



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Πειραματική & Θεωρητική μελέτη αντιδράσεων
νετρονίων σε ισότοπα του Hf**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζωή Μπάρη

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Ρ. Βλαστού-Ζάννη

Τριμελής Επιτροπή

Ρ. Βλαστού-Ζάννη

Μ. Κόκκορης

Μ. Διακάκη

Αθήνα, 2023

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή αποτέλεσε το μεγαλύτερο και σημαντικότερο μέρος των μεταπτυχιακών μου σπουδών, η οποία έλαβε ακόμα μεγαλύτερη αξία για εμένα λόγω των ανθρώπων που με πλαισίωσαν. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Ρόζα Ζαννη-Βλαστού για την συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον Μιχάλη Κόκκορη για την αμέριστη εμπιστοσύνη και την αδιάκοπη βοήθεια σε ότι κι αν προέκυπτε. Επιπλέον, ευχαριστώ την Μαίρη Διακάκη που ήταν πρόθυμη ανά πάσα στιγμή να βοηθήσει. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον διδακτορικό φοιτητή Σωτήρη Χασάπογλου για την πολύτιμη βοήθειά του. Αν και τελευταίοι αλλά εξίσου σημαντικοί, ευχαριστώ όλα τα μέλη της Ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π., ιδιαιτέρως τους Λάμπρο Αμανατίδη και Άννα Σκουλουδάκη με τους οποίους μοιραστήκαμε την εμπειρία του πειράματος και την έκαναν ακόμα πιο διασκεδαστική.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πειραματικά και θεωρητικά οι αντιδράσεις $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ χρησιμοποιώντας την αναλυτική τεχνική της νετρονικής ενεργοποίησης. Οι ενέργειες των νετρονίων για τις οποίες μελετήθηκαν οι αναφερόμενες αντιδράσεις ήταν 15.8 MeV and 17.7 MeV, οι οποίες παράχθηκαν μέσω της αντίδρασης $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ στον επιταχυντή 5.5 MeV Tandem Van de Graaf του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος». Λεπτοί στόχοι φυσικού Hf χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και στόχοι αναφοράς Al και Au τοποθετήθηκαν μπροστά και πίσω από τους στόχους του Hf για τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων. Οι ακτινοβολήσεις ήταν συνεχόμενες και διάρκησαν ~7-9 ώρες, όπου η συνολική ροή των νετρονίων ήταν της τάξης των 10^{10} - 10^{11} n/cm². Χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής νετρονίων BF₃ κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης, για την παρακολούθηση των διακυμάνσεων της δέσμης. Μετά το τέλος των δύο ακτινοβολήσεων τα ενεργοποιημένα δείγματα αναφοράς και του Hf μετρήθηκαν σε δύο ανιχνευτές σχετικής απόδοσης 80 % και σε έναν σχετικής απόδοσης 50%. Η απόλυτη απόδοση των ανιχνευτών υπολογίστηκε με τη χρήση πηγής ^{152}Eu , η οποία τοποθετήθηκε στην ίδια απόσταση από το παράθυρο του ανιχνευτή όπως και τα δείγματα.

Η αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ διορθώθηκε λόγω της συνεισφοράς της $^{177}\text{Hf}(n,3n)^{175}\text{Hf}$ για ενέργεια $E_n = 17.7$ MeV. Ένας στόχος Cd τοποθετήθηκε στη διάταξη των στόχων της ακτινοβολήσης των $E_n = 15.8$ MeV ώστε να μελετηθεί η ιδιότητα του να απορροφά θερμικά νετρόνια και η ύπαρξη των χαμηλοενεργειακών παρασιτικών νετρονίων.

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί των προαναφερθέντων αντιδράσεων μελετήθηκαν με τη χρήση του κώδικα EMPIRE 3.2.3 και συγκρίθηκαν με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα. Η επίδραση των διαφορετικών συνδυασμών οπτικών δυναμικών και πυκνοτήτων ενεργειακών καταστάσεων μελετήθηκαν με λεπτομέρεια. Επιπλέον, μελετήθηκε η σημαντικότητα του φαινομένου της προϊσορροπίας στις προς μελέτη αντιδράσεις. Τέλος, ορισμένες επιπλέον εντολές που παρέχει ο κώδικας αυτός μελετήθηκαν ώστε να διερευνηθεί η επίδραση που είχαν στους τελικούς υπολογισμούς.

Abstract

Experimental cross section measurements were carried out for the reactions $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ and $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ using the activation technique. The neutron beam at energies 15.8 MeV and 17.7 MeV was produced via the $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ reaction at the 5.5 MeV Tandem Van de Graaf accelerator laboratory of NCSR “Demokritos”. Thin foils of natural Hf were used, while reference foils of Al and Au were positioned at the front and back of the Hf target for the determination of the neutron flux at the target position. The irradiations were continuous for ~7-9 hours, leading to a total neutron fluence of 10^{10} - 10^{11} n/cm² and a BF₃ detector was used for monitoring the neutron flux during the irradiations. After the end of each irradiation, the activity of the Hf target and the reference foils was measured off-line by two 80 % and a 50% relative efficiency of the HPGe detectors. The absolute efficiency of the detectors was obtained using a calibrated ^{152}Eu source, placed at the same distance as at the sample.

The $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ reaction has been corrected for the contribution of the $^{177}\text{Hf}(n,3n)^{175}\text{Hf}$ in the case of 17.7 MeV. A Cd target was employed in the irradiation with 15.8 MeV neutrons to study the contribution of parasitic low energy neutrons, which accompany the main neutron beam.

The theoretical calculations of the $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ and $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ cross sections have also been performed using the nuclear statistical code EMPIRE 3.2.3 and they have been compared with the data. The impact of the different Optical Model Potentials and nuclear Level Densities, which are input available as options in the code, was investigated in detail such as the importance of pre-equilibrium emission and relative contributions obtained with the different pre-equilibrium models. Finally, some of the keywords provided by the EMPIRE code were investigated.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	5
Abstract	7
Περιεχόμενα	9
Κεφάλαιο 1	12
1.1 Σκοπός	12
1.2 Μέθοδος Νετρονικής Ενεργοποίησης	12
1.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου της νετρονικής ενεργοποίησης για τη μέτρηση ενεργών διατομών	14
1.3 Χάφνιο (Hf)	15
1.4 Τρέχουσα κατάσταση πειραματικών δεδομένων	15
1.5 Ενεργειακά Διαγράμματα	17
1.5.1 Διαθέσιμη ενέργεια (Q-value)	17
1.5.2 Ενεργειακό διάγραμμα αντίδρασης	18
1.5.2.1 Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$	18
1.5.2.2 Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$	21
1.5.2.3 Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$	24
Κεφάλαιο 2	27
2.1 Επιταχυντής	27
2.1.1 Αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων	29
2.2 Ανιχνευτής νετρονίων	30
2.3 Ολοκληρωτής ρεύματος (Current Integrator)	31
2.4 Χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης του πειράματος	32
2.5 Περιγραφή και τοποθέτηση των στόχων	33
2.6 Ανιχνευτές ακτίνων-γ	35
2.6.1 Ηλεκτρονικά	36
2.6.2 Βασικότερα χαρακτηριστικά ανιχνευτών	37
2.6.3 Μέτρηση ακτινοβολημένων στόχων	37
Κεφάλαιο 3	42
3.1 Ενεργός διατομή αντιδράσεων	42
3.2 Προσδιορισμός του όρου N_t	42
3.3 Προσδιορισμός του όρου N_p	43

3.3.1 Απόδοση ανιχνευτών HPGe.....	43
3.3.2 Διορθωτικός παράγοντας F	47
3.3.3 Διορθωτικός παράγοντας D.....	47
3.3.4 Διορθωτικός παράγοντας f_c	48
3.4 Προσδιορισμός της ροής των νετρονίων Φ	48
3.4.1 Προσδιορισμός της ροής των νετρονίων στα $E_n=15.8 MeV$	49
3.4.2 Προσδιορισμός της ροής των νετρονίων στα $E_n=18.0 MeV$	51
3.4.3 Προσδιορισμός της πειραματικής ροής	55
3.5 Προσδιορισμός ενεργών διατομών αντιδράσεων.....	56
3.5.1 Ενεργός διατομή αντίδρασης $^{174}Hf(n,2n) ^{173}Hf$	56
3.5.2 Ενεργός διατομή αντίδρασης $^{176}Hf(n,2n)^{175}Hf$	60
3.5.2.1 Ενεργός διατομή για ενέργεια νετρονίων $15.8 MeV$	60
3.5.2.2 Ενεργός διατομή για ενέργεια νετρονίων $18.0 MeV$	60
3.5.3 Πειραματική διερεύνηση της χρήσης του στόχου Cd.....	63
3.5.4 Ενεργός διατομή αντίδρασης $^{180}Hf(n,n'\gamma) ^{180m}Hf$	67
Κεφάλαιο 4	70
4.1 Θεωρητικά πρότυπα μηχανισμών αλληλεπίδρασης	70
4.1.1 Μηχανισμός άμεσης αντίδρασης	70
4.1.2 Μηχανισμός σύνθετου πυρήνα.....	71
4.1.3 Μηχανισμός πρώιμης αποδιέγερσης του σύνθετου πυρήνα.....	71
4.2 Πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων.....	72
4.3 Ο κώδικας EMPIRE.....	72
4.4 Θεωρητικοί υπολογισμοί αντιδράσεων $^{174}Hf(n,2n) ^{173}Hf, ^{176}Hf(n,2n)^{175}Hf$ και $^{180}Hf(n,n'\gamma) ^{180m}Hf$	75
4.4.1 Οπτικά Δυναμικά και Πυκνότητα Καταστάσεων	75
4.4.2 Μελέτη κατάλληλου συνδυασμού προτύπων οπτικού δυναμικού και πυκνότητας καταστάσεων για τις αντιδράσεις $^{174}Hf(n,2n) ^{173}Hf$ και $^{176}Hf(n,2n) ^{175}Hf$	81
4.4.3 Διερεύνηση της επίδρασης των μηχανισμών προϊσορροπίας στους υπολογισμούς....	83
4.4.4 Προσπάθειες τροποποίησης της θεωρητικής καμπύλης της $^{176}Hf(n,2n) ^{175}Hf$ με χρήση του κώδικα EMPIRE.....	85
4.4.4.1 Το Βελτιωμένο Πρότυπο του Γενικευμένου Υπερρευστού (EGSM).....	85
4.4.4.2 Αλλαγές στην ενέργεια που αρχίζει η περιοχή BCS.....	86
4.4.4.3 Αλλαγές στην παράμετρο πυκνότητας καταστάσεων α	88
4.4.4.4 Συνδυασμός των εντολών ATILNO και LDSHIF	91
4.4.4.5 Θεωρητική μελέτη της αντίδρασης $^{180}Hf(n,n'\gamma) ^{180m}Hf$	92

4.5 Προσαρμογή των διακριτών ενεργειακών σταθμών.....	94
Κεφάλαιο 5	99
Βιβλιογραφία	102

Κεφάλαιο 1

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του στοιχείου του Χαφνίου (Hf), που αφορά τη μελέτη της παρούσας εργασίας, τα συγκεκριμένα ισότοπα και οι αντιδράσεις που θα μελετηθούν καθώς και η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης μέσω της οποίας θα μελετηθούν αυτές οι αντιδράσεις.

1.1 Σκοπός

Η μελέτη των αντιδράσεων νετρονίων έχει ιδιαίτερη σημασία για την έρευνα της Πυρηνικής Φυσικής και της Αστροφυσικής καθώς ενισχύει την κατανόηση των μηχανισμών αντίδρασης των πυρήνων και προσφέρει έναν έλεγχο αξιοπιστίας των ήδη υπαρχόντων θεωρητικών μοντέλων. Για την ενίσχυση αυτής της μελέτης σημαντικός είναι ο προσδιορισμός της ενεργού διατομής μιας αντίδρασης, δηλαδή της πιθανότητας να αλληλεπιδράσει ένα σωματίδιο με ένα πυρήνα, τόσο στις εφαρμογές των αντιδράσεων που προκαλούνται από νετρόνια όσο και για την κατανόηση των φυσικών παραμέτρων που τις επηρεάζουν.

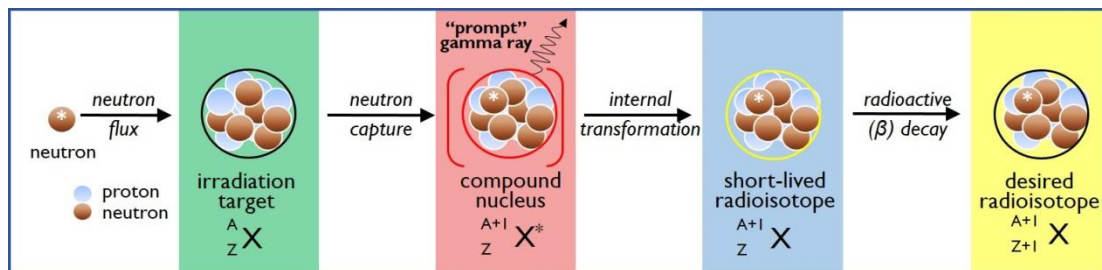
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα μελετηθεί η ενεργός διατομή διαφόρων αντιδράσεων νετρονίων ισότοπων του Hf (Χαφνίου). Ιδιαίτερης σπουδαιότητας κρίνεται η μελέτη του Hf διότι οι αντιδράσεις νετρονίων με τα διάφορα ισότοπα του βρίσκει ποικίλες εφαρμογές στην πυρηνική τεχνολογία, τη βιομηχανία και την ιατρική. Το Hf αποτελεί υποψήφιο στοιχείο για την κατασκευή ράβδων ελέγχου σε πυρηνικούς αντιδραστήρες αφού οι πυρήνες διαφόρων ισότοπων του παρουσιάζουν μεγάλη ενεργό διατομή στα θερμικά νετρόνια και ταυτόχρονα παρουσιάζουν άριστες μηχανικές ιδιότητες καθώς και αντοχή στη διάβρωση. Το Hf ήδη χρησιμοποιείται σε πυρηνικά υποβρύχια για την κατασκευή ράβδων ελέγχου των πυρηνικών αντιδραστήρων μέσω των οποίων αντλούν ενέργεια ώστε να λειτουργήσουν. Επιπλέον, ισότοπα του Hf έχουν παρατηρηθεί ως παρασιτικά προϊόντα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες κατά τη μεταστοιχείωση του W (Βολφραμίου) και του Ta (Τανταλίου). Αυτά τα παρασιτικά προϊόντα μπορεί να βρίσκονται σε βραχύβιες ισομερείς στάθμες που μπορεί να εκπέμπουν ακτίνες- γ που είναι επιβλαβείς και συνεπώς για λόγους ακτινοπροστασίας η μελέτη τους καθίσταται αναγκαία. [1]

Λόγω όσων αναφέρθηκαν δημιουργείται η ανάγκη για τον ακριβή προσδιορισμό των ενεργών διατομών των νετρονικών αντιδράσεων των ισότοπων του Hf. Στην παρούσα εργασία, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε πειραματική και θεωρητική μελέτη, με τη χρήση του κώδικα EMPIRE 3.2.3 (Malta), των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$.

1.2 Μέθοδος Νετρονικής Ενεργοποίησης

Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση (Neutron Activation Analysis, N.A.A.) αποτελεί μια πυρηνική αναλυτική τεχνική η οποία βασίζεται στη μέτρηση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας- γ που εκπέμπεται από το δείγμα που ακτινοβολήθηκε με νετρόνια επιτρέποντας έτσι την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των στοιχείων του δείγματος καθώς και τον προσδιορισμό της ενεργού διατομής άγνωστων αντιδράσεων.

Η διαδικασία που ακολουθείται στην ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση απαιτεί την χρήση κάποιας πηγής νετρονίων, όπως γεννήτρια νετρονίων, πυρηνικό αντιδραστήρα, επιταχυντή ή ισότοπα υπερουράνιων στοιχείων, η οποία εκπέμπει νετρόνια στους πυρήνες-στόχους και αυτοί με τη σειρά τους τα συλλαμβάνουν. Κατά την αλληλεπίδραση, λοιπόν, των νετρονίων με τους πυρήνες-στόχους δημιουργείται ένας σύνθετος πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση ο οποίος υποβάλλεται σε μια διαδικασία που καλείται εσωτερική μετατροπή (Internal Transformation, I.T.) και παράγεται το τελικό προϊόν της αντίδρασης. Ο παραγόμενος πυρήνας εκπέμπει χαρακτηριστικές ακτίνες-γ οι οποίες είναι δυνατό να ανιχνευτούν μετά το τέλος της ακτινοβόλησης του στόχου με τη βοήθεια ανιχνευτών ημιαγωγών και να προσδιοριστεί το πλήθος των πυρήνων που παράχθηκαν από την πυρηνική αντίδραση που είναι επιθυμητή η μελέτη της.

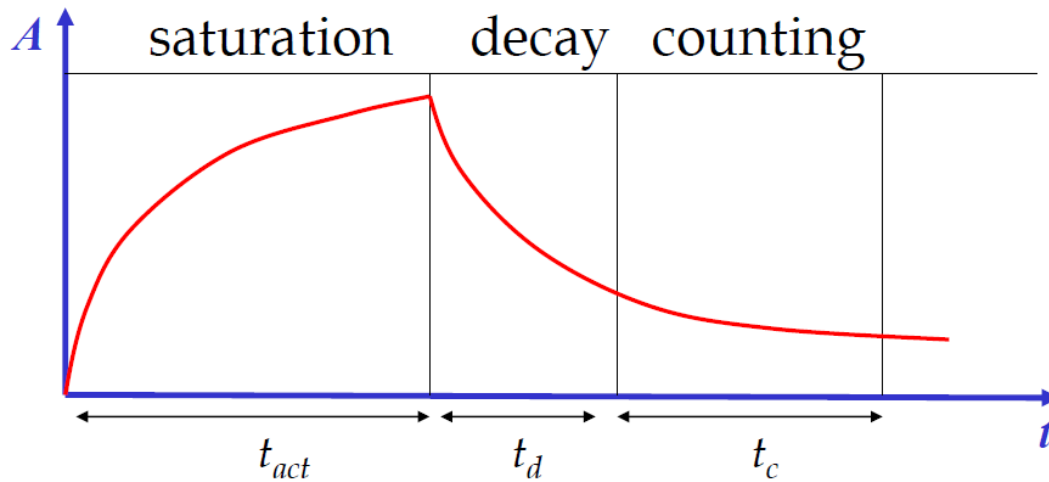


Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της μεθόδου της νετρονικής ενεργοποίησης

Ιδιαίτερως χρήσιμη είναι η εφαρμογή της μεθόδου αυτής για τον προσδιορισμό των ενεργών διατομών αντιδράσεων νετρονίων, η οποία λαμβάνει χώρα και στην παρούσα εργασία. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού μαζί με τα δείγματα προς μελέτη τοποθετούνται στόχοι αναφοράς παρόμοιων διαστάσεων και από υλικά στα οποία θα πραγματοποιηθούν αντιδράσεις για τις οποίες είναι γνωστές με ακρίβεια οι ενεργές διατομές τους. Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι οι στόχοι αναφοράς και οι στόχοι προς μελέτη τοποθετούνται σε αλληλουχία με τους δεύτερους να είναι τοποθετημένοι ανάμεσα στους στόχους αναφοράς και όσο το δυνατόν πιο κοντά μεταξύ τους ώστε να δέχονται όλοι την ίδια ροή νετρονίων, καθιστώντας δυνατό να προσδιοριστεί η ενεργός διατομή των άγνωστων αντιδράσεων.

Βασικές προϋποθέσεις για την εφαρμογή της μεθόδου είναι να επιλεγθούν προσεκτικά οι αντιδράσεις που μελετώνται έτσι ώστε οι πυρήνες που παράγονται από αυτές να είναι ραδιενεργοί και ο χρόνος ημιζωής τους να μην είναι πολύ μεγάλος ή πολύ μικρός ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση των ακτίνων-γ μετά το τέλος της ακτινοβόλησης. Σημαντικός είναι, επίσης, ο χρόνος ακτινοβόλησης του δείγματος ο οποίος καθορίζεται από το χρόνο ημιζωής των ισότοπων που μελετώνται κάθε φορά, αφού απαιτείται χρόνος ακτινοβόλησης ίσος τουλάχιστον με το τριπλάσιο του χρόνου ημιζωής του ισότοπου που παράγεται για να πλησιάσει την ενεργότητα κόρου.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2 που ακολουθεί ο πυρήνας ακτινοβολείται για ορισμένο χρόνο (χρόνος ακτινοβόλησης, t_{ac}) έως ότου ο παραγόμενος πυρήνας φτάσει στην ενεργότητα κόρου, όταν πια δηλαδή η δημιουργία των πυρήνων είναι ίση με την διάσπασή τους. Αφού ένας πυρήνας φτάσει σε κόρο σταματάει η ακτινοβόλησή του και μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι στόχοι μεταφέρονται και τοποθετούνται για να μετρηθούν σε κάποιο ανιχνευτή. Αυτό το χρονικό διάστημα αμτιστοιχεί στο t_d του διαγράμματος που ακολουθεί. Τέλος, επέρχεται η μέτρηση του στόχου για χρόνο t_c .



Εικόνα 1.2: Μεταβολή ενεργότητας συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός πειράματος νετρονικής ενεργοποίησης

Το κύριο πλεονέκτημα της ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση είναι ότι αποτελεί μη καταστροφική μέθοδο για το δείγμα και δεν απαιτεί προετοιμασία πριν την ακτινοβολήση ή τη μέτρησή του ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο την πιθανότητα επιμόλυνσης του δείγματος κατά την προετοιμασία του. Από την άλλη περιορισμός της μεθόδου είναι ότι είναι χρονοβόρα και ότι τα τελικά αποτελέσματα και συμπεράσματα λαμβάνονται μετά το τέλος της ακτινοβολήσης και της μέτρησης. Τέλος, ορισμένοι πυρήνες είναι αδύνατο να ανιχνευτούν λόγω των πολύ μικρών ή πολύ μεγάλων χρόνων ημιζωής ή των μικρών ενεργών διατομών των αντιδράσεων μέσω των οποίων παράγονται.

1.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου της νετρονικής ενεργοποίησης για τη μέτρηση ενεργών διατομών

Η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης, όπως ήδη αναφέρθηκε, εφαρμόζεται για τον υπολογισμό ενεργών διατομών αντιδράσεων νετρονίων. Η ενεργός διατομή μιας αντίδρασης δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = \frac{N_p}{N_\tau} \cdot \frac{1}{\Phi} \quad (1.1)$$

όπου N_p : το πλήθος των πυρήνων που παράχθηκαν στον πυρήνα στόχο κατά την ακτινοβολήση, N_τ : το πλήθος των πυρήνων ενός συγκεκριμένου ισοτόπου του στόχου που ακτινοβολήθηκε και Φ : η συνολική ροή στην οποία εκτέθηκε ο στόχος κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης. Να σημειωθεί ότι η σχέση (1.1) εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης προς μελέτη ή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πειραματικής ροής σε κάποιο στόχο αναφοράς αφού είναι γνωστή η ενεργός διατομή της αντίδρασης αναφοράς.

Το πλήθος των πυρήνων ενός συγκεκριμένου ισοτόπου του στόχου που ακτινοβολήθηκε δίνεται από τη σχέση

$$N_{\tau} = \frac{m \cdot N_A}{A} \quad (1.2)$$

όπου m : η μάζα του στόχου, N_A : ο αριθμός Avogadro ($N_A = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) και A : το μοριακό βάρος του στόχου.

Συνεπώς, η διαδικασία που ακολουθείται είναι ο προσδιορισμός των πυρήνων που παράχθηκαν κατά την ακτινοβόληση και των πυρήνων που υπήρχαν στο στόχο για ένα συγκεκριμένο ισότοπο. Η ροή προσδιορίζεται από προσομοιώσεις της ακτινοβόλησης επιτρέποντας τελικά τον υπολογισμό της ενεργού διατομής μιας αντίδρασης σύμφωνα με τη σχέση (1.1).

1.3 Χάφνιο (Hf)

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα εφαρμοστεί η μέθοδος της νετρονικής ενεργοποίησης, η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως, σε στόχους φυσικού Hf με στόχο της μελέτη αντιδράσεων νετρονίων σε διάφορα ισότοπά του. Το Hf είναι ένα μέταλλο με ατομικό αριθμό $Z = 72$ το οποίο εντοπίστηκε πρώτη φορά το 1923 στην Κοπεγχάγη αν και είχε προβλεφθεί η ύπαρξή του. Το εν λόγω χημικό στοιχείο βρίσκει πολλές εφαρμογές στην κατασκευή ηλεκτροδίων, ορισμένων ημιαγωγών, πυρίμαχων υλικών κ.α. [2]

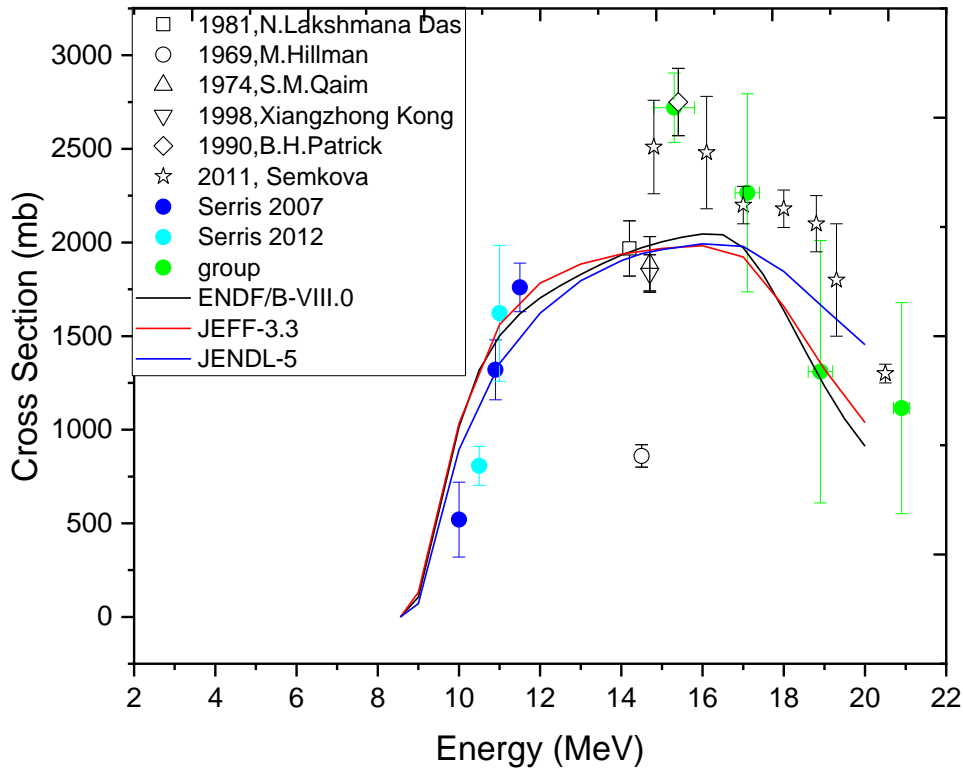
Ακολουθούν τα σταθερά ισότοπα που απαρτίζουν το φυσικό Hf στον παρακάτω Πίνακα 1.1

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής $t_{1/2}$	Ισοτοπική αναλογία (%)
^{174}Hf	$2 \cdot 10^{15} \text{ years}$	0.162(1)
^{176}Hf	Σταθερό	5.206(7)
^{177}Hf	Σταθερό	18.606(4)
^{178}Hf	Σταθερό	27.297(4)
^{179}Hf	Σταθερό	13.629(6)
^{180}Hf	Σταθερό	35.100(7)

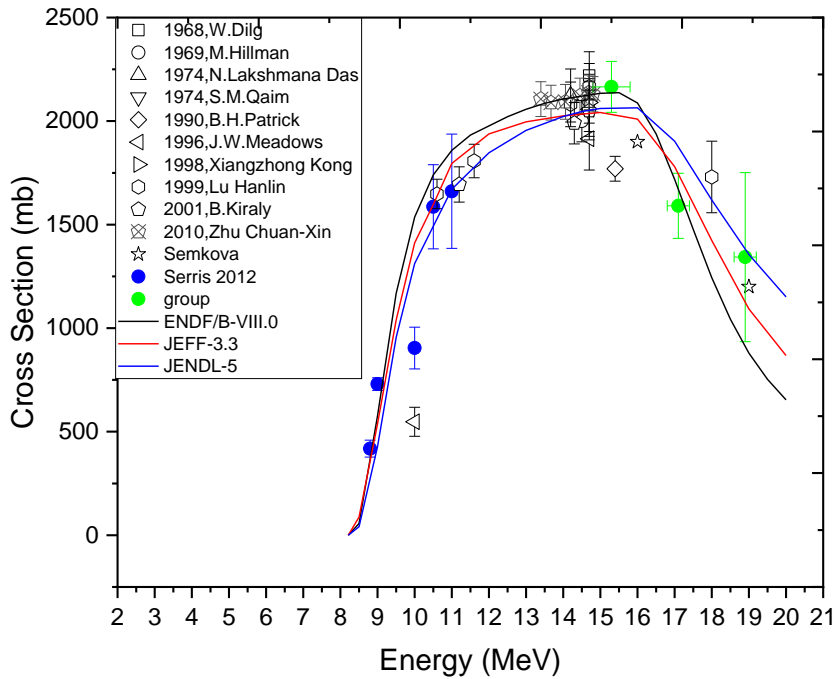
Πίνακας 1.1: Ισοτοπική σύσταση φυσικού Hf

1.4 Τρέχουσα κατάσταση πειραματικών δεδομένων

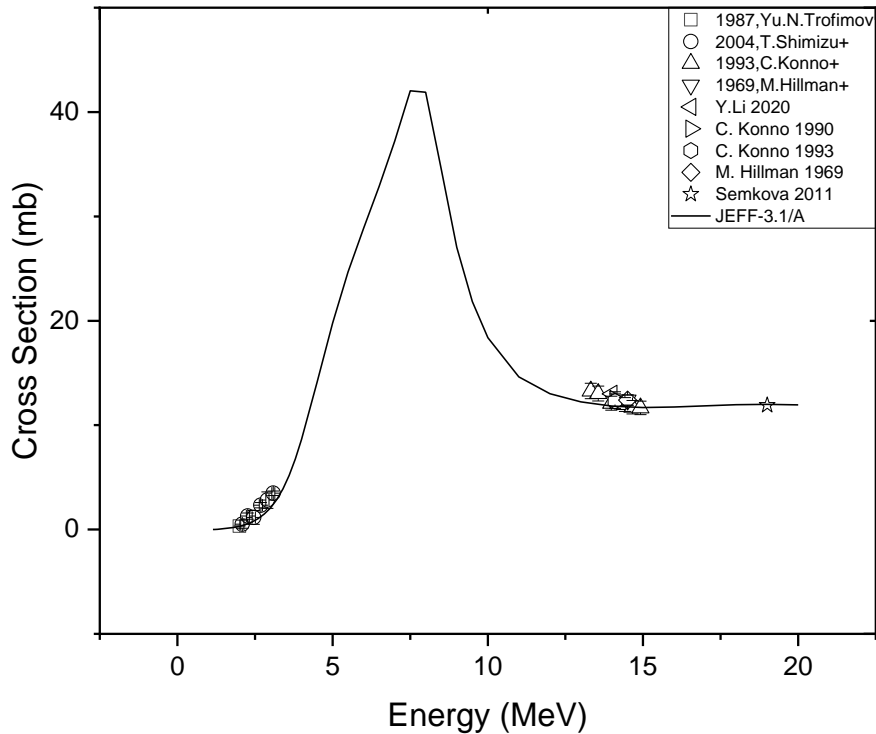
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας αποτελούν οι αντιδράσεις $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$. Οι συγκεκριμένες αντιδράσεις έχουν ήδη μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές κυρίως στην περιοχή των 14 – 15 MeV, όπως φαίνεται στα Σχήματα 1.1, 1.2 και 1.3, μαζί με τις εκτιμήσεις της βιβλιοθήκης ENDF/B-VIII.0. Οι αντιδράσεις αυτές έχουν απασχολήσει την ομάδα Πυρηνικής του τομέα Φυσικής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» σε χαμηλές ενέργειες καθώς και σε υψηλότερες αφήνοντας εκτός της μελέτης τους μόνο ενδιάμεσες ενέργειες στις οποίες έχει παρατηρηθεί μια πληθώρα πειραματικών δεδομένων. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε πείραμα για την μέτρηση των ενεργών διατομών αυτών των αντιδράσεων σε πιο υψηλές ενέργειες νετρονίων των 15.8 MeV και 18.0 MeV. Ακολουθούν τα πειραματικά δεδομένα ερευνητών από άλλα εργαστήρια για τις αντιδράσεις προς μελέτη καθώς και προηγούμενα πειραματικά δεδομένα που έχουν ληφθεί από την ομάδα Πυρηνικής.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα των πειραματικών δεδομένων της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$ συναρτήσει της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, που υπάρχουν στη βιβλιογραφία καθώς και οι εκτιμήσεις διαφόρων βιβλιοθηκών.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα των πειραματικών δεδομένων της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$ συναρτήσει της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, που υπάρχουν στη βιβλιογραφία καθώς και οι εκτιμήσεις της βιβλιοθήκης ENDF/B-VIII.0. [3], [4], [5]



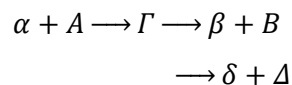
Σχήμα 1.3: Διάγραμμα ενεργού διατομής των πειραματικών δεδομένων της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n, n')^{80m5}\text{Hf}$ συναρτήσει της ενέργειας των προσπίπτοντων νετρονίων, που υπάρχουν στη βιβλιογραφία καθώς και οι εκτιμήσεις της βιβλιοθήκης ENDF/B-VIII.0.

Αρχικό βήμα για αυτή τη μελέτη των αντιδράσεων στα ισότοπα του Hf αποτελεί η κατασκευή των ενεργειακών διαγραμμάτων αυτών των αντιδράσεων.

1.5 Ενεργειακά Διαγράμματα

1.5.1 Διαθέσιμη ενέργεια (Q-value)

Οι αντιδράσεις που μελετώνται στην παρούσα εργασία αποτελούν αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα κατά την οποία ένα προσπίπτον σωματίδιο α αλληλεπιδρά και τελικά απορροφάται από έναν πυρήνα A σχηματίζοντας προσωρινά ένα σύνθετο πυρήνα Γ σε κάποια διεγερμένη του κατάσταση. Ο σύνθετος πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας με χαρακτηριστική του ιδιότητα το γεγονός ότι αφού βρεθεί στην ενδιάμεση κατάσταση του σύνθετου πυρήνα έχει «ξεχάσει» από πού προήλθε με αποτέλεσμα ο τρόπος αποδιέγερσης να είναι εντελώς ανεξάρτητος του τρόπου δημιουργίας του. Συνεπώς, υπάρχουν διάφορα κανάλια εξόδου που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του ίδιου συστήματος σωματιδίου και πυρήνα.



Κυριότερο κριτήριο για τον προσδιορισμό των καναλιών εξόδου είναι μέσω της διαθέσιμης ενέργειας (Q-value), δηλαδή της διαφοράς μάζας μεταξύ αρχικής και την τελικής κατάστασης και δίνεται από τη σχέση

$$Q = (m_{\alpha} + m_A - m_{\beta} - m_B) \cdot c^2 \quad (1.3)$$

Βάσει της τιμής του Q-value μιας αντίδρασης προκύπτει ότι:

- Αν $Q > 0$ η αντίδραση είναι εξώθερμη, δηλαδή εκλύεται ενέργεια κατά τη διεξαγωγή της και είναι δυνατή η πραγματοποίησή της ακόμα και με μηδενική κινητική ενέργεια του βλήματος
- Αν $Q < 0$ η αντίδραση είναι ενδόθερμη, όπου απορροφάται ενέργεια κατά την πραγματοποίησή της. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας να δοθεί υπό μορφή κινητικής ενέργειας του βλήματος ώστε να πραγματοποιηθεί η αντίδραση.
- Αν $Q = 0$, τότε γίνεται λόγος για ελαστική σκέδαση κατά την οποία το μόνο που συμβαίνει είναι να αλλάξει η κινητική ενέργεια και η διεύθυνση του σωματιδίου α .

Για να είναι δυνατή η αποδιέγερση ενός σύνθετου πυρήνα με μια συγκεκριμένη αντίδραση θα πρέπει η ενέργεια διέγερσής του να είναι μεγαλύτερη από το Q-value της εκάστοτε αντίδρασης.

1.5.2 Ενεργειακό διάγραμμα αντίδρασης

Με τον σχεδιασμό του ενεργειακού διαγράμματος παριστάνονται τα κανάλια εξόδου τα οποία είναι δυνατό να ανοίξουν κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης για συγκεκριμένη ενέργεια σωματιδίων και για το ισότοπο ενδιαφέροντος. Για την σκοπό αυτό μελετώνται όλα αυτά τα κανάλια με επίπεδο αναφοράς το ενεργειακό επίπεδο του σύνθετου πυρήνα.

Για τον προσδιορισμό των επιτρεπόμενων καναλιών εξόδου, για αντίδραση $\alpha + A \rightarrow \Gamma \rightarrow \beta + B$, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Υπολογισμός της διαθέσιμης ενέργειας, E_δ , της αντίδρασης σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα με τη σχέση (1.3)
2. Μετατροπή της ενέργειας νετρονίων από το σύστημα του εργαστηρίου (E_{LAB}) στο σύστημα του κέντρου μάζας (E_{CM}) με τη σχέση

$$E_{CM} = \frac{m_A}{m_\Gamma} \cdot E_{LAB} \quad (1.4)$$

3. Υπολογισμός της ενέργειας του παραγόμενου σύνθετου πυρήνα από τη σχέση

$$E^* = E_\delta + E_{CM} \quad (1.5)$$

4. Προσδιορισμός της τιμής της διαθέσιμης ενέργειας των αντιδράσεων από τη σχέση (1.3) μεταξύ των μαζών των προϊόντων του κάθε καναλιού και του σύνθετου πυρήνα.

Παρακάτω ακολουθούν τα ενεργειακά διαγράμματα και η μελέτη όλων των πιθανών καναλιών εξόδου για τις αντιδράσεις που μελετώνται στην εργασία.

1.5.2.1 Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$

Ακολουθώντας τα βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω υπολογίστηκε το ενεργειακό επίπεδο στο οποίο βρίσκεται κάθε κανάλι ώστε να ελεγχθεί αν η κάθε αντίδραση είναι ενεργειακά επιτρεπτή. Παρουσιάζεται, ως παράδειγμα, ο υπολογισμός του ενεργειακού

επιπέδου της αντίδρασης $^{174}\text{Hf} + n \rightarrow ^{175}\text{Hf}^* \rightarrow 2n + ^{173}\text{Hf}$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$.

1. Η διαθέσιμη ενέργεια της αντίδρασης υπολογίζεται από τη σχέση (1.3)

$$E_\delta = (m_n + m_{174} - m_{175}^*) \cdot 1u = 6.71 \text{ MeV}$$

όπου $1u = 931.49 \text{ MeV}$

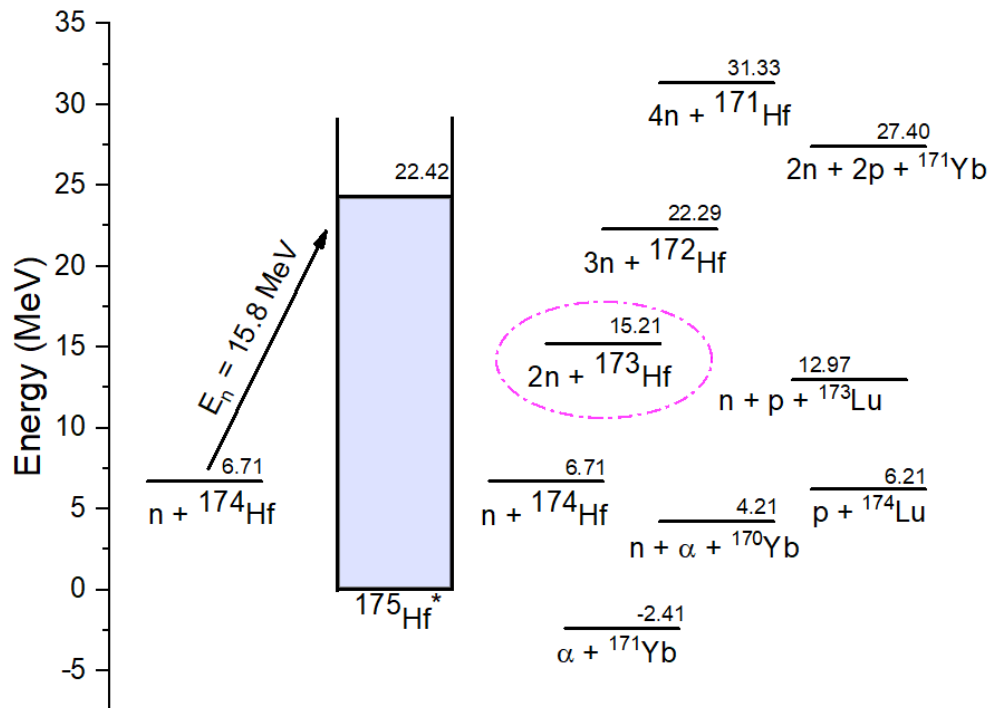
2. Η ενέργεια του κέντρου μάζας όπως υπολογίστηκε με τη σχέση (1.4)

$$E_{CM} = \frac{m_n}{m_{174}} \cdot E_{LAB} = 17.90 \text{ MeV}$$
3. Η ενέργεια του παραγόμενου σύνθετου πυρήνα με τη σχέση (1.5)

$$E^* = E_\delta + E_{CM} = 24.61 \text{ MeV}$$
4. Το ενεργειακό επίπεδο της αντίδρασης με τη σχέση (1.3)

$$Q = 2m_n + m_{173} - m_{175}^* = 15.21 \text{ MeV}$$

Αντίστοιχα με το παράδειγμα γίνεται ο υπολογισμός του ενεργειακού επιπέδου κάθε πιθανής αντίδρασης. Αυτές οι πληροφορίες αναπαρίστανται στα ενεργειακά διαγράμματα της αλληλεπίδρασης $^{174}\text{Hf} + n$ για ενέργειες νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ και $E_n = 18.0 \text{ MeV}$.



