



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΣΥΛΛΗΨΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ ΚΑΙ
ΑΣΤΡΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΒΑΡΒΑΡΑ Ι. ΦΩΤΕΙΝΟΥ

Διπλωματούχος Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Σ. ΧΑΡΙΣΟΠΟΥΛΟΣ

Δ/ντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

ΑΘΗΝΑ, Απρίλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΣΥΛΛΗΨΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ ΚΑΙ
ΑΣΤΡΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΒΑΡΒΑΡΑ Ι. ΦΩΤΕΙΝΟΥ

Διπλωματούχος Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ

ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Σ. ΧΑΡΙΣΟΠΟΥΛΟΣ : Δ/ντής Ερευνών
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» (Επιβλέπων)
2. Α. ΛΑΓΟΓΙΑΝΝΗΣ : Ερευν. Γ'
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
3. Ρ. Ζάννη-Βλαστού : Καθ. ΕΜΠ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ

ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Σ. ΧΑΡΙΣΟΠΟΥΛΟΣ : Δ/ντής Ερευνών
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» (Επιβλέπων)
2. Α. ΛΑΓΟΓΙΑΝΝΗΣ : Ερευν. Γ'
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
3. Ρ. Ζάννη-Βλαστού : Καθ. ΕΜΠ
4. Π. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ : Ερευν. Γ'
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
5. Μ. ΚΟΚΚΟΡΗΣ : Επ. Καθ. ΕΜΠ
6. Θ. ΜΕΡΤΖΙΜΕΚΗΣ : Επ. Καθ. ΕΚΠΑ
7. Κ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ : Αν. Καθ. ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2013

Στους γονείς μου Γιάννη και Ρόζα

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου Γιάννη και Ρόζα για την αγάπη, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που πάντα μου έδειχναν. Χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει να φτάσω μέχρι εδώ. Ευχαριστώ επίσης και τα αδέρφια μου Παναγιώτη και Κώστα καθώς και όλους τους στενούς μου συγγενείς και φίλους οι οποίοι με ανέχτηκαν χωρίς ιδιαίτερες διαμαρτυρίες όλα αυτά τα χρόνια.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον επιβλέποντα αυτής της διδακτορικής διατριβής, Διευθυντή Ερευνών του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, Δρ. Σωτήριο Χαρισόπουλο. Τον ευχαριστώ για όλες τις ευκαιρίες που μου έδωσε και την συμπαράσταση που μου παρείχε, αλλά κυρίως τον ευχαριστώ για τις ατελείωτες ώρες που πέρασε προσπαθώντας να με βοηθήσει στην ανάλυση των δεδομένων του διδακτορικού μου αλλά και τα ξενύχτια που έκανε κατά τη συλλογή των δεδομένων αυτών.

Ευγνωμοσύνη οφείλω επίσης προς τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, Δρ. Ρόζα Ζάννη-Βλαστού, Καθηγήτρια του ΕΜΠ, και Δρ. Τάσο Λαγογιάννη, Ερευνητή Γ' του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”. Την Δρ. Ζάννη-Βλαστού την ευχαριστώ για την καθοδήγηση και πάνω απ' όλα για τη βοήθεια που μου πρόσφερε στις πιο καίριες στιγμές της διατριβής μου. Ο Δρ. Λαγογιάννης είναι ο άνθρωπος που με έκανε να γνωρίσω και να αγαπήσω τον κλάδο της πειραματικής πυρηνικής φυσικής αλλά και ένας από τους ανθρώπους που με στηρίζουν ουσιαστικά από την πρώτη μου μέρα στο “Δημόκριτο”. Τον ευχαριστώ για όλα όσα έχει κάνει για μένα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τη Δρ. Παρασκευή Δημητρίου, Ερευνήτρια Γ' του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, η οποία εκτός του ότι με δίδαξε πάνω στο θεωρητικό κομμάτι, ήταν πάντα πρόθυμη να συζητήσει οποιαδήποτε μου απορία δίνοντάς μου έτσι την ευκαιρία να κατανοήσω πολλά σημεία της θεωρίας. Θα ήθελα επιπλέον να την ευχαριστήσω για την κριτική ανάγνωση των θεωρητικών κεφαλαίων της εργασίας μου.

Ευχαριστώ οφείλω και στους φίλους και συνεργάτες μου Δρ. Γιώργο Προβατά και Δρ. Θοδωρή Κωνσταντινόπουλο, οι οποίοι μου στάθηκαν με κάθε τρόπο σε όλες τις δυσκολίες που συνάντησα αυτά τα χρόνια. Ήμουν τυχερή που μοιράστηκα το γραφείο με αυτά τα δύο

άτομα γιατί εκτός από δύο πολύτιμους συνεργάτες απέκτησα δύο πραγματικούς φίλους. Μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στον Δρ. Μιχάλη Αξιώτη, ο οποίος, με περίσσεια υπομονής, ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει σε οποιοδήποτε είδους πρόβλημα συνάντησα.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω στον Δρ. Μιχάλη Κόκκορη, Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από τα πρώτα χρόνια της σταδιοδρομίας μου καθώς και στον Δρ. Θεωρή Μερτζιμέκη, Επίκουρο Καθηγητή του ΕΚΠΑ για τη στήριξη του σε πολλά στάδια του διδακτορικού μου αλλά και για το χρόνο που αφιέρωσε για την ανάγνωση της εργασίας μου. Τους δύο παραπάνω ανθρώπους, Δρ. Μιχάλη Κόκκορη και Δρ. Θεωρή Μερτζιμέκη, τους ευχαριστώ επίσης και για το γεγονός ότι ακόμα και αν δεν ήταν άμεσα αναμεμιγμένοι με το διδακτορικό μου με έκαναν πάντα να νιώθω ότι μπορώ να τους ζητήσω οποιαδήποτε βοήθεια.

Ευχαριστώ επίσης και τους Δρ. Κώστα Κάλφα και Δρ. Steven Ashley οι οποίοι μου προσέφεραν τις γνώσεις τους πριν πολλές φορές αναγκαστώ να τις ζητήσω καθώς και τους Βίκυ Κανταρέλου και Μίλτο Ανδριάνη για την εξαιρετική συνεργασία τους αλλά και το όμορφο κλίμα που δημιουργούσαν στο εργαστήριο. Ένα ευχαριστώ οφείλω και στον Δρ. Κώστα Παπαδόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ, για την ηθική υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Από το Εργαστήριο του Επιταχυντού Dynamitron Tandem (Dynamitron Tandem Laboratorium, DTL) του Πανεπιστημίου του Bochum, όπου πραγματοποιήθηκε μέρος των μετρήσεων που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Hans-Werner Becker για τη στήριξη που μου προσφέρει μέχρι και σήμερα καθώς και τον Δρ. Detlef Rogalla, ερευνητή του DTL. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Andreas Zilges επικεφαλής της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου της Κολωνίας της Γερμανίας καθώς και τους υποψήφιους διδάκτορες Anne Sauerwein, Lars Netterdon και Andreas Hennig για τη συμμετοχή τους στις εν λόγω μετρήσεις. Επιπλέον ευχαριστώ τα μέλη και των δύο παραπάνω Πανεπιστημίων για τη φιλοξενία που μας έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της παραμονής μας στη Γερμανία.

Part of the experiments presented in this thesis took place at the Dynamitron Tandem Laboratorium-DTL of the University of Bochum in Germany. From this Laboratory I would like to thank Dr. Hans-Werner Becker for his continuous support as well as Dr. Detlef Rogalla for his assistance during the experiments in Bochum. I would also like to thank Dr. Andreas Zilges, leader of the Nuclear Physics group of the the University of Cologne, Germany, as well as the PhD students Anne Sauerwein, Lars Netterdon and

Andreas Hennig for their participation at the measurements. Furthermore, I thank those members of the above two Universities for their hospitality during our stay in Germany.

Ευχαριστώ όλους αυτούς που με στήριξαν με οποιοδήποτε τρόπο όλα αυτά τα χρόνια και ζητώ συγνώμη αν παρέλειψα κάποιον. Καθένας από αυτούς συνέβαλε λιγότερο ή περισσότερο στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Το μεγαλύτερο όμως ευχαριστώ το οφείλω στον Κώστα, τον άνθρωπο που χρόνια τώρα είναι δίπλα μου σε κάθε στιγμή της ζωής μου, με στηρίζει, με καταλαβαίνει και πάντα με τον δικό του ιδιαίτερο τρόπο με βοηθάει να προχωρήσω όταν όλα μου φαίνονται ακατόρθωτα.

Περιεχόμενα

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	1
1.1 Βασικές έννοιες και μηχανισμοί πυρηνικών αντιδράσεων	1
1.2 Ενεργός διατομή	5
1.3 Θεωρία Hauser-Feshbach	6
2 ΑΣΤΡΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ	11
2.1 Βασικές έννοιες	11
2.1.1 Παράθυρο Gamow- Αστροφυσικός Παράγοντας	11
2.1.2 Ρυθμός πυρηνικής αντίδρασης	15
2.1.3 Το φαινόμενο Screening	16
2.2 Πυρηνοσύνθεση στα διάφορα στάδια της ζωής ενός αστέρα	18
2.3 Πυρηνοσύνθεση πάνω από το σίδηρο	20
2.3.1 Οι p -πυρήνες και η διεργασία σύνθεσής τους	22
2.4 Οι περιεκτικότητες των p -πυρήνων και οι αβεβαιότητές τους	23
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	27
3.1 Μετρήσεις στο Εργαστήριο Tandem του "Δημόκριτου"	28
3.1.1 Αναλύσεις στόχων με την μέθοδο XRF	28
3.1.2 Αναλύσεις στόχων με την μέθοδο RBS	30
3.2 Μετρήσεις ενεργών διατομών στη Στουτγκάρδη	42
3.2.1 Μέθοδος και βασικές εξισώσεις	42
3.2.2 Η ανιχνευτική διάταξη στη Στουτγκάρδη	43
3.2.3 Προσδιορισμός της ενεργού διατομής αντίδρασης σύλληψης με τη μέθοδο των γωνιακών κατανομών ακτίνων γ	45
3.2.4 Ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντού Dynamitron	48

