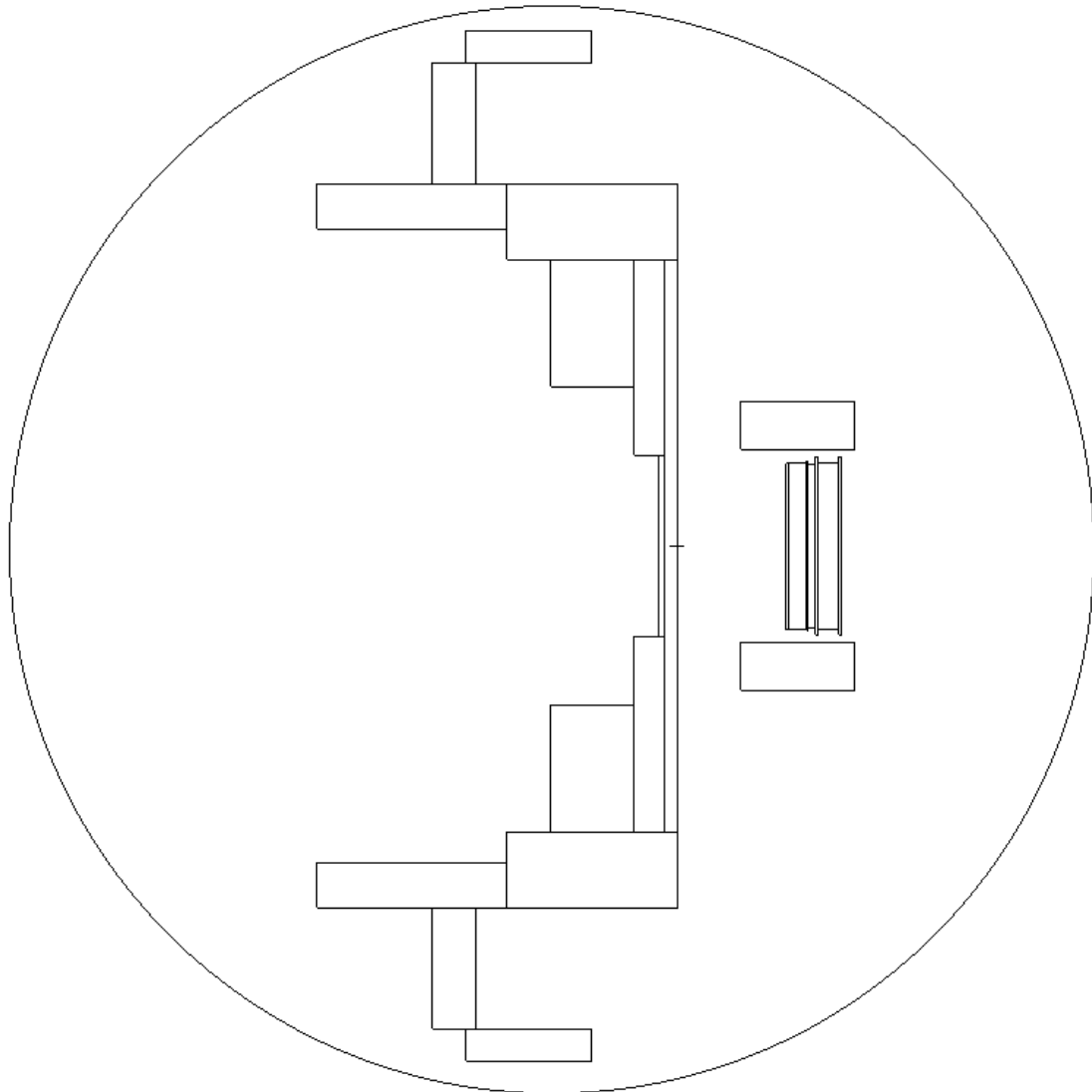
fc4 Neutron flux

c

c -----History cutoff-----

c

nps 100000000 \$ The usual method for limiting how long MCNP run



Σχήμα Β1: Γεωμετρία Πειραματικής Διάταξης Ακτινοβόλησης από τον Visual Editor του προγράμματος MCNP5



## Βιβλιογραφία

- «Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική», Π. Α. ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΥ
- Nuclear Data Tables 11, H. Liskien and A. Paulsen, “Neutron production cross sections and energies for the  $T(p,n)^3\text{He}$ ,  $D(d,n)^3\text{He}$ , and  $T(d,n)^4\text{He}$  reactions (1973)
- Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π (2011), Α. Καλαμαρά
- Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π (2013), Α. Καλαμαρά
- R. Vlastou et al., Nucl. Instr. and Methods in Phys. Research B 269 (2011)
- Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)
- A.Galonsky et al., Jour. Physical Review, Vol.104, p.421 (1956).
- Evaluated Nuclear Data File (ENDF)
- MCNP prmr, “An MCNP primer”, J. K. Shultis, R. E. Faw
- MCNP5 Manual VOLUME II
- [www.nndc.bnl.gov](http://www.nndc.bnl.gov)
- [nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/](http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/)
- G. Perdikakis et al., Phys. Rev. C 73, 067601 (2006).
- A. P. Tonchev et al., Phys. Rev. C 77, 054610 (2008).
- C. Sage et al., Phys. Rev. C 81, 064604 (2010).
- Neutron Sources for Basic Physics and Applications , S. Cierjacks