Σχήμα 1.4: Ενεργειακό διάγραμμα αλληλεπίδρασης $^{174}\text{Hf} + n$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Συμπερασματικά, σύμφωνα με το παραπάνω ενεργειακό διάγραμμα τα κανάλια που θα μπορέσουν να ανοίξουν για τη δεδομένη δέσμη νετρονίων ενέργειας $E_n = 15.8 \text{ MeV}$, είναι αυτά που το ενεργειακό τους επίπεδο είναι χαμηλότερο από το επίπεδο στο οποίο έχει διεγερθεί ο σύνθετος πυρήνας. Επομένως, τα κανάλια $4n + ^{171}\text{Hf}$ και $2n + 2p + ^{171}\text{Lu}$ θεωρούνται κλειστά κανάλια και είναι αδύνατο να μελετηθούν.

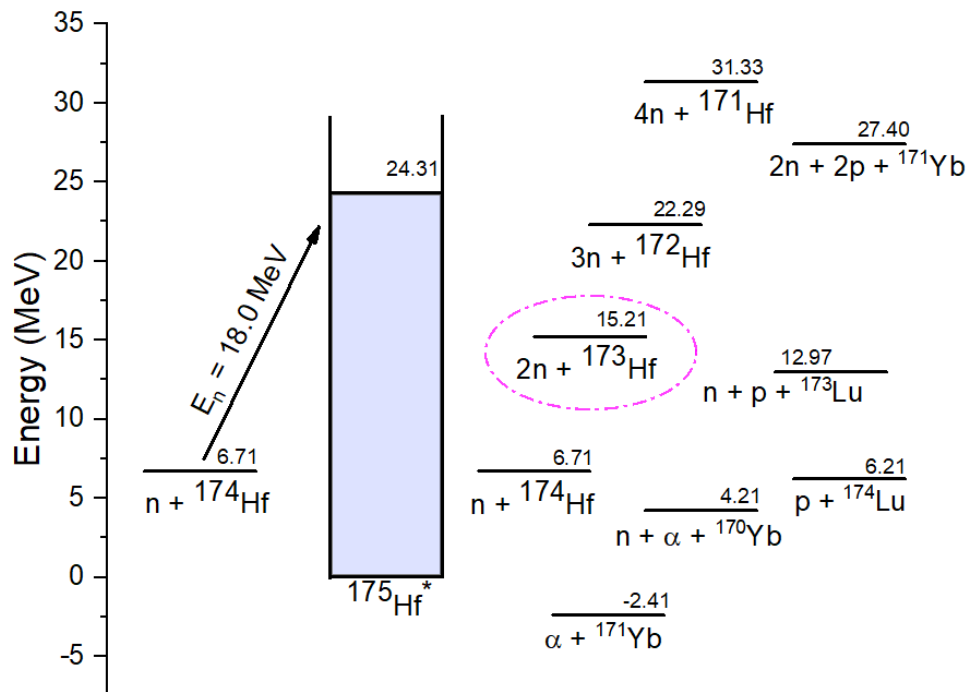
Βασική προϋπόθεση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι ο πυρήνας που παράγεται να μην έχει πολύ μεγάλο ούτε πολύ μικρό χρόνο ημιζωής ώστε να είναι δυνατή η μελέτη του με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης. Παρακάτω δίνονται αυτοί οι πυρήνες, οι αντιδράσεις από τις οποίες προκύπτουν και ο χρόνος ημιζωής αυτών ο οποίος τους κρίνει ακατάλληλους ώστε να μελετηθούν.

Ισότοπο	Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής
^{172}Hf	$^{174}\text{Hf}(n,3n)^{172}\text{Hf}$	1.87 y
^{174}Lu	$^{174}\text{Hf}(n,p)^{174}\text{Lu}$	3.31 y
^{173}Lu	$^{174}\text{Hf}(n,np)^{173}\text{Lu}$	1.37 y

Πίνακας 1.2: Τα ισότοπα τα οποία είναι αδύνατο να μελετηθούν στην παρούσα εργασία λόγω των μεγάλων χρόνων ημιζωής τους

Οι αντιδράσεις $^{174}\text{Hf}(n, a)^{171}\text{Yb}$ και $^{174}\text{Hf}(n, na)^{170}\text{Yb}$ οδηγούν σε σταθερούς πυρήνες καθιστώντας τους ακατάλληλους για μελέτη. Τέλος, η ελαστική σκέδαση $^{174}\text{Hf}(n, n)^{174}\text{Hf}$ θα απαιτούσε διαφορετική πειραματική διάταξη με την οποία θα ήταν δυνατή η ανίχνευση των σκεδαζόμενων νετρονίων.

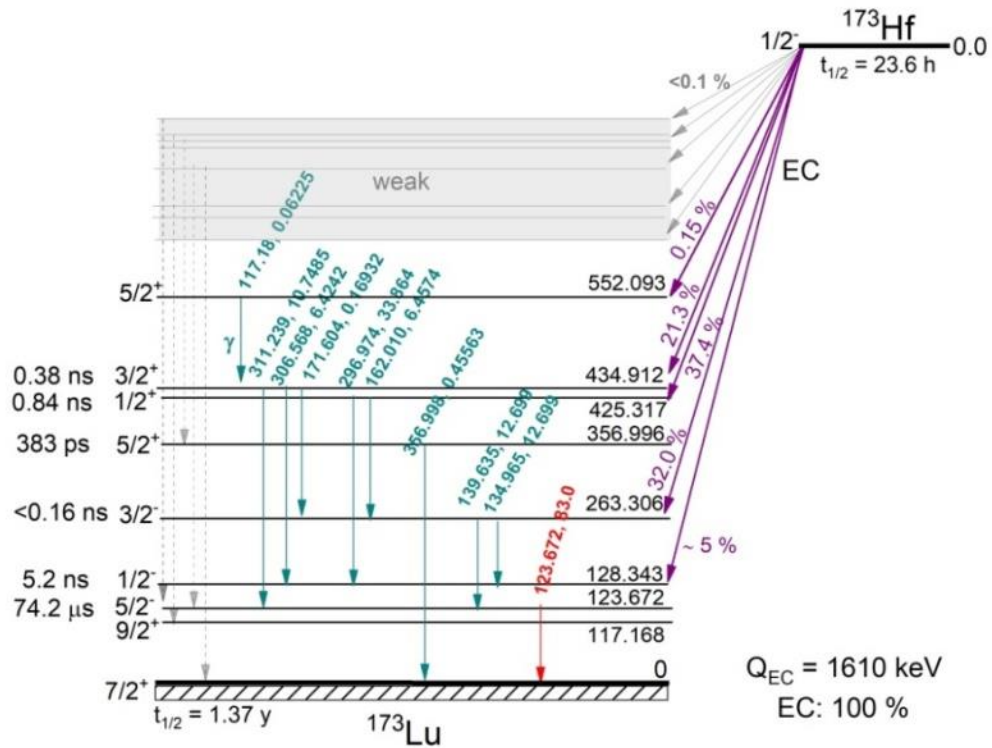
Ακολουθεί το ενεργειακό διάγραμμα για την περίπτωση όπου $E_n = 18.0 \text{ MeV}$.



Σχήμα 1.5: Ενεργειακό διάγραμμα αλληλεπίδρασης $^{174}\text{Hf} + n$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$

Σύμφωνα με το παραπάνω ενεργειακό διάγραμμα δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με την περίπτωση της ενέργειας νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ που μελετήθηκε ήδη. Και για τις δύο ενέργειες των νετρονίων είναι μια από τις αντιδράσεις που απασχολούν αυτή την εργασία, η $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$, η μόνη η οποία είναι δυνατό να παρατηρηθεί. Επειδή ο πυρήνας ^{173}Hf είναι βαρύς έχει την τάση να θέλει να διώξει νετρόνια

και για αυτό παρατηρείται μεγάλη ενεργός διατομή στην προκειμένη αντίδραση. Το ισότοπο που παράγεται από την συγκεκριμένη αντίδραση, έχει χρόνο ημιζωής $t_{1/2} = 23.6 \text{ h}$ και παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των βασικότερων ακτίνων-γ που εκπέμπονται από αυτό τον πυρήνα.



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα αποδιέγερσης του ^{173}Hf

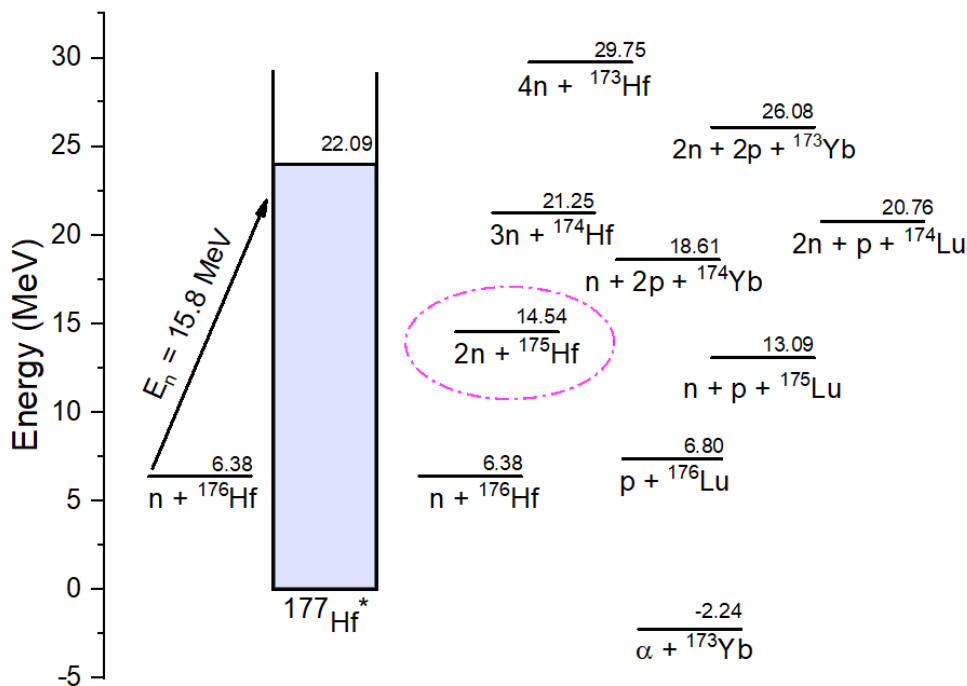
Στον Πίνακα 1.3 ακολουθούν συνοπτικά οι ενέργειες των κυριότερων ακτίνων-γ που θα μελετηθούν και οι εντάσεις τους.

Ενέργεια E_γ (keV)	Ένταση I_γ (%)
123.675	83
296.974	33.9
139.635	12.7
311.239	10.7

Πίνακας 1.3: Ενέργειες ακτίνων-γ του ^{173}Hf

1.5.2.2 Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ακριβώς με τον ίδιο τρόπο μελετήθηκε και η αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ για τις δύο ενέργειες των νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ και $E_n = 18.0 \text{ MeV}$.



Σχήμα 1.7: Ενεργειακό διάγραμμα αλληλεπίδρασης $^{176}\text{Hf} + n$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Σύμφωνα με το ενεργειακό διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7 παρατηρείται ότι τα κανάλια εξόδου $4n + ^{173}\text{Hf}$ και $2n + 2p + ^{173}\text{Yb}$ είναι κλειστά αφού τα ενεργειακά επίπεδα όλων αυτών των καναλιών είναι μεγαλύτερα από την ενέργεια του σύνθετου πυρήνα, επομένως θα απαιτούνταν να δοθεί περισσότερη ενέργεια στο αρχικό σύστημα ώστε να είναι επιτρεπτές οι συγκεκριμένες αντιδράσεις. Μεταξύ των υπολοίπων καναλιών εξόδου τα οποία είναι ανοιχτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4 οι αντιδράσεις που οι πυρήνες που παράγονται έχουν απαγορευτικούς χρόνους ημιζωής για να μελετηθούν με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης είτε επειδή είναι πολύ μεγάλοι είτε πολύ μικροί.

Ισότοπο	Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής
^{174}Lu	$^{176}\text{Hf}(n,2n+p)^{174}\text{Lu}$	3.31 y
^{174}Hf	$^{176}\text{Hf}(n,3n)^{174}\text{Hf}$	$2 \cdot 10^{15}$ y
^{176}Lu	$^{176}\text{Hf}(n,p)^{176}\text{Lu}$	$3.76 \cdot 10^{10}$ y

Πίνακας 1.4: Τα ισότοπα τα οποία είναι αδύνατο να μελετηθούν λόγω των μεγάλων χρόνων ημιζωής τους

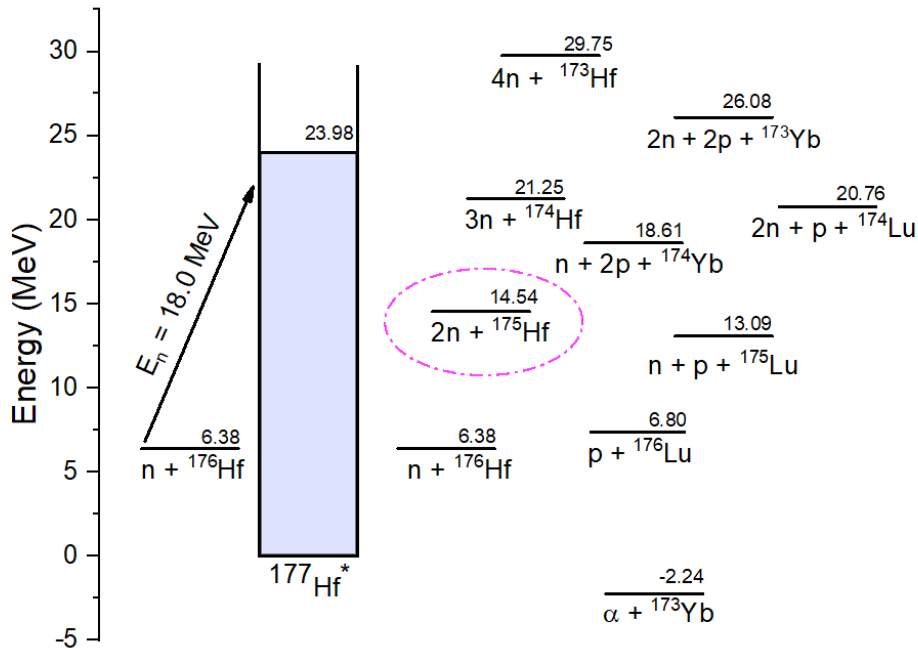
Στον Πίνακα 1.5 ακολουθούν οι αντιδράσεις που αδυνατούν να μελετηθούν αφού οι πυρήνες που παράγονται είναι σταθεροί και όπως ήδη αναφέρθηκε θα απαιτούνταν διαφορετική διάταξη για αυτό το σκοπό.

Ισότοπο	Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής
^{173}Yb	$^{176}\text{Hf}(n,\alpha)^{173}\text{Yb}$	σταθεροί
^{175}Lu	$^{176}\text{Hf}(n,np)^{175}\text{Lu}$	
^{174}Yb	$^{176}\text{Hf}(n,n+2p)^{174}\text{Yb}$	

Πίνακας 1.5: Τα ισότοπα τα οποία είναι αδύνατο να μελετηθούν επειδή παράγονται σταθεροί πυρήνες

Συνεπώς, η μόνη αντίδραση που είναι δυνατό να μελετηθεί είναι η $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$.

Ακολουθεί το ενεργειακό διάγραμμα για την περίπτωση όπου $E_n = 18.0 \text{ MeV}$.



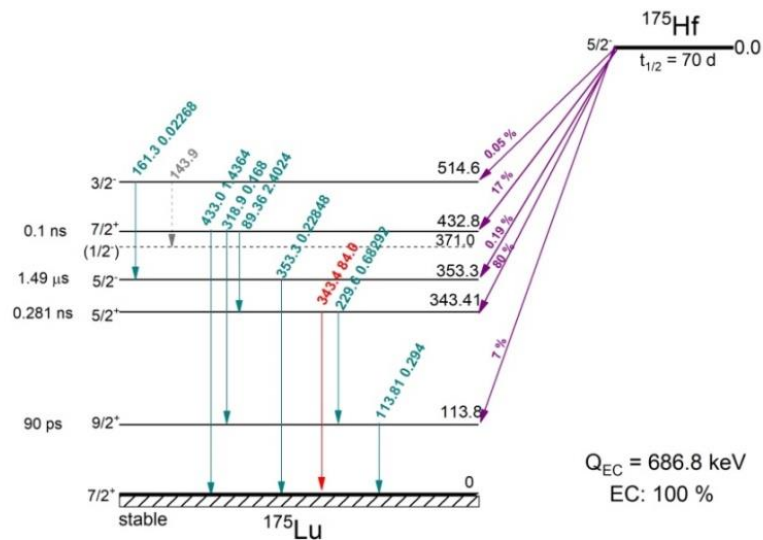
Σχήμα 1.8: Ενεργειακό διάγραμμα αλληλεπίδρασης $^{176}\text{Hf} + n$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$

Βάσει του παραπάνω ενεργειακού διαγράμματος προκύπτει ότι το μοναδικό κανάλι που μπορεί να μελετηθεί είναι και πάλι το $2n + ^{175}\text{Hf}$ για τους ίδιους λόγους που περιγράφηκαν και παραπάνω. Επιπλέον, όμως, λόγω της μεγαλύτερης ενέργειας των νετρονίων και κατά συνέπεια του σύνθετου πυρήνα που παράγεται επιτρέπεται ενεργειακά η αντίδραση $^{177}\text{Hf}(n, 3n)^{175}\text{Hf}$.

Το ισότοπο ^{175}Hf που παράγεται από την αντίδραση ενδιαφέροντος έχει χρόνο ημιζωής $t_{1/2} = 70 \text{ d}$ και στο διάγραμμα των αποδιεγέρσεων του που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικότερες ακτίνες-γ που εκπέμπει και έχει σημειωθεί αυτή που θα μελετηθεί και παρουσιάζονται, επίσης, στον Πίνακα 1.6.

Ενέργεια E_γ (keV)	Ένταση I_γ (%)
343.4	84
89.36	2.4

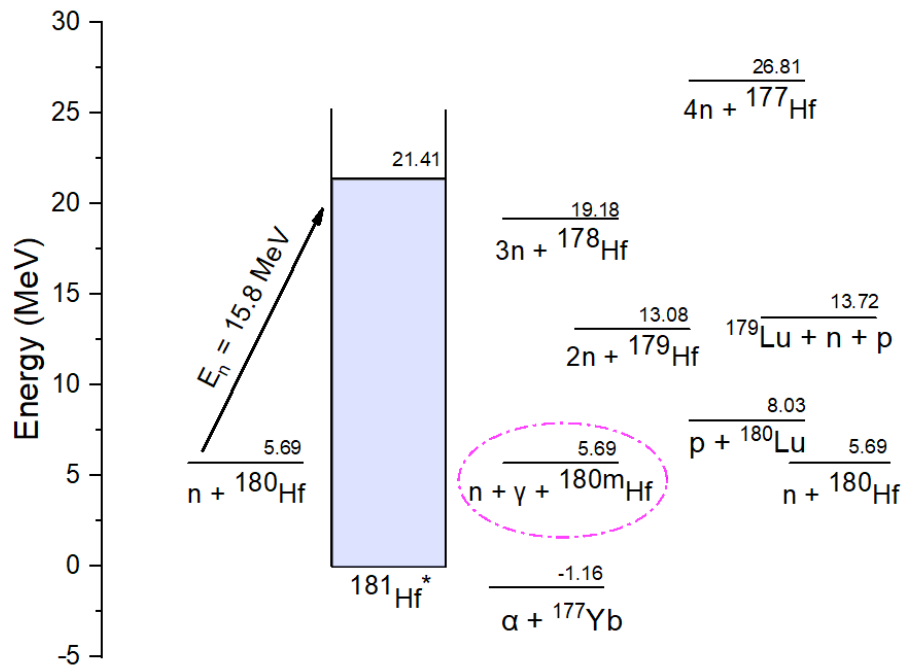
Πίνακας 1.6: Ενέργειες ακτίνων-γ του ^{175}Hf



Σχήμα 1.9: Διάγραμμα αποδιέγερσης του ^{175}Hf

1.5.2.3 Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$

Ακολουθεί το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$ καθώς και οι υπόλοιπες αντιδράσεις που μπορούν να προκύψουν κατά την ακτινοβόληση πυρήνα ^{180}Hf με νετρόνια.



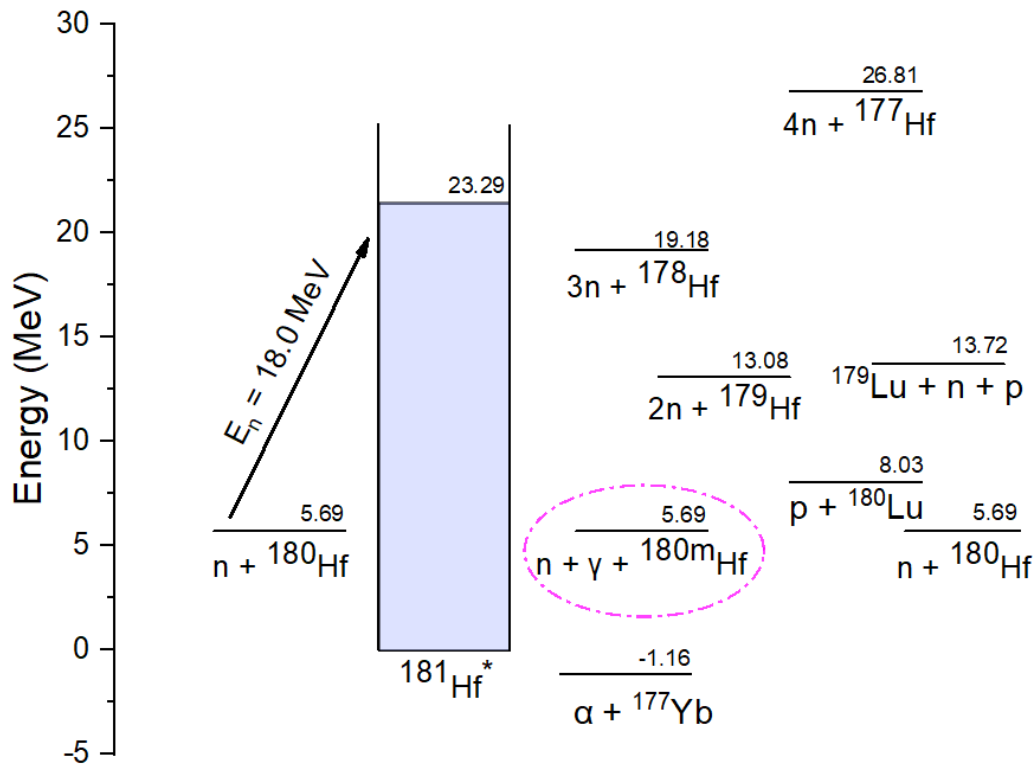
Σχήμα 1.10: Ενεργειακό διάγραμμα αλληλεπίδρασης $^{180}\text{Hf} + n$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Από τις αντιδράσεις που παρουσιάζονται για $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ η αντίδραση $^{180}\text{Hf}(n, 4n)^{177}\text{Hf}$ είναι αδύνατο να μελετηθεί καθώς αυτό το κανάλι είναι κλειστό αλλά και να μην ήταν η μελέτη του θα παρέμενε αδύνατη αφού ο παραγόμενος πυρήνας είναι σταθερός. Επίσης, σταθεροί είναι και οι πυρήνες που παράγονται από τις αντιδράσεις $^{180}\text{Hf}(n, 2n)^{179}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n, 3n)^{178}\text{Hf}$ οπότε ούτε αυτές μελετώνται. Η ελαστική σκέδαση $^{180}\text{Hf}(n, n')^{180}\text{Hf}$, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι αδύνατη η μελέτη της με την παρούσα διάταξη του πειράματος. Από τις αντιδράσεις που απομένουν η αντίδραση $^{180}\text{Hf}(n, p)^{180}\text{Lu}$, $t_{1/2} = 5.7 \text{ min}$, έχει σχετικά μικρό χρόνο ημιζωής οπότε είναι αδύνατη η ανίχνευση αυτού του ισότοπου. Τέλος, στις αντιδράσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.7 παράγονται πυρήνες οι οποίοι έχουν λογικούς χρόνους ημιζωής για τη μελέτη αυτών των αντιδράσεων και είναι υπό διερεύνηση. Αναγράφεται, επιπλέον, η κύρια αντίδραση που μελετάται, καθώς οι δύο πρώτες τελικά κατέστη αδύνατο να μελετηθούν πειραματικά.

Ισότοπο	Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής
^{174}Lu	$^{180}\text{Hf}(n, \alpha)^{177}\text{Yb}$	1.911 h
^{179}Lu	$^{180}\text{Hf}(n, np)^{179}\text{Lu}$	4.59 h
$^{180\text{m}}\text{Hf}$	$^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$	5.53 h

Πίνακας 1.7: Αντιδράσεις που προβλέπεται να μελετηθούν

Παρουσιάζεται και το ενεργειακό διάγραμμα για την αλληλεπίδραση $^{180}\text{Hf} + n$ για ενέργεια $E_n = 18.0 \text{ MeV}$.



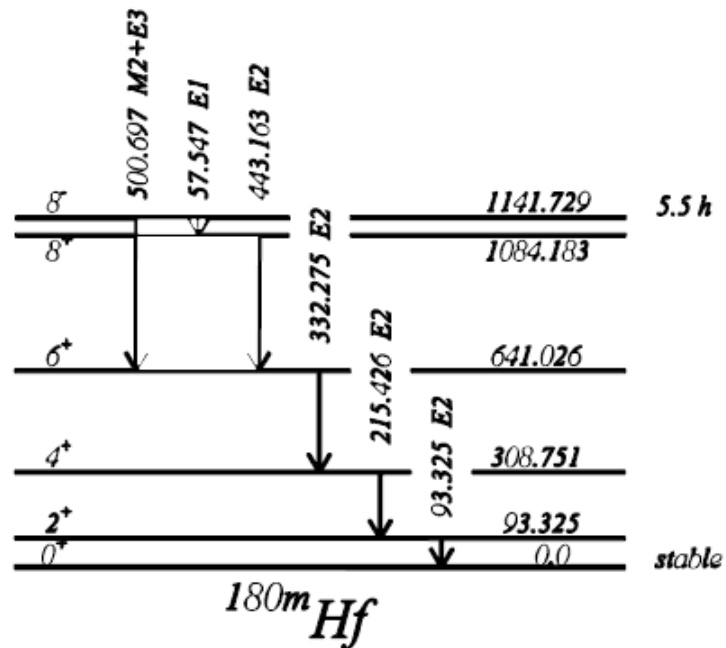
Σχήμα 1.11: Ενεργειακό διάγραμμα αλληλεπίδρασης $^{180}\text{Hf} + n$ για ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$

Αντίστοιχα, οι μόνες αντιδράσεις που είναι δυνατό να μελετηθούν είναι αυτές που παρουσιάστηκαν και για την ενέργεια των νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$.

Η κύρια αντίδραση που μελετάται σε αυτή την περίπτωση είναι η $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$. Ο παραγόμενος πυρήνας έχει χρόνο ημιζωής $t_{1/2} = 5.53 \text{ h}$ και οι πιο εντατικές ακτίνες- γ είναι αυτές που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Ενέργεια E_γ (keV)	Ένταση I_γ (%)
332.274	94
443.162	82
215.426	81.6
57.538	48
93.324	16.5
500.697	14.2

Πίνακας 1.8: Ενέργειες ακτίνων- γ του ^{180m}Hf



Σχήμα 1.12: Διάγραμμα αποδιέγερσης του ^{180m}Hf

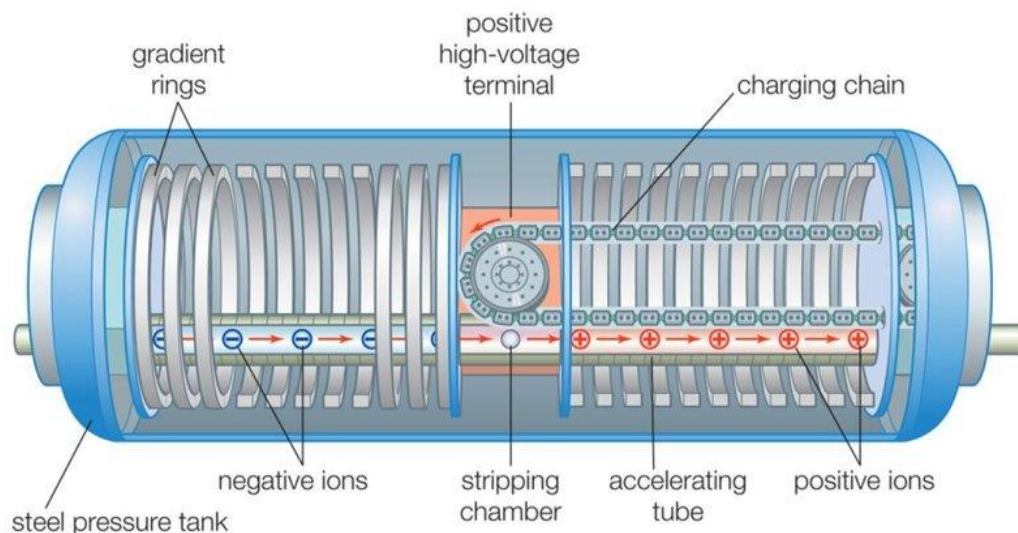
Κεφάλαιο 2

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος, όπως είναι ο επιταχυντής, οι ανιχνευτές γερμανίου, οι μονάδες των ηλεκτρονικών κ.α., οι στόχοι που ακτινοβολήθηκαν και στη συνέχεια μετρήθηκαν καθώς και οποιεσδήποτε σχετικές προετοιμασίες με το πείραμα ήταν αναγκαίες να πραγματοποιηθούν.

2.1 Επιταχυντής

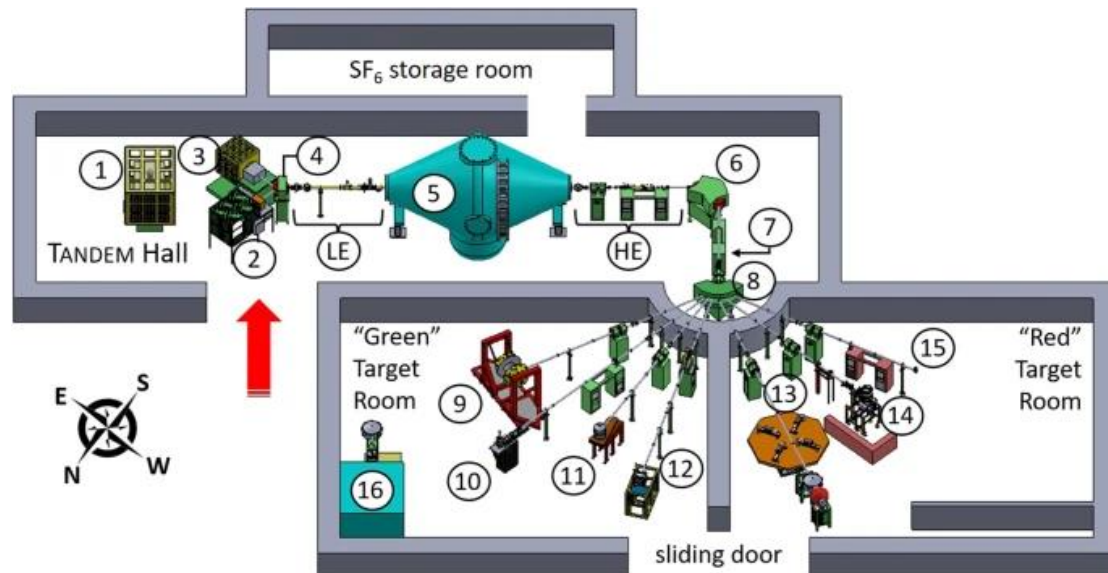
Για την πραγματοποίηση της νετρονικής ενεργοποίησης απαραίτητη προϋπόθεση είναι μια πηγή νετρονίων. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας ως πηγή νετρονίων χρησιμοποιείται ένας επιταχυντής. Σε έναν επιταχυντή είναι δυνατή η παραγωγή νετρονίων έμμεσα, από κατάλληλες πυρηνικές αντιδράσεις, κατευθύνοντας μια δέσμη συγκεκριμένων φορτισμένων σωματιδίων και ορισμένης ενέργειας, σε ένα στόχο. Το πείραμα της παρούσας εργασίας διεξήχθη στον επιταχυντή Tandem Van de Graff 5.5MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός επιταχυντή tandem, λοιπόν, στηρίζεται στην επιτάχυνση φορτισμένων σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες λόγω ενός στατικού ηλεκτρικού πεδίου. Όπως φαίνεται και παρακάτω, στην Εικόνα 2.1 ο επιταχυντής αποτελείται από μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα και έναν μίαντα μεταξύ δυο περιστρεφόμενων κύκλων. Ο μίαντας, αυτός, μεταφέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο στη σφαίρα από μια πηγή υψηλής τάσης, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των δύο. Μια πηγή ιόντων βρίσκεται έξω από τον επιταχυντή, η οποία διοχετεύει με αρνητικά ιόντα τον επιταχυντή και το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργήθηκε από τη σφαίρα τα επιταχύνει, έλκοντάς τα. Στη μεταλλική σφαίρα υπάρχει ένα λεπτό φύλλο άνθρακα απογυμνώνοντας τα αρνητικά ιόντα από ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια ώστε αυτά να μετατραπούν σε θετικά ιόντα και τελικά απωθούνται από την μεταλλική σφαίρα επιτυγχάνοντας έτσι τα ιόντα να διασχίζουν τον επιταχυντή σε όλο το μήκος του μέχρι τελικά εξέλθουν από αυτόν και να οδηγηθούν σε ένα μαγνήτη ο οποίος τα στρέφει κατά 90° [6].



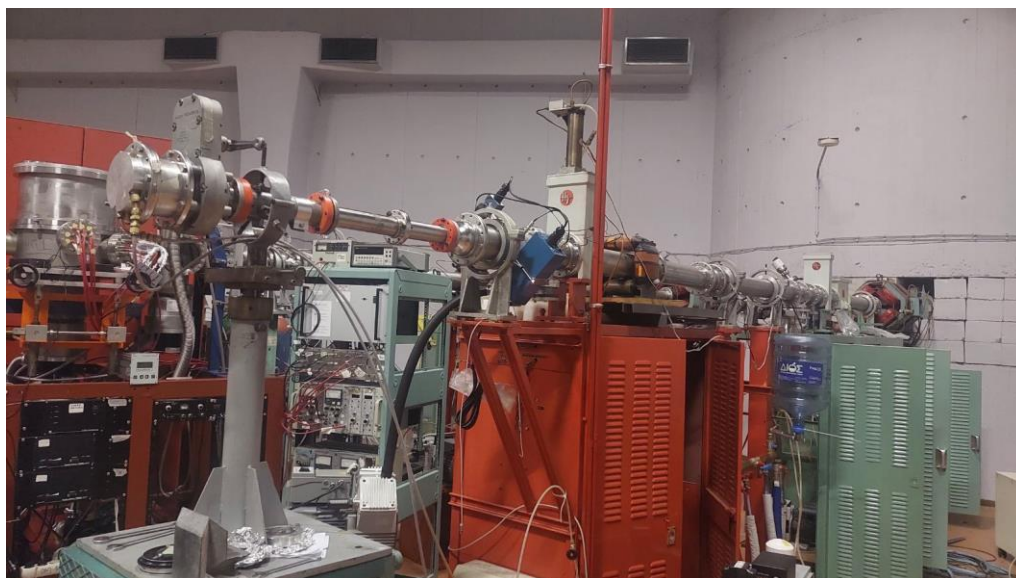
Εικόνα 2.1: Το εσωτερικό ενός επιταχυντή tandem

Όπως φαίνεται και παρακάτω στην Εικόνα 2.2, η διάταξη του επιταχυντή στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» διαθέτει πολλές γραμμές στις οποίες μπορεί να οδηγηθεί η δέσμη των ιόντων που επιταχύνθηκαν με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Για αυτό τον λόγο υπάρχει ένας ηλεκτρομαγνήτης ο οποίος ονομάζεται μαγνήτης επιλογής (switching magnet) και ο ρόλος του είναι να κατευθύνει τη δέσμη σε μία από τις έξι πειραματικές γραμμές από τις οποίες αποτελείται η διάταξη.



Εικόνα 2.2: Σχηματική διάταξη των αιθουσών της πειραματικής διάταξης του επιταχυντή tandem στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

Να σημειωθεί ότι η γραμμή η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος στα πλαίσια της εργασίας ήταν η 15, όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 2.2, ενώ στην Εικόνα 2.3 απεικονίζεται η γραμμή όπως στήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος.



Εικόνα 2.3: Γραμμή μεταφοράς δέσμης δευτερίων

Ιδιαίτερος σημαντικό ρόλο στη διάταξη του επιταχυντή έχουν οι αντλίες κενού οι οποίες επιτυγχάνουν ο επιταχυντής και όλη η γραμμή μεταφοράς, να βρίσκονται υπό υψηλό κενό ($\sim 10^6$ torr) ώστε να αποφευχθούν συγκρούσεις των σωματιδίων της δέσμης και του αέρα.

2.1.1 Αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων

Η παραγωγή μονοενεργειακών δεσμών νετρονίων επιτυγχάνεται έμμεσα σε έναν επιταχυντή με την χρήση της κατάλληλης πυρηνικής αντίδρασης. Αυτές οι πυρηνικές αντιδράσεις ποικίλουν ανάλογα με την ενέργεια των νετρονίων που είναι επιθυμητό να παραχθούν για την εκάστοτε εφαρμογή. Βασικά χαρακτηριστικά τέτοιων αντιδράσεων είναι η κινηματική της κάθε αντίδρασης, όπως το Q-value ή το ενεργειακό κατώφλι της κάθε αντίδρασης, η γωνιακή κατανομή των νετρονίων και η ύπαρξη ανταγωνιστικών αντιδράσεων παραγωγής νετρονίων.

Οι πιο κοινές αντιδράσεις νετρονίων οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μονοενεργειακών δεσμών με εύρος ενέργειας νετρονίων από 0.1 έως 20 MeV ακολουθούν στον Πίνακα 2.1.

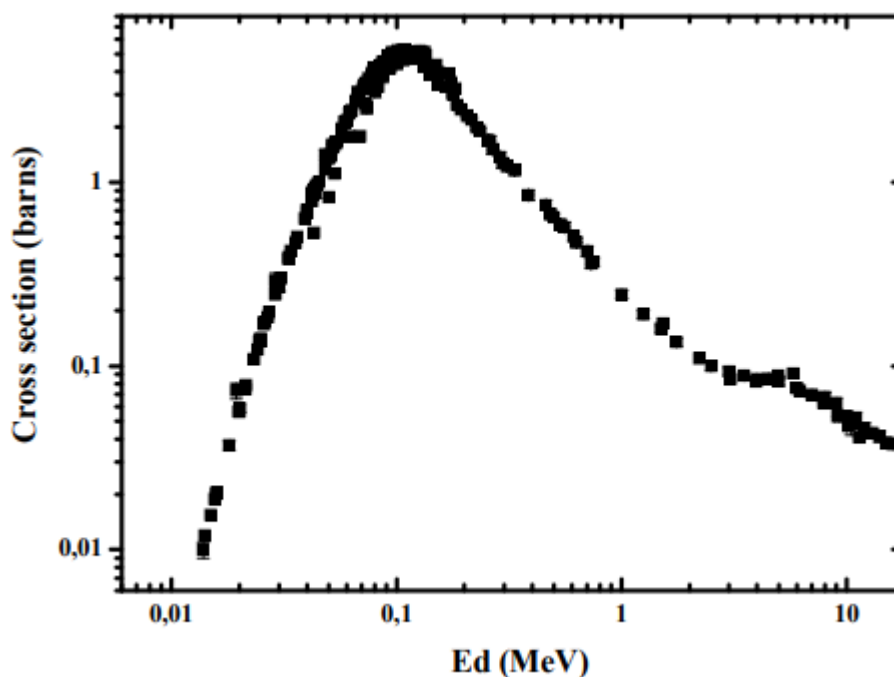
Αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων			
Αντιδράσεις με ισότοπα του H			
Αντίδραση	Q-value (MeV)	Ελάχιστη Ενέργεια Νετρονίων (MeV)	Μέγιστη Ενέργεια Νετρονίων (MeV)
$^2\text{H}(d,n)^3\text{H}$	3.269	2.45	7.74
$^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$	17.59	14.05	20.46
$^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$	-0.764	0.288	7.58
$^1\text{H}(t,n)^3\text{He}$	0.750	8	13
Αντιδράσεις με ισότοπα του Li			
Αντίδραση	Q-value (MeV)	Ελάχιστη Ενέργεια Νετρονίων (MeV)	Μέγιστη Ενέργεια Νετρονίων (MeV)
$^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	-1.664	0.03	4
$^7\text{Li}(d,n)^8\text{Be}$	15.031	-	13.35

Πίνακας 2.1: Κοινές αντιδράσεις παραγωγής νετρονίων σε επιταχυντές [6], [7]

Να τονιστεί ότι οι τιμές για τις ενέργειες που δίνονται στον Πίνακα 2.1 είναι για την περίπτωση όπου το σωματίδιο προσπίπτει στον εκάστοτε στόχο-πυρήνα στις 0° στο σύστημα του εργαστηρίου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι παραπάνω αντιδράσεις για χάρη μιας ολοκληρωμένης παρουσίασης των διαφορετικών αντιδράσεων που δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής νετρονίων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, έχει για τις ανάγκες του πειράματος που διεξήχθη η αντίδραση $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$, αφού είναι και η αντίδραση που χρησιμοποιήθηκε. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, δέσμη δευτερίων κατάλληλης ενέργειας κατευθύνεται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς σε στόχο CuTiT στον οποίο λαμβάνει χώρα και η αντίδραση. Ο στόχος αποτελείται από ένα φύλλο χαλκού πάχους, 1 mm, πάνω στο οποίο έχει εναποτεθεί ένα λεπτό στρώμα Ti (τιτανίου), στο οποίο βρίσκεται προσαρτημένο το τρίτιο με αναλογία απυρήνων $T/Ti = 1.543$. Το Τρίτιο έχει ενεργότητα 737 GBq. Στην διάταξη έχουν προστεθεί δύο πολύ λεπτά φύλλα Mo (μολυβδενίου), πάχους 5μm το καθένα, μπροστά από τον στόχο. Σκοπός της

ύπαρξης του Mo στον προκείμενο στόχο είναι να λειτουργεί για τα d (δευτέρια) ως επιβραδυντής τους πριν αυτά αλληλεπιδράσουν με το T (τρίτιο) μια και η ενεργός διατομή της αντίδρασης που μελετάται είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές ενέργειες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί.