3.3	Μετρήσεις ενεργών διατομών στο Bochum	51
3.3.1	Μέθοδος και βασικές εξισώσεις	51
3.3.2	Η ανιχνευτική διάταξη στο Bochum	54
3.3.3	Προσδιορισμός της ενεργού διατομής με την αθροιστική μέθοδο . . .	56
3.3.4	Απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή NaI	57
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	67
4.1	Η αντίδραση $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$	67
4.2	Η αντίδραση $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$	76
4.3	Η αντίδραση $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$	83
4.4	Η αντίδραση $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$	86
4.5	Η αντίδραση $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$	88
4.6	Η αντίδραση $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$	90
4.7	Η αντίδραση $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$	92
4.8	Η αντίδραση $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$	93
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ	97
5.1	Εισαγωγή	97
5.2	Οπτικό Δυναμικό νουκλεονίου-πυρήνα	99
5.2.1	Το φαινομενολογικό πρότυπο Koning και Delaroche (KD)	99
5.2.2	Το (ημι)μικροσκοπικό Οπτικό Δυναμικό των Bauge, Delaroche και Gi- rod (BDG)	101
5.3	Σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις του προτύπου HF	104
5.4	Βελτίωση των παραμέτρων του (ημι)μικροσκοπικού ΟΔ BDG	118
5.4.1	Βελτιστοποίηση των παραμέτρων λ_v και λ_w του ΟΔ BDG	125
5.4.2	Βελτιστοποίηση των σταθερών λ_{v1} και λ_{w1} του ΟΔ BDG	130
5.5	Συμπεράσματα	134
Α'	ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	137
Α'.1	Απώλειες ενέργειας δέσμης πρωτονίων σε στόχο Se	137
Α'.2	Απώλειες ενέργειας δέσμης πρωτονίων σε στόχο Mo	138
Β'	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΑΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	139
Γ'	ΓΩΝΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ	149

Εισαγωγή

Η p -διεργασία (p -process), η διεργασία που περιγράφει τη σύνθεση των λεγόμενων “ p -πυρήνων” (p -nuclei), αποτελεί για την αστρική πυρηνοσύνθεση ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα μελέτης. Κατά τη διεργασία αυτή παράγονται 35 σταθεροί, πλούσιοι σε πρωτόνια πυρήνες, οι οποίοι βρίσκονται βορειοδυτικά της κοιλάδας σταθερότητας μεταξύ των ισωτόπων ^{74}Se και ^{196}Hg . Η σύνθεση των p -πυρήνων πραγματοποιείται μέσω ενός πολύπλοκου δικτύου αντιδράσεων φωτοδιάσπασης, (γ, p) , (γ, n) και (γ, α) , αλλά και των αντίστροφων αντιδράσεων (p, γ) , (n, γ) και (α, γ) . Οι αντιδράσεις αυτές συνοδεύονται από β^+ αποδιεγέρσεις και αντιδράσεις σύλληψης ηλεκτρονίου (“EC”).

Ο κυρίαρχος στόχος όλων των μοντέλων σύνθεσης των p -πυρήνων είναι η ακριβής πρόβλεψη των περιεκτικότητων τους. Ωστόσο, οι παρατηρούμενες στο ηλιακό σύστημα περιεκτικότητες των p -πυρήνων παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από αυτές που προβλέπουν τα μοντέλα πυρηνοσύνθεσης. Τελευταίες μελέτες [1] υποδεικνύουν ότι σε πολλές περιπτώσεις οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να οφείλονται και στις πυρηνικές παραμέτρους που υπεισέρχονται στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Οι τελευταίες εισάγονται στους υπολογισμούς των περιεκτικότητων μέσω των ενεργών διατομών των αντιδράσεων που παίρνουν μέρος στο δίκτυο σύνθεσης των p -πυρήνων.

Ο πειραματικός προσδιορισμός των ενεργών διατομών όλων των αντιδράσεων που συνθέτουν το δίκτυο της p -διεργασίας είναι εξαιρετικά δύσκολος καθώς το πλήθος τους ξεπερνάει τις 20000. Η δυσκολία αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι μεγάλο μέρος των περίπου 2000 πυρήνων που συμμετέχουν στις αντιδράσεις αυτές είναι ασταθείς. Συνεπώς, όλοι οι υπολογισμοί των περιεκτικότητων των p -πυρήνων βασίζονται, αναγκαστικά, σε ενεργές διατομές που υπολογίζονται με τη θεωρία Hauser-Feshbach [2]. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος των προβλέψεων της θεωρίας Hauser-Feshbach και συγκεκριμένα της εγκυρότητας των πυρηνικών μεγεθών που υπεισέρχονται σε αυτή, κατά κύριο λόγο του Οπτικού Δυναμικού (“*Optical Model Potential*”, OMP) νουκλεονίου-πυρήνα και πυρήνα-σωματιδίου α , των Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων (“*Nuclear Level Densities*”, NLD) των πυρήνων που συμμετέχουν στην αντίδραση και των Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ (“ γ -

Strength Functions, γ SF). Η διατριβή αυτή εντάσσεται στο ευρύτερο ερευνητικό πρόγραμμα της ομάδας Πυρηνικής Αστροφυσικής του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, στόχος του οποίου είναι ο έλεγχος των προτύπων OMP, NLD και γ SF μέσω της συστηματικής μελέτης αντιδράσεων σύλληψης πρωτονίων και σωματιδίων α .

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προσδιορίστηκαν οι ενεργές διατομές οχτώ αντιδράσεων πρωτονικής σύλληψης σε ισότοπα του Σεληνίου και του Μολυβδαινίου. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι αντιδράσεις: $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$, $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$, $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$, $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$, $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$, $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε ενέργειες μεταξύ 1.5 και 6.2 MeV, περιοχή που παρουσιάζει ενδιαφέρον στην πυρηνοσύνθεση καθώς καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του παραθύρου Gamow, το οποίο κυμαίνεται από ≈ 1.5 έως ≈ 4.4 MeV για τα ισότοπα του *Mo* και μεταξύ ≈ 1.3 και ≈ 3.9 MeV για τα ισότοπα του *Se*. Σκοπός της εργασίας είναι α) ο εμπλουτισμός της βιβλιογραφίας με πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών σε περιοχές που, ως επί το πλείστον, δεν έχουν μελετηθεί στο παρελθόν για τις παραπάνω αντιδράσεις και β) ο έλεγχος των πυρηνικών μεγεθών που υπεισέρχονται στη θεωρία Hauser-Feshbach. Συγκεκριμένα, οι ενέργειες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της παρούσας διατριβής είναι κατάλληλες για τον έλεγχο και τη βελτίωση του Οπτικού Δυναμικού πρωτονίου-πυρήνα.

Η μελέτη των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ πραγματοποιήθηκε στο τέως Εργαστήριο Φυσικής Ακτινοβολιών (Institut für Strahlenphysik, IfS) του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης με τη μέθοδο των γωνιακών κατανομών (§3.2.1). Η ανιχνευτική διάταξη αποτελούνταν από τέσσερις ανιχνευτές Ge υψηλής καθαρότητας (HPGe) οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί πάνω σε μία γωνιομετρική τράπεζα με σκοπό τη συλλογή δεδομένων για οχτώ συνολικά γωνίες σκέδασης. Η σχετική ανιχνευτική ικανότητα των τριών από αυτούς ήταν 100% ενώ του τέταρτου 76%. Για τη θωράκιση των ανιχνευτών Ge από το υπόβαθρο Compton έγινε χρήση τεσσάρων ανιχνευτών BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$).

Οι μετρήσεις των ενεργών διατομών των αντιδράσεων πρωτονικής σύλληψης στα ισότοπα του *Mo* έλαβε χώρα στο εργαστήριο του επιταχυντιού Dynamitron Tandem (Dynamitron Tandem Laboratorium, DTL) του Πανεπιστημίου του Bochum με τη μέθοδο των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων (§3.3.1). Η ανίχνευση των εκπεμπόμενων ακτίνων γ έγινε με χρήση ενός ανιχνευτή NaI(Tl), διαστάσεων $12'' \times 12''$. Η στερεά γωνία που καλύπτει ο εν λόγω ανιχνευτής για φωτόνια που εκπέμπονται στο κέντρο του είναι περίπου ίση με 4π .

Οι ισοτοπικά εμπλουτισμένοι στόχοι *Se* και *Mo* που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω πειράματα παρασκευάστηκαν αντίστοιχα με τις τεχνικές της εξάχνωσης και της ελασματο-

ποίησης (rolling) στα Πανεπιστήμια της Κολωνίας (IKP) και του Λενιάρου (LNL) καθώς επίσης και στο κέντρο Έρευνας Βαρέων Ιόντων στη Γερμανία (GSI). Η επιφανειακή τους πυκνότητα μετρήθηκε στο Εργαστήριο Επιταχυντού Tandem του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” με την τεχνική του Φθορισμού Ακτίνων X (“*X-ray Fluorescence*”, XRF) (§3.1.1) και την τεχνική της Φασματοσκοπίας Οπισθοσκέδασης Rutherford (“*Rutherford Backscattering Spectrometry*”, RBS) (§3.1.2), αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα παλαιότερων εργασιών [3, 4] καθώς και με υπολογισμούς της θεωρίας Hauser-Feshbach. Οι τελευταίοι πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του κώδικα TALYS (έκδοση 1.4) [5]. Στον εν λόγω κώδικα χρησιμοποιούνται τόσο φαινομενολογικά όσο και (ημι)μικροσκοπικά μοντέλα για τον υπολογισμό του Οπτικού Δυναμικού νουκλεονίου-πυρήνα, των Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων και των Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ . Επιπλέον, τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων παραμέτρων (λ_v , λ_{v1} , λ_w και λ_{w1}) του (ημι)μικροσκοπικού Οπτικού Δυναμικού των Bauge, Delaroche και Girod (BDG) [6].

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συστηματική αυτή μελέτη συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Σε κάθε περίπτωση τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με τις προβλέψεις της θεωρίας Hauser-Feshbach.
2. Το φαινομενολογικό πρότυπο των Koning και Delaroche [7] για το Οπτικό Δυναμικό νουκλεονίου-πυρήνα σε συνδυασμό με τα φαινομενολογικά πρότυπα του Αερίου Fermi Σταθερής Θερμοκρασίας (Constant Temperature Fermi Gas) [5] και της Γενικευμένης Λορεντζιανής (Generalized Lorentzian) [8] για τις Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων και τις Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ , αντίστοιχα, αναπαράγουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα πειραματικά δεδομένα στις ενεργειακές περιοχές που το κανάλι (p, n) είναι “κλειστό”.
3. Ο (ημι)μικροσκοπικός συνδυασμός του Οπτικού Δυναμικού BDG με τις Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων και τις Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ που υπολογίστηκαν με βάση το πρότυπο Hartree-Fock-Bogolyubov [9] φαίνεται να δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που το ανταγωνιστικό κανάλι (p, n) είναι “ανοιχτό”.

Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων λ_v , λ_{v1} , λ_w και λ_{w1} του (ημι)μικροσκοπικού δυναμικού BDG χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα των αντιδράσεων $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία. Σε κάθε αντίδραση λάβαμε υπόψη μόνο την ενεργειακή περιοχή που το κανάλι (p, n) είναι “κλειστό”. Παρατηρήθηκαν τα εξής:

4. Μεταβάλλοντας την παράμετρο λ_v , κατά ένα παράγοντα της τάξης του 5%, οι θεωρητικές καμπύλες περιγράφουν τα πειραματικά σημεία των αντιδράσεων $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ με το βέλτιστο τρόπο.
5. Η εξάρτηση των αντιδράσεων αυτών από την παράμετρο λ_{v1} είναι πολύ μικρή ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ευαισθησία στις παραμέτρους λ_w και λ_{w1} .
6. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ είναι ανεξάρτητη από όλες τις υπό εξέταση παραμέτρους.

Οι αντιδράσεις $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$ εξαιρέθηκαν από την παραπάνω μελέτη καθώς τα ανταγωνιστικά κανάλια εξόδου $^{97}\text{Mo}(p, n)^{97}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, n)^{100}\text{Tc}$ παρουσιάζουν ενέργειες κατωφλίου χαμηλότερες από τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν οι παρούσες μετρήσεις. Εξαιρέθηκαν επίσης και οι αντιδράσεις $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$, $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$ και $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$ καθώς το ανταγωνιστικό κανάλι (p, p') των αντιδράσεων αυτών είναι ισχυρό στις ενέργειες που έγιναν οι μετρήσεις με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί να εξαρτώνται από τα πρότυπα NLD και γSF .

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά η δομή της εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται βασικές έννοιες της πυρηνικής φυσικής όπως οι τύποι των πυρηνικών αντιδράσεων, οι μηχανισμοί μέσω των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί μία πυρηνική αντίδραση και η ενεργός διατομή της. Στο ίδιο κεφάλαιο αναπτύσσεται σε συντομία ο φορμαλισμός της θεωρίας Hauser-Feshbach.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην περιγραφή των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων, των αντιδράσεων, δηλαδή, που λαμβάνουν χώρα σε αστρικά περιβάλλοντα. Τα μεγέθη αυτά είναι το παράθυρο Gamow (§2.1.1), ο αστροφυσικός παράγοντας (§2.1.1), ο ρυθμός αντίδρασης (§2.1.2) και το φαινόμενο Screening (§2.1.3). Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναπτύσσονται οι διεργασίες πυρηνοσύνθεσης που διεξάγονται στο εσωτερικό των αστέρων κατά τα διάφορα στάδια της εξέλιξής τους καθώς και οι διεργασίες σύνθεσης των βαρύτερων του σιδήρου στοιχείων. Έμφαση δίνεται στην διεργασία σύνθεσης των p -πυρήνων καθώς και στις αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των

παρατηρούμενων στο ηλιακό σύστημα περιεκτικότητας των p -πυρήνων και των αντίστοιχων προβλέψεων των μοντέλων πυρηνοσύνθεσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι ανιχνευτικές διατάξεις και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των ενεργών διατομών που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία. Στο ίδιο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι τεχνικές ανάλυσης των στόχων, που χρησιμοποιήθηκαν στις εν λόγω μετρήσεις, καθώς και οι πειραματικές και ανιχνευτικές διατάξεις με τις οποίες έγιναν οι αναλύσεις.

Το τέταρτο κεφάλαιο έχει χωριστεί σε δύο τμήματα. Στο πρώτο παρουσιάζονται τυπικά φάσματα των αντιδράσεων που μελετήθηκαν με τη μέθοδο των γωνιακών κατανομών και οι λεπτομέρειες της ανάλυσής τους. Ακολουθούν τυπικές γωνιακές κατανομές καθώς και τα αποτελέσματα της εν λόγω μελέτης. Στο δεύτερο τμήμα παρουσιάζονται τυπικά φάσματα ακτίνων γ που συλλέχθηκαν με τη μέθοδο των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων μαζί με όλες τις λεπτομέρειες της ανάλυσής τους καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στους θεωρητικούς υπολογισμούς για το Οπτικό Δυναμικό πρωτονίου-πυρήνα, τις Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων και τις Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ . Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα δύο πρότυπα Οπτικού Δυναμικού νουκλεονίου-πυρήνα που λήφθησαν υπόψη στους υπολογισμούς, το φαινομενολογικό πρότυπο των Koning και Delaroche και το (ημι)μικροσκοπικό πρότυπο των Bauge, Delaroche και Girod. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και η σύγκρισή τους με τη θεωρία και δεδομένα παλαιότερων εργασιών. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία βελτίωσης συγκεκριμένων παραμέτρων του Οπτικού Δυναμικού BDG και τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα τελικά συμπεράσματα.

Abstract

The term p -process refers to the process that describes the synthesis of the so-called “ p nuclei”, 35 stable, proton rich nuclei which are located northwest of the valley of stability between the isotopes ^{74}Se and ^{196}Hg . The formation of the p -nuclei takes place via a complicated reaction network which consists of (γ, p) , (γ, n) , (γ, α) and the inverse (p, γ) , (n, γ) and (α, γ) reactions along with β^+ decay and Electron Capture.

All models of p -process nucleosynthesis, developed so far, are not able to satisfactorily reproduce most of the p -nuclei abundances. Recent studies suggest that in many cases the differences may be due to nuclear parameters entering in the theoretical calculations through the reaction rates involved in the reaction network [1]. Due to the huge number of reactions involved in this network p -nuclei abundance calculations have to rely almost entirely on the predictions of the Hauser-Feshbach (HF) theory [2]. It is therefore necessary to check the predictions of HF theory and specifically the reliability of the nuclear parameters entering the HF calculations:

1. the nucleon-nucleus and the nucleus-nucleus Optical Model Potential (OMP),
2. the Nuclear Level Densities (NLD) and
3. the γ -ray Strength Function (γ SF).

The present work is part of the research program of the Nuclear Astrophysics group of NCSR “Demokritos”. This program aims at checking the validity of the OMP, NLD and γ SF models through the systematic study of proton- and α -capture reactions. This thesis focuses on systematic cross-section measurements of proton-capture reactions on Molybdenum and Selenium isotopes. The measurements were performed in the astrophysically relevant energy region from 1.5 to 6.2 MeV. We provide original cross-section data that will enrich the international bibliography and can be used in the qualification of the nuclear parameters entering the theoretical calculations. The measurements were

carried out at beam energies which are convenient for the qualification and optimization of the proton-nucleus optical potential.

The first set of measurements, concerning the $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ and the $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ reactions, were carried out at the Dynamitron accelerator of the University of Stuttgart (IfS) applying the γ -ray angular distribution technique [10]. The experimental setup consisted of four HPGe detectors mounted on a rotating table in order to cover eight scattering angles. The relative efficiency was almost 100% for the three of them and 76% for the fourth. The Compton background was suppressed by using four BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) detectors.

For the second set of measurements, the γ -ray angle integrated technique [11] was used for the determination of the cross sections of the $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$, $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$, $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$, $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ and $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$ reactions. The latter experiments were carried out at the Dynamitron Tandem accelerator (DTL) of the University of Bochum by using a $12'' \times 12''$ NaI detector covering a solid angle of 98% of 4π for photons emitted at its center [12].

The Molybdenum and Selenium targets used for the measurements were respectively prepared by rolling in the form of self-supporting foils and evaporating onto thick Tantalum disks highly isotopically enriched material. The areal density of the targets was determined at the Tandem Laboratory of NCSR "Demokritos" by applying the Rutherford Backscattering Spectroscopy (RBS) and the X-ray Fluorescence (XRF) techniques, respectively. These thicknesses were found to range between 87 and 1123 $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$.

All cross-section data obtained from this work are compared with those reported in literature [3, 4] and the Hauser Feshbach theory. The theoretical calculations have been performed using the *TALYS* code (version 1.4) [5]. In this code the nucleon-nucleus Optical Model Potential, the Nuclear Level Densities and the γ -ray Strength Function can be adjusted according to both phenomenological and semi-microscopic models. All available combinations were taken into account.

A good agreement was observed between the experimental data and several theoretical calculations for every reaction. However there is no unique combination capable of reproducing all cases. Specifically at beam energies lower than the (p, n) reaction energy threshold the combination that seems to reproduce better the experimental data consists of the following phenomenological models:

- the phenomenological model by Koning and Delaroche for the nucleon-nucleus

OMP [7],

- the Constant Temperature Fermi Gas (CTFG) model by Talys group for the Nuclear Level Densities [5] and
- the Generalized Lorentzian model by Kopecky and Uhl (KU) [8] for the γ -ray Strength Function.

At higher energies, the data can be reproduced by the semi-microscopic combination that consists of:

- the Bauge, Delaroche and Girod (BDG) nucleon-OMP [6]
- NLDs based on Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) calculations by Hilaire and Goriely [9] and
- γ -SFs calculated according to the Hartree-Fock-Bogolyubov–Quasi-particle Random-phase Approximation (HFB-QRPA) model.