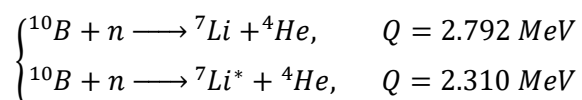
Σχήμα 2.1: Ενεργός διατομή της αντίδρασης παραγωγής νετρονίων που χρησιμοποιήθηκε συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων [8]

Κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης κρίνεται απαραίτητη η ψύξη του στόχου ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του και να αποφευχθεί η διαφυγή του ραδιενεργού Τριτίου, T.

2.2 Ανιχνευτής νετρονίων

Κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης είναι αναγκαία η καταγραφή της διακύμανσης της δέσμης των νετρονίων η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ανιχνευτή νετρονίων. Στην πράξη γίνεται λόγος για έναν απαριθμητή BF_3 (τριφθοριούχου φθορίου). Η αντικειμενική δυσκολία της ανίχνευσης των νετρονίων είναι ότι δεν έχουν φορτίο. Οπότε η ανίχνευσή τους θα πρέπει να γίνει με έμμεσο τρόπο, δηλαδή ανιχνεύοντας προϊόντα αντιδράσεων στις οποίες είναι γνωστό ότι συμμετέχουν.

Στον ανιχνευτή BF_3 πραγματοποιούνται οι δύο εξής αντιδράσεις:



Στον ανιχνευτή υπάρχουν πυρήνες ${}^{10}B$, με τους οποίους αλληλεπιδρούν τα νετρόνια. Η παραπάνω αντίδραση έχει μεγάλη ενεργό διατομή για θερμικά νετρόνια, δηλαδή χαμηλοενεργειακά, ενώ σε υψηλές ενέργειες νετρονίων η ενεργός διατομή της αντίδρασης είναι αρκετά μικρότερη με αποτέλεσμα να είναι τίθεται ένα εμπόδιο στην ανίχνευση ταχέων

νετρονίων, δηλαδή υψηλοενεργειακών. Για αυτό το λόγο, ο ανιχνευτής βρίσκεται κεντρικά, ενώ γύρω από αυτόν υπάρχει παραφίνη η οποία λειτουργεί σαν επιβραδυντής των νετρονίων, αφού αυτά σκεδάζονται στους πυρήνες της παραφίνης, χάνουν κινητική ενέργεια ώστε τελικά να φτάσουν στον ανιχνευτή με την κατάλληλη ενέργεια και να μπορέσουν να ανιχνευτούν. Στην πραγματικότητα αυτά που ανιχνεύονται είναι οι πυρήνες που παράγονται από τις παραπάνω αντιδράσεις και όχι τα νετρόνια αυτά καθ' αυτά. Επιπλέον, ο ανιχνευτής νετρονίων λειτουργεί ως απαριθμητής αυτών και δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια των νετρονίων.

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 2.4, ο οποίος δεν ήταν ευθυγραμμισμένος με τη δέσμη για να αποφευχθεί η οπισθοσκέδαση των νετρονίων.



Εικόνα 2.4: Ανιχνευτής BF_3

2.3 Ολοκληρωτής ρεύματος (Current Integrator)

Σε ένα πείραμα όπου χρησιμοποιείται επιταχυντής, κρίσιμο ρόλο έχει μια μονάδα των ηλεκτρονικών η οποία καλείται ολοκληρωτής ρεύματος συντελώντας στη μέτρηση και την παρακολούθηση του ρεύματος της δέσμης. Ολοκληρώνει το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τα επιταχυνόμενα σωματίδια στο στόχο του Τριτίου, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση του συνολικού φορτίου της δέσμης που παρέχεται από τον επιταχυντή. Συγκεκριμένα, ο ολοκληρωτής ρεύματος αποτελείται από ένα αναλογικό κύκλωμα (RC) και ένα ψηφιακό. Κάθε παλμός που καταμετράται στο δεύτερο κύκλωμα, αντιστοιχεί στη φόρτιση του πυκνωτή του πρώτου κυκλώματος. Οι παλμοί αυτοί καταγράφονται έτσι ώστε να γίνεται γνωστός ο αριθμός των συνολικών παλμών κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης. Ο ολοκληρωτής, λοιπόν, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της δέσμης και για τον προσδιορισμό των σωματιδίων που αλληλεπιδρούν με τον στόχο.

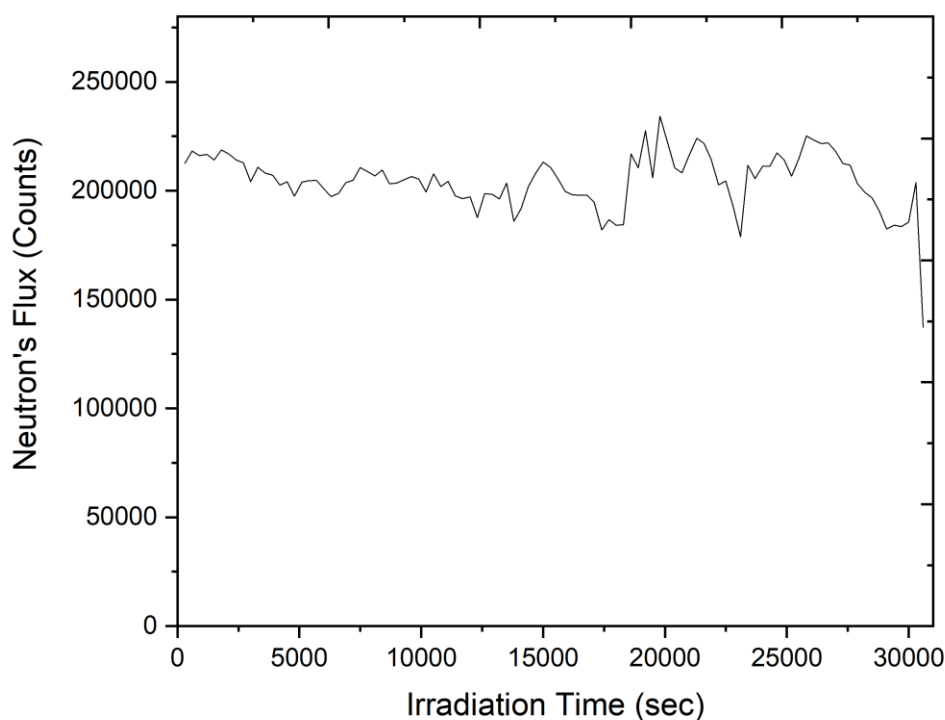
2.4 Χαρακτηριστικά ακτινοβόλησης του πειράματος

Για τον υπολογισμό των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ και $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$, που είναι ο κύριος σκοπός του πειράματος, έλαβαν χώρα δύο ακτινοβολήσεις σε δύο διαφορετικές ενέργειες νετρονίων. Για την παραγωγή των νετρονίων χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ μέσω της οποίας παράγεται μονοχρωματική δέσμη νετρονίων. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται όλες οι βασικές πληροφορίες σχετικά με τις ακτινοβολήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

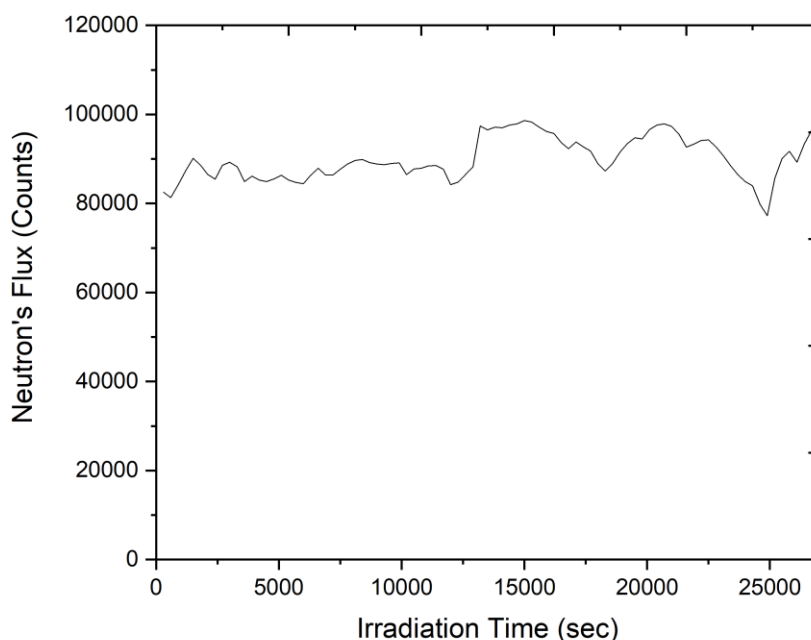
Μέρα ακτινοβόλησης	Ημερομηνία	Ενέργεια Δευτερίων (keV)	Ενέργεια νετρονίων (MeV)	Ρεύμα στο στόχο (μΑ)	Χρόνος ακτινοβόλησης
1 ^η	3/4/2023	2153	15.8	3	~ 7.5 h
2 ^η	4/4/2023	2916	18.0		~ 8 h

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά ακτινοβόλησης

Για τον έλεγχο της δέσμης χρησιμοποιήθηκε το φάσμα που λήφθηκε από τον ανιχνευτή BF_3 για τις δύο διαφορετικές ακτινοβολήσεις. Παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις της δέσμης κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης στα διαγράμματα που ακολουθούν στα Σχήματα 2.2 και 2.3, αφού η δέσμη δεν είναι εντελώς ομοιογενής, συνεπώς δεν θα ήταν δυνατό να παρατηρείται συνεχώς η ίδια παραγωγή νετρονίων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις όπως καταγράφηκαν στον απεριθμητή ανά 300 s.



Σχήμα 2.2: Διακυμάνσεις της δέσμης νετρονίων συναρτήσει του χρόνου ακτινοβόλησης για την ακτινοβόληση σε ενέργεια νετρονίων 15.8 MeV



Σχήμα 2.3: Διακυμάνσεις της δέσμης νετρονίων συναρτήσει του χρόνου ακτινοβόλησης για την ακτινοβόληση σε ενέργεια νετρονίων 15.8 MeV

Τα δύο αυτά φάσματα που λήφθηκαν θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό ενός πολύ σημαντικού παράγοντα, ονόματι f_c , ο οποίος θα περιγραφεί αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

2.5 Περιγραφή και τοποθέτηση των στόχων

Για τη μέτρηση των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ και $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ χρησιμοποιήθηκαν στόχοι φυσικού Hf . Βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός πειράματος νετρονικής ενεργοποίησης είναι να χρησιμοποιηθούν και στόχοι αναφοράς εκτός από τους προς μελέτη στόχους. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν δυο ακτινοβολήσεις, με διαφορετικούς στόχους, για τις δύο ενέργειες που ήταν επιθυμητή η μελέτη των αντιδράσεων. Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν, πριν από την ακτινοβόληση ζυγίστηκαν και μετρήθηκαν με τη χρήση παχύμετρου το πάχος και η διάμετρος του καθενός. Στον Πίνακα 2.3 αναγράφονται οι στόχοι που μελετήθηκαν μαζί με ορισμένα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την μελέτη τους.

Στόχοι Hf^{nat}					
Μέρα ακτινοβόλησης	Ενέργεια νετρονίων E_n (MeV)	Στόχος	Πάχος (mm)	Διάμετρος (mm)	Μάζα (g)
1 ⁿ	18.0	Hf_3	0.50 ± 0.01	13.03 ± 0.01	0.8292 ± 0.0001
2 ⁿ	15.8	Hf_4	0.51 ± 0.01	14.08 ± 0.01	0.9612 ± 0.0001
		Hf_2	0.54 ± 0.01	13.02 ± 0.01	0.8194 ± 0.0001

Πίνακας 2.3 (α): Χαρακτηριστικά των στόχων του Hf που χρησιμοποιήθηκαν

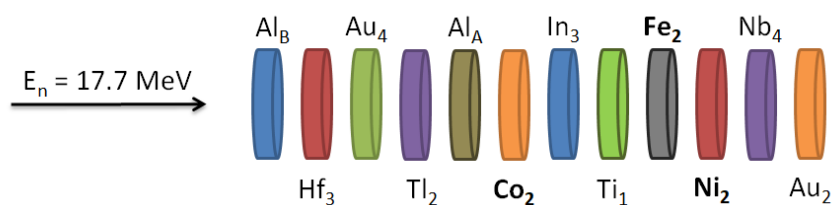
Στόχοι αναφοράς					
Μέρα ακτινοβολήσης	Ενέργεια νετρονίων E_n (MeV)	Στόχος	Πάχος (mm)	Διάμετρος (mm)	Μάζα (g)
1 ^η	18.0	Al _A	0.51 ± 0.01	14.32 ± 0.01	0.2210 ± 0.0001
		Al _B	0.51 ± 0.01	14.39 ± 0.01	0.2214 ± 0.0001
		Au ₂	0.51 ± 0.01	14.17 ± 0.01	1.5126 ± 0.0001
		Au ₄	0.29 ± 0.01	13.12 ± 0.01	0.6649 ± 0.0001
2 ^η	15.8	Al ₅	0.55 ± 0.01	13.84 ± 0.01	0.2014 ± 0.0001
		Al ₈	0.60 ± 0.01	13.48 ± 0.01	0.1923 ± 0.0001
		Au ₃	0.27 ± 0.01	13.39 ± 0.01	0.6528 ± 0.0001

Πίνακας 2.3 (β): Χαρακτηριστικά των στόχων αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν



Εικόνα 2.5: Ζύγιση στόχων (αριστερά), Παχύμετρο με το οποίο μετρήθηκαν οι στόχοι (δεξιά)

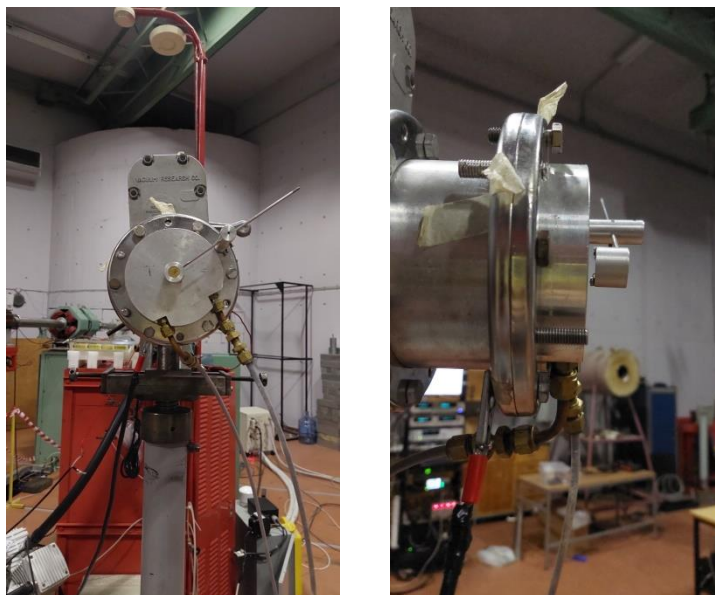
Ακολουθούν οι στόχοι που μετρήθηκαν και παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες όπως διατάχθηκαν στις δύο διαφορετικές ακτινοβολήσεις που πραγματοποιήθηκαν.



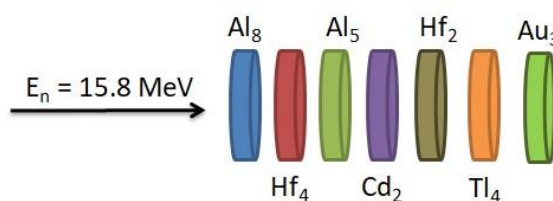
Εικόνα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των στόχων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης με ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0$ MeV

Οι στόχοι τοποθετήθηκαν σε μια μεταλλική βάση (Εικόνα 2.7) σε απόσταση ~ 1.7 cm από τη φλάντζα του Τριτίου αφού σε αυτή την απόσταση η δέσμη μπορεί να θεωρηθεί μονοενεργειακή και ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται αυξημένη ροή της δέσμης των

νετρονίων. Για την αντίδραση ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ οι στόχοι πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων γωνίας 20° ώστε να εξασφαλίζεται η μονοενεργειακότητα της δέσμης.



Εικόνα 2.7: Προετοιμασία για την ακτινοβολή (μέτρηση απόστασης), μπροστινή όψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά)



Εικόνα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των στόχων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης με ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Οι στόχοι και πάλι τοποθετήθηκαν σε μια μεταλλική βάση σε απόσταση $\sim 1.4 \text{ cm}$ σε αυτή την περίπτωση για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Και στις δύο ακτινοβολήσεις που έλαβαν χώρα υπήρχαν στόχοι οι οποίοι ξεφεύγουν από τα ερευνητικά ενδιαφέροντα αυτής της εργασίας αλλά ανταποκρίνονται στους ερευνητικούς σκοπούς άλλων εργασιών.

2.6 Ανιχνευτές ακτίνων-γ

Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές (semiconductor detectors) χρησιμοποιούνται ευρέως στην πυρηνική φυσική για την ανίχνευση ακτίνων-γ. Οι πιο κοινοί ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους ανιχνευτές είναι το Ge ή το Li , ενώ για την εφαρμογή στα πλαίσια της εργασίας, ενδιαφέρον έχουν οι ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου ($HPGe$), οι οποίοι βασίζονται στη χρήση υψηλής καθαρότητας γερμανίου ως ημιαγωγίου υλικού του ανιχνευτή. Η λειτουργία ενός ανιχνευτή στηρίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τον ενεργό όγκο του κρυστάλλου, δηλαδή με τους ατομικούς πυρήνες και τα ηλεκτρόνια του υλικού, προκαλώντας τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές μετακινούνται με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου και καταγράφονται ως

ηλεκτρικό σήμα από τον ανιχνευτή. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, είναι αναγκαίο να ψύχεται ο κρύσταλλος, με τη βοήθεια υγρού αζώτου.

2.6.1 Ηλεκτρονικά

Ένας ανιχνευτής σε συνδυασμό με συγκεκριμένες μονάδες ηλεκτρονικών δημιουργούν ένα ακριβές και αποδοτικό σύστημα για την καταγραφή και την ανάλυση του ηλεκτρονικού σήματος που εξέρχεται από τον ανιχνευτή. Η πορεία του σήματος μετά τον ανιχνευτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 και για κάθε μονάδα απεικονίζεται και το σήμα που θα παρατηρούνταν σε κάθε μια με τη χρήση παλμογράφου.

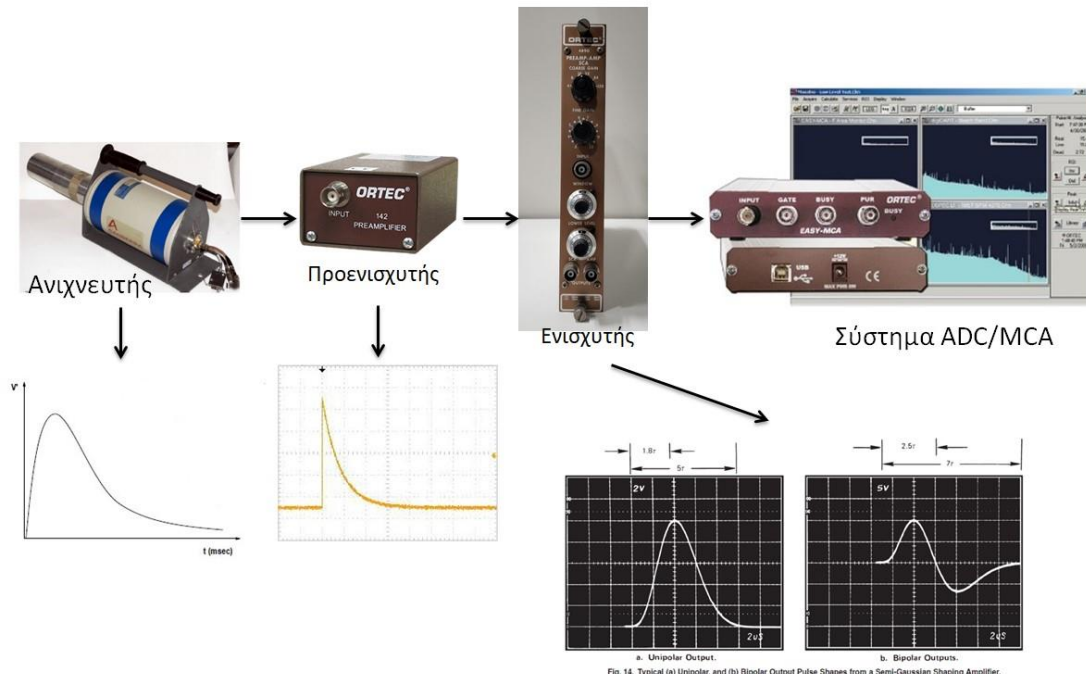


Fig. 14. Typical (a) Unipolar, and (b) Bipolar Output Pulse Shapes from a Semi-Gaussian Shaping Amplifier.

Εικόνα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση της πορείας του σήματος εξόδου από τον ανιχνευτή και τα αντίστοιχα σήματα που παρατηρούνται σε κάθε μονάδα

Ο ανιχνευτής είναι απαραίτητο να συνδεθεί με ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης που θα δημιουργήσει ηλεκτρικό πεδίο για τη συλλογή του φορτίου που θα προκληθεί από την πρόσπτωση των ακτίνων-γ στον κρύσταλλο Γερμανίου. Ακολούθως, ο ανιχνευτής συνδέεται με τον προενισχυτή. Αυτός λαμβάνει το αρχικό σήμα του ανιχνευτή το οποίο είναι πολύ ασθενές και το ενισχύει έτσι ώστε το σήμα που εξέρχεται από τον προενισχυτή να έχει ύψος παλμού της τάξης των mV . Ο προενισχυτής πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στον ανιχνευτή χρησιμοποιώντας το μικρότερο δυνατό μήκος του καλωδίου. Έπειτα, το σήμα εισέρχεται στον ενισχυτή, από τον οποίο εξέρχεται ως σήμα τάσης της τάξης των V , ενώ ταυτόχρονα περνάει από ένα κύκλωμα $CR - RC$ και μέσω διαφορίσης - ολοκλήρωσης καταλήγει να έχει τη μορφή γκαουσιανής καμπύλης. Πρακτικά, ο ενισχυτής πέρα από την ενίσχυση του σήματος είναι υπεύθυνος και για την διαμόρφωσή του. Τέλος, σειρά έχει το σύστημα ADC/MCA, το οποίο μετατρέπει το σήμα σε ψηφιακή πληροφορία ώστε να ληφθεί ένα φάσμα, το οποίο ουσιαστικά είναι το ιστόγραμμα των γεγονότων που καταγράφονται και αντιστοιχίζονται σε κανάλια.

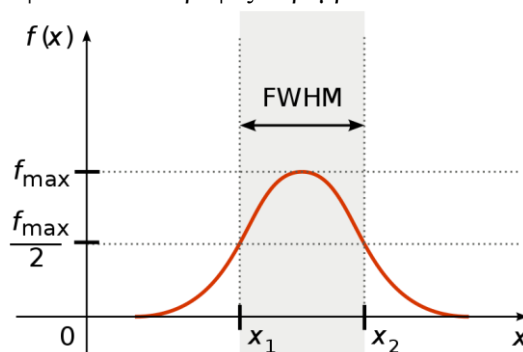
2.6.2 Βασικότερα χαρακτηριστικά ανιχνευτών

Ορισμένα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών έχουν ιδιαίτερη σημασία και στην εφαρμογή που μελετάται σε αυτή την εργασία. Τα κυριότερα είναι:

- Η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή είναι η πιθανότητα μια εκπεμπόμενη ακτίνα-γ να αλληλεπιδράσει με τον ανιχνευτή. Αυτό το μέγεθος κρίνεται πολύ σημαντικό και για την παρούσα εργασία, ενώ δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπομενα}}} \quad (2.1)$$

- Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα χαρακτηρίζει την ιδιότητα ενός ανιχνευτή να διακρίνει δύο διαφορετικές ακτίνες-γ διαφορετικών αλλά παραπλήσιων ενεργειών. Συνδέεται άμεσα με την έννοια του FWHM (Full Width Half Maximum), δηλαδή του πλάτους που έχει μια κορυφή στο μισό του μέγιστου ύψους της. Αν, λοιπόν, αυτό το μέγεθος είναι μεγάλο, συγκριτικά με την διαφορά ενεργειών δυο ακτίνων-γ που είναι επιθυμητή η ανίχνευσή τους, τότε οι κορυφές αυτές κρίνονται μη ανιχνεύσιμες από τον ανιχνευτή αυτό, αφού οι δύο κορυφές παρεμβάλλονται.

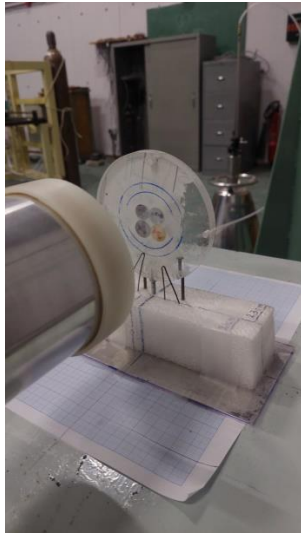


Σχήμα 2.5: Απεικόνιση του FWHM [9]

- Ο νεκρός χρόνος ερμηνεύεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να ανακάμψει ένας ανιχνευτής από την καταγραφή ενός φωτονίου και να καταστεί έτοιμος για την καταγραφή του επόμενου.

2.6.3 Μέτρηση ακτινοβολημένων στόχων

Έπειτα από την ακτινοβόληση των στόχων, αυτοί τοποθετήθηκαν στους δύο ανιχνευτές που ήταν διαθέσιμοι για τη μέτρησή τους. Λόγω του μεγάλου αριθμού των στόχων και του μικρού αριθμού των ανιχνευτών τοποθετήθηκαν πολλαπλοί στόχοι σε κάθε ανιχνευτή. Αρχικά, είχε πραγματοποιηθεί η μέτρηση των 18.0 MeV, οπότε παρουσιάζονται οι στόχοι και πληροφορίες σχετικά με τη διάταξή τους στους δύο ανιχνευτές (A και B). Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε βάσεις σε απόσταση 10 cm από τους ανιχνευτές HPGe (80%). Αυτά που ακτινοβολήθηκαν και μετρήθηκαν ήταν περισσότερα από αυτά που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, αφού έχουν επιλεγθεί και παρουσιαστεί μόνο όσοι ήταν απαραίτητοι για την εξαγωγή της ενεργού διατομής των ζητούμενων αντιδράσεων, ενώ οι υπόλοιποι στόχοι αφορούν τα ερευνητικά ενδιαφέροντα άλλων εργασιών.



Εικόνα 2.10: Διάταξη της μέτρησης της αποδιέγερσης των στόχων που ακτινοβολήθηκαν με ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$ στον ανιχνευτή A HPGe (80%) (αριστερά) και στον ανιχνευτή B HPGe (80%) (δεξιά)

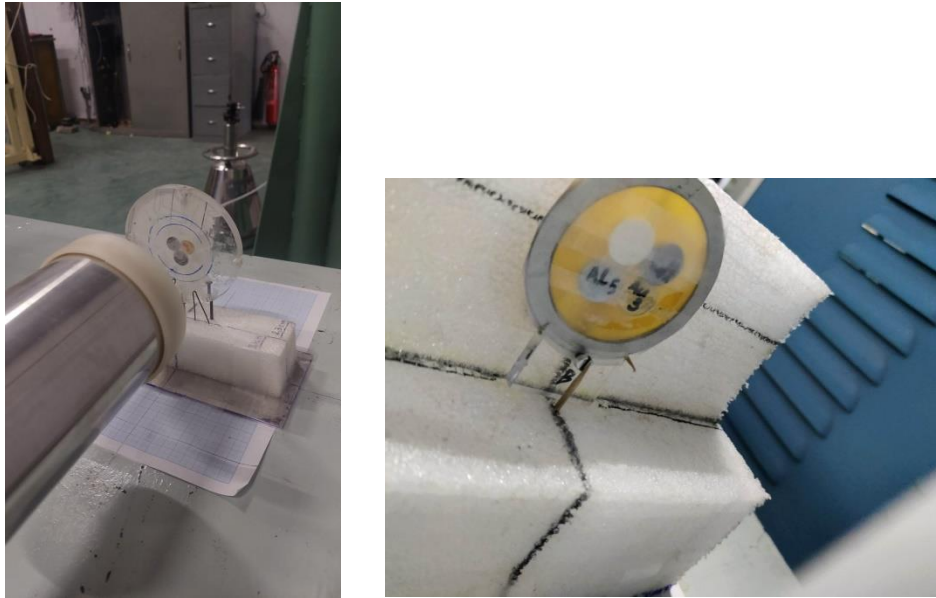
Μετρήσεις βραχύβιων ισοτόπων		Μετρήσεις μακρόβιων ισοτόπων	
Ανιχνευτής	Στόχος	Ανιχνευτής	Στόχος
A	Hf ₃	A	Au ₄
	Al _A		Hf ₃
B	Al _B	B	Au ₂

Πίνακας 2.4: Διάταξη των στόχων που ακτινοβολήθηκαν με ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$ σε κάθε ανιχνευτή

Ακολούθησε η ακτινοβολήση με ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$, στην οποία εκτός από τους στόχους αναφοράς οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.5, και με τον τρόπο όπου διατάχθηκαν στους ανιχνευτές A και B, ακτινοβολήθηκαν και δύο στόχοι φυσικού Hf. Ο ένας μετρήθηκε μετά το τέλος της ακτινοβολήσης στον ανιχνευτή A, ενώ ο άλλος στόχος μετρήθηκε σε έναν ανιχνευτή Ge απόδοσης 50%, στο Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) ο οποίος διαθέτει και θωράκιση.

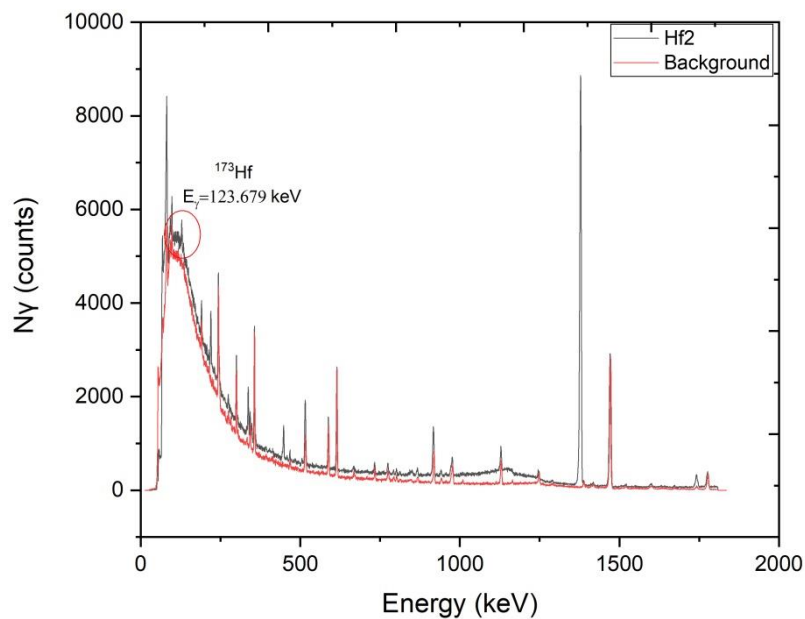
Μετρήσεις βραχύβιων ισοτόπων		Μετρήσεις μακρόβιων ισοτόπων	
Ανιχνευτής	Στόχος	Ανιχνευτής	Στόχος
A	Hf ₂	B	Hf ₄
	Al ₈		Hf ₂
B	Al ₅		Au ₃
ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.	Hf ₄		

Πίνακας 2.5: Διάταξη των στόχων που ακτινοβολήθηκαν με ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ σε κάθε ανιχνευτή



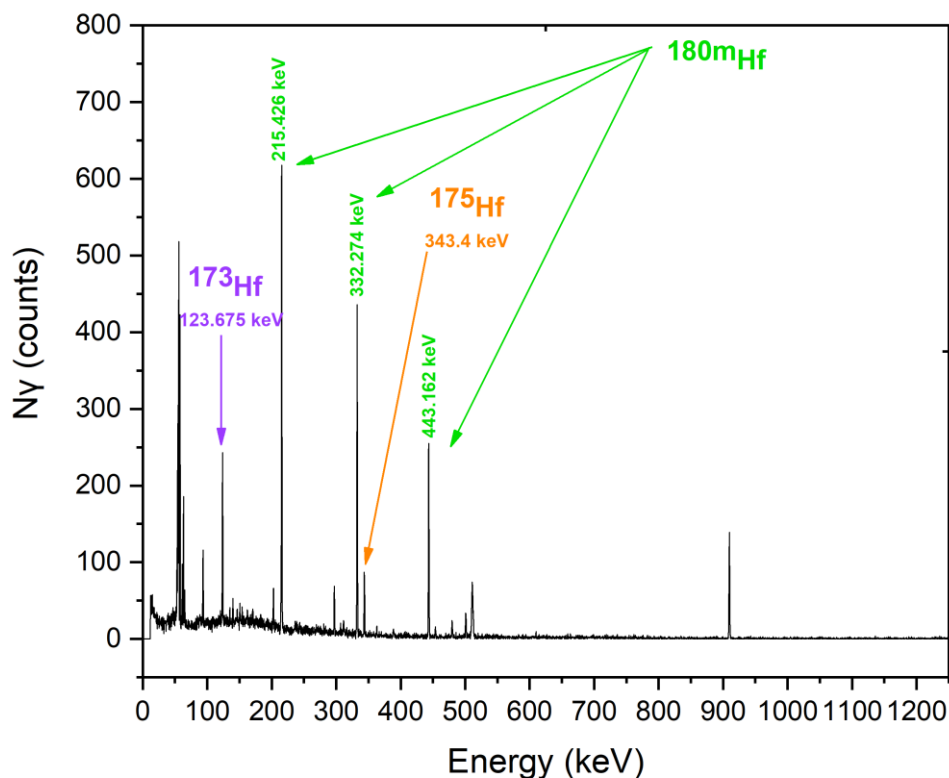
Εικόνα 2.11: Διάταξη της μέτρησης της αποδιέγερσης των στόχων που ακτινοβολήθηκαν με ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ στον ανιχνευτή A HPGe (80%) (αριστερά) και στον ανιχνευτή B HPGe (80%) (δεξιά)

Παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα όπως λήφθηκε από τον ανιχνευτή A και από την ακτινοβολία των $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ μαζί με ένα φάσμα του υποβάθρου. Η λήψη των φασμάτων υποβάθρου είναι απαραίτητη για τέτοιου είδους μετρήσεις καθώς υπάρχει φυσική ραδιενέργεια περιβάλλοντος, η οποία προέρχεται από ραδιενεργά ισότοπα, που ανήκουν στις ραδιενεργές σειρές, βρίσκονται στο έδαφος, στα βραχώδη υποστρώματα κ.α.



Σχήμα 2.6: Φάσμα ανιχνευτή A, στον οποίο υπήρχε ο στόχος Hf_2 και άλλοι στόχοι και φάσμα υποβάθρου από τον ίδιο ανιχνευτή

Ακολουθεί ένα ακόμα φάσμα, το οποίο λήφθηκε από τον ανιχνευτή του ΕΛ.Κ.Ε.Θ.Ε. και στο οποίο παρουσιάζονται όλες οι βασικές ακτίνες-γ που θα μελετηθούν.



Σχήμα 2.7: Φάσμα ανιχνευτή ΕΛ.Κ.Ε.Θ.Ε. στο οποίο παρουσιάζονται οι ακτίνες-γ προς μελέτη

Όλα τα φάσματα που λήφθηκαν επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα ανάλυσης φασμάτων tv, ώστε να εξαχθούν τα γεγονότα των φωτοκορυφών που αντιστοιχούν στις ακτίνες-γ των προς μελέτη ισοτόπων.

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται όλες οι αντιδράσεις των ισοτόπων του *Hf* που μελετήθηκαν ώστε να εξαχθεί η ενεργός διατομή τους καθώς και οι αντιδράσεις αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της μεθόδου της νετρονικής ενεργοποίησης.

Αντιδράσεις ισοτόπων Hf			
Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής	Ενέργεια E_γ (keV)	Πιθανότητα I_γ (%)
$^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$	23.6 h	123.675	83
$^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$	70 d	343.4	84
$^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$	5.53 h	332.274	94
		443.162	82
		215.426	81.6
Αντιδράσεις αναφοράς			
Αντίδραση	Χρόνος ημιζωής	Ενέργεια E_γ (keV)	Πιθανότητα I_γ (%)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	14.997 h	1368.626	99.9936
$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	6.1669 d	355.73	87
		333.03	22.9

Πίνακας 2.6: Αντιδράσεις που μελετήθηκαν

Κεφάλαιο 3

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων που λήφθηκαν ώστε να υπολογιστεί η ενεργός διατομή των αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο υπολογισμός αυτός προκύπτει ακολουθώντας τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης. Παρουσιάζεται, παρακάτω, η περιγραφή των μετρήσεων των στόχων που ακτινοβολήθηκαν όπως λήφθηκαν από τους δύο ανιχνευτές όπως η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής και οι διάφοροι διορθωτικοί παράγοντες που είναι απαραίτητοι για τον σκοπό αυτό.

3.1 Ενεργός διατομή αντιδράσεων

Η ενεργός διατομή μιας αντίδρασης προκύπτει, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, από τη σχέση (1.1):

$$\sigma = \frac{N_p}{N_t} \cdot \frac{1}{\Phi} \quad (3.1)$$

όπου N_p : το πλήθος των πυρήνων του προϊόντος-ισοτόπου που παράχθηκαν κατά την ακτινοβόληση

N_t : το πλήθος των αρχικών πυρήνων του στόχου που ακτινοβολήθηκε

Φ : η συνολική ροή των νετρονίων που προσέπεσε στο στόχο κατά την ακτινοβόληση

3.2 Προσδιορισμός του όρου N_t

Ο όρος N_t , όπως έχει ήδη αναφερθεί εκφράζει τον αριθμό των πυρήνων του στόχου που ακτινοβολήθηκαν. Επομένως, υποδηλώνει το αριθμό των πυρήνων του ^{174}Hf ή ^{176}Hf ή ^{180}Hf που υπήρχαν στο στόχο του ^{nat}Hf που ακτινοβολήθηκε. Το πλήθος N_t δίνεται από τη σχέση (1.2) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1, όμως, για την περίπτωση του Hf, όπου τα ισότοπα του περιέχονται στο στόχο σε συγκεκριμένες αναλογίες θα πρέπει για κάθε ισότοπο να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$N_t = \frac{m \cdot N_A \cdot \alpha}{A} \quad (3.2)$$

όπου m : η μάζα του στόχου

N_A : ο αριθμός Avogadro ($6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

α : η ισοτοπική αναλογία

A : το μοριακό βάρος

Η σχέση (4.2) θα χρησιμοποιηθεί για τα ισότοπα του Hf, ενώ οι στόχοι αναφοράς ήταν μονοϊσοτοπικοί οπότε σε αυτή την περίπτωση $\alpha = 1$.

3.3 Προσδιορισμός του όρου N_p

Ο όρος N_p εκφράζει τον αριθμό των πυρήνων που παράχθηκαν κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης από την κάθε αντίδραση που μελετάται, δηλαδή το πλήθος των πυρήνων ^{173}Hf , ^{175}Hf και $^{180\text{m}}\text{Hf}$. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_p = \frac{N_\gamma}{\varepsilon \cdot F \cdot I_\gamma \cdot D \cdot f_c} \quad (3.3)$$

όπου,

N_γ : ο αριθμός των γεγονότων της κάθε κορυφής συγκεκριμένης ακτίνας- γ που μελετάται όπως προκύπτει από το πρόγραμμα ανάλυσης φασμάτων, ολοκληρώνοντας την κάθε κορυφή

ε : η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή για την ενέργεια της μετρούμενης ακτίνας- γ

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

I_γ : η ένταση της κάθε ακτίνας- γ

D : διορθωτικός παράγοντας σχετικός με την αποδιέγερση των πυρήνων που παράγονται, από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι και το τέλος της μέτρησης του στόχου

f_c : διορθωτικός παράγοντας μέσω του οποίου υπολογίζεται το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και την αποδιέγερση των πυρήνων κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης.

3.3.1 Απόδοση ανιχνευτών HPGe

Οι ακτίνες- γ που παράχθηκαν από την αποδιέγερση των ενεργοποιημένων πυρήνων, μετά το τέλος της ακτινοβόλησης, ανιχνεύτηκαν με δύο ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe). Και οι δύο ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν σχετική ανιχνευτική απόδοση 80%.

Από τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός ανιχνευτή έχει σημασία, ειδικά στην εφαρμογή που μελετάται, ο υπολογισμός της απόλυτης απόδοσης του κάθε ανιχνευτή. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκε μια σημειακή πηγή Ευρωπαϊού (^{152}Eu) με χρόνο ημιζωής $t_{1/2} = 13.517 \text{ y}$ και σταθερά αποδιέγερσης $\lambda = 1.6246 \cdot 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$. Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε την 1/1/2011 και είχε αρχική ενεργότητα $R_o = (2.17 \pm 0.03) \text{ Bq}$. Για τη λήψη των φασμάτων τοποθετήθηκε η πηγή σε απόσταση 10 cm από το παράθυρο του κάθε ανιχνευτή. Σε κάθε ένα από τους δύο ανιχνευτές λήφθηκαν φάσματα ώστε να εξαχθεί η απόδοση του κάθε ανιχνευτή σε δύο διαφορετικούς χρόνους. Η πρώτη μέτρηση έγινε πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις των ακτινοβολημένων στόχων και η δεύτερη μέρα έλαβε χώρα μια βδομάδα αργότερα ώστε να μελετηθούν ορισμένα μακρόβια ισότοπα, στο διάστημα αυτό, όμως, που δεν χρησιμοποιούνταν κατέβηκε η τάση των ανιχνευτών και ανέβηκε ξανά έτσι ώστε να καταστεί απαραίτητο να ληφθεί ξανά μέτρηση για την απόδοση του κάθε ανιχνευτή και να ελεγχθεί η απόκρισή τους.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης είναι απαραίτητη η ανάλυση των φασμάτων που λήφθηκαν από τον κάθε ανιχνευτή, με το πρόγραμμα tv, καθώς και ο υπολογισμός της ενεργότητας της πηγής την χρονική στιγμή της μέτρησης. Η ενεργότητα προκύπτει ως εξής:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N_o \cdot e^{-\lambda t} \Leftrightarrow -\frac{dN(t)}{dt} = \frac{dN(0)}{dt} \cdot e^{-\lambda t} \Leftrightarrow R(t) = R_o \cdot e^{-\lambda t} \quad (3.4)$$

Υπάρχουν ορισμένοι χαρακτηριστικοί χρόνοι για ένα φάσμα, όπου live time είναι ο πραγματικός χρόνος λήψης φάσματος, χωρίς το νεκρό χρόνο που προσθέτουν τα ηλεκτρονικά, ενώ real time είναι ο χρόνος λήψης του φάσματος. Ο νεκρός χρόνος προκύπτει από τη σχέση

$$t_d = \frac{\text{real time}}{\text{live time}} \quad (3.5)$$

Με το νεκρό χρόνο διορθώνονται τα γεγονότα που εκτιμώνται σε κάθε φωτοκορυφή έτσι ώστε αυτά να αντανakλούν τα πραγματικά γεγονότα που θα αναμένονταν να μετρηθούν, αντισταθμίζοντας τις περιόδους μη απόκρισης του ανιχνευτή. Αυτή η διόρθωση διασφαλίζει ότι τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις μετρήσεις ακτίνων-γ είναι πιο ακριβή και αξιόπιστα για μετέπειτα ανάλυση και ερμηνεία.

Η απόδοση υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.1) όπου $N_{\text{εκπεμπόμενα}} = (\text{live time}) \cdot R(t) \cdot I_{\gamma}$. Άρα, ο υπολογισμός της απόδοσης προκύπτει από τη σχέση

$$\varepsilon = \frac{N_{\gamma}}{(\text{live time}) \cdot R(t) \cdot I_{\gamma}} \quad (3.6)$$

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται όλα αυτά τα μεγέθη που περιγράφηκαν και είναι σημαντικά για την ανάλυση ενός φάσματος.

1ος κύκλος μετρήσεων: 3/4/2023				
Ανιχνευτής	Live time (sec)	Real time (sec)	Dead time (sec)	Ενεργότητα την ημέρα λήψης του φάσματος (Bq)
A ₁	885.996	900.303	1.016	$(1.16 \pm 0.02) \cdot 10^5$
B ₁	1182.142	1200	1.015	$(1.16 \pm 0.02) \cdot 10^5$
2ος κύκλος μετρήσεων: 12/4/2023				
Ανιχνευτής	Live time(sec)	Real time (sec)	Dead time (sec)	Ενεργότητα την ημέρα λήψης του φάσματος (Bq)
A ₂	883.222	900	1.019	$(1.16 \pm 0.02) \cdot 10^5$
B ₂	881.516	900	1.021	$(1.16 \pm 0.02) \cdot 10^5$
Μέτρηση στο ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ: 4/4/2023				
Ανιχνευτής	Live time(sec)	Real time (sec)	Dead time (sec)	Ενεργότητα την ημέρα λήψης του φάσματος (Bq)
ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ	673.74	600	0.109	$(1.16 \pm 0.02) \cdot 10^5$

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικοί χρόνοι σε κάθε ανιχνευτή και η ενεργότητα της πηγής στο χρόνο της μέτρησης του κάθε φάσματος για τις δύο μετρήσεις που λήφθηκαν στον κάθε ανιχνευτή. (Ο δείκτης 1 αναφέρεται στις πρώτες μετρήσεις, ενώ ο δείκτης 2 αναφέρεται στις μετρήσεις που λήφθηκαν τη δεύτερη βδομάδα στους ανιχνευτές A και B)

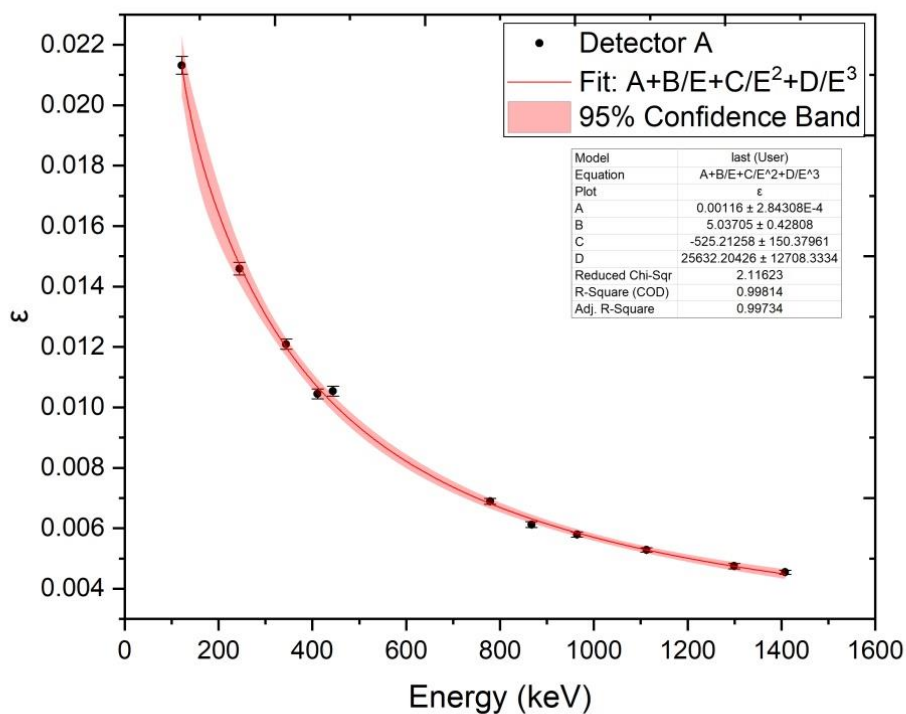
Με την εφαρμογή της σχέσης (3.6) για κάθε ακτίνα-γ προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας 3.2 για τον ανιχνευτή A για την πρώτη σειρά μετρήσεων που λήφθηκε με την σημειακή πηγή του ^{152}Eu , ενώ στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την απόδοση του ανιχνευτή, συναρτήσει της ενέργειας. Να τονιστεί ότι στο διάγραμμα της

απόδοσης, έγινε προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων με την σχέση που προτείνεται από την Διεθνή Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency, I.A.E.A.), η οποία είναι:

$$\varepsilon = A + \frac{B}{E} + \frac{C}{E^2} + \frac{D}{E^3} \quad (3.7)$$

Ενέργεια κορυφών (keV)	Πιθανότητα I _γ (%)	N _γ (counts)	Απόδοση
121.7817	0.2853	613785 ± 811	0.02132 ± 0.00030
244.6974	0.0755	111194 ± 367	0.01459 ± 0.00021
344.2785	0.2659	324468 ± 583	0.01209 ± 0.00017
411.1165	0.02237	23585 ± 184	0.01044 ± 0.00017
443.9606	0.02827	30064 ± 199	0.01054 ± 0.00016
778.9045	0.1293	89969 ± 320	0.006895 ± 0.000098
867.38	0.0423	26117 ± 199	0.006118 ± 0.000097
964.057	0.1451	84820 ± 305	0.005792 ± 0.000083
1112.076	0.1367	72883 ± 286	0.005283 ± 0.000076
1299.142	0.01633	7828 ± 101	0.004750 ± 0.000090
1408.013	0.2087	95705 ± 311	0.004544 ± 0.000065

Πίνακας 3.2: Ανάλυση των κορυφών για κάθε ακτίνα-γ και εύρεση απόδοσης ανιχνευτή A (80%), στον πρώτο κύκλο μετρήσεων με σημειακή πηγή ¹⁵²Eu

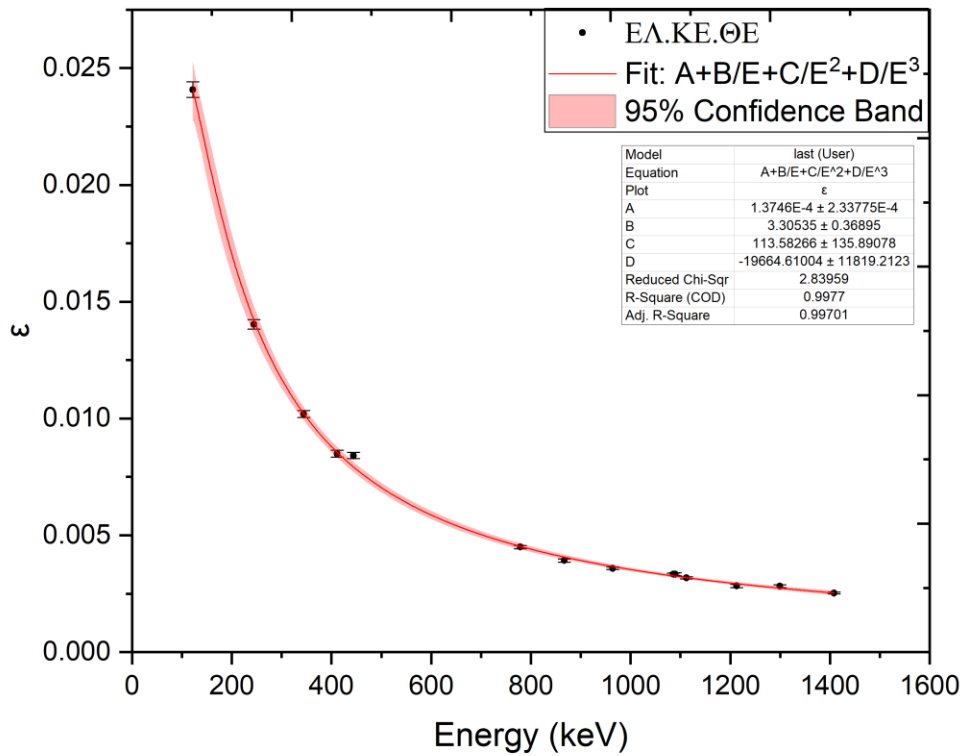


Σχήμα 3.1: Απόλυτη απόδοση ανιχνευτή A, συναρτήσει της ενέργειας, για την πρώτη μέτρηση που λήφθηκε στον ανιχνευτή

Αντίστοιχα, υλοποιήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία και για τον ανιχνευτή B, καθώς και για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων, δηλαδή μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μια βδομάδα αργότερα, για τους ίδιους ανιχνευτές. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα από τη μέτρηση της απόδοσης του ανιχνευτή του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ ο οποίος παρουσιάζει διαφορά χαρακτηριστικά από αυτά των ανιχνευτών Α και Β.

Ενέργεια κορυφών (keV)	Πιθανότητα I _γ (%)	N _γ (counts)	Απόδοση
121.7817	0.2853	424811 ± 658	0.02407 ± 0.00033
244.6974	0.0755	65474 ± 266	0.01402 ± 0.00020
344.2785	0.2659	167579 ± 414	0.01019 ± 0.00014
411.1165	0.02237	11748 ± 117	0.00849 ± 0.00014
443.9606	0.02827	14715 ± 131	0.00842 ± 0.00014
778.9045	0.1293	35963 ± 195	0.004498 ± 0.000067
867.38	0.0423	10268 ± 111	0.003925 ± 0.000069
964.057	0.1451	32175 ± 183	0.003586 ± 0.000054
1085.837	0.1011	20854 ± 147	0.003336 ± 0.000052
1089.737	0.01734	3576 ± 65	0.003335 ± 0.000061
1112.076	0.1367	26853 ± 168	0.003177 ± 0.000048
1212.948	0.01415	2478 ± 57	0.002832 ± 0.000065
1299.142	0.01633	2850 ± 56	0.003822 ± 0.000055
1408.013	0.2087	32697 ± 181	0.002534 ± 0.000038

Πίνακας 3.3: Ανάλυση των κορυφών για κάθε ακτίνα-γ και εύρεση απόδοσης ανιχνευτή του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ (50%), με σημειακή πηγή ¹⁵²Eu



Σχήμα 3.2: Απόλυτη απόδοση ανιχνευτή του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ, συναρτήσει της ενέργειας

3.3.2 Διορθωτικός παράγοντας F

Ο παράγοντας F εκφράζει την ενδοαπορρόφηση που έχει υποστεί η δέσμη, από τον ίδιο τον στόχο και την πειραματική διάταξη. Εξαρτάται από την εκτεταμένη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης καθώς και από το υλικό του κάθε στόχου. Για τις ανάγκες του υπολογισμού του, λοιπόν, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MCNP5 για κάθε ακτίνα-γ όλων των στόχων που μελετώνται στην παρούσα εργασία τα οποία αποτελέσματα παρουσιάζονται για τον κάθε στόχο στους επόμενους πίνακες, από τον Πίνακα 3.5 έως τον Πίνακα 3.14.

3.3.3 Διορθωτικός παράγοντας D

Μέσω του συγκεκριμένου παράγοντα διορθώνεται ο αρχικός πληθυσμός των παραγόμενων πυρήνων από μια ορισμένη αντίδραση λόγω της αποδιέγερσής τους κατά τη διάρκεια της αναμονής από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης. Αυτός ο διορθωτικός παράγοντας υπολογίζεται από την σχέση

$$D = e^{-\lambda \cdot t_w} - e^{-\lambda \cdot t_m} \quad (3.8)$$

όπου,

t_w : ο χρόνος αναμονής από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι την αρχή της μέτρησης

t_m : ο χρόνος από το τέλος της ακτινοβόλησης έως το τέλος της μέτρησης

λ : σταθερά αποδιέγερσης

3.3.4 Διορθωτικός παράγοντας f_c

Με τον παράγοντα f_c διορθώνεται ο αριθμός των πυρήνων που παράγονται κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης σε σχέση με τον αριθμό των αποδιεγέρσεων του ίδιου πυρήνα που πραγματοποιούνται στον ίδιο χρόνο. Ο παράγοντας f_c υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_c = \frac{\int_0^{t_B} e^{\lambda \cdot t} \cdot f(t) dt}{\int_0^{t_B} f(t) dt} \cdot e^{-\lambda \cdot t_B} \quad (3.9)$$

όπου,

λ : η σταθερά αποδιέγερσης του εκάστοτε ισοτόπου,

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

t_B : η χρονική διάρκεια της ακτινοβόλησης

Για τον υπολογισμό του f_c , χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που λήφθηκαν από τον ανιχνευτή BF_3 , μέσω του οποίου ελεγχόταν η δέσμη κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης. Τα ολοκληρώματα στην σχέση (3.9), υπολογίζονται αριθμητικά, από τα αντίστοιχα αθροίσματα. Κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης ανά 5 λεπτά λαμβανόταν ένα φάσμα από τον ανιχνευτή νετρονίων. Από κάθε ένα από αυτά τα φάσματα μπορεί να ληφθεί η ροή των νετρονίων της δέσμης, δηλαδή το $f(t)$, και κατά συνέπεια να υπολογιστούν ο αριθμητής και ο παρονομαστής κάθε 5λεπτου. Τελικά, αθροίζονται όλες οι τιμές του αριθμητή μεταξύ τους και όλες οι τιμές του παρονομαστή, υπολογίζεται ο λόγος των δύο αθροισμάτων και αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση προκύπτει ο διορθωτικός παράγοντας f_c .

Τα διαγράμματα των διακυμάνσεων της δέσμης των νετρονίων, σύμφωνα με τα οποία γίνεται ο παραπάνω υπολογισμός, παρουσιάζονται παραπάνω στο Κεφάλαιο 2, στα σχήματα (2.2) και (2.3) για ενέργειες νετρονίων 15.8 MeV και 18.0 MeV αντίστοιχα.

3.4 Προσδιορισμός της ροής των νετρονίων Φ

Η γνώση της ροής στο στόχο του Hf είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στόχοι αναφοράς, για τους οποίους είναι έμπιστες οι τιμές των ενεργών διατομών των αντιδράσεων αναφοράς τους, ώστε να χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.1) και να επιλυθεί ως προς τη ροή Φ . Επομένως, η πειραματική ροή στους στόχους αναφοράς προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma^r = \frac{N_p^r}{N_t^r} \cdot \frac{1}{\Phi_r} \iff \Phi_r = \frac{N_p^r}{N_t^r} \cdot \frac{1}{\sigma^r} \quad (3.10)$$

Γνωρίζοντας τις ροές των στόχων αναφοράς οι οποίες προσδιορίζονται πειραματικά υπολογίζεται και η ροή των στόχων του Hf με τη βοήθεια του προγράμματος MCNP6 μέσω του οποίου προσομοιώνεται η ακτινοβόληση των στόχων, χρησιμοποιώντας σαν αρχική ροή νετρονίων, την πειραματική ροή ενός επιλεγμένου στόχου αναφοράς.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις των δύο ακτινοβολήσεων που διεξήχθησαν όπου και στις δύο περιπτώσεις προσομοιώθηκε η ακριβής διάταξη των στόχων στη βάση στην οποία τοποθετήθηκαν και η γεωμετρία της φλάντζας στην οποία υπάρχει το T , όπου

παράγονται τα νετρόνια. Ο κύριος λόγος για τον οποίο εκτελείται προσομοίωση είναι για να προσδιοριστεί η ροή στους στόχους του Hf , για τους οποίους δεν μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, καθώς αποτελεί ενός είδους επαλήθευση αφού η προσομοιωμένη ροή κάθε στόχου αναφοράς προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές εντός σφάλματος έχει επιτευχθεί η ορθή περιγραφή της ροής των νετρονίων.

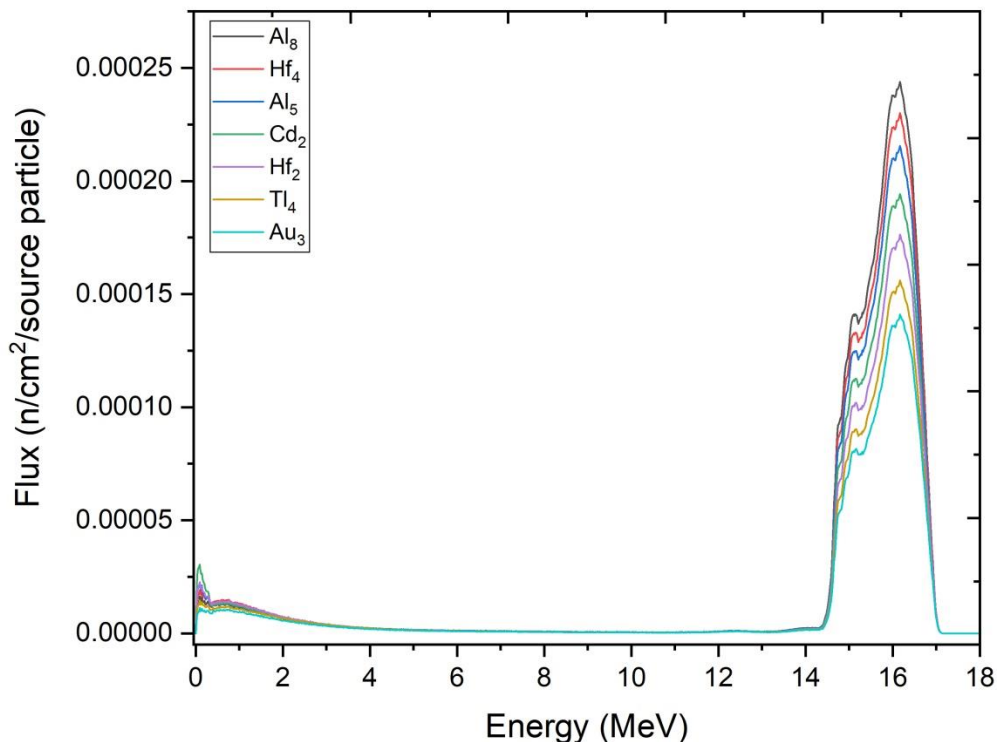
3.4.1 Προσδιορισμός της ροής των νετρονίων στα $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Από την προσομοίωση της ακτινοβολήσης σε ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ προκύπτει η ροή των νετρονίων ανά cm^2 ανά νετρόνιο που εκπέμπεται από την πηγή. Έτσι, προκύπτει η ροή σε κάθε στόχο από την προσομοίωση, συναρτήσει της ενέργειας.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3, η ροή των νετρονίων μειώνεται προχωρώντας από τον πρώτο προς τους τελευταίους στόχους.

Από την προσομοίωση μπορεί να εξαχθεί η μέση ενέργεια της ροής καθώς και το σφάλμα της. Στην προκειμένη περίπτωση υπολογίζεται η μέση ροή σε κάθε στόχο ολοκληρώνοντας, ουσιαστικά, τη γραφική παράσταση της ροής συναρτήσει της ενέργειας για κάθε στόχο σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{i+1} - E_i) \cdot \Phi_{E_i}}{2} \quad (3.11)$$



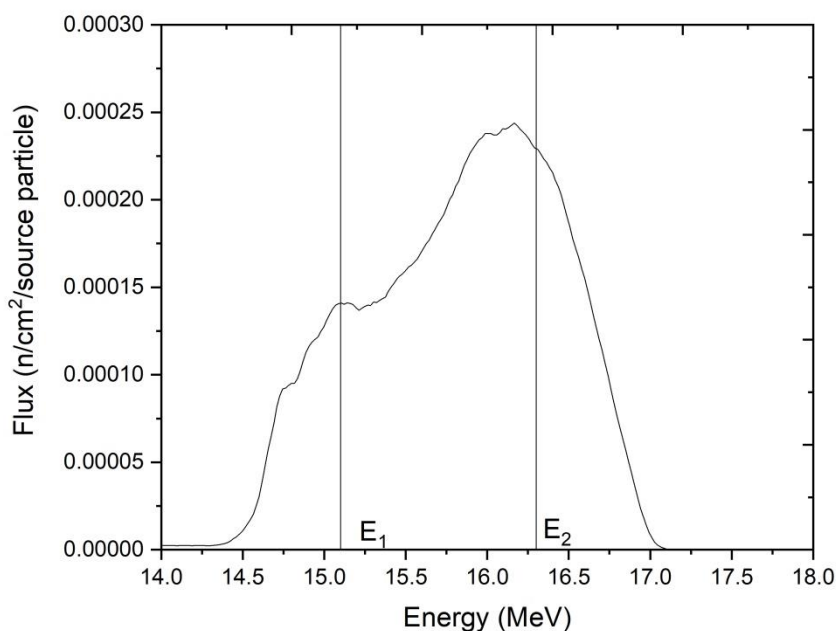
Σχήμα 3.3: Ροή νετρονίων σε όλους τους στόχους για $E_n = 15.8 \text{ MeV}$, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις μέσω του κώδικα MCNP6.

Αφού υπολογιστεί η μέση ροή από την παραπάνω σχέση, από τη γραφική μπορεί να καθοριστεί σε ποια ενέργεια αντιστοιχεί η μέση ροή και έτσι υπολογίζεται η ενέργεια της ροής των νετρονίων. Για το σφάλμα της ενέργειας, έχοντας επίπεδο εμπιστοσύνης 68.32%, επιλέγονται την περιοχή μεταξύ δύο τιμών E_1 και E_2 , η οποία περιοχή αντιστοιχεί στο 68.32%. Από την περιοχή ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές εξάγεται το σφάλμα της ενέργειας από τη σχέση:

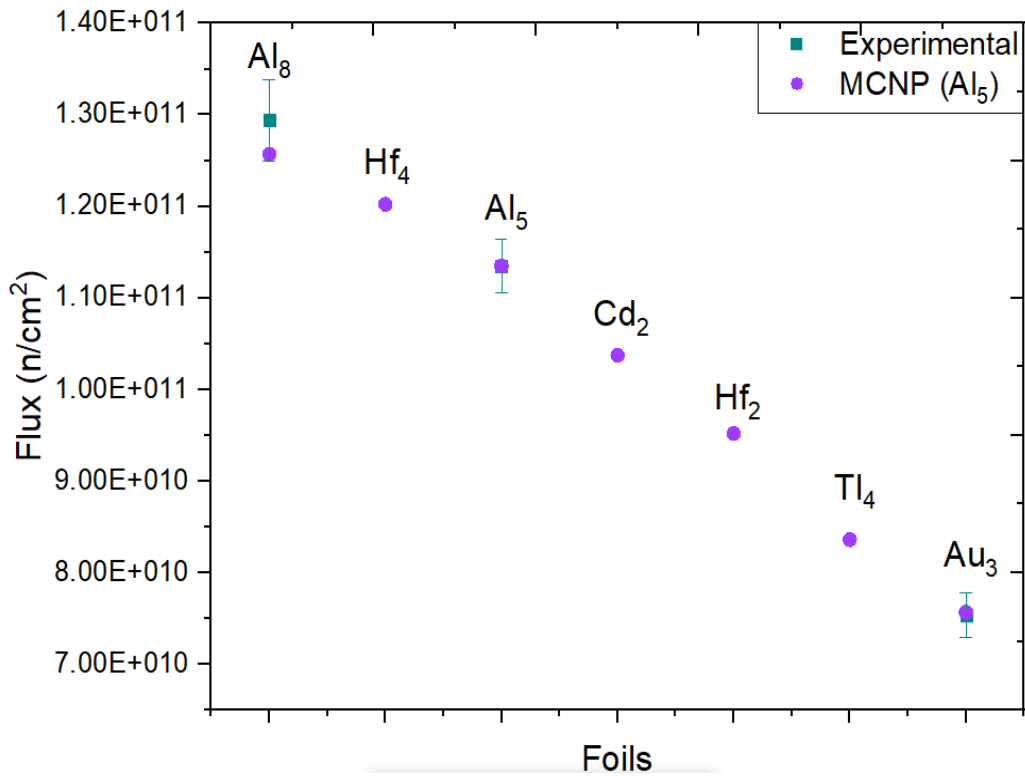
$$\delta E = \frac{(E_2 - E_1)}{2} \quad (3.12)$$

Με αυτό τον τρόπο, λοιπόν προέκυψε ότι η ενέργεια των νετρονίων ήταν $E_n = (15.8 \pm 0.4) \text{ MeV}$. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε δίνεται και σχηματικά στο Σχήμα 3.4.

Χρησιμοποιώντας, ως αναφορά την πειραματική ροή που υπολογίστηκε για τον στόχο Al_5 , υπολογίζεται μέσω της προσομοίωσης η ροή στους υπόλοιπους στόχους που ακτινοβολήθηκαν.



Σχήμα 3.4: Γραφική απεικόνιση υπολογισμού σφάλματος μέσης ενέργειας

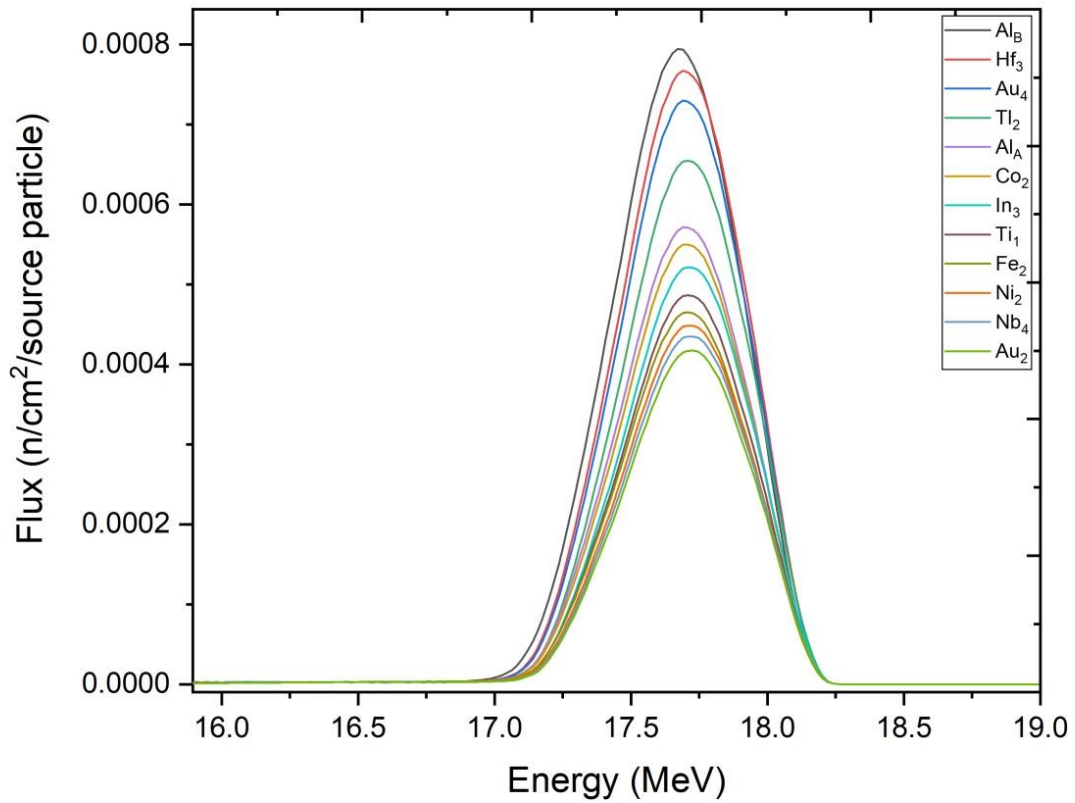


Σχήμα 3.5: Γραφική απεικόνιση των προσομοιωμένων τιμών των ροών των στόχων σε σύγκριση με τις πειραματικές τιμές αυτών στα 15.8 MeV

3.4.2 Προσδιορισμός της ροής των νετρονίων στα $E_n = 18.0 \text{ MeV}$

Σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκε και πάλι προσομοίωση μέσω του MCNP6. Η κατανομή της ροής των νετρονίων μπορεί να προσαρμοστεί από την Κανονική Κατανομή. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται άμεσα, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Origin, η μέση ενέργεια της ροής του κάθε στόχου καθώς και το σφάλμα της το οποίο ισούται με

$$\delta E = \frac{FWHM}{2} \quad (3.13)$$

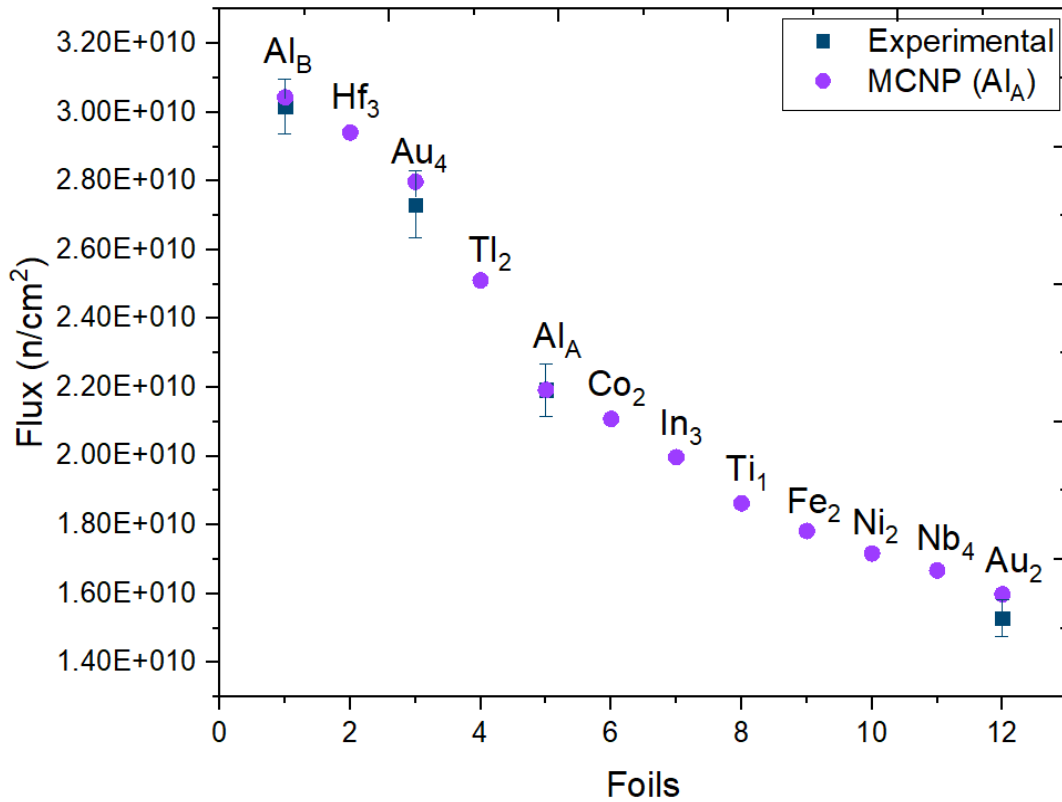


Σχήμα 3.6: Ροή νετρονίων σε όλους τους στόχους για $E_n = 18.0 \text{ MeV}$, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις μέσω του κώδικα MCNP6.

Προκύπτει ότι $E_n = (18.0 \pm 0.3) \text{ MeV}$.

Η ροή σε όλους τους στόχους που ακτινοβολήθηκαν, έχοντας ως στόχο αναφοράς τον στόχο του Al_A παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.

Σε αυτή την ακτινοβόληση, υπήρχαν ορισμένοι στόχοι οι οποίοι δεν έχουν ενδιαφέρον για αυτή την εργασία, αλλά εντάσσονται θεματικά σε άλλες, οπότε υπολογίστηκαν οι πειραματικές ροές μόνο στους στόχους που ήταν απαραίτητοι για τη μελέτη των αντιδράσεων του Hf .



Σχήμα 3.7: Γραφική απεικόνιση των προσομοιωμένων τιμών των ροών των στόχων σε σύγκριση με τις πειραματικές τιμές αυτών στα 18.0 MeV

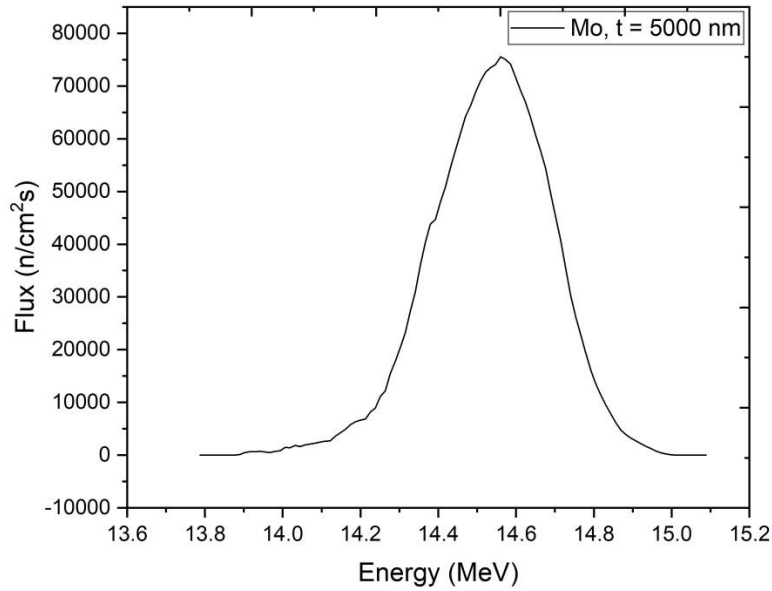
Οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις στην κατανομή των νετρονίων, σχήματα (3.3) και (3.6) μπορούν να αποδοθούν σε αρκετούς παράγοντες. Η διαφορά στην απώλεια ενέργειας μεταξύ των δύο ενεργειών των δευτερίων, $E_d = 2153 \text{ keV}$, από τα οποία παράγονται νετρόνια ενέργειας $\sim 16 \text{ MeV}$ και $E_d = 2916 \text{ keV}$, με παραγόμενα νετρόνια ενέργειας $\sim 18 \text{ MeV}$, κατά τη διέλευσή τους από το φύλλο Mo που υπάρχει πριν τον στόχο του T επηρεάζει τα δευτέρια. Για τα δευτέρια μικρότερης ενέργειας παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας σε σχέση τα δευτέρια μεγαλύτερης ενέργειας. Αυτό επιβεβαιώθηκε και με το πρόγραμμα SRIM-2013 μέσω του οποίου υπολογίστηκε η απώλεια ενέργειας των δευτερίων στο στόχο του Mo.

Ενέργεια δευτερίων (keV)	Ηλεκ. Απώλεια ενέργειας dE/dx (keV/μm)	Πυρηνική Απώλεια ενέργειας dE/dx (keV/ μm)	Εύρος (μm)
2000	9.855	0.9494	13.45
2250	9.368	0.8603	16.02
2500	8.887	0.7874	18.71
2750	8.453	0.7266	21.56
3000	8.069	0.6751	24.54

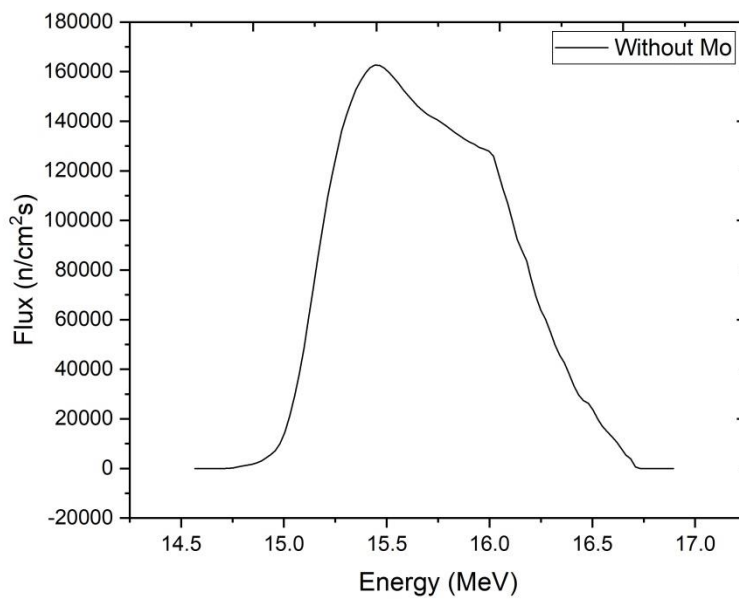
Πίνακας 3.4: Απώλεια ενέργειας και εύρος στο στόχο του Mo, για διάφορες ενέργειες των δευτερίων

Αν ο στόχος Mo ήταν λεπτότερος θα οδηγούσε σε μικρότερη απώλεια ενέργειας και λιγότερες αλληλεπιδράσεις στο στόχο. Συνεπώς, ελέγχθηκε αυτός ο ισχυρισμός στο πρόγραμμα Neusdesk, μέσω του οποίου λαμβάνεται η κατανομή των νετρονίων για το δεδομένο στόχο T, που όμως σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε το πάχος του Mo να είναι το

μισό, δηλαδή 5000 nm. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι η κατανομή είναι Γκαουσιανή όπως θα αναμενόταν. Επιπλέον, η απουσία του φύλλου Mo επιτρέπει στα δευτέρια να διατηρήσουν τις αρχικές τους ενέργειες το οποίο καταλήγει σε ένα μεγαλύτερο ενεργειακό εύρος δευτερίων και κατά συνέπεια το ίδιο ισχύει και για τις ενέργειες των νετρονίων.



Σχήμα 3.8: Κατανομή νετρονίων αν ο στόχος Mo είχε πάχος 5000 nm



Σχήμα 3.9: Κατανομή νετρονίων χωρίς στόχο Mo

3.4.3 Προσδιορισμός της πειραματικής ροής

Σύμφωνα με τη σχέση (3.10) είναι δυνατός ο υπολογισμός των πειραματικών ροών σε στόχους αναφοράς. Για τον υπολογισμό, όμως, των πειραματικών ροών είναι απαραίτητος ο υπολογισμός όλων αυτών των μεγεθών και διορθωτικών παραγόντων που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Παρουσιάζονται, λοιπόν, οι τιμές που υπολογίστηκαν για κάθε στόχο και τελικά οι πειραματικές ροές που λήφθηκαν για αυτούς.