In addition, the experimental data of this work were used for the optimization of the λ_v , λ_{v1} , λ_w and λ_{w1} parameters of the BDG semi-microscopic OMP. For this purpose, the default values of the above mentioned parameters, obtained by global parameterization, were modified within a range from 50% to 150% with a step of 2% and the corresponding cross sections were calculated by using *TALYS* code. In all cases the Nuclear Level Densities and the γ -ray Strength Function were described by the phenomenological models CTFG and KU respectively.

The above study was carried out for the $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ and the $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ reactions. In each case we took into consideration only the energy region which is below the (p, n) energy threshold. This study resulted to the following conclusions:

1. The theoretical curves fit the experimental data of the $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ and the $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ reactions by modifying the parameter λ_v by a factor of 5%.
2. The cross sections of the aforementioned reactions depend weakly on the λ_{v1} parameter and are independent of the λ_w and λ_{w1} parameters.

3. The cross section of the $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ reaction is independent of all the parameters examined.

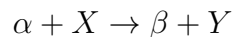
The remaining reactions were excluded from this process as the competitive reactions $^{78}\text{Se}(p, p')^{78}\text{Se}$, $^{92}\text{Mo}(p, p')^{92}\text{Mo}$, $^{94}\text{Mo}(p, p')^{94}\text{Mo}$, $^{97}\text{Mo}(p, n)^{97}\text{Tc}$ and $^{100}\text{Mo}(p, n)^{100}\text{Tc}$ are too strong in the energy range covered by these measurements. For these reactions the calculations are sensitive not only on the optical potential but also on other nuclear parameters (NLD, γ -SF).

Κεφάλαιο 1

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Βασικές έννοιες και μηχανισμοί πυρηνικών αντιδράσεων

Θεωρούμε σωματίδιο α (“βλήμα”) το οποίο προσκρούει σε πυρήνα-στόχο X . Η πυρηνική αντίδραση:



χαρακτηρίζεται από τα προϊόντα β και Y . Στην απλή περίπτωση που το βλήμα σκεδάστηκε από το πυρηνικό δυναμικό ή το δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου τα προϊόντα θα ταυτίζονται με τα αντιδρώντα. Η σκέδαση αυτή μπορεί να είναι:

- Ελαστική: στις περιπτώσεις που η στροφορμή, η ιδιοστροφορμή και η ενεργειακή κατάσταση των σωματιδίων α και X καθώς και η ολική κινητική ενέργεια του συστήματος βλήμα-στόχος δεν μεταβάλλονται.
- Ανελαστική: αν ένας από τους αντιδρώντες πυρήνες α ή X μεταβεί σε μία διεγερμένη κατάσταση (α^* ή X^*) κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα βλήμα-στόχος χάνει ενέργεια μέσω της ακτινοβολίας γ που θα εκπεμφθεί κατά την αποδιέγερση του εν λόγω πυρήνα.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις έχουμε πυρηνικές αντιδράσεις που ταξινομούνται ως εξής:

- Αντιδράσεις μεταφοράς: Ένα ή περισσότερα νουκλεόνια μεταφέρονται από το βλήμα στον πυρήνα-στόχο ή αντίστροφα.

- Αντιδράσεις διάσπασης: Ένας εκ των πυρήνων α ή X διασπάται σε δύο ή περισσότερους πυρήνες.
- Αντιδράσεις ανταλλαγής φορτίου: Ένα πρωτόνιο του βλήματος ανταλλάσσεται με ένα νετρόνιο του στόχου ή αντίστροφα.
- Αντιδράσεις σύλληψης (capture reactions): Το βλήμα ${}_Z^a\alpha$ και ο πυρήνας-στόχος ${}_Z^AX$ συγχωνεύονται σχηματίζοντας τον σύνθετο πυρήνα ${}_{Z+z}^{A+a}C^*$. Σε μία αντίδραση σύλληψης, η αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Για όλες τις πυρηνικές αντιδράσεις ορίζεται μία τιμή Q (“ Q -value”), η οποία εκφράζει τη διαφορά μάζας μεταξύ προϊόντων και αντιδρώντων. Η τιμή Q μίας αντίδρασης $X(\alpha, \beta)Y$ δίνεται από τη σχέση:

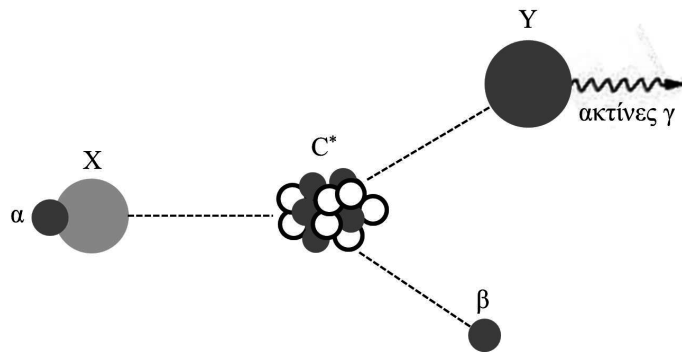
$$Q = (m_\alpha + m_X)c^2 - (m_\beta + m_Y)c^2 \quad (1.1)$$

όπου m_α , m_X οι μάζες του βλήματος και του πυρήνα στόχου σε MeV/c^2 και m_β , m_Y οι μάζες του εκπεμπόμενου σωματιδίου και του παραγόμενου πυρήνα, αντίστοιχα. Αν η Q -value είναι θετική, η αντίδραση είναι εξώθερμη και πραγματοποιείται για κάθε ενέργεια δέσμης. Στην περίπτωση που η Q -value είναι αρνητική η ελάχιστη κινητική ενέργεια που πρέπει να δοθεί στο βλήμα για να λάβει χώρα η αντίδραση (“ενέργεια κατωφλίου”, E_{th}) είναι περίπου ίση με την Q -value της αντίδρασης αυτής.

Οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε ένα στάδιο, όπως οι αντιδράσεις διάσπασης και μεταφοράς και ονομάζονται άμεσες αντιδράσεις ή σε δύο στάδια, μέσω σχηματισμού σύνθετου πυρήνα.

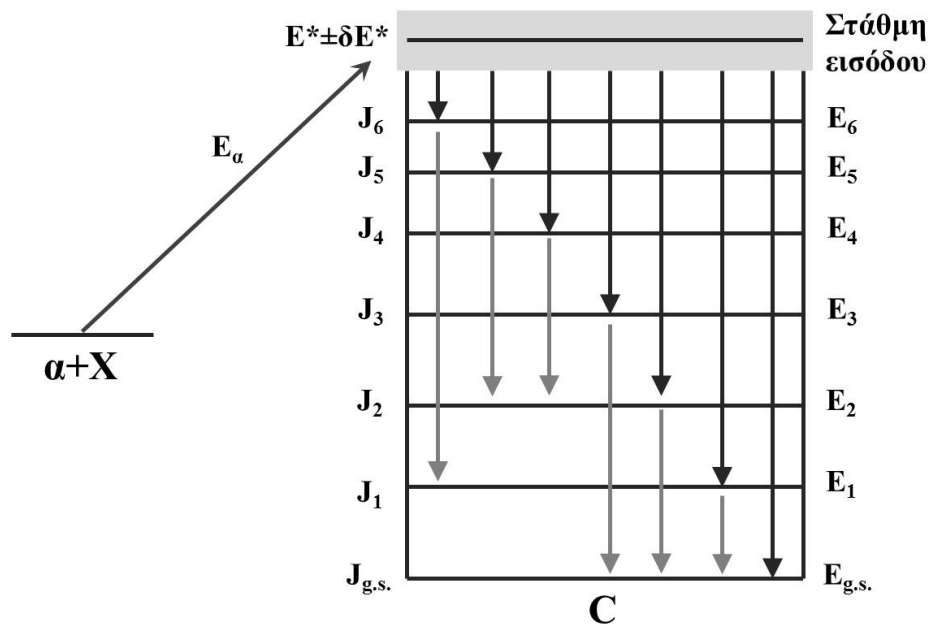
Στις αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα παίρνουν μέρος όλα τα νουκλεόνια του πυρήνα-στόχου και του βλήματος και τα στάδια που προαναφέρθηκαν είναι:

1. Σύλληψη του βλήματος α από τον πυρήνα-στόχο X και σχηματισμός του σύνθετου πυρήνα C^* : $\alpha + X \rightarrow C^*$. Στο στάδιο αυτό η ενέργεια του συστήματος κατανέμεται σε όλα τα νουκλεόνια του πυρήνα C^* και χάνεται η οποιαδήποτε πληροφορία για τη δημιουργία του.
2. Αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα, είτε μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, είτε μέσω εκπομπής ενός νουκλεονίου ή ακόμα και ενός ελαφρού πυρήνα. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις η αποδιέγερση συνήθως συνοδεύεται από την ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας γ .



Σχήμα 1.1: Ο μηχανισμός σύνθετου πυρήνα. Ο παραγόμενος πυρήνας C^* αποδιεγείρεται μέσω εκπομπής ενός σωματιδίου συχνά συνοδευόμενη από την ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας γ .

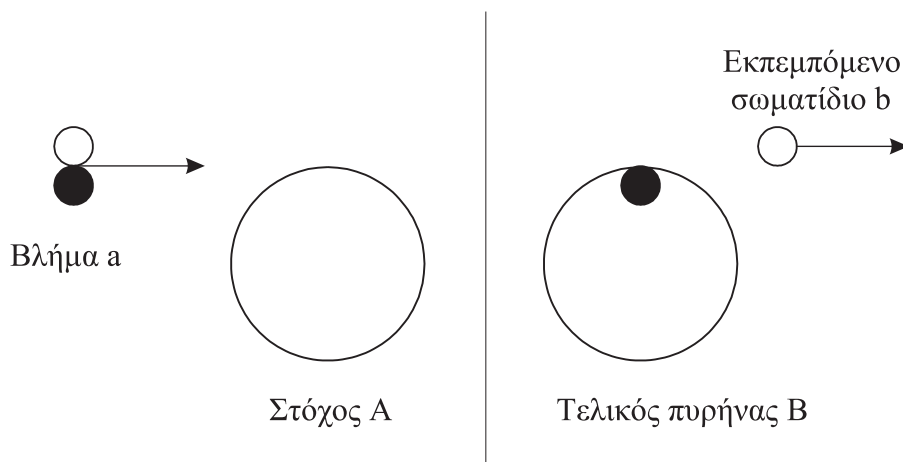
Στο σχήμα 1.2 φαίνεται ένα τυπικό ενεργειακό διάγραμμα ενός σύνθετου πυρήνα, παραγόμενου σε μία αντίδραση σύλληψης. Βλήμα τύπου α και ενέργειας E_α προσπίπτει σε στόχο X με αποτέλεσμα τη δημιουργία του σύνθετου πυρήνα C^* σε διεγερμένη στάθμη (“στάθμη εισόδου”) ενέργειας $E^* = Q + E_\alpha$.



Σχήμα 1.2: Σχηματισμός του σύνθετου πυρήνα C^* μέσω της σύλληψης ενός σωματιδίου τύπου α από έναν πυρήνα τύπου X . Στην περίπτωση του σχήματος αυτού, ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [13].

Ο χρόνος μίας τέτοιας αντίδρασης είναι της τάξης των 10^{-16} sec [14]. Ο μηχανισμός σύνθετου πυρήνα κυριαρχεί σε χαμηλές ενεργειακές περιοχές όπου το βλήμα ή το εκπεμπόμενο σωματίδιο δεν έχει αρκετή ενέργεια για να διαφύγει άμεσα από τον πυρήνα-στόχο. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του εν λόγω μηχανισμού είναι η γωνιακή κατανομή των προϊόντων της αντίδρασης. Εξαιτίας των τυχαίων συγκρούσεων στο εσωτερικό του σύνθετου πυρήνα η κατανομή των εκπεμπόμενων σωματιδίων είναι συμμετρική ως προς τις 90° .

Σε αντίθεση με τις αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα, οι άμεσες αντιδράσεις δεν οδηγούν στην απορρόφηση του βλήματος από τον πυρήνα-στόχο. Το προσπίπτον σωματίδιο αλληλεπιδρά άμεσα και σε πολύ μικρές χρονικές κλίμακες (10^{-22} sec) [15] είτε με τα νουκλεόνια της επιφάνειας είτε με το δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου. Οι άμεσες αντιδράσεις πραγματοποιούνται σε ένα μόνο στάδιο (σχήμα 1.3) στη διάρκεια του οποίου δεν υπάρχει χρόνος για την αποκατάσταση ισορροπίας και κατά συνέπεια ο πυρήνας “διατηρεί πληροφορίες” για τον τρόπο δημιουργίας του. Ως αποτέλεσμα, τα προϊόντα μίας άμεσης αντίδρασης εξαρτώνται άμεσα από την ενέργεια, τη στροφορμή και την ομοτιμία των αντιδρώντων σωματιδίων. Η κατανομή των προϊόντων μίας άμεσης αντίδρασης παρουσιάζει μέγιστο σε γωνίες πλησίον του άξονα που ορίζεται από τη διεύθυνση της δέσμης (0° και 180°).



Σχήμα 1.3: Μηχανισμός άμεσης αντίδρασης για μία αντίδραση μεταφοράς [14].

Μία αντίδραση μπορεί επιπλέον να πραγματοποιηθεί και μέσω συνδυασμού των μηχανισμών σύνθετου πυρήνα και άμεσης αντίδρασης. Η σχετική συνεισφορά του κάθε μηχανισμού εξαρτάται από την ενέργεια του βλήματος. Για παράδειγμα για δέσμη πρωτονίων ενέργειας $E_p < 10$ MeV κυριαρχεί ο μηχανισμός του σύνθετου πυρήνα, καθώς, το μήκος κύ-

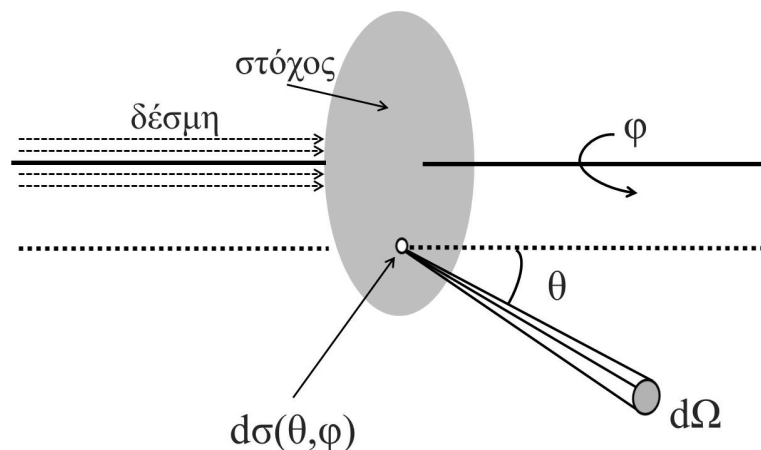
ματος De Broglie του βλήματος είναι αρκετά μεγάλο ώστε να αλληλεπιδρά με τον πυρήνα-στόχο σαν σύνολο και όχι με μεμονωμένα νουκλεόνια αυτού. Όσο η ενέργεια του βλήματος αυξάνεται, το αντίστοιχο μήκος κύματος De Broglie μικραίνει οπότε αυξάνεται η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με κάποιο σωματίδιο με διαστάσεις της τάξης του νουκλεονίου (1 fm) [15]. Στο ενεργειακό φάσμα $10 < E_p < 20$ MeV συνεισφέρουν και οι δύο μηχανισμοί αντιδράσεων ενώ για $E_p > 20$ MeV κυριαρχούν οι άμεσες αντιδράσεις.

1.2 Ενεργός διατομή

Η ενεργός διατομή σ μίας αντίδρασης εκφράζει την πιθανότητα να λάβει χώρα η εν λόγω αντίδραση. Θεωρούμε δέσμη σωματιδίων τύπου α , η οποία προσπίπτει σε ομογενή στόχο X με ενέργεια E . Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $X(\alpha, \beta)Y$ ορίζεται ως ο λόγος της ροής Φ_β των εκπεμπόμενων σωματιδίων β προς τη ροή Φ_α των ανά μονάδα επιφανείας προσπιπτόντων σωματιδίων α :

$$\sigma = \frac{\Phi_\beta}{\Phi_\alpha} \quad (1.2)$$

Η ενεργός διατομή μετράται σε μονάδες επιφανείας: barns ($1\text{b} = 10^{-24} \text{cm}^2$). Η γωνιακή κατανομή των εκπεμπόμενων σωματιδίων β εκφράζει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η εν λόγω αντίδραση μέσω εκπομπής ενός σωματιδίου β σε κατεύθυνση (θ, ϕ) ως προς



Σχήμα 1.4: Πυρηνική αντίδραση και σχετικά μεγέθη για την περιγραφή της ενεργού διατομής.

τον άξονα της δέσμης και εντός στερεάς γωνίας $d\Omega$ και περιγράφεται μέσω της διαφορικής ενεργού διατομής $d\sigma(E, \Omega)/d\Omega$. Ισχύει:

$$\sigma = \int_{4\pi} \frac{d\sigma(E, \Omega)}{d\Omega} d\Omega \quad (1.3)$$

Μία πιο χρήσιμη έκφραση για τον πειραματικό προσδιορισμό της ενεργού διατομής σ μίας αντίδρασης δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{AI_\beta}{N_b N_A \xi} \quad (1.4)$$

Στη σχέση αυτή, I_β είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων σωματιδίων τύπου β , A είναι το ατομικό βάρος των πυρήνων του στόχου σε g/mol, N_b ο συνολικός αριθμός των προσπίπτοντων σωματιδίων της δέσμης, N_A ο αριθμός Avogadro σε πυρήνες/mol και ξ το πάχος του στόχου σε gr/cm². Η απόδειξη της σχέσης (1.4) δίνεται στην εργασία [16].

1.3 Θεωρία Hauser-Feshbach

Όπως αναφέρθηκε, οι αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα πραγματοποιούνται σε δύο στάδια. Το πρώτο περιλαμβάνει τη δημιουργία του σύνθετου πυρήνα C^* σε μία υψηλά ενεργειακά διεγερμένη κατάσταση και το δεύτερο την αποδιέγερσή του, είτε μέσω εκπομπής ακτινοβολίας γ είτε μέσω σωματιδιακής εκπομπής. Χαρακτηριστικό των αντιδράσεων αυτών είναι το “μεγάλο” χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη δημιουργία μέχρι την αποδιέγερση του πυρήνα C^* . Αποτέλεσμα της “καθυστερήσης” αυτής είναι η ισοκατανομή της ενέργειας διεγερσης του πυρήνα C^* στο σύνολο των νουκλεονίων του. Εξαιτίας της ισοροπίας που επέρχεται χάνεται κάθε πληροφορία για τη δημιουργία του σύνθετου πυρήνα. Η ιδιότητα αυτή του εν λόγω μηχανισμού εκφράζεται από την υπόθεση ανεξαρτησίας του Bohr [17] σύμφωνα με την οποία η τελική κατάσταση ($\beta + Y$) μίας αντίδρασης σύνθετου πυρήνα είναι ανεξάρτητη από το κανάλι εισόδου $\alpha + X$ και συνεπώς η ενεργός διατομή μίας αντίδρασης σύνθετου πυρήνα μπορεί να γραφεί:

$$\sigma(J^\pi) = \sigma_{\alpha X}(J^\pi) P_{\beta Y}(J^\pi) \quad (1.5)$$

όπου $\sigma_{\alpha X}$ η ενεργός διατομή της σύνθεσης του πυρήνα C^* μέσω συγκεκριμένου καναλιού εισόδου:



και J η στροφορμή της στάθμης εισόδου του σύνθετου πυρήνα C^* , η οποία ισούται με το διανυσματικό άθροισμα της τροχιακής στροφορμής l του βλήματος και της ιδιοστροφορμής S του καναλιού εισόδου:

$$\vec{J} = \vec{l} + \vec{S} \quad (1.7)$$

Η τελευταία υπολογίζεται ως:

$$\vec{S} = \vec{s} + \vec{I} \quad (1.8)$$

Στη σχέση (1.8) s είναι η ιδιοστροφορμή του βλήματος και I η ιδιοστροφορμή της θεμελιώδους στάθμης του στόχου. Η ομοτιμία π της στάθμης εισόδου συνδέεται με την ομοτιμία της θεμελιώδους στάθμης του πυρήνα-στόχου π_t και την τροχιακή στροφορμή του βλήματος l μέσω της έκφρασης:

$$\pi = \pi_t(-1)^l \quad (1.9)$$

Η πιθανότητα $P_{\beta Y}$ της σχέσης (1.5) ορίζεται ως η σχετική πιθανότητα αποδιέγερσης του πυρήνα C^* μέσω συγκεκριμένου καναλιού εξόδου $\beta + Y$:

$$C^* \rightarrow \beta + Y \quad (1.10)$$

και ισούται με το λόγο της πιθανότητας αποδιέγερσης $\lambda_{\beta Y}$ μέσω του εν λόγω καναλιού προς την ολική πιθανότητα αποδιέγερσης λ_{tot} μέσω όλων των δυνατών καναλιών εξόδου:

$$P_{\beta Y} = \frac{\lambda_{\beta Y}}{\lambda_{tot}} \quad (1.11)$$

Σύμφωνα τη στατιστική περιγραφή της θεωρία Hauser-Feshbach (HF) [2], η ενεργός διατομή $\sigma_{\alpha X}$ του καναλιού εισόδου μίας αντίδρασης σύνθετου πυρήνα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\alpha X} = \pi \lambda_D^2 (2J + 1) T_{\alpha X}^{J\pi} \quad (1.12)$$

Στην παραπάνω σχέση με λ_D συμβολίζεται το μήκος κύματος De Broglie και με $T_{\alpha X}^{J\pi}$ ο λεγόμενος συντελεστής διέλευσης του καναλιού εισόδου. Ο τελευταίος εκφράζει την πιθανότητα να διαπεράσει το σωματίδιο α το δυναμικό Coulomb του πυρήνα X και να σχηματίσουν σύνθετο πυρήνα C^* σε διεγερμένη κατάσταση στροφορμής J και ομοτιμίας π .

Στην παρούσα εργασία δε θα αναπτυχθεί ο πλήρης φορμαλισμός της θεωρίας Hauser-Feshbach, καθώς έχει ήδη περιγραφεί σε μεγάλο αριθμό εγχειριδίων μεταξύ των οποίων βρίσκεται και η πρόσφατη εργασία [16].

Αποδεικνύεται ότι η ενεργός διατομή της δημιουργίας ενός σύνθετου πυρήνα C και της αποδιέγερσής του μέσω των καναλιών $\alpha + X$ και $\beta + Y$, αντίστοιχα, γράφεται ως:

$$\sigma = \pi \bar{\lambda}^2 \frac{1}{(2s+1)(2I+1)} \sum_{J^\pi} (2J+1) \frac{T_{\alpha X}^{J^\pi} T_{\beta Y}^{J^\pi}}{\sum_i T_i^{J^\pi}} \quad (1.13)$$

Η παράμετρος $T_{\beta Y}^{J^\pi}$ είναι ο συντελεστής διέλευσης του καναλιού εξόδου και εκφράζει την πιθανότητα διαφυγής ενός σωματιδίου β από στάθμη στροφορμής J^π του σύνθετου πυρήνα.

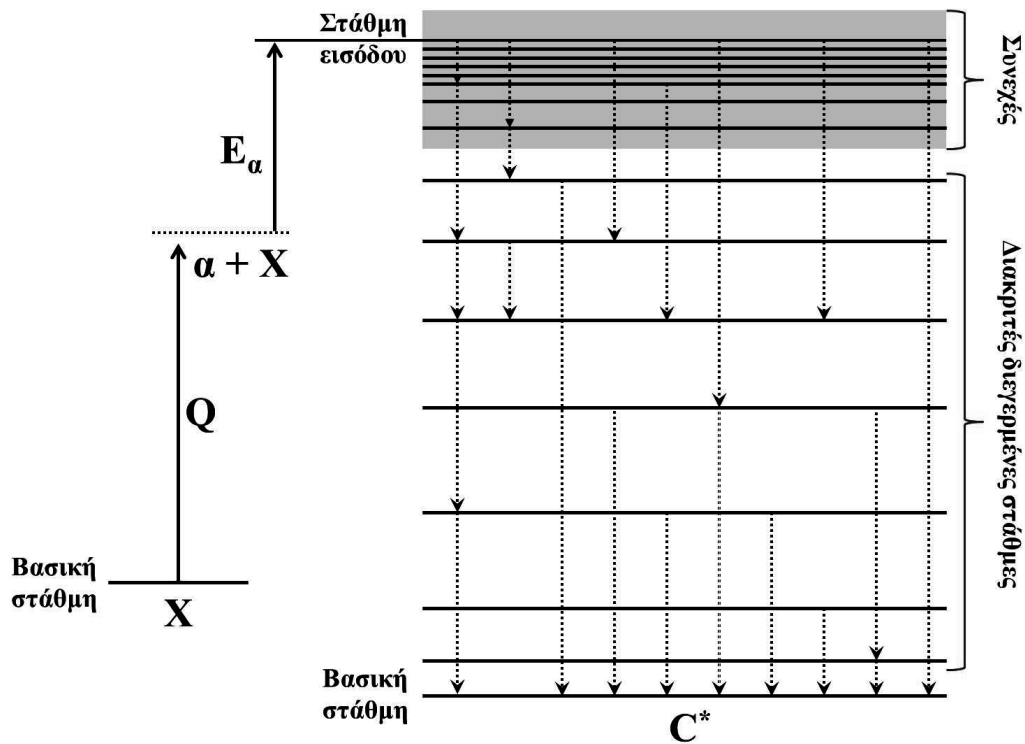
Στη σχέση (1.13), ο παράγοντας:

$$\omega_J = \frac{2J+1}{(2s+1)(2I+1)} \quad (1.14)$$

ονομάζεται στατιστικός παράγοντας και εκφράζει την πιθανότητα να βρεθεί ο σύνθετος πυρήνας C σε μία από τις $2J+1$ υποστάθμες του και ταυτόχρονα οι πυρήνες α και X σε μία από τις $2s+1$ και $2I+1$ δυνατές τους υποκαταστάσεις.

Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται ο σχηματισμός και η αποδιέγερση ενός σύνθετου πυρήνα παραγόμενου σε μία αντίδραση σύλληψης. Για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης αυτής μέσω της σχέσης (1.13) απαιτείται η γνώση των συντελεστών διέλευσης τόσο του καναλιού εισόδου όσο και όλων των δυνατών καναλιών εξόδου για όλες τις ενεργειακές στάθμες του πυρήνα C ενέργειας $E \leq E^*$, με $E^* = E_\alpha + Q$ την ενέργεια της στάθμης εισόδου. Για μικρές ενέργειες δέσμης, ο σύνθετος πυρήνας, συνήθως, διεγείρεται σε περιοχές με διακριτές ενεργειακές στάθμες. Στην περίπτωση αυτή, ο υπολογισμός των συντελεστών διέλευσης βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα για την ενέργεια, την ιδιοστροφορμή και την ομοτιμία της κάθε στάθμης. Καθώς η ενέργεια διέγερσης αυξάνει, ο διαχωρισμός των σταθμών γίνεται ολοένα και πιο δύσκολος καθώς οι μεταξύ τους αποστάσεις δE γίνονται συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα πλάτη τους ΔE . Τότε, στον υπολογισμό της ενεργού διατομής, υπεισέρχεται η Πυκνότητα των Πυρηνικών Καταστάσεων του πυρήνα (*"Nuclear Level Density"*, NLD) που είναι συνάρτηση του μαζικού αριθμού A , της ενέργειας E^* και της στροφορμής J της στάθμης εισόδου.

Οι συντελεστές διέλευσης του καναλιού εισόδου καθώς και των διάφορων καναλιών εξόδου υπολογίζονται μέσω της επίλυσης της εξίσωσης Schrödinger, θεωρώντας κατάλληλο Οπτικό Δυναμικό (*"Optical Model Potential"*, OMP) για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πυρήνων που συμμετέχουν στο εκάστοτε κανάλι. Στη μέθοδο που αναπτύσσεται για τον σκοπό αυτό, η σκέδαση/απορρόφηση σωματιδίων από ένα πυρήνα περιγράφεται από ένα μιγαδικό δυναμικό, η πραγματική και η φανταστική συνιστώσα του οποίου υπολογίζονται μέσα από φαινομενολογικά ή μικροσκοπικά πρότυπα [5].



Σχήμα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση του ενεργειακού διαγράμματος του σύνθετου πυρήνα της αντίδρασης $\alpha + A \rightarrow C^*$. Στο σχήμα αυτό, η αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα C^* πραγματοποιείται μέσω εκπομπής ακτίνων γ [13].

Στην περίπτωση που ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται με εκπομπή ακτινοβολίας γ , είναι απαραίτητος, ο προσδιορισμός της λεγόμενης “Συνάρτησης Ισχύος ακτίνων γ ” (“ γ -ray Strength Function”, γ SF), η οποία περιγράφει το μηχανισμό εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον πυρήνα και ουσιαστικά εκφράζει τον συντελεστή διέλευσης για g -ακτινοβολία.