Αντίδραση αναφοράς	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$		$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$
Στόχος αναφοράς	Al ₈	Al ₅	Au ₃
Χρόνος ημιζωής $t_{1/2}$ (sec)	14.997 h		6.1669 d
Σταθερά διάσπασης λ (sec ⁻¹)	$1.2835 \cdot 10^{-5}$		$1.30062 \cdot 10^{-6}$
E_γ (keV)	1368.626		355.73
I_γ (%)	99.9936		87
t_w (sec)	1310		512501
t_m (sec)	69760		516101
N_γ (counts)	113548 ± 343	104775 ± 333	6250 ± 91
ϵ	0.00457 ± 0.00016	0.00459 ± 0.00016	0.01178 ± 0.00032
D	0.575		0.002
f_c	0.827		0.980
F	0.996	0.996	0.932
N_p	$(5.25 \pm 0.18) \cdot 10^6$	$(4.82 \pm 0.12) \cdot 10^6$	$(2.782 \pm 0.085) \cdot 10^8$
N_t	$(4.290 \pm 0.022) \cdot 10^{21}$	$(4.493 \pm 0.022) \cdot 10^{21}$	$(1.9958 \pm 0.0031) \cdot 10^{21}$
σ (cm ²)	$9.46 \cdot 10^{-26}$		$1.89 \cdot 10^{-24}$
Φ (n/cm ²)	$(1.294 \pm 0.045) \cdot 10^{11}$	$(1.134 \pm 0.029) \cdot 10^{11}$	$(7.37 \pm 0.24) \cdot 10^{10}$

Πίνακας 3.5: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων στους στόχους αναφοράς για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Αντίδραση αναφοράς	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$		$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	
Στόχος αναφοράς	Al_B	Al_A	Au_4	Au_2
Χρόνος ημιζωής $t_{1/2}$ (sec)	14.997 h		6.1669 d	
Σταθερά διάσπασης λ (sec^{-1})	$1.2835 \cdot 10^{-5}$		$1.30062 \cdot 10^{-6}$	
E_γ (keV)	1368.626		355.73	
I_γ (%)	99.9936		87	
t_w (sec)	905		587094	
t_m (sec)	49095		593905	
N_γ (counts)	16330 ± 139	11795 ± 118	3579 ± 71	4229 ± 78
ϵ	0.00459 ± 0.00012	0.00457 ± 0.00012	0.01190 ± 0.00036	0.01179 ± 0.00032
D	0.456		0.004	
f_c	0.847		0.983	
F	0.996	0.996	0.934	0.886
N_p	$(9.24 \pm 0.24) \cdot 10^6$	$(6.71 \pm 0.24) \cdot 10^6$	$(9.16 \pm 0.33) \cdot 10^7$	$(1.152 \pm 0.037) \cdot 10^8$
N_τ	$(4.9389 \pm 0.0022) \cdot 10^{21}$	$(4.9299 \pm 0.0023) \cdot 10^{21}$	$(2.032839 \pm 0.000073) \cdot 10^{21}$	$(4.62456 \pm 0.00031) \cdot 10^{21}$
σ (cm^2)	$6.20 \cdot 10^{-26}$		$1.65 \cdot 10^{-24}$	
Φ (n/cm^2)	$(3.017 \pm 0.080) \cdot 10^{10}$	$(2.192 \pm 0.076) \cdot 10^{10}$	$(2.731 \pm 0.098) \cdot 10^{10}$	$(1.530 \pm 0.053) \cdot 10^{10}$

Πίνακας 3.6: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων στους στόχους αναφοράς για ενέργεια νετρονίων $E_n = 18.0 \text{ MeV}$

3.5 Προσδιορισμός ενεργών διατομών αντιδράσεων

Χρησιμοποιώντας όλες τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω και όλες τις σχέσεις που δόθηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο, υπολογίστηκαν όλοι οι απαραίτητοι συντελεστές και τα μεγέθη ώστε να εκτιμηθούν οι ενεργές διατομές. Ακολουθούν, όλες οι τιμές που υπολογίστηκαν για κάθε αντίδραση στις δύο ενέργειες για κάθε στόχο.

3.5.1 Ενεργός διατομή αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$

Για τη συγκεκριμένη αντίδραση ήταν δυνατός ο υπολογισμός της ενεργού διατομής της μόνο στην ακτινοβολή των $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ η οποία παρουσιάζεται παρακάτω στον Πίνακα (3.7).

Από την άλλη, αδύνατος κατέστη ο υπολογισμός της ενεργού διατομής στην υψηλότερη ενέργεια νετρονίων, όπου είχε πραγματοποιηθεί ακτινοβολήση. Δεδομένου ότι από τα ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα η ενεργός διατομή στα 18.0 MeV είναι γνωστό πως είναι μικρότερη, σε σχέση με την μικρότερη ενέργεια νετρονίων, από μόνο του σαν γεγονός αποδίδει μεγάλη δυσκολία στη μέτρηση αυτή. Η μεγάλη δυσκολία της μέτρησης αυτής της ενεργού διατομής, επίσης, αποδίδεται στην πολύ μικρή αναλογία του ισοτόπου ^{174}Hf στο φυσικό Hf (0.162 %). Επιπλέον, πιο πρακτικά η απουσία θωράκισης από τον ανιχνευτή ενίσχυσε τη δυσκολία αυτής της μέτρησης καθώς η πιο εντατική κορυφή του ισοτόπου ^{173}Hf που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής βρίσκεται στα 123.675 keV, όπου το υπόβαθρο έχει πιο έντονη συνεισφορά λόγω του φαινομένου Compton.

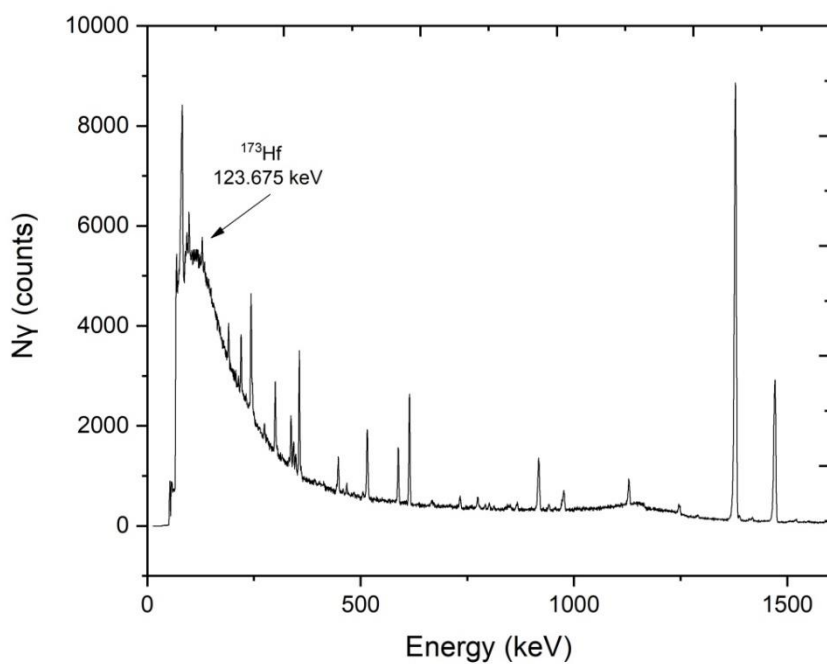
Στόχος	Hf ₂
E_n	(15.8 ± 0.4) MeV
E_γ (keV)	123.675
Αριθμός γεγονότων (counts)	3515 ± 271
Απόδοση ϵ	0.02110 ± 0.00097
Διορθωτικός παράγοντας f_c	0.885
t_w (sec)	1310
t_m (sec)	69760
Διορθωτικός παράγοντας D	4.23E-01
Διορθωτικός παράγοντας F	0.486
Αριθμός πυρήνων ^{174}Hf στόχου N_t	(4.595 ± 0.056) · 10 ¹⁸
Αριθμός πυρήνων ^{173}Hf που παράχθηκαν N_p	(1.10 ± 0.10) · 10 ⁶
Ροή Φ (n/cm ²)	(9.52 ± 0.24) · 10 ¹⁰
Ενεργός διατομή σ (mb)	2521 ± 237

Πίνακας 3.7: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$

Ακολουθεί ένα τυπικό φάσμα μέσω του οποίου υπολογίστηκε η εν λόγω ενεργός διατομή στο Σχήμα (3.10).

Σε αυτή την ενέργεια ακτινοβολήθηκαν και μετρήθηκαν δύο στόχοι. Ακολουθεί η μελέτη του στόχου Hf_4 ο οποίος μετρήθηκε στον ανιχνευτή HPGe του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ. Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο στόχων στην ίδια ενέργεια φαίνεται να βρίσκονται σε καλή συμφωνία εντός σφάλματος μεταξύ τους.

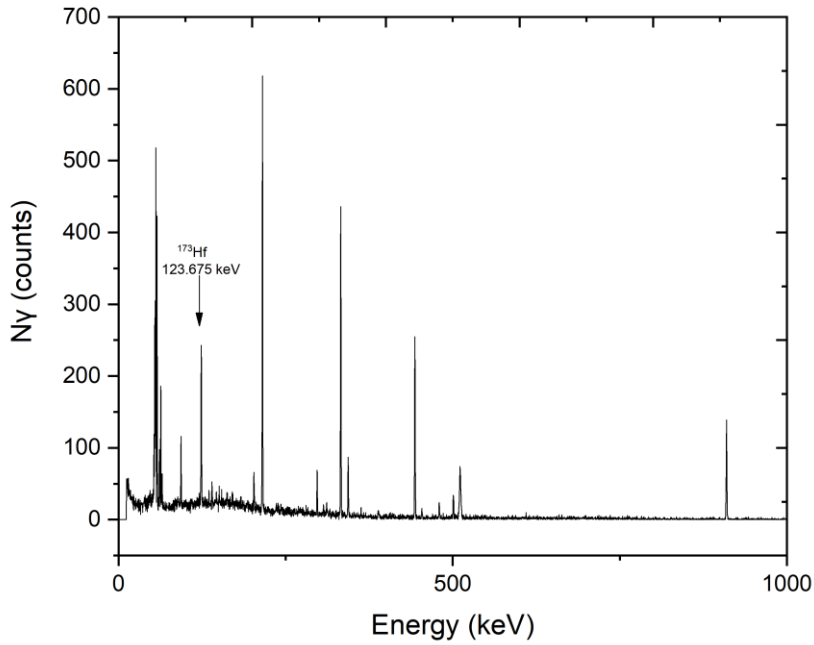
Στο Σχήμα (3.11) δίνεται και το φάσμα που λήφθηκε από τον ανιχνευτή του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ.



Σχήμα 3.10: Φάσμα Hf_2 ~19 h, το οποίο λήφθηκε μετά από 21 min από το τέλος της ακτινοβολήσης

Στόχος	Hf ₄
E_n	(15.8 ± 0.4) MeV
E_γ (keV)	123.675
Αριθμός γεγονότων (counts)	784 ± 33
Απόδοση ϵ	0.0239 ± 0.0030
Διορθωτικός παράγοντας f_c	0.885
t_w (sec)	8975
t_m (sec)	17459
Διορθωτικός παράγοντας D	6.22E-02
Διορθωτικός παράγοντας F	0.448
Αριθμός πυρήνων ¹⁷⁴ Hf στόχου N_t	(5.390 ± 0.056) · 10 ¹⁸
Αριθμός πυρήνων ¹⁷³ Hf που παράχθηκαν N_p	(1.60 ± 0.21) · 10 ⁶
Ροή Φ (n/cm ²)	(1.202 ± 0.022) · 10 ¹¹
Ενεργός διατομή σ (mb)	2476 ± 334

Πίνακας 3.8: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8$ MeV



Σχήμα 3.11: Φάσμα Hf_4 το οποίο προέκυψε από μέτρηση 2.5 h, μετά από 2.5 h από το τέλος της ακτινοβόλησης, στον ανιχνευτή του ΕΛΚΕΘΕ.

Αφού υπολογίστηκε η ενεργός διατομή της αντίδρασης για κάθε στόχο ξεχωριστά στη συνέχεια εκτιμήθηκε ο μέσος σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών αυτών.

Ο μέσος σταθμισμένος μέσος όρος (weighted average), χρησιμοποιείται ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση των διαφορετικών εκτιμήσεων της ενεργού διατομής για τον κάθε στόχο, βάσει των βαρών που φέρουν οι τιμές αυτές. Με αυτό τον τρόπο, συνδυάζονται και οι δύο μετρήσεις, ώστε να ληφθεί ένα αποτέλεσμα με μικρότερη αβεβαιότητα. Ο μέσος σταθμισμένος μέσος όρος δίνεται από τη σχέση:

$$x_{wav} = \frac{\sum w_i \cdot x_i}{\sum w_i} \quad (3.14)$$

όπου,

x_i : οι επιμέρους τιμές μιας μεταβλητής

w_i : δίνεται από τη σχέση $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ (3.15) και

σ_i : τα επιμέρους σφάλματα των τιμών

Η τυπική απόκλιση του x_{wav} , υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{wav} = \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \quad (3.16)$$

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (3.16) προκύπτει, για την ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{174}Hf(n, 2n)^{173}Hf$ για τους δύο στόχους που ακτινοβολήθηκαν με ενέργεια $E_n = 15.8 \text{ MeV}$, ότι $\sigma_{wav} = (2506 \pm 193) \text{ mb}$.

3.5.2 Ενεργός διατομή αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$

Η συγκεκριμένη ενεργός διατομή εκτιμήθηκε και για τις δύο ενέργειες των ακτινοβολήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Ακολουθούν τα αποτελέσματα σε κάθε ενέργεια.

3.5.2.1 Ενεργός διατομή για ενέργεια νετρονίων 15.8 MeV

Σε αυτή την περίπτωση, επισημαίνεται ξανά, ότι ακτινοβλήθηκαν δύο στόχοι ^{nat}Hf . Επομένως, τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής αυτής της αντίδρασης παρουσιάζονται στον Πίνακα (3.9).

Στόχος	Hf ₂	Hf ₄
E _n	(15.8 ± 0.4) MeV	
E _γ (keV)	335.73	
Αριθμός γεγονότων (counts)	1649 ± 105	3452 ± 126
Απόδοση ε	0.01205 ± 0.00033	0.01205 ± 0.00033
Διορθωτικός παράγοντας f _c	0.998	
t _w (sec)	597038	517783
t _m (sec)	654680	595236
Διορθωτικός παράγοντας D	6.15E-03	8.33E-03
Διορθωτικός παράγοντας F	0.928	0.935
Αριθμός πυρήνων ^{176}Hf στόχου N _τ	(1459.82 ± 0.18)·10 ¹⁷	(1712.52 ± 0.18)·10 ¹⁷
Αριθμός πυρήνων ^{175}Hf που παράχθηκαν N _ρ	(2.86 ± 0.20)·10 ⁷	(4.39 ± 0.20)·10 ⁷
Ροή Φ (n/cm ²)	(9.52 ± 0.24)·10 ¹⁰	(1.202 ± 0.032)·10 ¹⁰
Ενεργός διατομή σ (mb)	2058 ± 198	2131 ± 144
σ _{wav} (mb)	2106 ± 176	

Πίνακας 3.9: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων E_n = 15.8 MeV

3.5.2.2 Ενεργός διατομή για ενέργεια νετρονίων 18.0 MeV

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για την ίδια αντίδραση στην ενέργεια νετρονίων, E_n = 18.0 MeV. Σε αυτή την περίπτωση η αντίδραση που μελετάται επιμολύνεται από την αντίδραση $^{177}\text{Hf}(n, 3n)^{175}\text{Hf}$ η οποία είναι ενεργειακά επιτρεπτή σε αυτή την περίπτωση όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα (3.12) η ενεργός διατομή της όπου φαίνεται ότι είναι ανοιχτή, ενώ στον Πίνακα (3.10) παρουσιάζονται τα αρχικά αποτελέσματα πριν από τη διόρθωση.

Η διαδικασία που ακολουθείτε για την διόρθωση, μοιάζει αρκετά με αυτή του υπολογισμού της ενεργού διατομής, μόνο που σε αυτή την περίπτωση είναι άλλη αφετηρία. Ξεκινώντας, λοιπόν, με την ενεργό διατομή της αντίδρασης η οποία λαμβάνεται από βιβλιοθήκες, υπολογίζεται ο αριθμός των πυρήνων που παράχθηκαν από τη σχέση (3.1) ως εξής:

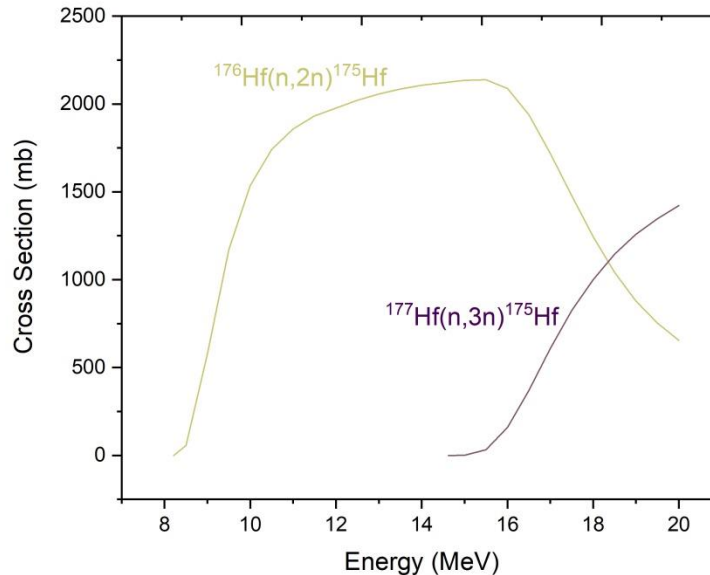
$$\sigma = \frac{N_p}{N_t} \cdot \frac{1}{\Phi} \Leftrightarrow N_p = \sigma \cdot N_t \cdot \Phi \quad (3.17)$$

Για αυτή τη διαδικασία η ενεργός διατομή συγκεκριμένα για την αντίδραση $^{177}\text{Hf}(n, 3n)^{175}\text{Hf}$ υπολογίστηκε από την ENDF/B-VIII.0 ώστε να μελετηθεί η συνεισφορά της, τελικά, στην αντίδραση ενδιαφέροντος. [10]

Στη συνέχεια, από τη σχέση (3.3) προκύπτει ο αριθμός των γεγονότων της κορυφής που μελετάται τα οποία αντιστοιχούν στην αντίδραση της επιμόλυνσης του ^{175}Hf .

$$N_p = \frac{N_\gamma}{\varepsilon \cdot F \cdot I_\gamma \cdot D \cdot f_c} \Leftrightarrow N_\gamma = N_p \cdot \varepsilon \cdot F \cdot I_\gamma \cdot D \cdot f_c \quad (3.18)$$

Μέσω αυτής της διαδικασίας, λοιπόν, υπολογίζονται τα γεγονότα που αντιστοιχούν στην αντίδραση της επιμόλυνσης και αφαιρούνται από τα συνολικά γεγονότα που εκτιμήθηκαν για την κορυφή που μελετάται, έτσι ώστε τελικά να υπολογιστεί η αντίδραση της αντίδρασης προς μελέτη.



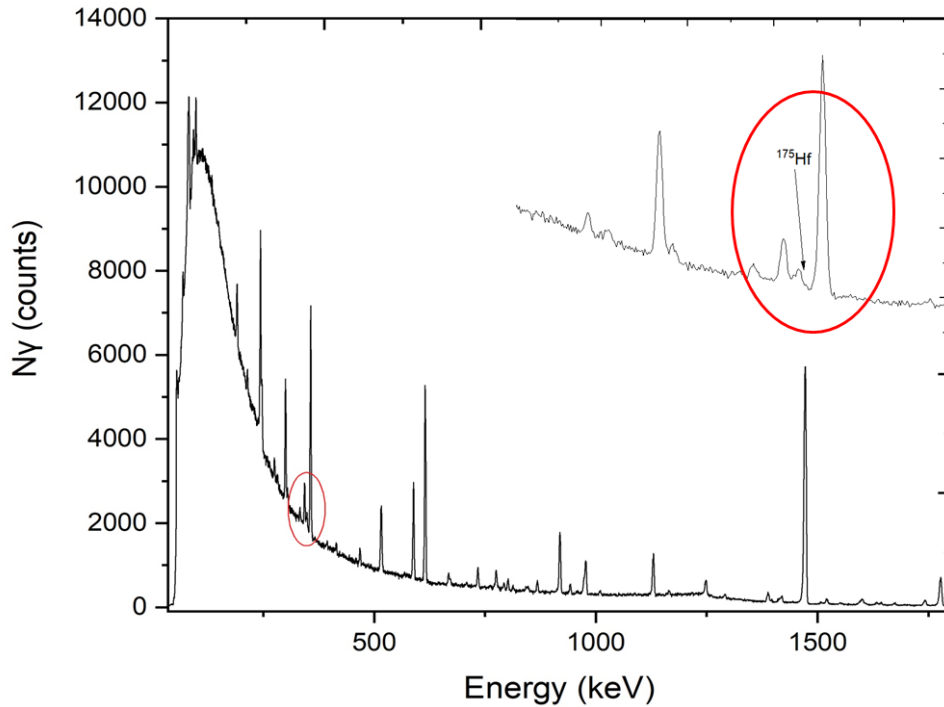
Σχημα 3.12: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων που μελετώνται συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων, από την βάση δεδομένων ENDF VIII.0.

Στόχος	Hf ₃		
Αντίδραση	¹⁷⁶ Hf(n,2n) ¹⁷⁵ Hf	¹⁷⁷ Hf(n,3n) ¹⁷⁵ Hf	Τελικά αποτελέσματα
E _n	(18.0 ± 0.3) MeV		
E _γ (keV)	123.679		
Αριθμός γεγονότων (counts)	3144 ± 159	2234 ± 70	910 ± 89
Απόδοση ε	0.01217 ± 0.00038		
Διορθωτικός παράγοντας f _c	0.998		
t _w (sec)	594394		
t _m (sec)	736694		
Διορθωτικός παράγοντας D	1.51E-02		
Διορθωτικός παράγοντας F	0.934		
Αριθμός πυρήνων ¹⁷⁴ Hf στόχου N _t	(1477.28 ± 0.18)·10 ¹⁷		
Αριθμός πυρήνων ¹⁷³ Hf που παράχθηκαν N _p	(2.18 ± 0.13)·10 ⁷	(1.551 ± 0.007)·10 ⁷	(6.32 ± 0.65)·10 ⁶
Ροή Φ (n/cm ²)	(2.954 ± 0.014)·10 ¹⁰		
Ενεργός διατομή σ (mb)	5002 ± 297	1000.57	1447 ± 139

Πίνακας 3.10: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων E_n = 18.0 MeV και των αποτελεσμάτων της διόρθωσης

Όπως φαίνεται και στον πίνακα (3.10) η ενεργός διατομή της αντίδρασης είναι σημαντικά υπερεκτιμημένη από την αναμενόμενη τιμή για αυτό και ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω με την διόρθωση.

Ακολουθεί ένα τυπικό φάσμα, στα 18.0 MeV, από το οποίο υπολογίστηκε η ενεργός διατομή της αντίδρασης.



Σχημα 3.12: Φάσμα Hf_3 που λήφθηκε μια βδομάδα μετά την ακτινοβόληση, ενώ η μέτρηση διήρκησε 39 h

3.5.3 Πειραματική διερεύνηση της χρήσης του στόχου Cd

Κατά την παραγωγή των νετρονίων μέσω πυρηνικών αντιδράσεων σε επιταχυντές παράγονται εκτός από τα ταχέα νετρόνια ζητούμενης ενέργειας, νετρόνια χαμηλότερων ενεργειών, θερμικά ή επιθερμικά, τα οποία μολύνουν τη δέσμη. Αυτά τα νετρόνια, των χαμηλών ενεργειών, που παράγονται ακούσια μπορεί να είναι αποτέλεσμα σκεδάσεων των νετρονίων, που συμβαίνουν στο στόχο ή στα υλικά της φλάντζας, με αποτέλεσμα να χάσουν ενέργεια. Επιπλέον, μεγάλη συνεισφορά στην παραγωγή παρασιτικών νετρονίων οφείλεται σε παρασιτικές (d, n) αντιδράσεις με τον Cu , το Mo , το Ti και το Al της φλάντζας. Τα παρασιτικά νετρόνια, κρίνονται ανεπιθύμητα, αφού επηρεάζουν την μονοενεργειακότητα της δέσμης και ακόμα πιο σημαντικό είναι ότι τα χαμηλοενεργειακά νετρόνια έχουν τεράστια σημασία στις (n, γ) αντιδράσεις οι οποίες ενεργοποιούνται από αυτά και σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να μολύνουν τις αντιδράσεις που μελετώνται. Κατά την ανάλυση των φασμάτων, τα γεγονότα μιας κορυφής δεδομένης ακτίνας- γ είναι υπερεκτιμημένα και κατά συνέπεια και οι υπολογισμοί μεγεθών, όπως της ενεργού διατομής, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Αναζητώντας, λοιπόν, μια πιο σαφή ένδειξη αυτού του ισχυρισμού υλοποιήθηκε μια προσπάθεια απόδειξης της ύπαρξης των παρασιτικών καθώς και της συνεισφοράς που αυτά έχουν στις διάφορες εφαρμογές.

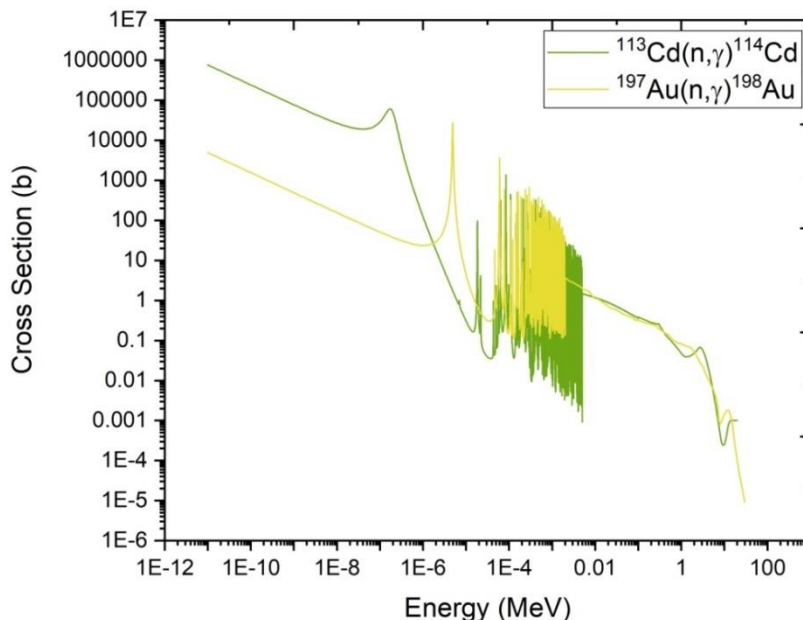
Η βασική ιδέα στηρίζεται στο γεγονός ότι οι αντιδράσεις (n, γ) ενεργοποιούνται από χαμηλοενεργειακά νετρόνια και στην ιδιότητα του Cd (Καδμίου) να απορροφά θερμικά νετρόνια. Το Cd , λόγω της υψηλής ενεργού διατομής που παρατηρείται σε αντιδράσεις (n, γ), ιδιαίτερος στην περιοχή των θερμικών νετρονίων, χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδρασή τους σε ένα σύστημα. Κλασικό παραδειγμα, είναι η χρήση του σε πυρηνικούς αντιδραστήρες για τον έλεγχο του πληθυσμού των νετρονίων και τη ρύθμιση της ροής αυτών στον αντιδραστήρα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η

αποτελεσματικότητα του Cd να απορροφά χαμηλοενεργειακά νετρόνια με μελέτες να έχουν καταλήξει στο ότι ένα δείγμα Cd πάχους 1 mm επιτρέπει σε όλα τα νετρόνια ενέργειας μεγαλύτερης από 0.5 eV να το διαπεράσουν, αλλά απορροφά όλα τα νετρόνια κάτω από αυτή την ενέργεια [11]. Το φυσικό Cd αποτελείται από οχτώ ισότοπα τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10 με το ^{113}Cd να είναι αυτό που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ενεργό διατομή απορρόφησης νετρονίων στην ενεργειακή περιοχή των θερμικών.

Ισότοπο	Μάζα (amu)	Ισοτοπική αναλογία (%)
^{106}Cd	105.906458	1.25
^{108}Cd	107.904183	0.89
^{110}Cd	109.903006	12.49
^{111}Cd	110.904182	12.80
^{112}Cd	111.902757	24.13
^{113}Cd	112.904401	12.22
^{114}Cd	113.903358	28.73
^{116}Cd	115.904755	7.49

Πίνακας 3.10: Ισότοπα ^{nat}Cd

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$ σε σχέση με αυτή της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ ώστε να συγκριθεί η μεγαλύτερη πιθανότητα να απορροφηθούν θερμικά νετρόνια από το Cd σε σχέση με το Au που θα διερευνηθεί παρακάτω.



Σχήμα 3.12: Ενεργός διατομή αντιδράσεων $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$ και $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ συναρτήσει της ενέργειας από την βάση δεδομένων ENDF VIII.0.

Στηριζόμενοι σε όσα αναφέρθηκαν σχετικά με τις ιδιότητες του Cd και τη συνεισφορά που μπορεί να έχει στην μείωση της επίδρασης των θερμικών νετρονίων διαμορφώθηκε η διάταξη των στόχων στην ακτινοβόληση των 15.8 MeV , έτσι ώστε να

ακτινοβοληθούν δύο στόχοι *Hf*, όπου ο ένας θα είχε μπροστά του *Cd* ενώ ο άλλος όχι, έτσι ώστε να είναι άμεση η σύγκριση των δύο στόχων και να μελετηθεί η επίδραση που έχει το *Cd*. Για την σύγκριση αυτή είναι απαραίτητη και η επιλογή μιας αντίδρασης που ενεργοποιείται από χαμηλοενεργειακά νετρόνια και αυτό που αναμένεται είναι στο στόχο χωρίς *Cd* να είναι πιο έντονη η παρουσία του προϊόντος της αντίδρασης σε σχέση με το στόχο με *Cd*. Για αυτό τον σκοπό επιλέχθηκε η αντίδραση $^{179}\text{Hf}(n, \gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ η οποία είναι αρκετά σημαντική στα πλαίσια αυτής της εργασίας καθώς επιμολύνει την αντίδραση $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ για την οποία θα γίνει λόγος παρακάτω. Αυτό το εγχείρημα, επιβεβαιώθηκε συγκρίνοντας τον αριθμό των γεγονότων ανα δευτερόλεπτο για τους δύο στόχους του *Hf* που ακτινοβολήθηκαν. Στον Πίνακα (3.11) παρουσιάζονται αυτά τα αποτελέσματα όπου παρατηρείται πως για τον ίδιο χρόνο μέτρησης τα γεγονότα ανα δευτερόλεπτο για τον στόχο που είχε μπροστά του *Cd* είναι μικρότερα το οποίο επιβεβαιώνει ότι ο στόχος του *Cd* απορρόφησε τα χαμηλοενεργειακά νετρόνια.

$^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$			
$E_\gamma = 332.274 \text{ keV}$			
Hf_4 (χωρίς <i>Cd</i> , ΕΛΚΕΘΕ)		Hf_2 (με <i>Cd</i> , detector A)	
Counts/sec	0.212497	Counts/sec	0.129387

Πίνακας 3.11: Τα counts/sec για την ακτίνα-γ με $E_\gamma = 332,274 \text{ keV}$ που μελετάται για την αντίδραση $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$

Η ίδια μελέτη πραγματοποιήθηκε και σε στόχους *Au* (Χρυσού) για την αντίδραση $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$. Η δυσκολία που υπάρχει εδώ είναι ότι ο στόχος που είχε μπροστά του *Cd* ακτινοβολήθηκε με ενέργεια 15.8 MeV , ενώ ο στόχος που δεν είχε *Cd* ακτινοβολήθηκε με ενέργεια νετρονίων 18.0 MeV . Στην ακτινοβολήση των 18.0 MeV υπήρχαν δύο στόχοι *Au* και για τις ανάγκες αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο στόχος που είχε παραπλήσια μάζα με τον στόχο *Au* που είχε μπροστά του *Cd*.

Αρχικά, εκτιμήθηκαν τα γεγονότα ανά δευτερόλεπτο (*counts/sec*) για την ακτίνα-γ με ενέργεια $E_\gamma = 411.8 \text{ keV}$ του ισοτόπου ^{198}Au , ο οποίος παράχθηκε από την αντίδραση $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα (3.12).

Λόγω της διαφορετικής ενέργειας στους δύο στόχους είναι αδύνατο να συγκριθούν άμεσα τα γεγονότα ανά δευτερόλεπτο. Η σύγκριση αυτή αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα αφού αυτά εξαρτώνται σημαντικά από την διαφορετική ενεργό διατομή στην κάθε ενέργεια και τη ροή του καθενός. Παρατηρείται ότι στα 15.8 MeV η ενεργός διατομή καθώς και ροή είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα 18.0 MeV , οπότε θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερος ο αριθμός των πυρήνων του ισοτόπου ^{198}Au που παράγονται και κατά συνέπεια μεγαλύτερος αριθμός γεγονότων άρα και μεγαλύτερος αριθμός γεγονότων ανα δευτερόλεπτο. Όμως, όπως παρατηρείται και στον Πίνακα (3.12) πειραματικά ισχύει ότι $\left(\frac{\text{counts}}{\text{sec}}\right)_{18.0}$ είναι μεγαλύτερος από τα $\left(\frac{\text{counts}}{\text{sec}}\right)_{15.8}$. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι στα 15.8 MeV ο στόχος του *Au* ήταν τοποθετημένος μετά τον στόχο του *Cd* και ένα μεγάλο μέρος των θερμικών νετρονίων απορροφήθηκαν από το τελευταίο οπότε ο αριθμός των γεγονότων ανά δευτερόλεπτο παρατηρείται μικρότερος από το αναμενόμενο.

$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$		
$E_\gamma = 411.80205 \text{ keV}$		
E_n (MeV)	18.0 ± 0.3	15.8 ± 0.4
Στόχος Au	Χωρίς Cd (Au_4)	Με Cd (Au_3)
Ενεργός διατομή σ (b)	$6.02 \cdot 10^{-4}$	$6.23 \cdot 10^{-4}$
Ροή Φ ($(n/\text{cm}^2)/\text{sec}$)	$(908.03 \pm 0.33) \cdot 10^3$	$(239.50 \pm 0.73) \cdot 10^4$
N_γ (counts)	2543 ± 94	3218 ± 138
Χρόνος λήψης φάσματος (sec)	28321	68450
Counts/sec	0.090	0.047

Πίνακας 3.12: Πληροφορίες σχετικές με τον υπολογισμό των counts/sec για την ακτίνα-γ με $E_\gamma = 411.8 \text{ keV}$ που μελετάται για την αντίδραση $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$

Αν και η παραπάνω παρατήρηση υποδεικνύει την ύπαρξη θερμικών νετρονίων στη δέσμη δεν επιτρέπει την ποσοτικοποίηση τους. Παρόλα αυτά, πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία για μια ακόμα αντίδραση, την $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$ η οποία είναι αντίδραση καταφλίου και ενεργοποιείται για ενέργειες νετρονίων μεγαλύτερες από $E_{th} = 8.1 \text{ MeV}$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα (3.13).

$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$		
$E_\gamma = 355.73 \text{ keV}$		
E_n (MeV)	18.0 ± 0.3	15.8 ± 0.4
Στόχος Au	Χωρίς Cd	Με Cd
Ενεργός διατομή σ (b)	1.844	2.23796
Ροή Φ ($(n/\text{cm}^2)/\text{sec}$)	$(908.03 \pm 0.323) \cdot 10^3$	$(239.50 \pm 0.73) \cdot 10^4$
N_γ (counts)	3565 ± 127	6250 ± 193
Χρόνος λήψης φάσματος (sec)	6811	3601
Counts/sec	0.523	1.736
$\sigma \cdot \Phi$	$1.67 \cdot 10^6$	$5.36 \cdot 10^6$

Πίνακας 3.13: Πληροφορίες σχετικές με τον υπολογισμό των counts/sec για την ακτίνα-γ με $E_\gamma = 355.73 \text{ keV}$ που μελετάται για την αντίδραση $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$

Η ενεργός διατομή όπως έχει ήδη αναφερθεί δίνεται από τη σχέση (3.1). Ο αριθμός των πυρήνων που παράγονται κατά την ακτινοβόληση, N_p , όπως προκύπτει από τη σχέση, είναι ανάλογος του αριθμού των γεγονότων που καταμετρώνται από τον ανιχνευτή, N_γ , όπως προκύπτει από τη σχέση (3.3), $N_p \propto N_\gamma$. Κανονικοποιώντας τον αριθμό των γεγονότων στο χρόνο της μέτρησής του καθώς και τη ροή στο χρόνο της ακτινοβόλησης και από τη σχέση

(3.1) προκύπτει ότι τα γεγονότα ανα δευτερόλεπτο είναι ανάλογα του $\sigma \cdot \Phi$ παίρνοντας τους λόγους των δυο διαφορετικών ενεργειών για την ίδια ακτίνα-γ.

$$\text{Από τα παραπάνω προκύπτει ότι } \frac{(\sigma \cdot \Phi)_{18.0}}{(\sigma \cdot \Phi)_{15.8}} = 0.31 \text{ και } \frac{(\text{counts}/\text{sec})_{18.0}}{(\text{counts}/\text{sec})_{15.8}} = 0.30 \text{ τα οποία}$$

είναι περίπου ίσα όπως είναι αναμενόμενο. Επομένως, ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική για μια αντίδραση που δεν επηρεάζεται από τα θερμικά και επιθερμικά νετρόνια που υπάρχουν στη δέσμη και καταλήγοντας σε ένα αποτέλεσμα που είναι αναμενόμενο και λογικό επιβεβαιώνει ότι ο τρόπος εργασίας που εκτελέστηκε είναι αξιόπιστος.

3.5.4 Ενεργός διατομή αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$

Ενδιαφέρον έχει για την μελέτη των αντιδράσεων του Hf η συγκεκριμένη αντίδραση, αφού, το ^{180}Hf είναι το ισότοπο του ^{nat}Hf όπου έχει τη μεγαλύτερη ισοτοπική αναλογία. Η συγκεκριμένη αντίδραση, επιμολύνεται από την αντίδραση $^{179}\text{Hf}(n, \gamma)^{180m}\text{Hf}$, η οποία ενεργοποιείται από χαμηλοενεργειακά νετρόνια. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των ενεργών διατομών αυτών των αντιδράσεων για τις δυο ενέργειες νετρονίων και για τους δύο στόχους.

Στόχος	Hf_2		
E_n	$(15.8 \pm 0.4) \text{ MeV}$		
Χρόνος ημιζωής $t_{1/2}$ (h)	5.53		
E_γ (keV)	215.462	332.274	443.162
Πιθανότητα I_γ (%)	81.6	94	82
Αριθμός γεγονότων (counts)	5646 ± 170	5582 ± 133	3991 ± 100
Απόδοση ϵ	0.01579 ± 0.00083	0.01226 ± 0.00032	0.01015 ± 0.00026
Διορθωτικός παράγοντας f_c	0.615		
t_w (sec)	1310		
t_m (sec)	44452		
Διορθωτικός παράγοντας D	7.43E-01		
Διορθωτικός παράγοντας F	0.816	0.921	0.949
Αριθμός πυρήνων ^{180}Hf στόχου N_t	$(962.37 \pm 0.12) \cdot 10^{18}$		
Αριθμός πυρήνων ^{180m}Hf που παράχθηκαν N_p	$(1.175 \pm 0.071) \cdot 10^6$	$(1.151 \pm 0.040) \cdot 10^6$	$(1.106 \pm 0.040) \cdot 10^6$
Ροή Φ (n/cm ²)	$(9.52 \pm 0.24) \cdot 10^{10}$		
Ενεργός διατομή σ (mb)	12.8 ± 1.1	12.56 ± 0.91	12.07 ± 0.88
σ_{wav} (mb)	12.57 ± 0.97		

Πίνακας 3.14: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων $E_n = 15.8 \text{ MeV}$ του Hf_2

Στόχος	Hf ₄		
E _n	(15.8 ± 0.4) MeV		
Χρόνος ημιζωής t _{1/2} (h)	5.53		
E _γ (keV)	215.462	332.274	443.162
Πιθανότητα I _γ (%)	81.6	94	82
Αριθμός γεγονότων (counts)	2365 ± 50	1791 ± 43	1140 ± 34
Απόδοση ε	0.01596 ± 0.00080	0.01058 ± 0.00031	0.00795 ± 0.00022
Διορθωτικός παράγοντας f _c	0.615		
t _w (sec)	8975		
t _m (sec)	17459		
Διορθωτικός παράγοντας D	1.87E-01		
Διορθωτικός παράγοντας F	0.816	0.921	0.949
Αριθμός πυρήνων ¹⁸⁰ Hf στόχου N _τ	(1.1290 ± 0.0012)·10 ²¹		
Αριθμός πυρήνων ^{180m} Hf που παράχθηκαν N _p	(1.933 ± 0.011)·10 ⁶	(1.698 ± 0.064)·10 ⁶	(1.601 ± 0.065)·10 ⁶
Ροή Φ (n/cm ²)	(1.20 ± 0.24)·10 ¹⁰		
Ενεργός διατομή σ (mb)	14.3 ± 1.3	12.54 ± 0.98	11.82 ± 0.96
σ _{wav} (mb)	12.5 ± 0.80		

Πίνακας 3.15: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων E_n = 15.8 MeV του Hf₄

Η τελική τιμή της ενεργού διατομής της αντίδρασης ¹⁸⁰Hf(n, n'^γ)^{180m}Hf όπως αυτή υπολογίζεται από τις σχέσεις (3.14), (3.15) και (3.16) είναι:

$$\sigma_{wav} = (12.57 \pm 0.97) \text{ mb}$$

Ακολουθεί, η αντίστοιχη ανάλυση για την περίπτωση των E_n = 18.0 MeV, στην οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκε η κορυφή με ακτίνα-γ ενέργειας E_γ = 332.74 keV επειδή αυτός ο στόχος Hf, τοποθετήθηκε στον ίδιο ανιχνευτή με ένα στόχο Au και δε λήφθηκε υπόψη ότι λόγω της αντίδρασης ¹⁹⁷Au(n, 2n)¹⁹⁶Au μολύνθηκε η ακτίνα-γ ενδιαφέροντος για αυτή την αντίδραση του Hf από την E_γ = 355.73 keV.