Ο θεωρητικός υπολογισμός της ενεργού διατομής των αντιδράσεων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς των πυρηνικών μοντέλων (OMP, NLD και γ SF) που χρησιμοποιεί ο κώδικας *TALYS* (έκδοση 1.4) [5]. Τα πρότυπα των εν λόγω πυρηνικών παραμέτρων που χρησιμοποιεί ο κώδικας αυτός παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 2

ΑΣΤΡΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ

2.1 Βασικές έννοιες

2.1.1 Παράθυρο Gamow- Αστροφυσικός Παράγοντας

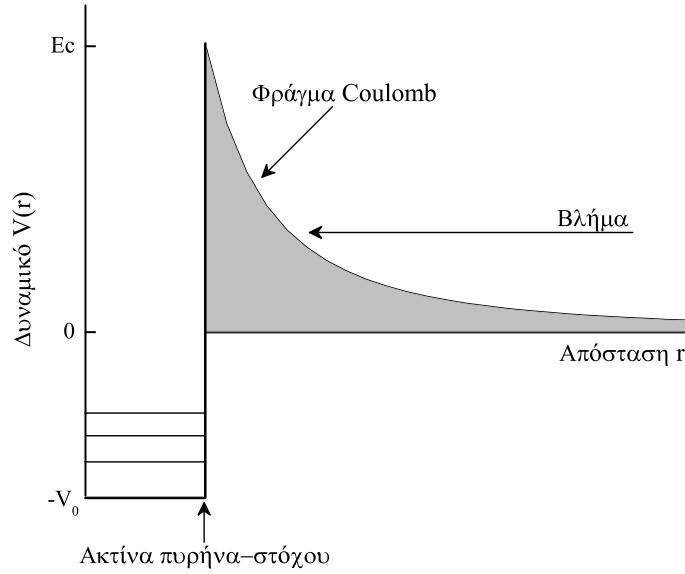
Σε ένα μη εκφυλισμένο και σε θερμοδυναμική ισορροπία αστρικό αέριο, οι ενέργειες E των πυρήνων του ακολουθούν την κατανομή Maxwell-Boltzmann [18]:

$$\phi(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{kT} \right)^{3/2} E^{1/2} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.1)$$

όπου k είναι η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία του αστέρα. Η κατανομή αυτή παρουσιάζει μέγιστο για $E=kT$ και φθίνει εκθετικά για ενέργειες μεγαλύτερες από την τιμή αυτή. Από τη σχέση (2.1) και δεδομένου ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός αστέρα σε θερμοδυναμική ισορροπία κυμαίνεται από $\approx 10^6$ έως $\approx 10^9$ K (ανάλογα με τη μάζα του και το στάδιο εξέλιξης στο οποίο βρίσκεται) αποδεικνύεται ότι η κινητική ενέργεια των πυρήνων του δεν υπερβαίνει τα μερικά MeV. Καθώς, λοιπόν, η κινητική ενέργεια των πυρήνων ενός αστρικού αερίου είναι κατά πολύ μικρότερη του φράγματος Coulomb αυτών, οι αντιδράσεις σύλληψης λαμβάνουν χώρα κυρίως μέσω του φαινομένου σήραγγος (σχήμα 2.1). Ως εκ τούτου, η ενεργός διατομή των εν λόγω αντιδράσεων είναι ανάλογη της πιθανότητας να λάβει χώρα το φαινόμενο σήραγγος. Η τελευταία εκφράζεται από τη σχέση:

$$T(E) = \exp(-2\pi\eta) = \exp\left(-\frac{E_G}{E}\right) \quad (2.2)$$

Στην παραπάνω σχέση η ποσότητα η ονομάζεται παράμετρος Sommerfield και εκφράζει το λόγο της δυναμικής ενέργειας αλληλεπίδρασης προς την κινητική ενέργεια του βλήματος



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση του δυναμικού Coulomb και του πυρηνικού δυναμικού κατά την αλληλεπίδραση ενός βλήματος ενέργειας $E < E_c$ με ένα πυρήνα στόχο.

σε απόσταση $d=2\lambda_D$ από το κέντρο του πυρήνα-στόχου, σε απόσταση δηλαδή διπλάσια του μήκους κύματος De Broglie [16]. Η παράμετρος Sommerfield δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{Z_t Z_b e^2}{\hbar} \sqrt{\frac{\mu}{2E}} \quad (2.3)$$

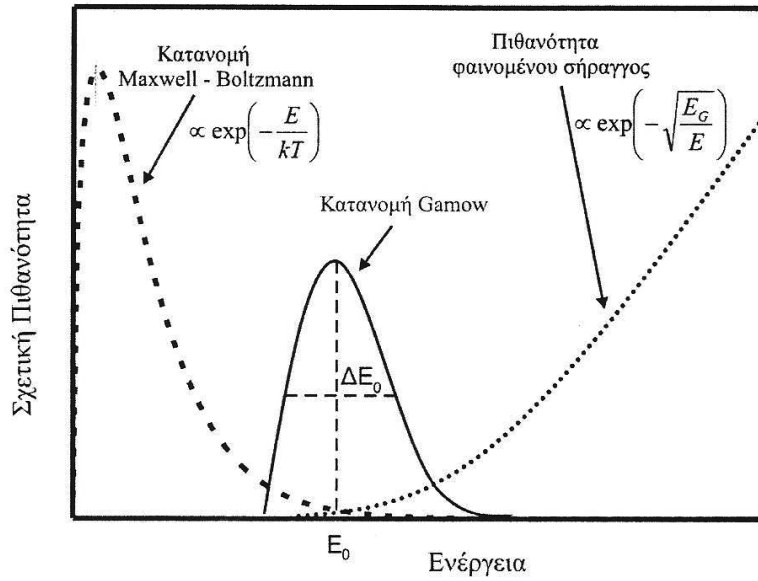
με Z_t και Z_b τους ατομικούς αριθμούς του πυρήνα-στόχου και του βλήματος, αντίστοιχα και μ την ανηγμένη μάζα του συστήματος βλήμα-στόχος:

$$\mu = \frac{m_\alpha m_X}{m_\alpha + m_X} \quad (2.4)$$

Η ποσότητα E_G στη σχέση (2.2) ονομάζεται “ενέργεια Gamow” και υπολογίζεται από την έκφραση:

$$E_G = 2\mu \frac{Z_t^2 Z_b^2 \pi^2 e^4}{\hbar^2} \quad (2.5)$$

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η κατανομή Maxwell-Boltzmann $\phi(E)$ μαζί με την κατανομή $T(E)$ που εκφράζει την πιθανότητα διέλευσης του βλήματος από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται σε μεγέθυνση και η συνέλιξη των



Σχήμα 2.2: Συνέλιξη της κατανομής Maxwell-Boltzmann $\phi(E)$ (εστιαγμένη γραμμή) και της κατανομής $T(E)$ (διακεκομμένη γραμμή) που εκφράζει την πιθανότητα διέλευσης του βλήματος από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου. Το αποτέλεσμα της συνέλιξης αυτής είναι η κατανομή Gamow [18]. Η τελευταία εμφανίζεται σε μεγέθυνση.

δύο αυτών κατανομών, η λεγόμενη “κατανομή Gamow”. Η τελευταία παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία για την πυρηνική αστροφυσική, καθώς, για δεδομένη αστρική θερμοκρασία T η πυρηνοσύνθεση λαμβάνει χώρα μέσα στο ενεργειακό εύρος $\delta E = E_0 \pm \Delta E_0/2$. Το κεντροειδές E_0 και το εύρος ΔE_0 της κατανομής Gamow δίνονται από τις σχέσεις (2.6) και (2.7), αντίστοιχα [18].

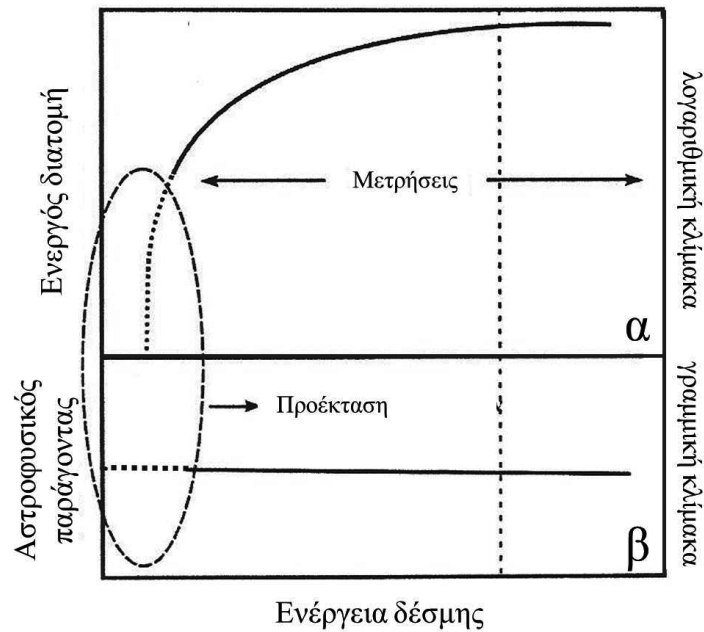
$$E_0 = \left(\frac{\mu}{2}\right)^{1/3} \left(\frac{Z_t Z_b \pi e^2}{\hbar} kT\right)^{2/3} = 0.122 (Z_t^2 Z_b^2 \mu T_9^2)^{1/3} \quad (2.6)$$

$$\Delta E_0 = 0.237 (Z_t^2 Z_b^2 \mu T_9^5)^{1/6} \quad (2.7)$$

Όπως αναφέρεται παραπάνω, στο εύρος ΔE_0 του παραθύρου Gamow, η ενεργός διατομή σ μίας αντίδρασης σύλληψης φορτισμένου σωματιδίου ενέργειας E είναι ανάλογη της πιθανότητας διέλευσης $T(E)$ του βλήματος από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου μέσω του φαινομένου σήραγγος:

$$\sigma \propto \frac{1}{E} T(E) \quad (2.8)$$

Συνεπώς, οι τιμές της ενεργού διατομής των αντιδράσεων αυτών είναι πολύ μικρές σε περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην πυρηνοσύνθεση και κατά συνέπεια ο πειραματικός προσδιορισμός τους είναι εξαιρετικά δύσκολος, έως και αδύνατος σε πολλές περιπτώσεις. Η διαδικασία που συνήθως ακολουθείται, στις περιπτώσεις αυτές, είναι η συλλογή πειραματικών δεδομένων σε ένα ευρύ ενεργειακό φάσμα σε περιοχές πάνω από το παράθυρο Gamow με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού που διέπει τις εν λόγω αντιδράσεις καθώς και των πυρηνικών παραμέτρων που τις χαρακτηρίζουν, προκειμένου, να καταστεί δυνατή η “προέκταση” των μετρήσεων σε περιοχές αστροφυσικού ενδιαφέροντος.