Στόχος	Hf ₃	
E _n	(18.0 ± 0.3) MeV	
Χρόνος ημιζωής t _{1/2} (h)	5.53	
E _γ (keV)	215.462	443.162
Αριθμός γεγονότων (counts)	3479 ± 170	2288 ± 91
Απόδοση ε	0.01579 ± 0.00083	0.01015 ± 0.00026
Διορθωτικός παράγοντας f _c	0.652	
t _w (sec)	905	
t _m (sec)	44105	
Διορθωτικός παράγοντας D	7.54E-01	
Διορθωτικός παράγοντας F	0.828	0.952
Αριθμός πυρήνων ¹⁸⁰ Hf στόχου N _τ	(9.7388 ± 0.0012) · 10 ²⁰	
Αριθμός πυρήνων ^{180m} Hf που παράχθηκαν N _ρ	(6.64 ± 0.48) · 10 ⁵	(5.87 ± 0.28) · 10 ⁵
Ροή Φ (n/cm ²)	(2.954 ± 0.014) · 10 ¹⁰	
Ενεργός διατομή σ (mb)	23.1 ± 1.8	20.4 ± 1.2
σ _{wav} (mb)	21.1 ± 1.4	

Πίνακας 3.16: Συνοπτικός πίνακας τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης για ενέργεια νετρονίων E_n = 18.0 MeV

Μεταξύ των ενεργών διατομών των δύο ενεργειών υπάρχει μεγάλη απόκλιση ενώ δεδομένου ότι η ενέργειες που μελετώνται δεν απέχουν πολύ θα αναμενόταν οι τιμές των ενεργών διατομών να έχουν παραπλήσιες τιμές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, έχει ότι η ενεργός διατομή στα 15.8 MeV είναι σχεδόν η μισή από αυτή των 18.0 MeV το οποίο δικαιολογείται από την ύπαρξη του Cd στην πρώτη περίπτωση. Άρα, το Cd απορρόφησε το μεγαλύτερο ποσοστό των παρασιτικών νετρονίων που παράχθηκαν και αποφεύχθηκε με αυτό τον τρόπο η επιμόλυνση της ¹⁸⁰Hf(n, n'γ)^{180m}Hf από την αντίδραση ¹⁷⁹Hf(n, γ)^{180m}Hf. Η αδυναμία αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί το ποσοστό της επιμόλυνσης αν υπήρξε τελικά έστω και σε μικρότερο βαθμό από την περίπτωση της υψηλότερης ενέργειας.

Κεφάλαιο 4

Οι πυρηνικές αντιδράσεις περιγράφονται από σύνθετους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης λόγω της πολυπλοκότητας των πυρηνικών συστημάτων καθώς και των διαφορετικών τρόπων αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που μετέχουν σε αυτές. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται θεωρητικά μοντέλα που περιγράφουν διαφορετικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασεων καθώς και άλλες πυρηνικοί παράμετροι αναζητώντας τον κατάλληλο συνδυασμό αυτών, ώστε τελικά να επιτευχθεί η βέλτιστη θεωρητική αναπαράσταση των υπάρχοντων πειραματικών δεδομένων των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$ που μελετήθηκαν και πειραματικά. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή όλων των πυρηνικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1 Θεωρητικά πρότυπα μηχανισμών αλληλεπίδρασης

Η θεωρητική μελέτη των πυρηνικών αντιδράσεων στηρίζεται σε τρεις βασικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το χρόνο αλληλεπίδρασης και για την περιγραφή του καθενός επιλέγεται ένα κατάλληλο πρότυπο. Αυτοί οι μηχανισμοί είναι οι εξής:

4.1.1 Μηχανισμός άμεσης αντίδρασης

Στις άμεσες αντιδράσεις πυρήνα-βλήματος ο χρόνος διάρκειας που απαιτείται ώστε να περάσει το δεύτερο από τον πυρήνα είναι της τάξης $\sim 10^{-22}\text{sec}$. Σε αυτό το είδος αντιδράσεων το βλήμα αλληλεπιδρά με ένα πολύ μικρό πλήθος των νουκλεονίων του πυρήνα, κυρίως με αυτά που βρίσκονται κοντά στην επιφάνειά του. Χαρακτηριστικό αυτών των αντιδράσεων είναι η οξεία γωνιακή κατανομή των εξερχόμενων σωματιδίων. Για την περιγραφή του μηχανισμού αυτού επιλέχθηκε το Οπτικό Πρότυπο Πυρηνικού Δυναμικού (Optical Model Potential).

Το οπτικό πρότυπο για την περιγραφή του πυρηνικού δυναμικού απαιτεί δύο παραδοχές, πρώτον, ότι το βλήμα αλληλεπιδρά είτε με τον πυρήνα σε σύνολο είτε με μια ομάδα νουκλεονίων (one-body interactions) και, δεύτερον, ότι το πυρηνικό δυναμικό είναι ομοιόμορφο στην περιοχή της αλληλεπίδρασης. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η αλληλεπίδραση περιγράφεται από τη σχέση:

$$U(r) = V(r) + iW(r) \quad (4.1)$$

όπου το πραγματικό μέρος $V(r)$ εκφράζει τη σκέδαση των σωματιδίων από τον πυρήνα, ενώ το μιγαδικό μέρος $W(r)$ εκφράζει την απορρόφηση σωματιδίων στο εσωτερικό του πυρήνα. Και για τα δύο αυτά δυναμικά περιγράφονται οι σφαιρικά συμμετρικοί του όροι με Woods-Saxon όρους. Αυτοί οι όροι είναι:

1. το βάθος του πηγαδιού (V_0)
2. το πλάτος του πηγαδιού R , $R \cong R_0 A^{1/3}$, όπου το R_0 λαμβάνει τιμές από 1.2 έως 1.6
3. η διάχυση a (difusness), η οποία καθορίζει την κλίση του πηγαδιού, όπου αυτός ο όρος λαμβάνει τιμές από 2 έως 6 fm.

Η μορφή του δυναμικού με αυτούς τους όρους λαμβάνει τη μορφή:

$$V(r) = \frac{-V_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}} \quad (4.2)$$

Για να λάβει, όμως, την τελική της μορφή η σχέση (4.1) πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και άλλοι όροι, όπως για παράδειγμα, στην περίπτωση των φορτισμένων σωματιδίων είναι απαραίτητος ο όρος Coulomb. Στην παρούσα εργασία, καθώς δεν γίνεται η μελέτη του πυρηνικού δυναμικού αλλά χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την μελέτη της ενεργού διατομής ορισμένων αντιδράσεων παρουσιάζεται απλώς η τελική σχέση:

$$U_{total}(r, E) = -V_V(r, E) - iW_V(r, E) + U_{Coulomb} - iW_D(r, E)1\sigma + V_{SO}(r, E)1\sigma + iW_{SO}(r, E) \quad (4.3)$$

Όπου, V και W το φανταστικό και το πραγματικό μέρος, αντίστοιχα, του όγκου του κεντρικού δυναμικού (δείκτης V), του επιφανειακού κεντρικού δυναμικού (δείκτης D) και του σπιν τροχιάς (δείκτης SO) δυναμικού αντίστοιχα, ενώ E είναι η ενέργεια του εργαστηρίου του προσπίπτοντος σωματιδίου σε MeV [12].

4.1.2 Μηχανισμός σύνθετου πυρήνα

Στο μηχανισμό σύνθετου πυρήνα το βλήμα συλλαμβάνεται από τον πυρήνα-στόχο, δημιουργείται ένας νέος πυρήνας που έχει απορροφήσει το βλήμα και πλέον το σύστημα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, όπου η συνολική ενέργεια μοιράζεται σε όλα τα νουκλεόνια του συστήματος. Στη συνέχεια το σύστημα ξεχνάει από πού προήλθε και αποδιεγείρεται προς κάποιο από τα ενεργειακά επιτρεπτά κανάλια της αντίδρασης, γεγονός το οποίο στηρίζεται στην υπόθεση ανεξαρτησίας του Bohr (Bohr independence hypothesis). Λόγω αυτού η γωνιακή κατανομή των εξερχόμενων σωματιδίων θεωρείται ισοτροπική. Η χρονική διάρκεια αυτών των αντιδράσεων εκτιμάται $\sim 10^{-16} - 10^{-18} sec$. Ο μηχανισμός σύνθετου πυρήνα περιγράφεται από τη θεωρία που αναπτύχθηκε από τους Hauser-Feshbach και περιγράφει κυρίως αντιδράσεις για ενέργειες εισερχόμενων σωματιδίων στην περιοχή ενεργειών από 10 έως 20 MeV [13].

Η ενεργός διατομή μιας αντίδρασης (a,b) όπως αυτή υπολογίζεται από τη συγκεκριμένη θεωρία για κανάλι εισόδου a και κανάλι εξόδου b δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{ab}(E) = \frac{\pi}{k_a^2} (2l + 1) \frac{T_l(\epsilon_a) T_l(\epsilon_b) \rho_B(E_B^*)}{\sum_{\gamma} T_{\gamma,l} \rho_{\Gamma}(E_{\Gamma}^*)} \quad (4.4)$$

όπου γ είναι το κανάλι εξόδου που μελετάται, T_l είναι οι συντελεστές διέλευσης (transmission coefficients) των αντίστοιχων καναλιών αποδιέγερσης όπως αυτοί προκύπτουν από τη λύση της εξίσωσης Schrodinger για το οπτικό δυναμικό που περιγράφει το πυρηνικό σύστημα και ρ είναι η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων των πυρήνων.

4.1.3 Μηχανισμός πρώιμης αποδιέγερσης του σύνθετου πυρήνα

Στην περίπτωση αυτού του μηχανισμού κατά την αλληλεπίδραση συμμετέχει περιορισμένος αριθμός νουκλεονίων, δημιουργείται και πάλι σύνθετος πυρήνας αλλά αυτός αποδιεγείρεται πριν επέλθει η θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτό το είδος μηχανισμού χαρακτηρίζεται από ενδιάμεσους χρόνους πραγματοποίησής του σε σχέση με τα άλλα δύο είδη που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο μηχανισμός αυτός παρατηρείται κυρίως για ενέργειες

εξερχόμενων σωματιδίων μεταξύ 10 και 200 MeV [13]. Το μοντέλο που περιγράφει αυτό το είδος μηχανισμού είναι το μοντέλο εξιτονίων του Griffin, όπου σύμφωνα με αυτό, το εισερχόμενο σωματίδιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα-στόχο, δημιουργώντας καταστάσεις σωματιδίων και οπών πάνω και κάτω από την ενέργεια Fermi, γνωστές ως εξιτόνια. Τέτοιες διαδοχικές αλληλεπιδράσεις οδηγούν σε ένα σύστημα, στο οποίο αυξάνεται ο αριθμός των εξιτονίων και τελικά αυτό καταλήγει σε ισορροπία κατά την οποία υπάρχουν δυο ανταγωνιστικοί μηχανισμοί αποδιέγερσής του, ο πρώτος είναι μέσω αλληλεπίδρασης δύο εξιτονίων που οδηγεί σε πιο σύνθετες δομές και ο δεύτερος μέσω εκπομπής σωματιδίων στο συνεχές φάσμα [14].

4.2 Πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων

Η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων αποτελεί απαραίτητο χαρακτηριστικό για την περιγραφή του κάθε πυρήνα καθώς ορίζεται ως το πλήθος των ενεργειακών καταστάσεων (dN) ανά μονάδα ενέργειας (dE) [15] και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho(E) = \lim_{\Delta E \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta E} = \frac{dN(E)}{dE} \quad (4.5)$$

Η χρήση αυτού του όρου είναι ιδιαίτερος σημαντικός για την περιγραφή των ενεργειακών καταστάσεων του πυρήνα κυρίως όσο αυξάνεται η ενέργεια όπου οι στάθμες αρχίζουν να πυκνώνουν και αρχίζουν να επικαλύπτουν η μία την άλλη σε ενεργειακό εύρος όσο μιας δέσμης σωματιδίων με αποτέλεσμα να μην είναι πειραματικά διαχωρίσιμες. Αυτή η περιοχή καλείται το συνεχές του πυρήνα και η προσεγγιστική περιγραφή της γίνεται μέσω διαφόρων στατιστικών προτύπων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την εύρεση των παραμέτρων των στατιστικών προτύπων έχουν οι αθροιστικές χαμηλοενεργειακές στάθμες του πυρήνα στην περιοχή του διακριτού συναρτήσεως της ενέργειας (cumulative number of states) τα οποία απασχολούν και τη μελέτη της παρούσας εργασίας και παρουσιάζονται παρακάτω.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της πυκνότητας των ενεργειακών καταστάσεων είναι τα εξής:

1. Το μοντέλο του ενισχυμένου γενικευμένου υπερρευστού (Enhanced Generalized Superfluid Model, EGSM)
2. Το μοντέλο του γενικευμένου υπερρευστού (Generalized Superfluid Model, GSM)
3. Το μοντέλο Gilbert Cameron (GC)
4. Το μικροσκοπικό μοντέλο των Hartee-Fock-Bogoliubov (HFBM)

Το μοντέλο του ενισχυμένου γενικευμένου υπερρευστού (EGSM) αποτελεί το βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική μελέτη των αντιδράσεων που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και για αυτό είναι και αυτό που επιλέγεται να παρουσιαστεί πιο αναλυτικά.

4.3 Ο κώδικας EMPIRE

Για την ανάγκη της θεωρητικής μελέτης των αντιδράσεων που μελετήθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω ήταν απαραίτητη η χρήση του κώδικα EMPIRE 3.2.3 (Malta) [15] ο οποίος στηρίζεται στη θεωρία των Hauser-Feshbach για την αποδιέγερση του

σύνθετου πυρήνα. Για την υλοποίηση των υπολογισμών ο κώδικας EMPIRE χρησιμοποιεί ένα πλήθος κωδικών και δεδομένα σχετικά με τις μάζες των πυρήνων, τις παραμορφώσεις των πυρήνων, τις διακριτές στάθμες κ.α. από βιβλιοθήκες όπως η RIPL-3 [16] καθώς και από βιβλιοθήκες με πειραματικά δεδομένα όπως η EXFOR [17]. Ο κώδικας EMPIRE στα πλαίσια αυτής της εργασίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ενεργών διατομών των αντιδράσεων ενδιαφέροντος, παρόλα αυτά θεωρείται κατάλληλος και για βασικές μελέτες πυρηνικής δομής αλλά και συνεισφέροντας στην βελτίωση των μοντέλων.

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του κώδικα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου που θα δοθούν στον κώδικα αλλά και την πλήρη κατανόηση των μηχανισμών αντίδρασης. Ο κώδικας για την υλοποίηση των υπολογισμών απαιτεί ένα αρχείο εισόδου το οποίο θα περιέχει τα εξής:

1. Πληροφορίες για τον πυρήνα-στόχο, το προσπίπτον σωματίδιο, η ενέργειά του καθώς και ο αριθμός των σωματιδίων που θα εκπεμφθούν. Όλα αυτά τα στοιχεία εισάγονται στο πρώτο μέρος του κώδικα.
2. Το οπτικό δυναμικό, το οποίο εισάγεται με έναν αριθμό ο οποίος αντιστοιχίζεται μέσω της RIPL-3 σε συγκεκριμένα δυναμικά, ώστε να περιγραφεί η αλληλεπίδραση του πυρήνα με τα προσπίπτοντα σωματίδια. Το οπτικό δυναμικό εισάγεται στον κώδικα στο δεύτερο μέρος του μέσω της λέξης-κλειδί OMPOT.
3. Η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων στο συνεχές κάθε πυρήνα. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ενός από τα τέσσερα μοντέλα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, με αντίστοιχες παραμετροποιήσεις που λαμβάνονται επίσης από τη βιβλιοθήκη RIPL-3. Το μοντέλο της πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων εισάγεται στον κώδικα στο δεύτερο μέρος του μέσω της λέξης-κλειδί LEVDEN.
4. Τα πρότυπα πρώιμης αποδιέγερσης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες, η στατιστική προσέγγιση άμεσων αντιδράσεων πολλαπλών βημάτων MSD (Multistep Direct Reactions), το οποίο αποτελεί ένα κβαντομηχανικό πρότυπο και τις διαδικασίες πολλών βημάτων σύνθετου πυρήνα MSC (Multistep Compound), η οποία αποτελεί μια φαινομενολογική προσέγγιση που βασίζεται στο Κλασικό Πρότυπο Εξιτονίων και υλοποιείται μέσω του κώδικα PCROSS.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα αρχείο εισόδου με επεξηγήση του τί πληροφορία εισάγει η κάθε λέξη-κλειδί.

* Πρώτο μέρος του κώδικα όπου εισάγονται όλες οι αναγκαίες πληροφορίες για τον πυρήνα-στόχο, το προσπίπτον σωματίδιο και τα σωματίδια που είναι επιθυμητό να μελετηθούν κατά την εκπομπή τους

```

9.          !Αρχική ενέργεια προσπίπτοντος σωματιδίου στο σύστημα του εργαστηρίου
174. 72.    !Μαζικός και ατομικός αριθμός πυρήνα-στόχου A, Z (17472Hf)
1. 0.      !Μαζικός και ατομικός αριθμός προσπίπτοντος σωματιδίου A, Z (n)
3          !Αριθμός εκπεμπόμενων νετρονίων
1          !Αριθμός εκπεμπόμενων πρωτονίων
1          !Αριθμός εκπεμπόμενων σωματιδίων α
1          !Αριθμός εκπεμπόμενων δευτερίων
1          !Αριθμός εκπεμπόμενων πυρήνων τριτίου
0          !Αριθμός εκπεμπόμενων πυρήνων 3He
0 0. 0.    !

```

* Δεύτερο μέρος του κώδικα

IOUT	3.	! Καθορίζει τα αρχεία εξόδου του κώδικα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών που θα περιλαμβάνουν
LEV DEN	0.	! Πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων (0 είναι η προεπιλογή και αντιστοιχεί στο EGSM)
NEX	080.	!Μέγιστος αριθμός ενεργειακών βημάτων
HRTW	3.	!Διακυμάνσεις πλάτους έως 3 MeV (που προκαλείται από νετρόνια)
MSD	1.	!Στατιστική προσέγγιση άμεσων αντιδράσεων πολλαπλών βημάτων MSD. Το 1 σημαίνει ότι είναι ενεργοποιημένος αυτός ο υπολογισμός και είναι η προεπιλογή, αν είναι 0 τότε δεν λαμβάνεται υπόψη αυτό το μοντέλο στους τελικούς υπολογισμούς
MSC	1.	!Στατιστική προσέγγιση αντιδράσεων πολλαπλών βημάτων σύνθετου πυρήνα MSC. Λαμβάνει δύο τιμές, 0 και 1, ακριβώς όπως το MSD.
MSDMIN	3.1	!Η ελάχιστη ενέργεια από την οποία ξεκινούν οι υπολογισμοί του μοντέλου MSD
ENDF	2.	!Καθορίζει τη μορφοποίηση από την ENDF
PCROSS	1.5	!Αντιστοιχεί στο Πρότυπο Εξιτονίων, λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 3, με το 0 απενεργοποιείται, ενώ σαν προεπιλογή τίθεται η τιμή 1.5.
* Τρίτο μέρος του κώδικα, σχετίζεται με πληροφορίες για το οπτικό δυναμικό		
OMPOT	-100. 1	!Οπτικό δυναμικό, ο αριθμός αντιστοιχίζεται μέσω της βιβλιοθήκης RIPL στο οπτικό δυναμικό της επιλογής του χρήστη
DIRECT	0.	!Χρήση σφαιρικού οπτικού δυναμικού, όπου το 0 είναι η προεπιλογή
*DIRECT	1.	!Χρήση μεθόδου συζευγμένων καναλιών (coupled channel method, CC) για τον υπολογισμό ανελαστικής σκέδασης στις συλλογικές καταστάσεις (collective levels)
*DIRECT	2.	!Παρόμοια με την τιμή 1, με τη διαφοροποίηση ότι τα κανάλια της ανελαστικής σκέδασης υπολογίζονται μέσα στα πλαίσια της προσέγγισης των συζευγμένων καναλιών
*DIRECT	3.	! Παρόμοια με την τιμή 1, με τη διαφοροποίηση ότι τα κανάλια της ανελαστικής σκέδασης υπολογίζονται μέσα στα πλαίσια της προσέγγισης DWBA. Μόνο για σφαιρικό μοντέλο οπτικού δυναμικού
GSTRFN	1.	!Συνάρτηση Ισχύος ακτίνων-γ, η προεπιλογή είναι 1 και αντιστοιχεί στην Τροποποιημένη Λορεντζιανή τύπου 1 (PLujko MLO RIPL-2)
RECOIL	0.	!Σχετίζεται με τον υπολογισμό ανακρούσεων. Η προεπιλογή είναι 0 και σημαίνει ότι αυτή η εντολή είναι απενεργοποιημένη, ενώ για 1 είναι ενεργοποιημένη

GO

@ Running title may be given in any line starting with @

10.

11.

- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.
- 17.
- 18.
- 19.
- 20.
- 1.

Η εντολή GO δηλώνει ότι το αρχείο τερματίζεται και μετά από αυτή εισάγονται οι τιμές της ενέργειας, σε Mev, για τις οποίες επιθυμείται ο υπολογισμός των ενεργών διατομών των αντιδράσεων.

4.4 Θεωρητικοί υπολογισμοί αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ και $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$

Για την βέλτιστη προσαρμογή των θεωρητικών υπολογισμών των ενεργών διατομών για τις αντιδράσεις ενδιαφέροντος έγινε μια σειρά υπολογισμών κατά τους οποίους δοκιμαστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μεταξύ οπτικών δυναμικών και πυκνοτήτων ενεργειακών καταστάσεων καθώς και άλλων παραμέτρων οι οποίες θα αναφερθούν αναλυτικά παρακάτω.

4.4.1 Οπτικά Δυναμικά και Πυκνότητα Καταστάσεων

Στο πρώτο στάδιο της μελέτης έγινε ο εντοπισμός όλων των διαθέσιμων προτύπων οπτικού δυναμικού της RIPL-3, για προσπίπτοντα νετρόνια με τα χαρακτηριστικά του ατομικού και μαζικού αριθμού των πυρήνων ^{174}Hf και ^{176}Hf . Παρακάτω παρουσιάζονται τα τέσσερα πρότυπα πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων που είναι διαθέσιμα από τον κώδικα EMPIRE τα οποία συγκεντρώνονται στον Πίνακα (4.1).

Κωδικός	Πυκνότητα Καταστάσεων
0	Enhanced Generalized Superfluid Model (EGSM)
1	Generalized Superfluid Model (GSM)
2	Gilbert Cameron Model (G-C)
3	HFB Total Level Densities (HFBM)

Πίνακας 4.1: Όλα τα πρότυπα πυκνότητας καταστάσεων που διατίθενται από τον κώδικα EMPIRE

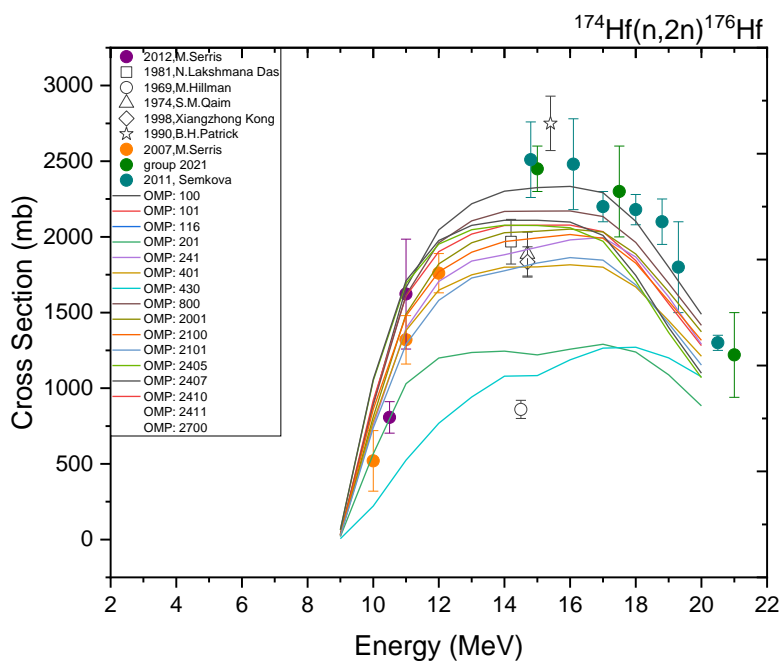
Αρχικά, ελέγχθηκαν όλα αυτά τα οπτικά δυναμικά για ένα συγκεκριμένο πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων, αυτό που ήταν ορισμένο ως προεπιλογή από τον κώδικα, δηλαδή το Βελτιωμένο Πρότυπο Γενικευμένου Υπερρευστού (Enhanced Generalized Superfluid Model, EGSM), ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των οπτικών δυναμικών και για τις δύο αντιδράσεις. Παρουσιάζονται όλα αυτά τα οπτικά δυναμικά που περιγράφουν την αλληλεπίδραση των δυο αυτών πυρήνων με νετρόνια όπως αυτά παρουσιάζονται στον

Πίνακα (4.2), όπου δίνεται και ο κωδικός που αντιστοιχίζεται από τη βιβλιοθήκη ώστε να αναγνωρίζεται το δυναμικό από τον κώδικα.

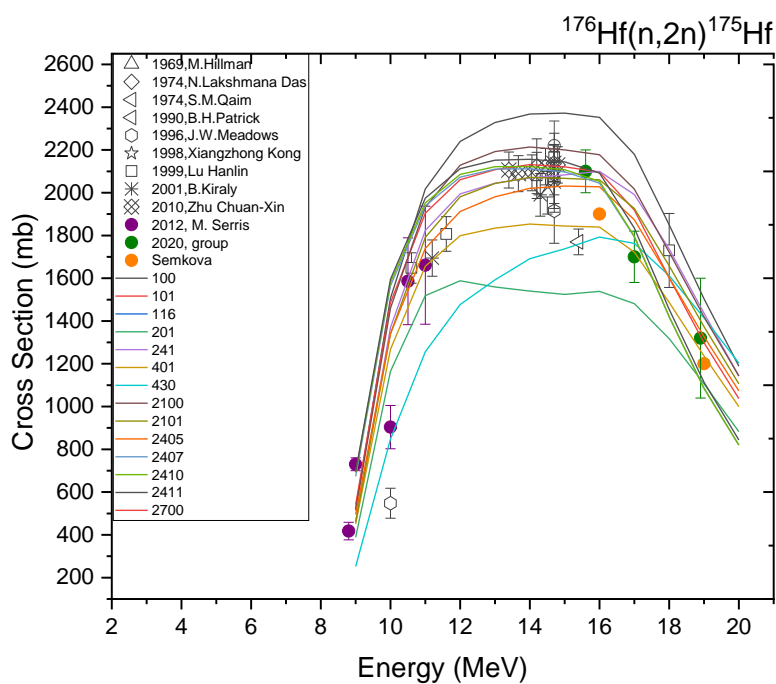
Αριθμός καταλόγου RIPL	Οπτικό δυναμικό	Εύρος ατομικού αριθμού Z	Εύρος μαζικού αριθμού A	Ενεργειακό ευρος (MeV)
100	F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees	20-92	40-238	10-50
101	J.C.Ferrer, J.D.Carlson and J.Rapaport	12-83	24-209	11-11
116	P.A.Moldauer	20-83	40-209	0-5
201	S.Igarasi (1973)	69-74	147-186	0-20
241	S.Igarasi (1974)	69-74	147-186	0-20
401	D.Wilmore and P.E.Hodgson	20-92	40-238	0-25
430	O.Bersillon and Cindro	13-82	27-208	1-24
800	C.A.Engelbrecht and H.Fiedeldey	20-83	40-210	0-155
2001	D.G.Madland	6-82	12-208	50-400
2100	R.L.Varner, W.J.Thompson, T.L.McAbee, E.J.Ludwig, T.B.Clegg	20-83	40-209	10-26
2101	R.L.Walter and P.P.Guss	26-82	54-208	10-80
2405	A.J.Koning, J.P.Delaroche	13-83	27-209	0-200
2407	B.Morillon and P.Romain (2004 & 2006)	27-83	59-209	0-200
2410	B.Morillon and P.Romain (2007)	13-83	27-209	0-200
2411	B.Morillon and P.Romain (2007)	13-83	27-209	0-200
2700	C.A.Engelbrecht and H.Fiedeldey	20-83	40-210	0-155

Πίνακας 4.2: Όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των πυρήνων ^{174}Hf και ^{176}Hf

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες που λήφθηκαν για τις δυο αντιδράσεις που μελετώνται προς σύγκριση με τα πειραματικά σημεία όπως αυτά λήφθηκαν από την EXFOR και από παλιότερες μετρήσεις της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής ΕΜΠ στα σχήματα (4.1) και (4.2).



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{176}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση του ^{174}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGSM

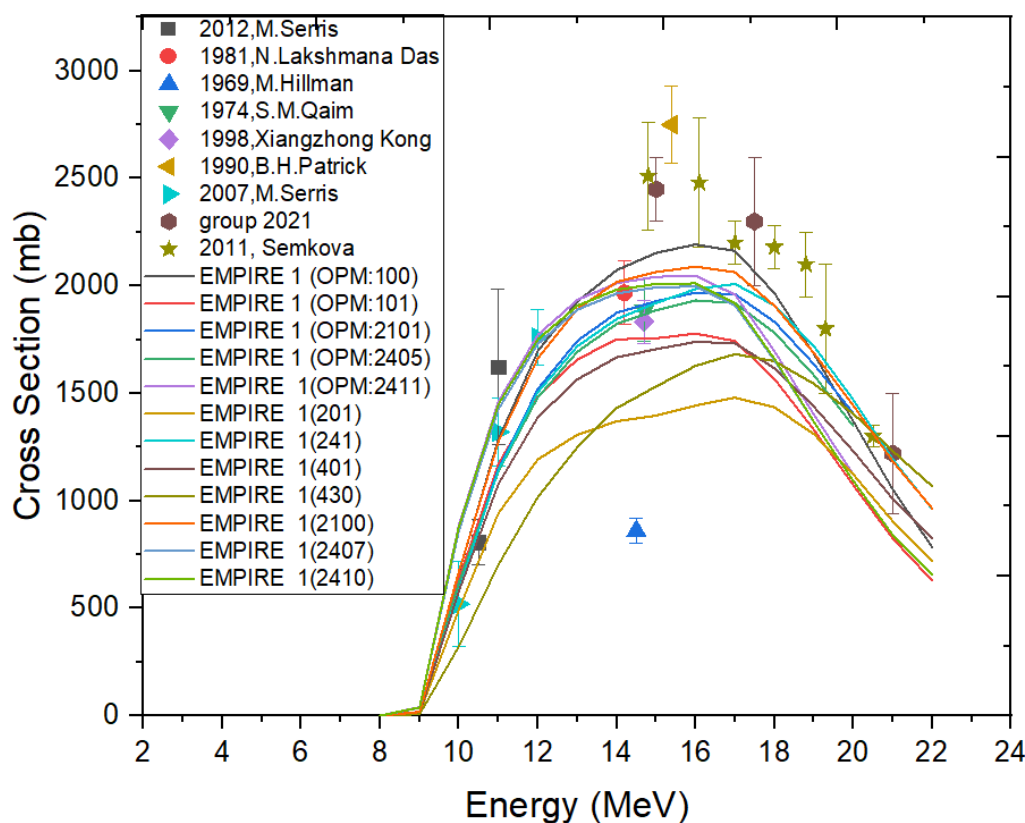


Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την

αλληλεπίδραση του ^{176}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGSM

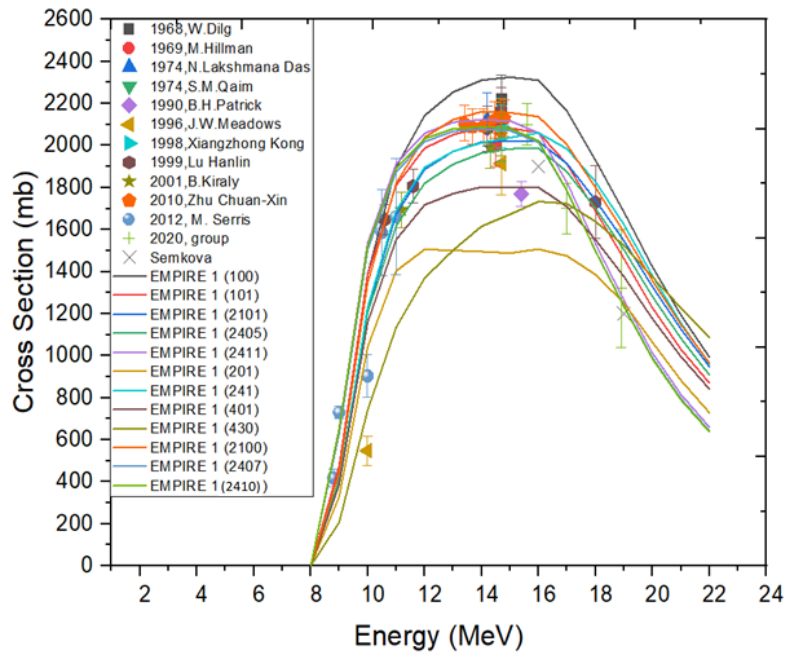
Παρατηρώντας αρχικά τα χαρακτηριστικά όλων των οπτικών δυναμικών σύμφωνα με τον Πίνακα (4.1) παρατηρείται ότι ορισμένα είναι local δυναμικά, δηλαδή έχουν νόημα σε ένα μικρό εύρος ατομικών αριθμών των πυρήνων, όπως τα δυναμικά του S. Igarasi με αριθμό καταλόγου της βιβλιοθήκης RIPL 201 [18] και 241 [19], είτε μικρό ενεργειακό εύρος, όπως του P. A. Moldauer με αριθμό καταλόγου 116 [20]. Αυτά τα δυναμικά, λοιπόν, κρίνονται ακατάλληλα για την μελέτη αυτών των αντιδράσεων. Επιπλέον, από τα γραφήματα, για το EGSM η μόνη θεωρητική καμπύλη που αναπαράγει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ είναι αυτή για το οπτικό δυναμικό των F. D. Becchetti και G. W. Greenlees με κωδικό καταλόγου 100, [21] το οποίο όμως υπερεκτιμά την ενεργό διατομή για την $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ κυρίως στις ενδιάμεσες ενέργειες των νετρονίων.

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής ελέγχθηκαν και τα υπόλοιπα πρότυπα πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων που διατείνονται από τον κώδικα EMPIRE, ώστε να επιλεγθεί σε πρώτη φάση ο κατάλληλος συνδυασμός πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων και οπτικού δυναμικού. Παρουσιάζονται οι καμπύλες των θεωρητικών υπολογισμών για τις δύο αντιδράσεις για το Πρότυπο Γενικευμένου Υπερρευστού (Generalized Superfluid Model, GSM) στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Ακολουθούν στα Σχήματα 4.5 και 4.6 για το Gilbert Cameron και στα Σχήματα 4.7 και 4.8 για το HFBM.

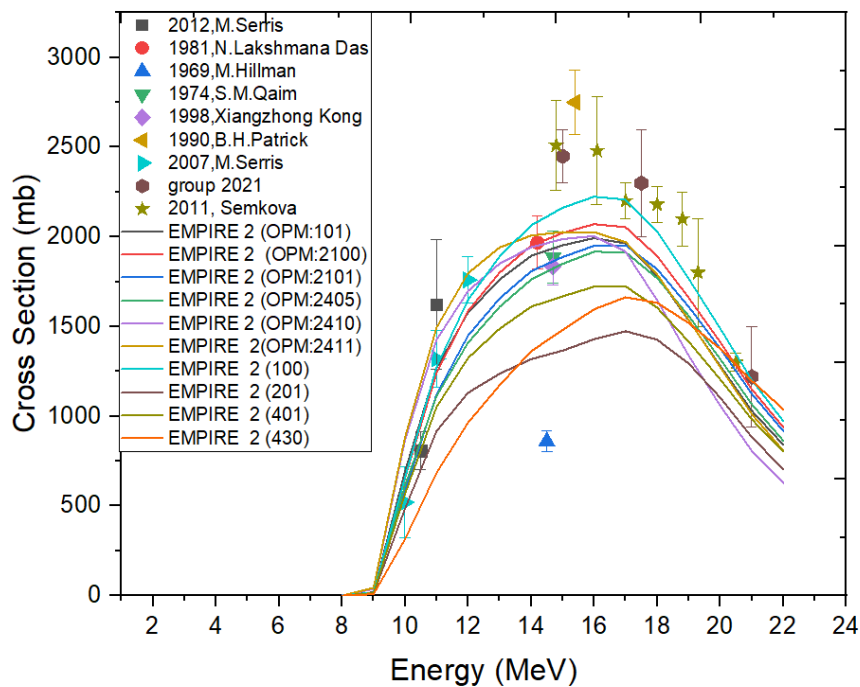


Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την

αλληλεπίδραση του ^{174}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων GSM

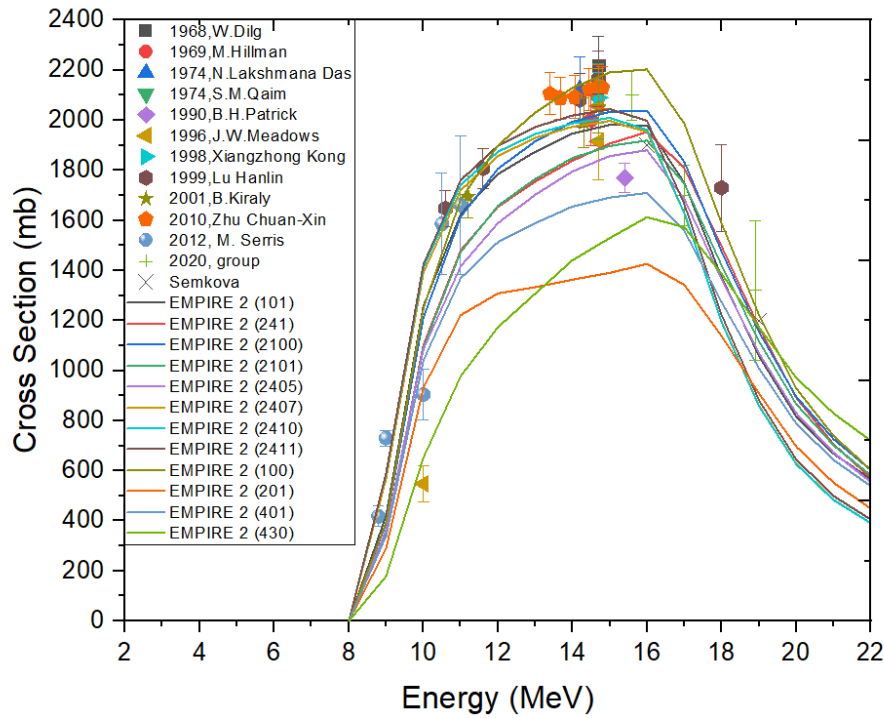


Σχήμα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση του ^{176}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων GSM

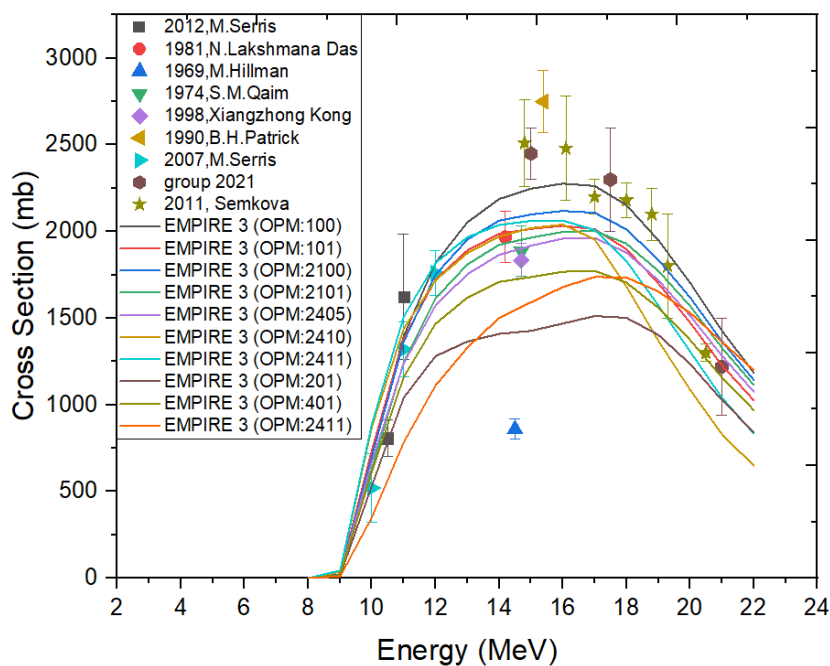


Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την

αλληλεπίδραση του ^{174}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων Gilbert Cameron

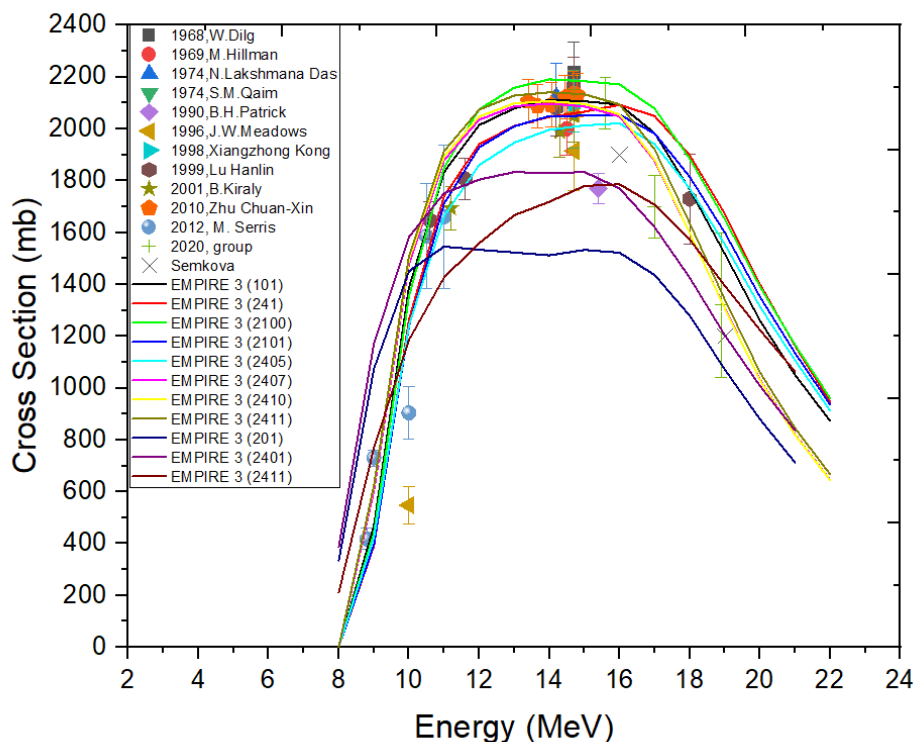


Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση του ^{176}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων Gilbert Cameron



Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την

αλληλεπίδραση του ^{174}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το μικροσκοπικό πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων HFBM



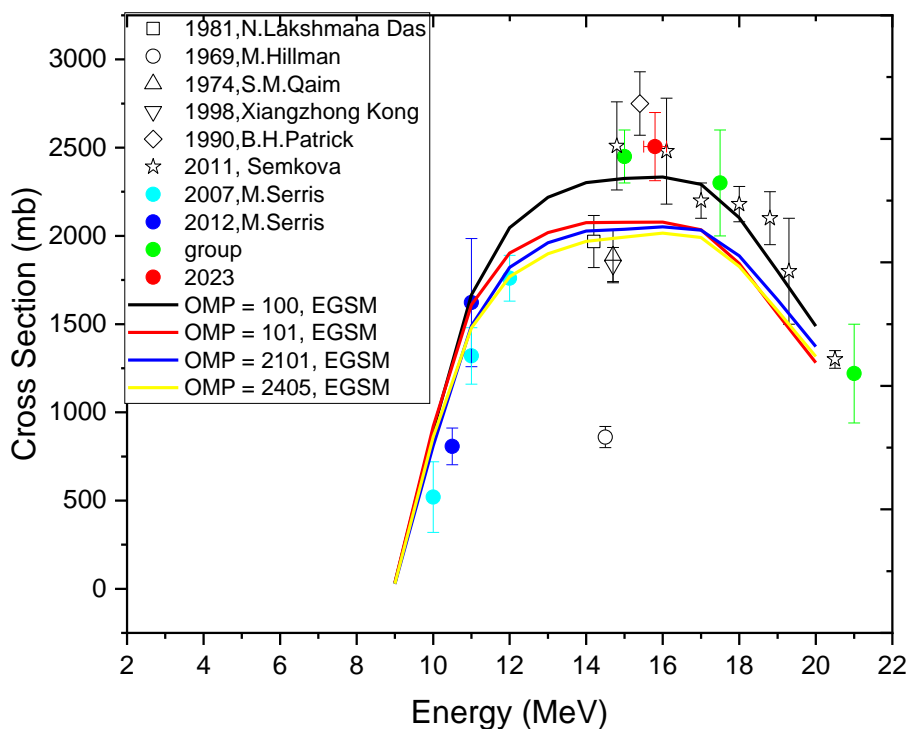
Σχήμα 4.8: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ για όλα τα οπτικά δυναμικά που μπορούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση του ^{176}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το μικροσκοπικό πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων HFBM

4.4.2 Μελέτη κατάλληλου συνδυασμού προτύπων οπτικού δυναμικού και πυκνότητας καταστάσεων για τις αντιδράσεις $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ και $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$

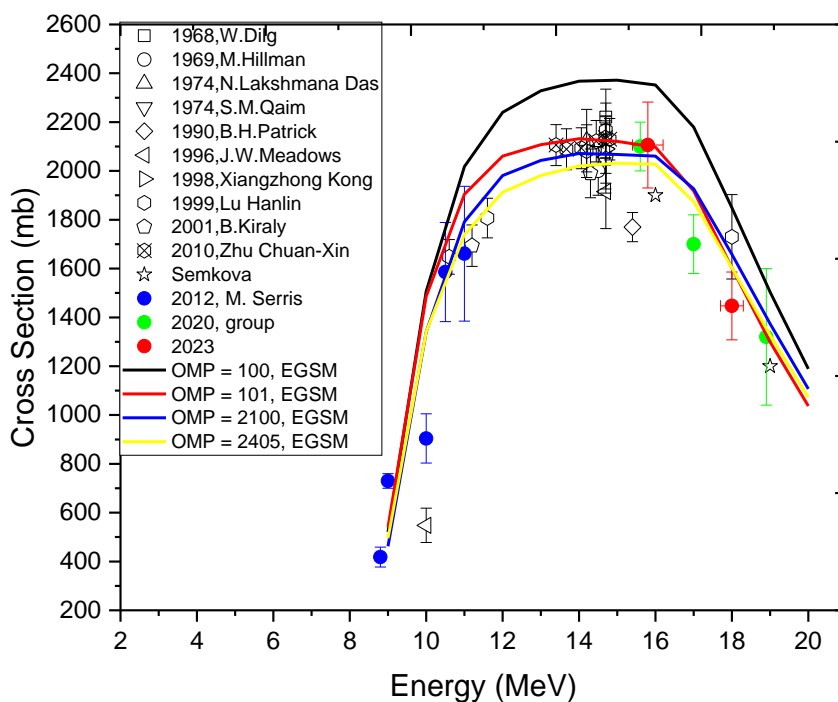
Για τους θεωρητικούς υπολογισμούς των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ και $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ με το EMPIRE, χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί οπτικών δυναμικών και πυκνοτήτων καταστάσεων όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η μελέτη των δύο αντιδράσεων πραγματοποιήθηκε συνδυαστικά ώστε να επιλεγεί ένα πρότυπο πυκνότητας καταστάσεων, σε πρώτη φάση, που να ικανοποιεί τα πειραματικά δεδομένα και των δύο αντιδράσεων. Έτσι λοιπόν, το βέλτιστο πρότυπο πυκνότητας καταστάσεων παρατηρήθηκε πως ήταν το Βελτιωμένο Πρότυπο Γενικευμένου Υπερρευστού (Enhanced Generalized Superfluid Model, EGSM). Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν αυτά τα οπτικά δυναμικά τα οποία προσαρμόζονται καλύτερα με τα πειραματικά δεδομένα και των δύο αντιδράσεων. Αυτά τα δυναμικά είναι:

1. των F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees (OMPOT:100) [21]
2. των J.C.Ferrer, J.D.Carlson and J.Rapaport (OMPOT:101) [22]
3. των R.L.Walter and P.P.Guss (OMPOT:2101) [23]
4. των A.J.Koning, J.P.Delaroche (OMPOT:2405) [24]

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες των ενεργών διατομών μόνο αυτών των τεσσάρων δυναμικών για τις δύο αντιδράσεις που μελετώνται.



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ των πιο ικανοποιητικών οπτικών δυναμικών που μπορούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση του ^{174}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGSM



Σχήμα 4.10: Σχηματική αναπαράσταση των θεωρητικών καμπυλών της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ των πιο ικανοποιητικών οπτικών δυναμικών που μπορούν να

περιγράψουν την αλληλεπίδραση του ^{176}Hf με νετρόνια σε συνδυασμό με το πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGS8

Μεταξύ των τεσσάρων αυτών δυναμικών επιλέχθηκε το οπτικό δυναμικό των F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees μια και είναι το μοναδικό που προσαρμόζεται καλύτερα με τα πειραματικά δεδομένα της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ αν και στην αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ είναι το μόνο που παρουσιάζει υπερεκτιμημένη τη θεωρητική καμπύλη της ενεργού διατομής της.

4.4.3 Διερεύνηση της επίδρασης των μηχανισμών προϊσορροπίας στους υπολογισμούς

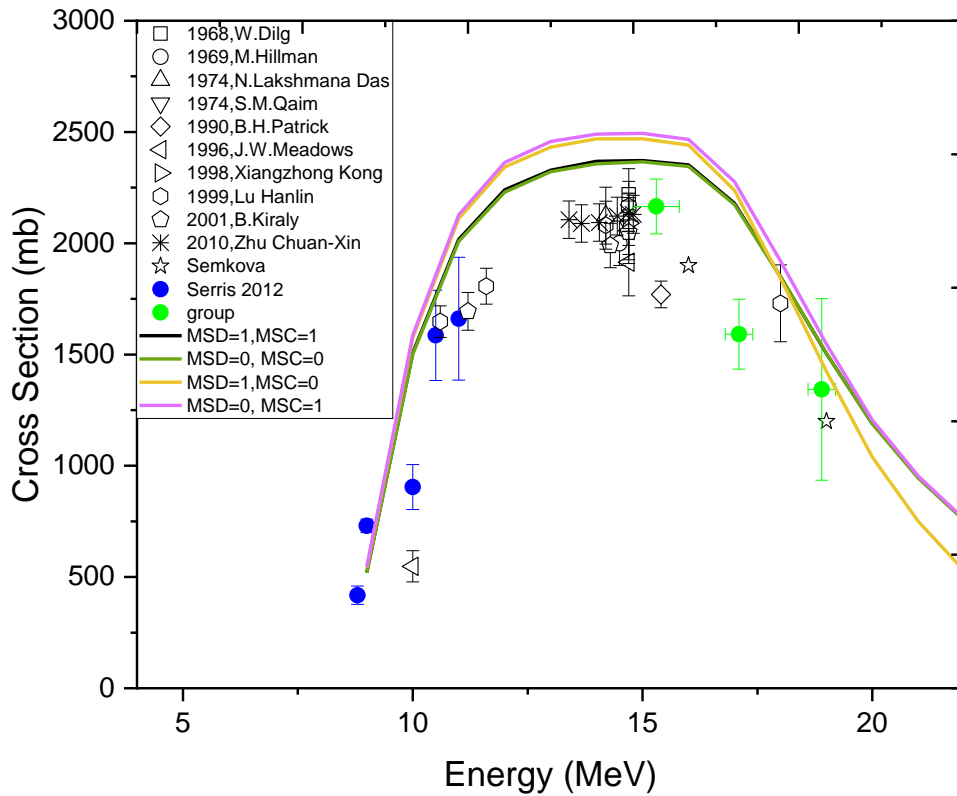
Αφού επιλέχθηκαν οπτικό δυναμικό καθώς και το πρότυπο της πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων διερευνήθηκε η συμπεριφορά της ενεργού διατομής στην περίπτωση που απουσιάζουν οι μηχανισμοί της προϊσορροπίας. Πρακτικά, αν δεν χρησιμοποιούνται αυτοί οι μηχανισμοί από τον κώδικα EMPIRE αυτό σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπ'όψιν στους υπολογισμούς ορισμένα κανάλια εξόδου. Αυτοί οι μηχανισμοί, όπως ήδη αναφέρθηκαν, είναι η στατιστική προσέγγιση άμεσων αντιδράσεων πολλαπλών βημάτων (Multistep Direct, MSD) η οποία ευθύνεται για τον υπολογισμό των άμεσων αντιδράσεων και η στατιστική προσέγγιση αντιδράσεων πολλαπλών βημάτων σύνθετου πυρήνα (Multistep Compound, MSC) αναφέρεται σε αντιδράσεις κατά τις οποίες ο πυρήνας-στόχος περνά από διάφορα ενδιάμεσα βήματα πριν φτάσει στον τελικό σύνθετο πυρήνα. Αποκλείοντας αυτούς του δύο μηχανισμούς, μπορεί να χαθεί η ακρίβεια των προβλέψεων των ενεργών διατομών. Παρόλα αυτά ελέγχεται η ευαισθησία των υπολογισμών της ενεργού διατομής συμπεριλαμβάνοντας και αποκλείοντας τη συνεισφορά αυτών των μηχανισμών. Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε, σε πρώτη φάση, αυτός ο έλεγχος για την αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ μια και ήταν αυτή για την οποία η θεωρητική καμπύλη της ενεργού διατομής δεν προσαρμοζόταν καλά με τα πειραματικά δεδομένα. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν ήταν λαμβάνοντας υπ'όψιν τη συνεισφορά:

- του MSD και του MSC
- του MSD και όχι του MSC
- του MSC και όχι του MSD
- κανενός από τους δύο μηχανισμούς

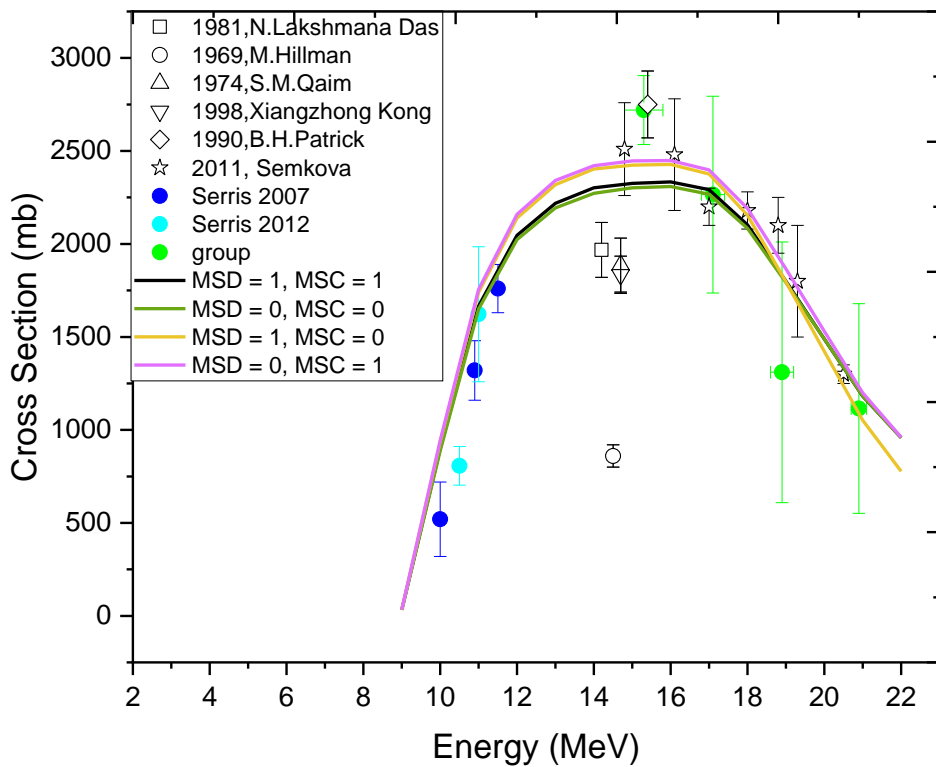
Παρατηρείται πως η ενεργός διατομή αυξάνεται σε όλο το εύρος της ενέργειας των νετρονίων όταν επιδρά μόνο ο ένας από τους δύο μηχανισμούς και πως η συνεισφορά του MSD είναι ελαφρώς ισχυρότερη από αυτή του MSC. Στην περίπτωση που απουσιάζουν και οι δύο μηχανισμοί τότε παρατηρείται σχεδόν αμελητέα μεταβολή της ενεργού διατομής σε σχέση με την περίπτωση που συνεισφέρουν και οι δύο μηχανισμοί.

Πραγματοποιήθηκε ακριβώς ο ίδιος έλεγχος όπως περιγράφηκε και παραπάνω για την αντίδραση $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$. Παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά με την αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ που ήδη μελετήθηκε.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα στο Σχήμα 4.11 και 4.12.



Σχήμα 4.11: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενεργειας των προσπίπτοντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά των μηχανισμών προϊσοροπίας



Σχήμα 4.12: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενεργειας των προσπίπτοντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά των μηχανισμών προϊσοροπίας

4.4.4 Προσπάθειες τροποποίησης της θεωρητικής καμπύλης της $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ με χρήση του κώδικα EMPIRE

Σκοπός των προσπαθειών που πραγματοποιήθηκαν με το EMPIRE είναι να βελτιωθεί η αναπαραγωγή των πειραματικών δεδομένων από τη θεωρητική καμπύλη της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ χωρίς να επηρεαστεί η θεωρητική καμπύλη της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ αλλά και να έχει φυσική σημασία η τροποποίηση που θα υλοποιηθεί. Η θεωρητική καμπύλη της $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ έχει υψηλότερη τιμή από την πειραματική για ενδιάμεσες ενέργειες, από 12 έως 18 MeV. Ο κώδικας EMPIRE δίνει τη δυνατότητα της μεταβολής ορισμένων παραμέτρων και να εξετασθεί η επίδρασή τους στην ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$.

Για χάρη της παρουσίας αυτών των τροποποιήσεων που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω, παρουσιάζονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του Βελτιωμένου Προτύπου του Γενικευμένου Υπερρευστού (EGSM), το οποίο είναι και το βασικό πρότυπο πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων που χρησιμοποιήθηκε.

4.4.4.1 Το Βελτιωμένο Πρότυπο του Γενικευμένου Υπερρευστού (EGSM)

Το βελτιωμένο πρότυπο γενικευμένου υπερρευστού (EGSM) στηρίζεται στην παραδοχή ότι τα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του συστήματος πυρήνα- στόχου και προσπίπτοντος σωματιδίου μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Υπάρχει μια κρίσιμη θερμοκρασία t_{cr} , ή εναλλακτικά μια κρίσιμη ενέργεια E_{cr} , κάτω από την οποία ο πυρήνας βρίσκεται σε υπερρευστή κατάσταση ενώ για ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση της κρίσιμης ενέργειας βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση. Στην υπερρευστή κατάσταση θεωρείται πως έχει ισχύ η θεωρία BCS, κατά την οποία πραγματοποιείται σύζευξη νουκλεονίων στην οποία ιδιότητα οφείλεται η σταθερότητα του πυρήνα [14]. Στην ρευστή κατάσταση του πυρήνα η πυκνότητα καταστάσεων ακολουθεί τη θεωρία του Fermi Gas Model (FGM) και οι συζεύξεις μεταξύ νουκλεονίων εξαφανίζονται. Η κρίσιμη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

$$t_{cr} = 0.567\Delta_o \quad (4.6)$$

όπου ο όρος Δ_o είναι μια συνάρτηση συσχετισμού για την αλληλεπίδραση λόγω σύζευξης νουκλεονίων, της οποίας η τιμή δίνεται από τη σχέση $\Delta_o = 12A^{-\frac{1}{2}}$ (4.7), [25]

Η κρίσιμη ενέργεια δίνεται μέσω της σχέσης:

$$E_{cr} = a_{cr}t_{cr}^2 + E_{cond} \quad (4.7)$$

όπου a_{cr} : είναι η παράμετρος πυκνότητας καταστάσεων που αντιστοιχεί στην κρίσιμη ενέργεια αλλαγής φάσης του πυρήνα και E_{cond} : είναι η ενέργεια συμπύκνωσης η οποία ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την σύζευξη νουκλεονίων, η οποία δίνεται μέσω της σχέσης $E_{cond} = \frac{3}{2\pi} a_{cr}\Delta_o^2$ (4.8)

Επιπλέον, η παράμετρος a της πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων δίνεται από τη σχέση

$$a = \tilde{a} \left[1 + \frac{\delta\varepsilon_o}{E' - E_{cond}} f(E' - E_{cond}) \right] \quad (4.9)$$

όπου \tilde{a} : η ασυμπτωτική τιμή της παραμέτρου a σε πολύ υψηλές ενέργειες και προσδιορίζεται από πειραματικά δεδομένα [15]. Η παράμετρος πυκνότητας καταστάσεων a είναι η πιο σημαντική μεταξύ των παραμέτρων πυκνότητας καταστάσεων και κάθε πυρήνας λαμβάνει μια μοναδική τιμή που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα [26]. Η παράμετρος a στη φάση του υπερρευστού είναι σταθερή και ίση με μια κρίσιμη τιμή a_{cr} που αντιστοιχεί στην κρίσιμη θερμοκρασία t_{cr} . Οι μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου a αντιστοιχούν σε πυκνότερες ενεργειακές καταστάσεις σε ένα ενεργειακό εύρος.

4.4.4.2 Αλλαγές στην ενέργεια που αρχίζει η περιοχή BCS

Η έννοια της περιοχής BCS (από τα αρχικά των Bardeen, Cooper και Schiffer που θεμελίωσαν τη μικροσκοπική θεωρία των υπερρευστών) χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η συμπεριφορά των νουκλεονίων όταν αυτά πλησιάζουν την κρίσιμη ενέργεια, στην οποία αυτά αρχίζουν και δημιουργούν ζεύγη και να φέρεται ο πυρήνας ως υπερρευστό. Υπάρχει, λοιπόν, μια λέξη-κλειδί στον κώδικα EMPIRE, η οποία επιτρέπει να μεταβληθεί αυτή η κρίσιμη ενέργεια. Αυτή η λέξη-κλειδί είναι η LDSHIF και θα πρέπει να βρίσκεται στο δεύτερο μέρος του κώδικα σύμφωνα με τη δομή του κώδικα που δόθηκε παραπάνω. Με αυτή την εντολή, λοιπόν, ορίζεται από τον χρήστη η ενέργεια στην οποία η περιοχή BCS ξεκινά. Η εντολή αυτή μπορεί να λάβει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές και η τελική τιμή της μετατόπισης της ενέργειας είναι η τιμή που δίνεται από το χρήστη μειωμένη κατά 1. Η προεπιλογή του κώδικα για αυτή την εντολή είναι 1 και αντιστοιχεί σε μηδενική μετατόπιση. Η εντολή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους πυρήνες που παίρνουν μέρος στους υπολογισμούς είτε σε συγκεκριμένους πυρήνες αρκεί να προσδιοριστούν ο ατομικός και ο μαζικός αριθμός των επιθυμητών πυρήνων. Παρουσιάζονται δύο παραδείγματα, αντίστοιχα, για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

LDSHIF	2			!Αναφέρεται σε όλους τους πυρήνες. Το 2 αντιστοιχεί σε θετική μετατόπιση 1 MeV
LDSHIF	2	72	174	!Αναφέρεται σε θετική μετατόπιση 1 MeV μόνο στον πυρήνα ^{174}Hf

Η προσαρμογή, λοιπόν, της περιοχής BCS, επηρεάζει ενδεχομένως τη συμπεριφορά του πυρήνα, τις πυκνότητες καταστάσεων τους άρα και την ενεργό διατομή των αντιδράσεων. Βάσει αυτού, μελετήθηκε κατά κύριο λόγο η αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ αφού αυτή ήταν η αντίδραση για την οποία δεν προσαρμοζόταν η θεωρητική καμπύλη της ενεργού διατομής με τα πειραματικά δεδομένα.

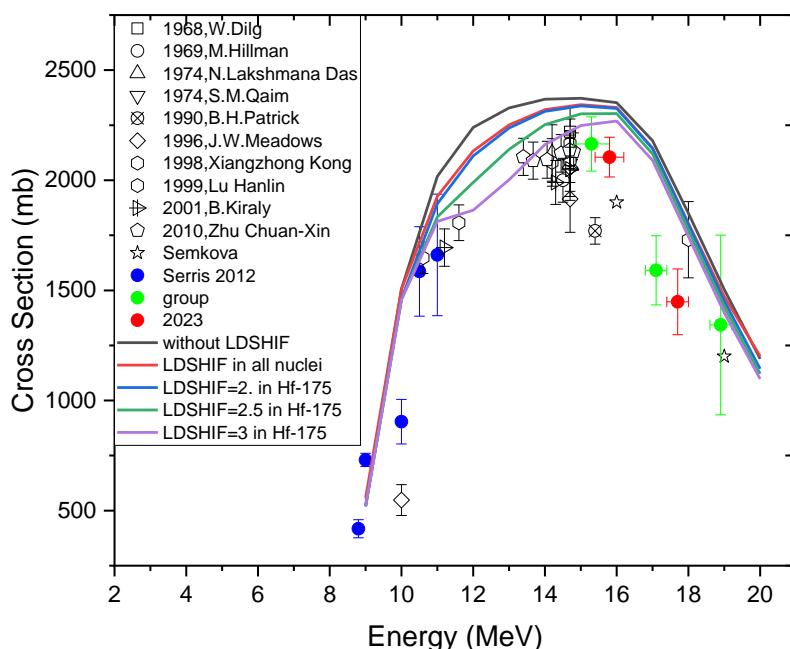
Αρχικά, μελετήθηκε η συμπεριφορά της θεωρητικής καμπύλης της ενεργού διατομής της αντίδρασης στην περίπτωση που εφαρμοστεί η εντολή σε όλους τους πυρήνες που μετέχουν στον υπολογισμό. Σκοπός είναι να χαμηλώσει η καμπύλη, κυρίως στην περιοχή των ενδιάμεσων ενεργειών. Είναι απαραίτητο, όμως, για να έχει φυσική σημασία το τελικό αποτέλεσμα η παρέμβαση που θα λάβει χώρα να είναι η όσο το δυνατόν μικρότερη. Για αυτό το λόγο, διερευνήθηκαν οι πυρήνες οι οποίοι έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην καμπύλη με τη χρήση της συγκεκριμένης εντολής. Μετά από διάφορες δοκιμές παρατηρήθηκε ότι ο μόνος πυρήνας ο οποίος επηρεάζει την θεωρητική καμπύλη της αντίδρασης είναι το ^{175}Hf .

Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα (4.13) όσο αυξάνεται η θετική μετατόπιση της περιοχής BCS τότε η καμπύλη φαίνεται να πέφτει, όπως επιθυμείται, αλλά όσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραμόρφωση της καμπύλης, όπως φαίνεται

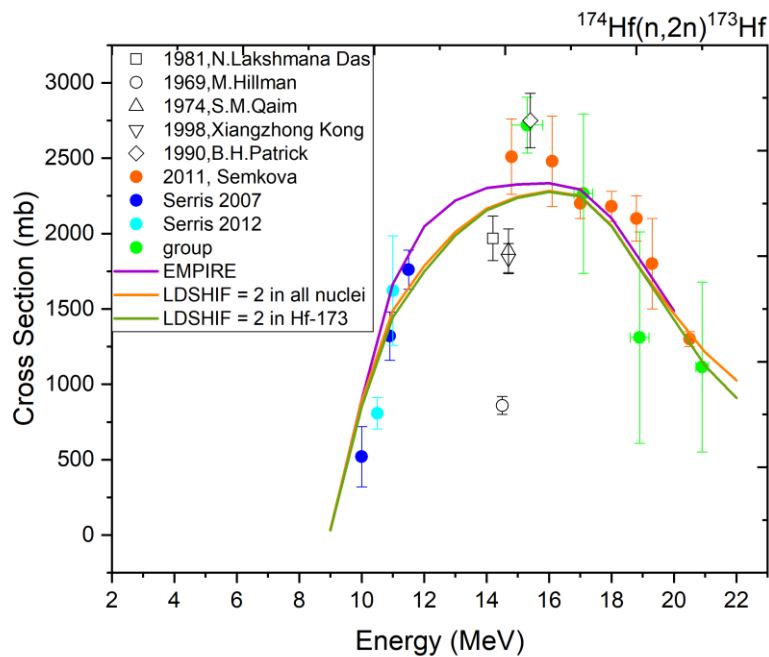
και στο σχήμα για την περίπτωση που εφαρμόζεται η εντολή $LDSHIF = 3$ στον πυρήνα ^{175}Hf , το οποίο αντιστοιχεί σε μετατόπιση 2 MeV . Επίσης, παρατηρείται πως η συγκεκριμένη εντολή έχει επίδραση κυρίως στις ενδιάμεσες ενέργειες, αφήνοντας σχεδόν ανεπηρέαστη την περιοχή των χαμηλών και των υψηλών ενεργειών.

Ελέγχθηκε η ίδια εντολή και στην αντίδραση $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ μόνο για την περίπτωση που $LDSHIF = 2$ για όλους τους πυρήνες που μετέχουν στους υπολογισμούς και μόνο για τον πυρήνα ^{173}Hf ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά και αν συνεισφέρει με παρόμοιο τρόπο όπως και στην αντίδραση που μελετήθηκε προηγουμένως. Παρατηρήθηκε, ότι και σε αυτή την περίπτωση η εφαρμογή της λέξης-κλειδί $LDSHIF$ έχει την ίδια επίδραση στην καμπύλη είτε αναφέρεται σε όλους τους πυρήνες είτε μόνο στον παραγόμενο πυρήνα. Οπότε, σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η χρήση της εντολής αρκεί η εφαρμογή της μόνο στον παραγόμενο πυρήνα ώστε η παρέμβαση να είναι η μικρότερη δυνατή.

Συμπερασματικά, χρησιμοποιώντας την εντολή $LDSHIF$ επιτρέπεται η τροποποίηση των ενεργειακών επιπέδων σε ένα τρόπο που μπορεί να επηρεάσει τον πληθυσμό τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες ενός πυρήνα που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο σπιν, ενδέχεται να είναι πιο ευνοϊκά για την αντίδραση που μελετάται. Ρυθμίζοντας, λοιπόν, τα επίπεδα ενέργειας με το $LDSHIF$, μπορεί να μετακινηθεί ο πληθυσμός αυτών των καταστάσεων, καθιστώντας τις αντιδράσεις λιγότερο ή περισσότερο πιθανές να συμβούν, συμβάλλοντας έτσι στην ενεργό διατομή της αντίδρασης.



Σχήμα 4.13: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το $EGSM$ όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής $LDSHIF$ στη θεωρητική καμπύλη

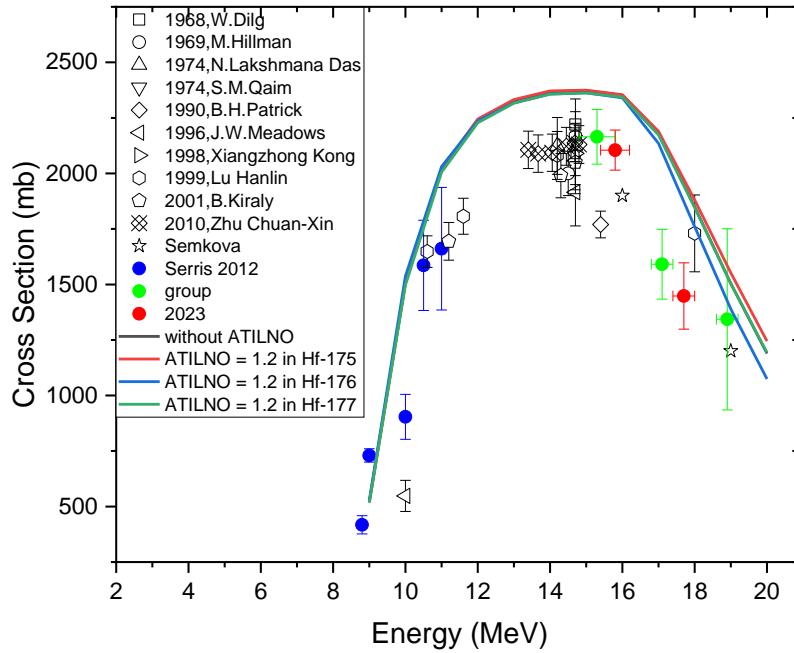


Σχήμα 4.14: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$, συναρτήσεως της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής LDSHIF στη θεωρητική καμπύλη

4.4.4.3 Αλλαγές στην παράμετρο πυκνότητας καταστάσεων α

Η παράμετρος πυκνότητας καταστάσεων α κατέχει βασικό ρόλο στον υπολογισμό της ενέργειας και όλων των θερμοδυναμικών μεγεθών στα πλαίσια του EGSM, με αποτέλεσμα να επηρεάζει σημαντικά την πυκνότητα καταστάσεων στο συνεχές άρα και την ενεργό διατομή των αντιδράσεων. Ο κώδικας EMPIRE δίνει τη δυνατότητα τροποποίησης αυτής της παραμέτρου μέσω της λέξης-κλειδί ATILNO, σύμφωνα με την οποία για τους επιλεγμένους από το χρήστη πυρήνες πολλαπλασιάζονται οι ασυμπτωτικές τιμές της παραμέτρου α , $\tilde{\alpha}$, με την τιμή που δίνεται από το χρήστη. Και σε αυτή την περίπτωση η εντολή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους πυρήνες που παίρνουν μέρος στους υπολογισμούς είτε σε συγκεκριμένους πυρήνες με ακριβώς τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση της λέξης-κλειδί LDSHIF.

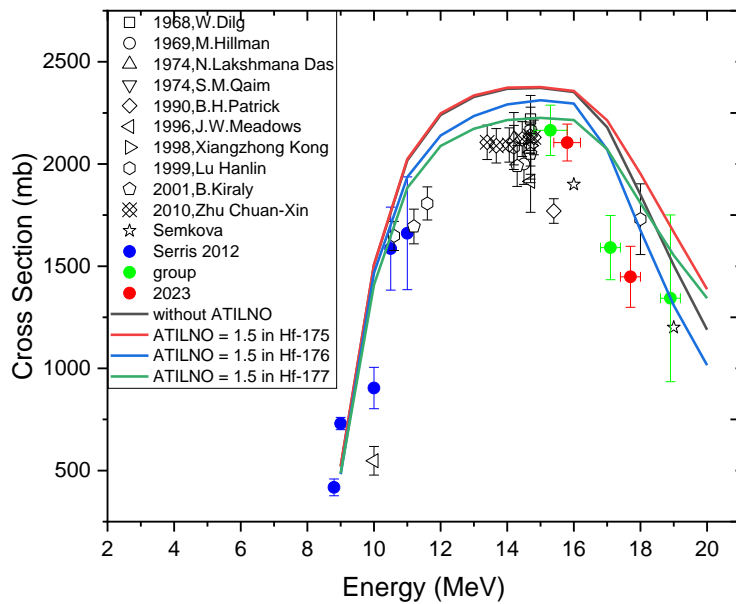
Και σε αυτή την περίπτωση, επιδιώκοντας τη μικρότερη δυνατή παρέμβαση στους υπολογισμούς, διερευνήθηκε για ποιους πυρήνες έχει σημαντικότερη επίδραση η χρήση της εντολής. Αρχικά δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές της εντολής αυτής για τρεις διαφορετικούς πυρήνες ώστε να παρατηρηθεί σε ποιον από αυτούς υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση αυτής της λέξης κλειδί. Παρουσιάζονται παρακάτω αυτές για τις οποίες παρατηρήθηκε η βέλτιστη τροποποίηση της καμπύλης προς την τελική επιθυμητή κατεύθυνση.



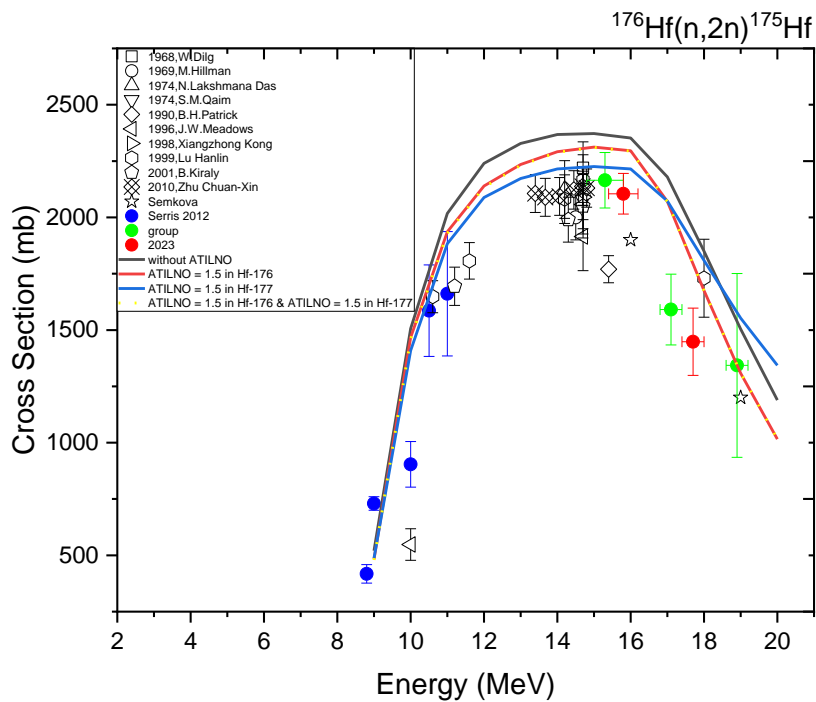
Σχήμα 4.15: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής $\text{ATILNO} = 1.2$ στη θεωρητική καμπύλη

Από το Σχήμα (4.15) φαίνεται ότι σε όποιον πυρήνα κι αν εφαρμοστεί η λέξη κλειδί, με τιμή $\text{ATILNO} = 1.2$, δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη διαφορά από την αρχική καμπύλη εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται για τον δεύτερο σύνθετο πυρήνα (^{176}Hf) όπου βελτιώνεται η υψηλοενεργειακή περιοχή της θεωρητικής καμπύλης.

Στο Σχήμα (4.16) ακολουθεί η διαδικασία αυτή για τους ίδιους πυρήνες αλλά για $\text{ATILNO} = 1.5$. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά σε σχέση με την αρχική καμπύλη. Αν εφαρμοστεί στον δεύτερο σύνθετο πυρήνα (^{176}Hf) τότε βελτιώνεται σημαντικά η εικόνα της θεωρητικής καμπύλης η οποία μειώνεται αρκετά και προσεγγίζει τα πειραματικά σημεία, ειδικά στην περιοχή των υψηλών ενεργειών. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί για τον πρώτο σύνθετο πυρήνα, δηλαδή το ^{177}Hf , τότε στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών οι διαφορές είναι μικρές, στην ενδιάμεση περιοχή των ενεργειών είναι σημαντικά βελτιωμένη η καμπύλη, ενώ η υψηλοενεργειακή περιοχή αποκλίνει από τα πειραματικά σημεία. Για αυτό το σκοπό, αποπειράθηκε η μελέτη της εφαρμογής της λέξης κλειδί και για τους δύο πυρήνες ταυτόχρονα όπως φαίνεται στο Σχήμα (4.17) όπου μετά από διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, η εφαρμογή της εντολής ATILNO δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα μόνο όταν εφαρμόζεται για τον πρώτο ή δεύτερο σύνθετο πυρήνα, ενώ συνδυαστικά αυτοί οι δύο πυρήνες δεν βελτιώνουν σημαντικά την καμπύλη.



Σχήμα 4.16: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσε της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής $\text{ATILNO} = 1.5$ στη θεωρητική καμπύλη

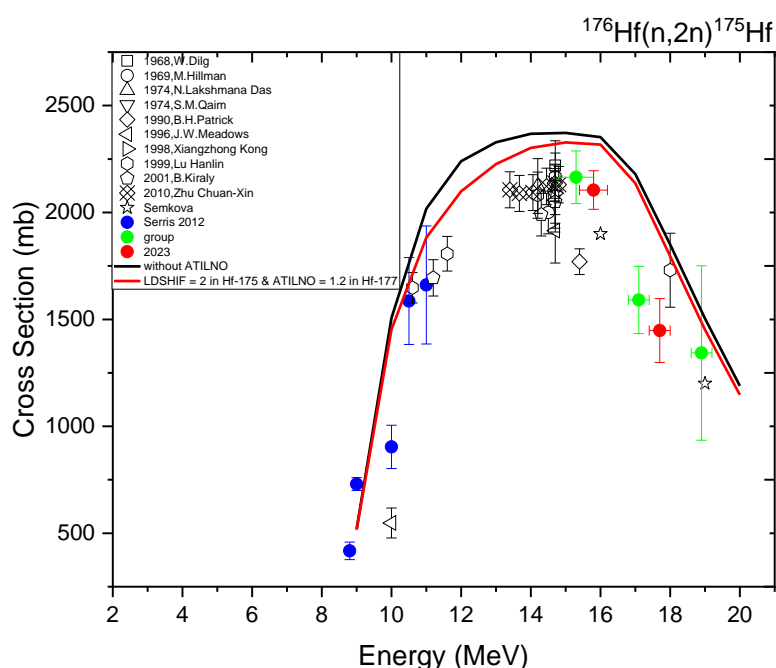


Σχήμα 4.17: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσε της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής $\text{ATILNO} = 1.5$ στη θεωρητική καμπύλη

4.4.4.4 Συνδυασμός των εντολών ATILNO και LDSHIF

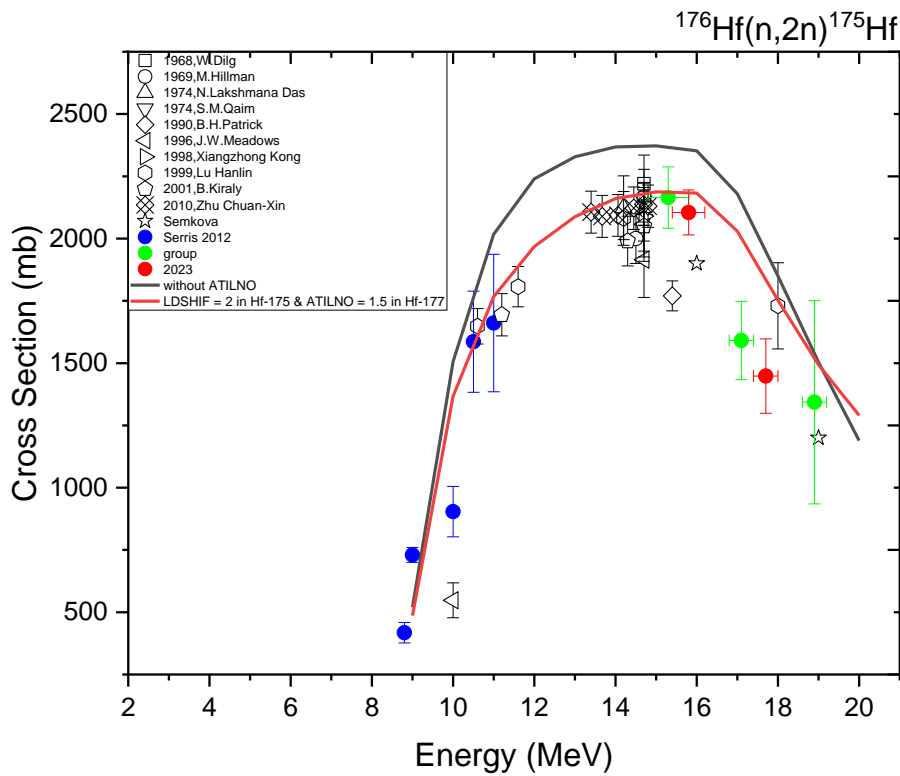
Αφού μελετήθηκε η κάθε εντολή ξεχωριστά ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της κάθε μιας, πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια συνδυασμού των δύο εντολών. Για την περίπτωση της λέξης κλειδί LDSHIF, επιλέχθηκε η τιμή 2, και η εφαρμογή της μόνο στον παραγόμενο πυρήνα, δηλαδή το ^{175}Hf . Ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται και η εντολή ATILNO, για δυο τιμές 1.2 και 1.5, για τον πρώτο συνθετο πυρήνα, τον ^{177}Hf . Στα σχήματα (4.18) και (4.19) παρουσιάζονται αυτά τα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση που LDSHIF = 2, για τον ^{175}Hf και ATILNO = 1.2 για τον ^{177}Hf , παρατηρείται ότι βελτιώνεται η περιοχή των χαμηλών ενεργειών, στις ενδιάμεσες ενέργειες προσεγγίζονται τα πειραματικά σημεία και στις υψηλές ενεργειες, αν και με μικρές διαφορές βελτιώνεται σημαντικά η θεωρητική καμπύλη.



Σχήμα 4.18: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενέργειας των προσπιτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής LDSHIF = 2, στον ^{175}Hf και ATILNO = 1.2 στο ^{177}Hf

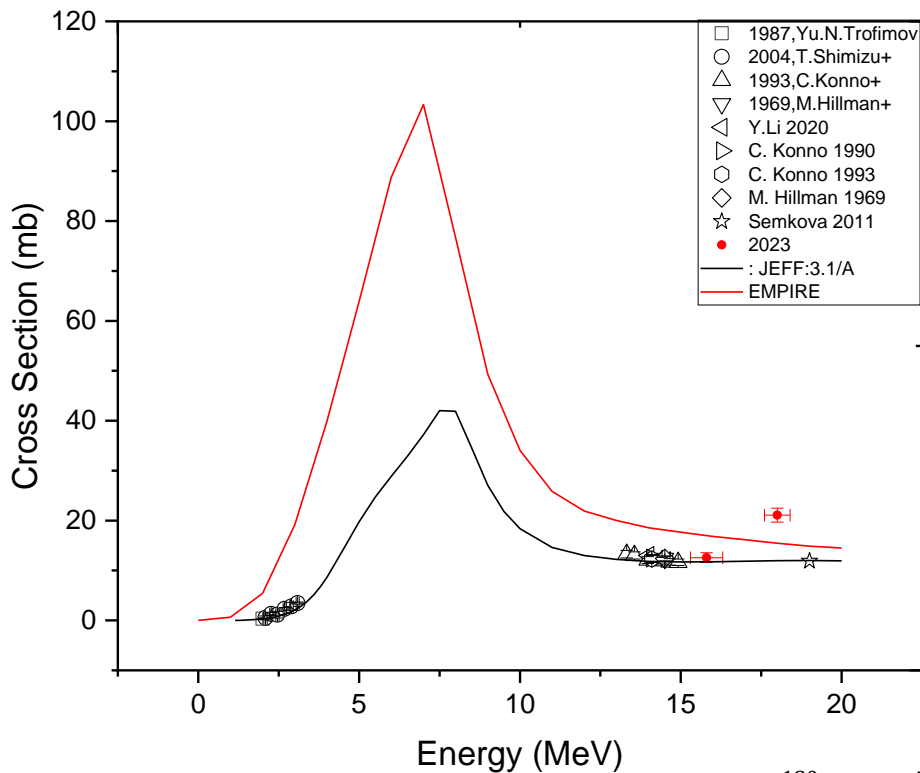
Στην περίπτωση που LDSHIF = 2, για τον ^{175}Hf και ATILNO = 1.5 για τον ^{177}Hf , παρατηρούνται σημαντικότερες αλλαγές προς την επιθυμητή κατεύθυνση, απλώς στις υψηλές ενέργειες η θεωρητική καμπύλη τείνει να αποκλίνει από τα πειραματικά σημεία. Παρόλα αυτά, σκοπός δεν είναι η θεωρητική καμπύλη να περνά από όλα τα σημεία, αλλά κατά κύριο λόγο, να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και οι παρεμβάσεις οι οποίες υλοποιούνται να έχουν φυσική σημασία. Μεταξύ των δύο τιμών επιλέγεται η μικρότερη καθώς με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μικρότερη δυνατή παρέμβαση και ταυτόχρονα η μεταβολή της σταθεράς πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων δεν ξεπερνά το 20% όπως και προτείνεται σε τέτοιου είδους παρεμβάσεις.



Σχήμα 4.19: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά της εντολής LDHSIF = 2, στον ^{175}Hf και ATILNO = 1.5 στο ^{177}Hf

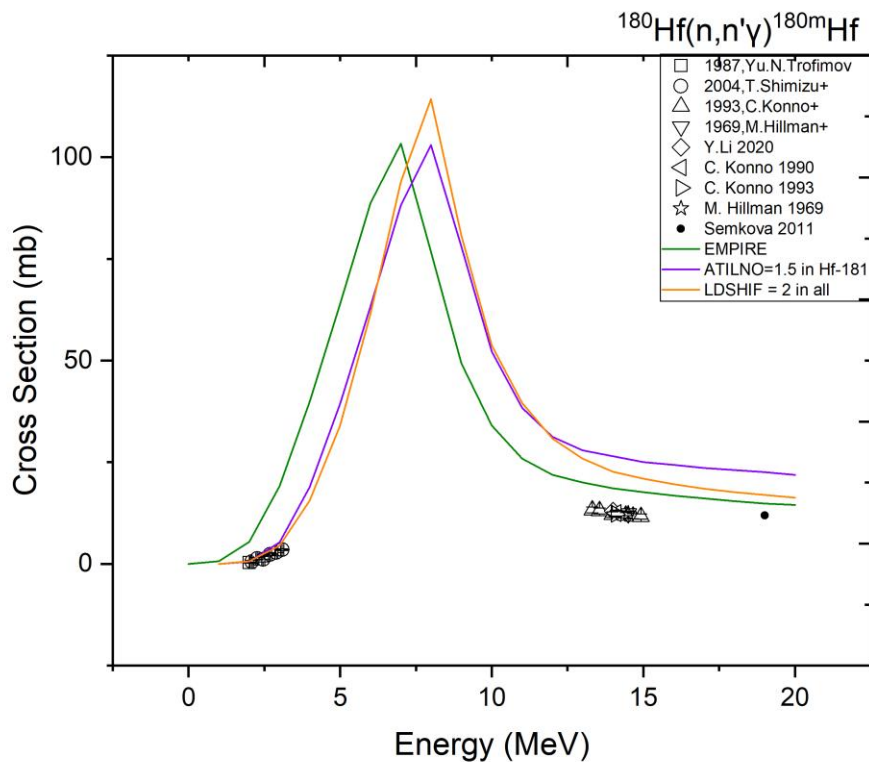
4.4.4.5 Θεωρητική μελέτη της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$

Αφού επιλέχθηκε το δυναμικό και η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων ελέγχθηκε η αντίδραση $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ και πως αναπαράγονται αυτές οι παράμετροι στον υπολογισμό της θεωρητικής ενεργού διατομής της. Το δυναμικό θα είναι το ίδιο και σε αυτή την περίπτωση σε σχέση με τις άλλες δύο $(n,2n)$ αντιδράσεις αφού ο πυρήνας ^{180}Hf αλληλεπιδρά με νετρόνια. Παρακάτω παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη και η προσαρμογή της σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν για αυτή την αντίδραση. Παρατηρείται ότι η πρόβλεψη της καμπύλης είναι υπερεκτιμημένη σε σχέση με το αναμενόμενο και για αυτό το λόγο η συγκεκριμένη αντίδραση χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



Σχήμα 4.20: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$, συναρτήσει της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM και το οπτικό δυναμικό των F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees

Πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά της θεωρητικής καμπύλης της ενεργού διατομής με τη χρήση των λεξεων-κλειδιών (LDSHIF και ATILNO) που περιγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω. Στο σχήμα (4.21) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά. Δοκιμάστηκε η εντολή LDSHIF σε όλους τους πυρήνες ώστε να διερευνηθεί αν υπάρχει συνεισφορά της εντολής και η εντολή ATILNO στον πρώτο σύνθετο πυρήνα. Η μελέτη αυτή της αντίδρασης είναι σε πρωταρχικό στάδιο οπότε και οι προσπάθειες που περιγράφονται είναι απλώς αναγνωριστικές σχετικά με την επίδραση που παρατηρείται κατά την χρήση τους. Αυτό που παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις είναι ότι η θεωρητική καμπύλη και στις δυο περιπτώσεις μετατοπίζεται προς τα δεξιά και προσαρμόζεται πολύ καλύτερα στα πειραματικά σημεία της χαμηλοενεργειακής περιοχής αλλά στις υψηλές ενέργειες εξακολουθεί να υπάρχει μεγάλη απόκλιση. Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα στην ενδιάμεση ενεργειακή περιοχή, δυσκολεύει τη θεωρητική μελέτη της συμπεριφοράς της ενεργού διατομής.



Σχήμα 4.21: Αναπαράσταση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$, συναρτήσεως της ενέργειας των προσπιπτόντων νετρονίων, σύμφωνα με το EGSM και το οπτικό δυναμικό των F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees και έλεγχος των εντολών LDSHIF και ATILNO

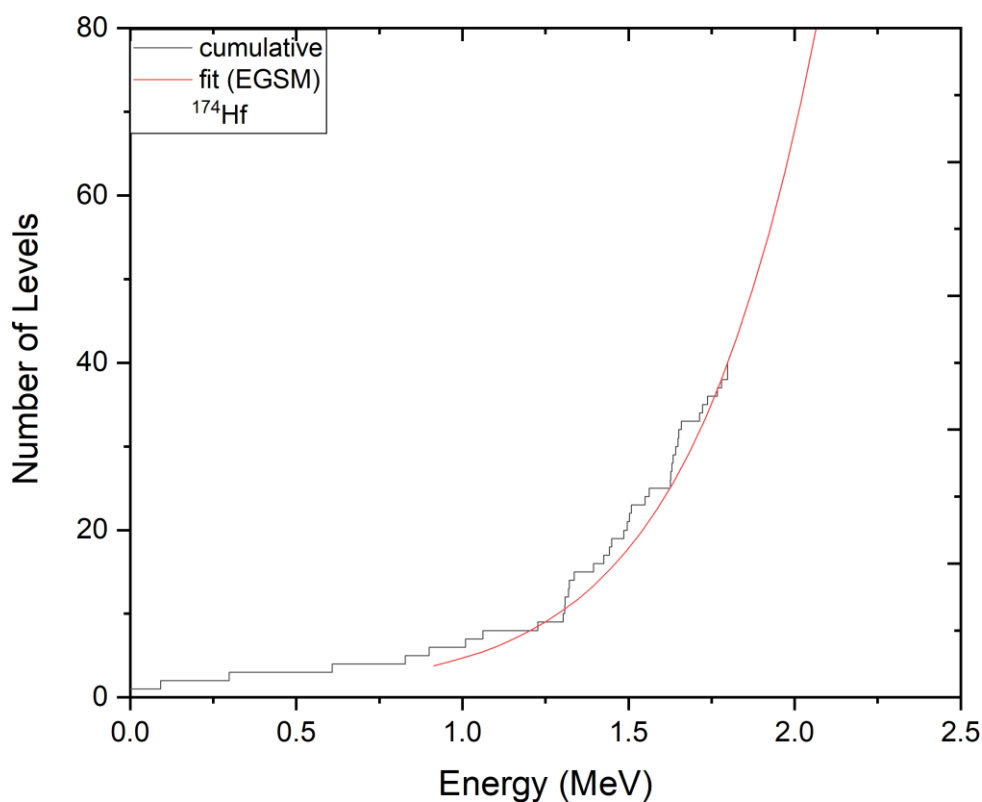
4.5 Προσαρμογή των διακριτών ενεργειακών σταθμών

Η προσαρμογή των παραμέτρων της πυκνότητας των ενεργειακών καταστάσεων κρίνεται αναγκαία πριν πραγματοποιηθούν οποιοδήποτε υπολογισμοί ώστε να ελεγχθεί αν τα αθροιστικά διακριτά ενεργειακά επίπεδα, για τους εμπλεκόμενους στους υπολογισμούς πυρήνες, είναι πλήρη και αν αυτά προσαρμόζονται ικανοποιητικά με την θεωρητική καμπύλη της πυκνότητας καταστάσεων. Στην περίπτωση που δεν παρατηρηθεί ικανοποιητική προσαρμογή μεταξύ των δύο, είναι δυνατή η παρέμβαση από το χρήστη στον αριθμό των ενεργειακών επιπέδων που λαμβάνουν χώρα στους υπολογισμούς. Παρόλα αυτά, αυτό σαν εγχείρημα απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς επεκτείνοντας πολύ το εύρος των διακριτών ενεργειακών καταστάσεων μπορεί να επηρεαστούν σημαντικά οι πυκνότητες των ενεργειακών καταστάσεων των πυρήνων και κατά συνέπεια η τελική ενεργός διατομή που θα υπολογιστεί να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η προσεκτική προσαρμογή της πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων με τις αθροιστικές διακριτές ενεργειακές καταστάσεις πριν από κάθε υπολογισμό της ενεργού διατομής κάποιας αντίδρασης ή μετά από κάθε αλλαγή του αρχείου εισόδου.

Μέσω του κώδικα EMPIRE, δίνεται η δυνατότητα αυτής της μελέτης μέσω της λέξης-κλειδί FITLEV μέσω της οποίας για όλους τους πυρήνες που μετέχουν στους υπολογισμούς πλοτάρονται τα αθροιστικά διακριτά ενεργειακά επίπεδα και το πρότυπο της πυκνότητας

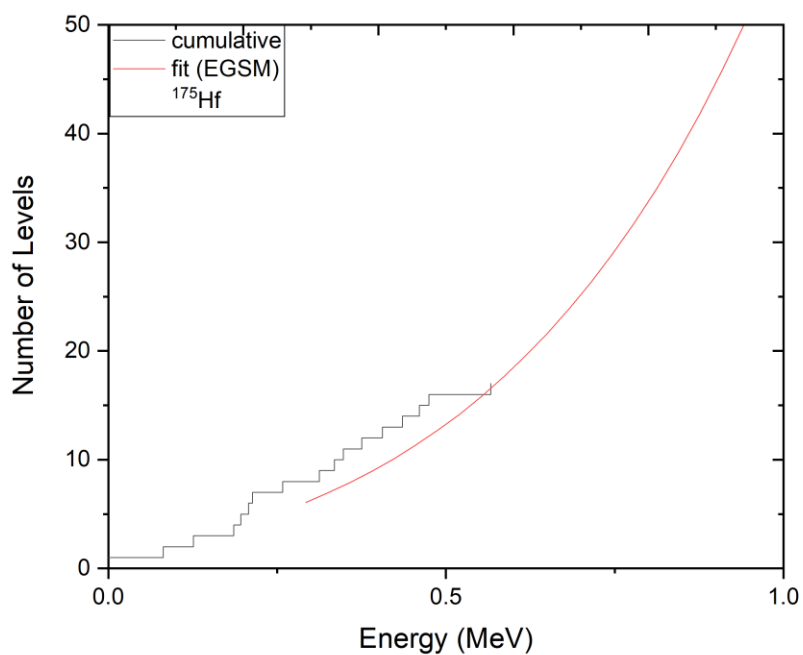
καταστάσεων. Η εντολή αυτή λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0 και εισάγεται στο δεύτερο μέρος του κώδικα.

Παρακάτω παρουσιάζεται αυτή η μελέτη για ορισμένους από τους βασικότερους πυρήνες που παίρνουν μέρος στους υπολογισμούς των παραπάνω αντιδράσεων. Για τον πυρήνα ^{174}Hf όπως φαίνεται και παρακάτω η προσαρμογή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική.

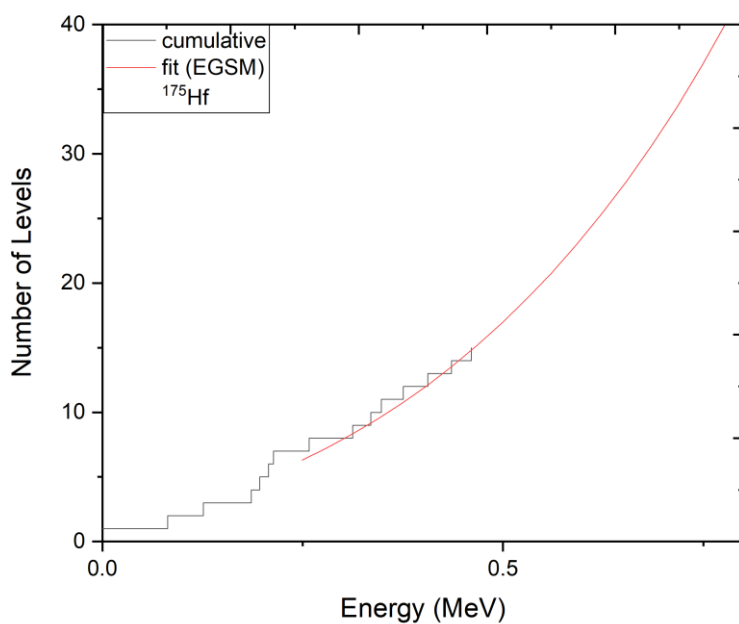


Σχήμα 4.22: Αναπαράσταση του αριθμού των αθροιστικών ενεργειακών επιπέδων και του μοντέλου πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGSM συναρτήσει της ενέργειας για τον πυρήνα ^{174}Hf .

Επίσης, παρουσιάζεται ο πυρήνας ^{175}Hf για τον οποίο παρατηρείται μη ικανοποιητική προσαρμογή όπως φαίνεται στο Σχήμα (4.23). Για αυτό το σκοπό τροποποιήθηκε ο αριθμός των ενεργειακών καταστάσεων που λαμβανονται υπ'όψιν για αυτό τον υπολογισμό οι οποίοι είναι ήδη λίγοι, καθώς η προεπιλογή για τον συγκεκριμένο πυρήνα είναι 17. Μειώνοντας τον μέγιστο αριθμό στα 15 δίνει πολύ καλύτερη προσαρμογή όπως φαίνεται και στο Σχήμα (4.24).



Σχήμα 4.23: Αναπαράσταση των 17 αθροιστικών ενεργειακών καταστάσεων του ^{175}Hf τα οποία δεν μπορούσαν να αναπαραχθούν κατάλληλα με το βελτιωμένο γενικευμένο πρότυπο υπερρευστού (EGSM). Αυτή η περίπτωση είναι η προεπιλογή του EMPIRE.

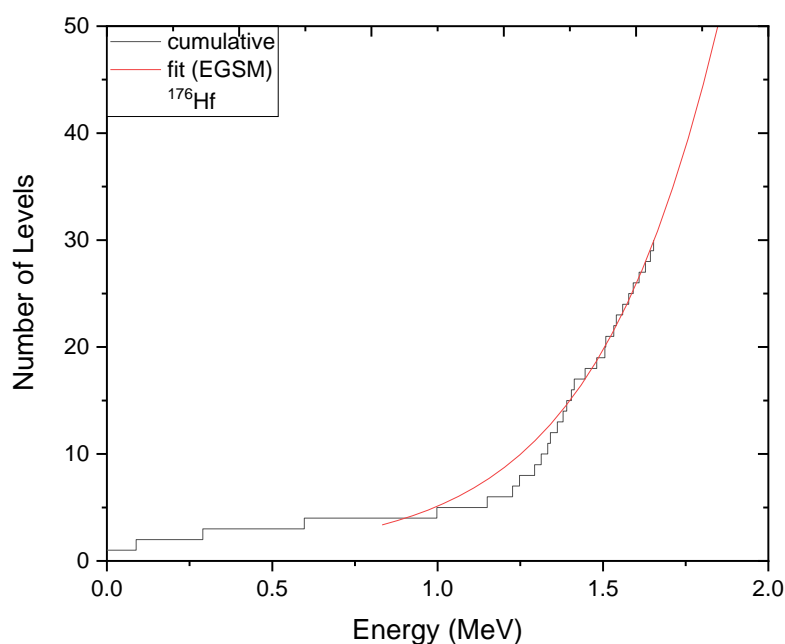


Σχήμα 4.24: Αναπαράσταση των αθροιστικών ενεργειακών καταστάσεων του ^{175}Hf αφού αυτά περιοριστούν στα 15 τα οποία τώρα μπορούν να αναπαραχθούν κατάλληλα με το βελτιωμένο γενικευμένο πρότυπο υπερρευστού (EGSM).

Παρουσιάζεται, επίσης η ίδια μελέτη και για τους πυρήνες ^{176}Hf και ^{177}Hf , οι οποίοι μετέχουν στην αντίδραση που παρουσιάζει τα μη ικανοποιητικά αποτελέσματα στους θεωρητικούς υπολογισμούς.

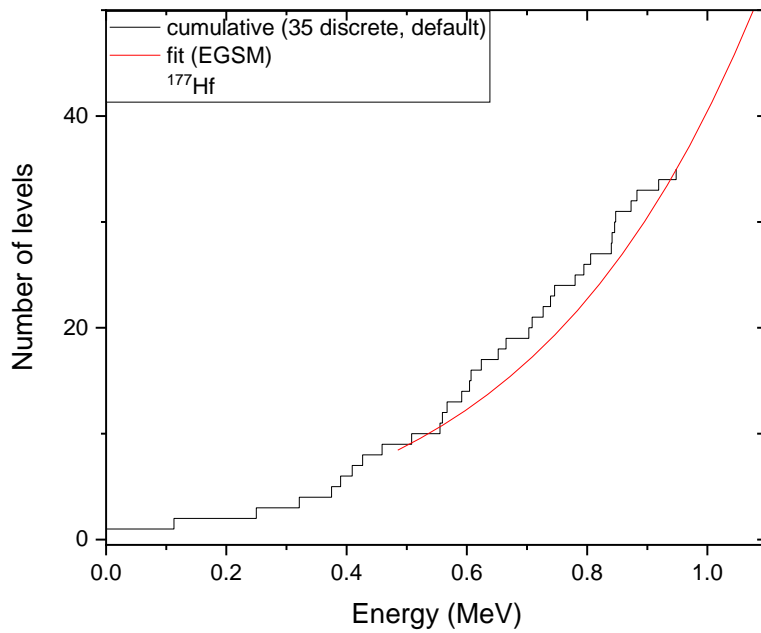
Αρχικά, στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται η αναπαράσταση μοντέλου και αθροιστικών για τον πυρήνα ^{176}Hf , για τον οποίο με την προεπιλογή που δίνεται από τον κώδικα για τον αριθμό των ενεργειακών επιπέδων που λαβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς παρατηρείται καλή συμφωνία.

Σχήμα 4.22: Αναπαράσταση του αριθμού των αθροιστικών ενεργειακών επιπέδων και του μοντέλου πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGSM συναρτήσει της ενέργειας για τον πυρήνα ^{174}Hf .

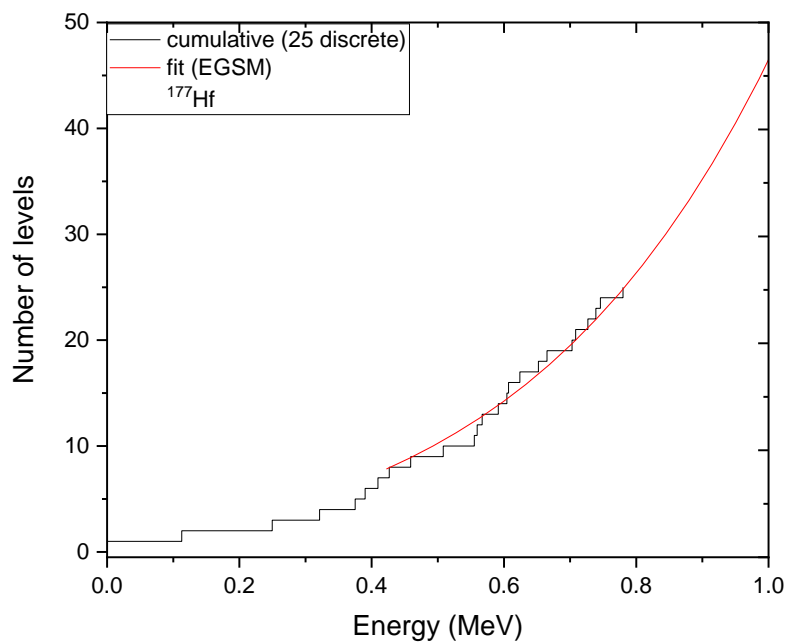


Σχήμα 4.25: Αναπαράσταση του αριθμού των αθροιστικών ενεργειακών επιπέδων και του μοντέλου πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων EGSM συναρτήσει της ενέργειας για τον πυρήνα ^{176}Hf .

Ακολουθεί ο πυρήνας ^{177}Hf , όπου στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η αναπαράσταση αθροιστικών και μοντέλου με την προεπιλογή για τον αριθμό των αθροιστικών ενεργειακών επιπέδων όπως δίνεται από τον κώδικα, ενώ στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η αναπαράσταση για μειωμένο αριθμό αθροιστικών και όπου πετυχαίνεται καλύτερη συμφωνία μεταξύ αθροιστικών ενεργειακών επιπέδων και μοντέλου.



Σχήμα 4.26: Αναπαράσταση των 35 αθροιστικών ενεργειακών καταστάσεων του ^{177}Hf τα οποία δεν μπορούσαν να αναπαραχθούν κατάλληλα με το βελτιωμένο γενικευμένο πρότυπο υπερρευστού (EGSM). Αυτή η περίπτωση είναι η προεπιλογή του EMPIRE.



Σχήμα 4.27: Αναπαράσταση των 25 αθροιστικών ενεργειακών καταστάσεων του ^{177}Hf τα οποία δεν μπορούσαν να αναπαραχθούν κατάλληλα με το βελτιωμένο γενικευμένο πρότυπο υπερρευστού (EGSM). Αυτή η περίπτωση είναι η προεπιλογή του EMPIRE.

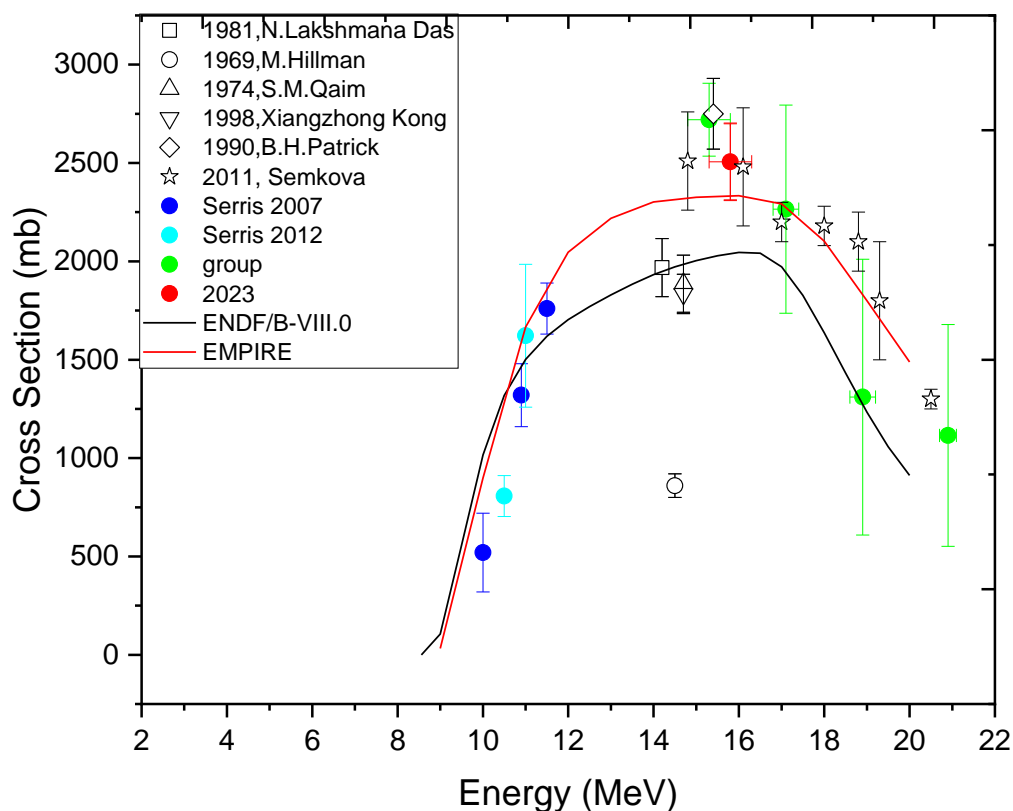
Κεφάλαιο 5

Η παρούσα εργασία αποτέλεσε μια προσπάθεια ολοκληρωμένης μελέτης, σε πειραματικό και θεωρητικό επίπεδο, της ενεργού διατομής αντιδράσεων νετρονίων σε ισότοπα το Hf. Παρουσιάζονται στον Πίνακα (5.1) συνοψίζονται οι πειραματικές τιμές των αντιδράσεων:

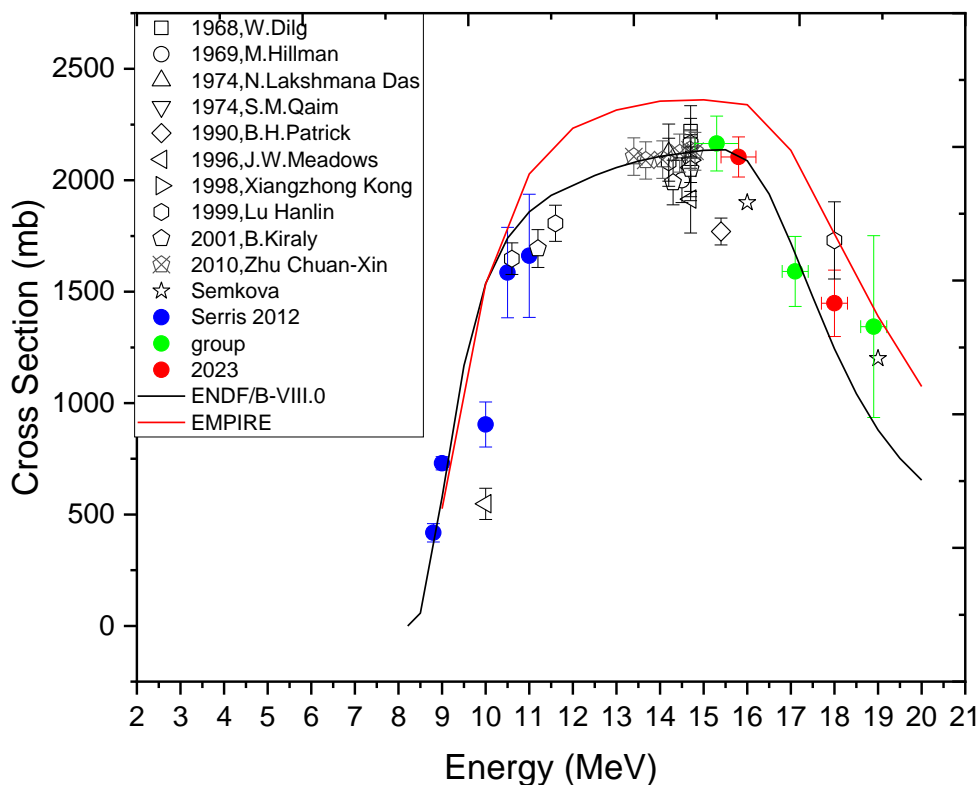
$^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$	
Ενέργεια (MeV)	Ενεργός διατομή σ (mb)
15.8 ± 0.4	2506 ± 193
$^{176}\text{Hf}(n,2n)^{175}\text{Hf}$	
Ενέργεια (MeV)	Ενεργός διατομή σ (mb)
15.8 ± 0.4	2106 ± 176
18.0 ± 0.3	1447 ± 139
$^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$	
Ενέργεια (MeV)	Ενεργός διατομή σ (mb)
15.8 ± 0.4	12.57 ± 0.97
18.0 ± 0.3	21.1 ± 1.4

Πίνακας 5.1: Τελικές πειραματικές τιμές που υπολογίστηκαν

Ακολουθούν τα διαγράμματα στα οποία αναπαριστώνται οι παραπάνω τιμές που υπολογίστηκαν με τα υπόλοιπα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 5.1: Αναπαράσταση του πειραματικού και θεωρητικού αποτελέσματος της μελέτης της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n,2n)^{173}\text{Hf}$ σε σχέση και με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα

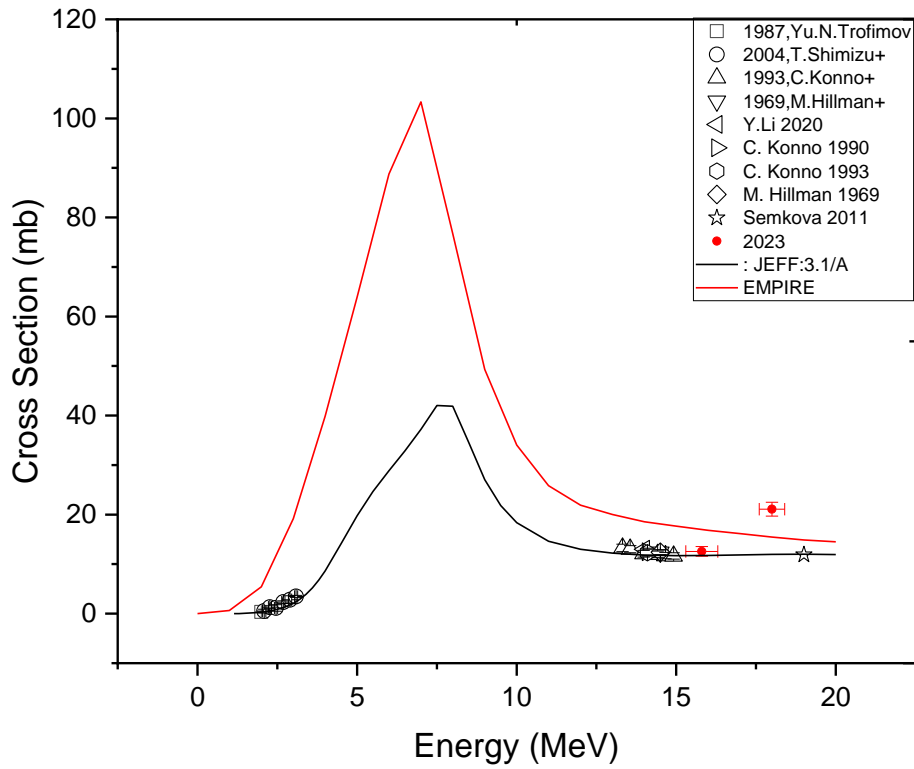


Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση του πειραματικού και θεωρητικού αποτελέσματος της μελέτης της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ σε σχέση και με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα

Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν σε αυτή την εργασία βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα. Οι θεωρητικές καμπύλες που υπολογίστηκαν μέσω του κώδικα EMPIRE 3.2.3 (Malta) προσαρμόζονται, επίσης, πολύ καλά με τα πειραματικά δεδομένα σε ότι αφορά την αντίδραση $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$, ενώ η αντίδραση $^{176}\text{Hf}(n, 2n)^{175}\text{Hf}$ χρήζει περαιτέρω διερεύνησης καθώς είναι υπερεκτιμημένη όπως το ίδιο ισχύει και για την αντίδραση $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$. Οπότε δεν αναπαράγονται ταυτόχρονα το ίδιο ικανοποιητικά σε συνδυασμό και οι τρεις αντιδράσεις από κανένα συνδυασμό οπτικών δυναμικών και πυκνότητας ενεργειακών καταστάσεων. Η καλύτερη δυνατή προσέγγιση θεωρείται ότι πετυχαίνεται με το μοντέλο του ενισχυμένου γενικευμένου υπερρευστού (EGSM) και το οπτικό δυναμικό των F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees.

Ένα βασικό μειονέκτημα της μελέτης αυτής είναι η αδυναμία μέτρησης της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{174}\text{Hf}(n, 2n)^{173}\text{Hf}$ στην υψηλότερη ενέργεια που πραγματοποιήθηκε ακτινοβολήση. Οι κύριοι λόγοι που συντελούν στην αστοχία αυτής της μέτρησης είναι η πολύ χαμηλή ισοτοπική αναλογία του ισοτόπου ^{174}Hf καθώς και η μικρότερη ενεργός διατομή της αντίδρασης στα $\sim 18 \text{ MeV}$.

Συμπερασματικά, όλα τα παραπάνω οδηγούν στην ανάγκη να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με εμπλουτισμένους στόχους ^{174}Hf και ^{176}Hf ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη στατιστική στις μετρήσεις αλλά και να αποφευχθούν οι επιμολύνσεις των αντιδράσεων προς μελέτη από παρασιτικές. Επιπλέον, σε ότι έχει να κάνει με πειραματικές μετρήσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο ενεργειακό εύρος από 12 έως 15 MeV. Τέλος, η θεωρητική μελέτη των αντιδράσεων αυτών απαιτεί παραπάνω διερεύνηση.



Σχήμα 5.3: Αναπαράσταση του πειραματικού και θεωρητικού αποτελέσματος της μελέτης της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{180}\text{Hf}(n, n'\gamma)^{180m}\text{Hf}$ σε σχέση και με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα

Βιβλιογραφία

- [1] Serris, M. *et al.* (2012) ‘Experimental and theoretical study of the (n,2n) reaction on $^{174,176}\text{Hf}$ isotopes’, *Physical Review C*, 86(3). doi:10.1103/physrevc.86.034602.
- [2] *Hafnium* (2023) *Wikipedia*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hafnium>
- [3] M. Serris *a et al.* (2007) *Study of the (N, 2n) cross section of the ^{174}Hf Isotope*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X07007343>)
- [4] R. Vlastou, Cross Section Measurements and Theoretical Study of the $^{174,176}\text{Hf}(n,2n)^{173,175}\text{Hf}$ Reactions, ND 2022 doi:10.1051/epjconf/202328401040
- [5] V. Semkova, Neutron-induced Activation Cross Sections on Hafnium Isotopes from the Threshold to 20 MeV, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 59, No. 2, 1737 (2011)
- [6] Cierjacks, S. and Barschall, H.H. (1983) *Neutron sources for basic physics and applications an OECD/NEA report*. Oxford: Pergamon Press.
- [7] David L. Chichester, Production and applications of neutrons using particle accelerators INL-EXT-09-17312 <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/6302373.pdf>
- [8] A. Kalamara, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (2014) Εφαρμογή της αντίδρασης $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ στην παραγωγή υψηλοενεργειακής δέσμης νετρονίων 17.5 MeV για τη μελέτη της αντίδρασης $^{241}\text{Am}(n,2n)^{240}\text{Am}$, Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/39107>
- [9] Full width at half maximum (2023) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum
- [10] ENDF: Evaluated Nuclear Data File. Available at: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- [11] D’Mellow, B. *et al.* (2007) ‘The replacement of cadmium as a thermal neutron filter’, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 577(3), pp. 690–695. doi:10.1016/j.nima.2007.05.001.
- [12] K. Κομποθανάσης, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (2018), Θεωρητική μελέτη των (n,2n) αντιδράσεων των ισοτόπων $^{191,193}\text{Ir}$ με τη χρήση του κώδικα EMPIRE 3.2.2 Malta
- [13] M. Διακάκη, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (2011), Θεωρητική μελέτη της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(n,2n)$ με χρήση του κώδικα stapre-F, Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/3862>
- [14] Kalamara, A., Διδακτορική Διατριβή (2019) Αντιδράσεις νετρονίων σε Ir και Au και παραγωγή ισομερών καταστάσεων, Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/48968>
- [15] Empire 3.2, nuclear reaction code. Available at: <https://www-nds.iaea.org/empire/>

- [16] RIPL-3: Reference input parameter library. Available at: <https://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>
- [17] EXFOR: Experimental nuclear reaction data. Available at: <https://www-nds.iaea.org/exfor/>
- [18] S.Igarasi, Japan At.Ener.Res. Insti. 1228 , 41 (1973) https://www-nds.iaea.org/cgi-bin/ripl_om_param.pl?Z=72&A=174&ID=201&E1=0.1&E2=150
- [19] S.Igarasi, JAERI-M 5752 (1974) https://www-nds.iaea.org/cgi-bin/ripl_om_param.pl?Z=72&A=174&ID=241&E1=0.1&E2=150
- [20] P.A.Moldauer, Nucl. Phys. 47,65(1963), https://www-nds.iaea.org/cgi-bin/ripl_om_param.pl?Z=72&A=174&ID=116&E1=0.1&E2=150
- [21] F.D.Becchetti, Jr. and G.W.Greenlees, Nucleon-Nucleus Optical-Model Parameters, $A>40$, $E<50$ MeV, Phys. Rev. 182,1190 (1969)
- [22] J.C.Ferrer,J.D.Carlson and J.Rapaport, Nucl.Phys.A275,325(1977), https://www-nds.iaea.org/cgi-bin/ripl_om_param.pl?Z=72&A=174&ID=101&E1=0.1&E2=150
- [23] R.L.Walter and P.P.Guss, Rad. Effects 95, 73 (1986) [1985 Santa Fe Conf. Proc.], https://www-nds.iaea.org/cgi-bin/ripl_om_param.pl?Z=72&A=174&ID=2101&E1=0.1&E2=150
- [24] A.J.Koning, J.P.Delaroche, Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV, Nucl. Phys. A713, 231 (2003), [https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(02\)01321-0](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(02)01321-0)
- [25] Talys. Available at: <https://www-nds.iaea.org/talys/>
- [26] Hasan_Özdoğan a et al. (2021), Estimations of level density parameters by using artificial neural network for phenomenological level density models, Applied Radiation and Isotopes, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109583>
- [27] ENDF: Evaluated Nuclear Data File. Available at: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- [28] Κβαντομηχανική Ι, Σ. Τραχανάς, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, ISBN:978-960-524-206-0