Σχήμα 2.3: Τυπική μεταβολή α) της ενεργού διατομής $\sigma(E)$ και β) του αστροφυσικού παράγοντα $S(E)$ σε μη συντονιστικές αντιδράσεις σύλληψης φορτισμένου σωματιδίου [18].

Λαμβάνοντας υπόψη της σχέση (2.2) και εισάγοντας το λεγόμενο “Αστροφυσικό Παράγοντα” $S(E)$, η σχέση (2.8) παίρνει τη μορφή:

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} \exp(-2\pi\eta)S(E) \quad (2.9)$$

όπου η είναι η παράμετρος Sommerfield της σχέσης (2.3) [18]. Ο αστροφυσικός παράγοντας περιγράφει τη συνεισφορά των διάφορων πυρηνικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα

κατά την πραγματοποίηση μίας αντίδρασης. Η συνεισφορά της αλληλεπίδρασης Coulomb περιγράφεται από τον συντελεστή διέλευσης $T(E)$.

Η χρήση του αστροφυσικού παράγοντα κρίνεται καταλληλότερη για τις περιπτώσεις που απαιτείται προέκταση των μετρήσεων σε χαμηλότερες ενέργειες, καθώς, για αντιδράσεις μη συντονιστικού χαρακτήρα, η μεταβολή του αστροφυσικού παράγοντα σε συνάρτηση με την ενέργεια του βλήματος E είναι ομαλότερη από τη μεταβολή της ενεργού διατομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να δώσει αποτελέσματα μόνο στην περίπτωση που δεν παρουσιάζονται συντονισμοί στην περιοχή ενδιαφέροντος.

2.1.2 Ρυθμός πυρηνικής αντίδρασης

Το κύριο πυρηνικό μέγεθος που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς των μοντέλων πυρηνοσύνθεσης είναι ο μέσος ρυθμός αντίδρασης $\langle \sigma v \rangle$, ο οποίος εκφράζει τον αριθμό των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα χρόνου.

Εστω η πυρηνική αντίδραση $X(\alpha, \beta)Y$ που λαμβάνει χώρα σε ένα αστρικό αέριο που αποτελείται από N_α πυρήνες τύπου α και N_x πυρήνες τύπου X . Ο ρυθμός r της αντίδρασης αυτής εκφράζεται από τη γενική σχέση:

$$r = N_\alpha N_x u \sigma(u) \quad (2.10)$$

όπου u είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των πυρήνων X και α και $\sigma(u)$ η ενεργός διατομή της αντίδρασης $X(\alpha, \beta)Y$ [18]. Καθώς η σχετική ταχύτητα μεταξύ των σωματιδίων ενός αστρικού αερίου δεν είναι σταθερή αλλά υπακούει σε μία κατανομή πιθανότητας $\phi(u)$, η σχέση (2.10) γράφεται ως:

$$r = N_\alpha N_x \int_0^\infty \phi(u) u \sigma(u) du \quad (2.11)$$

Το ολοκλήρωμα της παραπάνω σχέσης εκφράζει το μέσο ρυθμό αντίδρασης ανά ζεύγος σωματιδίων $\langle \sigma v \rangle$:

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^\infty \phi(u) u \sigma(u) du \quad (2.12)$$

Προκειμένου να αποφευχθεί ο διπλασιασμός του ρυθμού αντίδρασης r στην περίπτωση που τα σωματίδια X και α ταυτίζονται η σχέση (2.11) παίρνει τη μορφή:

$$r = \frac{1}{1 + \delta_{\alpha x}} N_\alpha N_x \int_0^\infty \phi(u) u \sigma(u) du \quad (2.13)$$

με $\delta_{\alpha x}$ το δ του Kronecker [18]. Αν επιπλέον λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι τα σωματίδια ενός αστρικού αερίου κινούνται με μη σχετικιστικές ταχύτητες, η κατανομή ταχυτήτων $\phi(u)$

θα υπακούει στην κατανομή Maxwell-Boltzmann [18]:

$$\phi(u) = 4\pi u^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mu^2}{2kT} \right) \quad (2.14)$$

όπου k είναι η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία του αερίου και m η μάζα των πυρήνων του. Από τις σχέσεις (2.12) και (2.14), ο μέσος ρυθμός αντίδρασης ανά ζεύγος μη ταυτοτικών σωματιδίων προκύπτει ως:

$$\langle \sigma v \rangle = 4\pi \left(\frac{\mu}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^\infty u^3 \sigma(u) \exp \left(-\frac{\mu u^2}{2kT} \right) du \quad (2.15)$$

Στην τελευταία σχέση η ταχύτητα u είναι η σχετική ταχύτητα των πυρήνων α και X στο σύστημα του κέντρου μάζας. Η ανηγμένη μάζα μ των παραπάνω πυρήνων υπολογίζεται από τη σχέση (2.4). Μία πιο χρήσιμη έκφραση για το μέσο ρυθμό $\langle \sigma v \rangle$ μίας αντίδρασης δίνεται από τη σχέση:

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \int_0^\infty E \sigma(E) \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) dE \quad (2.16)$$

όπου $E = \frac{1}{2}\mu u^2$ η ενέργεια της δέσμης στο σύστημα κέντρου μάζας.

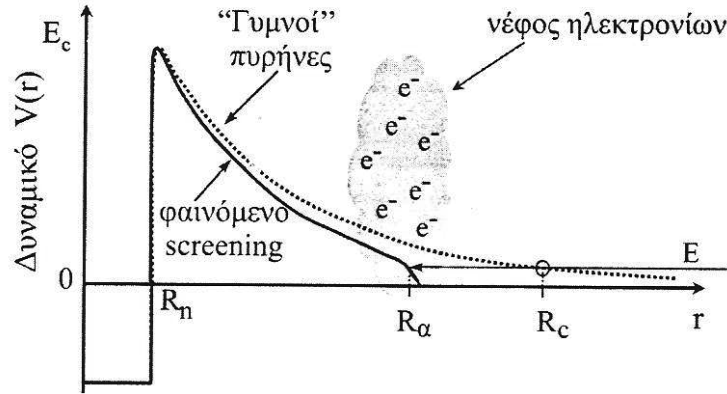
Ο κλάδος της πειραματικής πυρηνικής αστροφυσικής αποσκοπεί στη μέτρηση των ενεργών διατομών των αντιδράσεων που αποτελούν το δίκτυο σύνθεσης των διαφόρων στοιχείων, καθώς, η γνώση τους είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των αντίστοιχων ρυθμών αντίδρασης, όπως φαίνεται στην παραπάνω ανάλυση. Οι ρυθμοί των αντιδράσεων που προκύπτουν θα χρησιμοποιηθούν από τα μοντέλα πυρηνοσύνθεσης για τον υπολογισμό των περιεκτικοτήτων των υπό εξέταση στοιχείων.

2.1.3 Το φαινόμενο Screening

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν σε ένα αστρικό περιβάλλον οι πυρήνες είναι απαλλαγμένοι από το ηλεκτρονιακό νέφος που τους περιβάλλει. Αντιθέτως, σε μια μέτρηση στο εργαστήριο τα άτομα του στόχου είναι ουδέτερα, με αποτέλεσμα το δυναμικό Coulomb της αλληλεπίδρασης να είναι μικρότερο¹ από το αντίστοιχο δυναμικό για αλληλεπίδραση με “γυμνούς” πυρήνες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Το γεγονός αυτό ενισχύει

¹Σε μία εργαστηριακή μέτρηση το θετικά φορτισμένο βλήμα “αισθάνεται” τόσο το απωστικό δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου όσο και το ελκτικό δυναμικό του αρνητικά φορτισμένου ηλεκτρονιακού νέφους που τον περιβάλλει. Η συνισταμένη δύναμη που θα του ασκηθεί θα είναι (ανάλογα με την απόστασή του από τον πυρήνα-στόχο) ελαττωμένη σε σχέση με τη δύναμη που θα του ασκούνταν από έναν “γυμνό” πυρήνα.

τον συντελεστή διέλευσης του φαινομένου σήραγγος και συνεπώς την ενεργό διατομή της αντίδρασης.



Σχήμα 2.4: Φαινόμενο Electron Screening. Το απωστικό δυναμικό Coulomb μειώνεται λόγω του αρνητικά φορτισμένου νέφους των ηλεκτρονίων που περιβάλλουν τον πυρήνα-στόχο και μηδενίζεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από την ακτίνα R_α του πυρήνα [19].

Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως “*φαινόμενο Electron Screening*”, πρέπει να ληφθεί υπόψη στον πειραματικό προσδιορισμό των ενεργών διατομών. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε το διορθωτικό παράγοντα f :

$$f = \frac{\sigma_s(E)}{\sigma_b(E)} = \frac{\sigma_b(E + U_e)}{\sigma_b(E)} \quad (2.17)$$

όπου E είναι η ενέργεια της προσπίπτουσας δέσμης, $\sigma_s(E)$ η ενεργός διατομή που μετράται στο εργαστήριο, $\sigma_b(E)$ η αντίστοιχη ενεργός διατομή για “γυμνούς” πυρήνες και U_e το δυναμικό screening, το οποίο όπως αναλυτικά περιγράφεται στην εργασία [20], μπορεί να θεωρηθεί ίσο με:

$$U_e = -0.3Z_1Z_2 \text{ [keV]} \quad (2.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.17) και (2.9) και για $U_e/E \ll 0.1$ προκύπτει [21]:

$$f = \frac{\sigma_s(E)}{\sigma_b(E)} = \frac{\sigma_b(E + U_e)}{\sigma_b(E)} = \frac{E}{E + U_e} \exp \frac{\pi\eta(E)U_e}{E} \quad (2.19)$$

Η παράμετρος η είναι η παράμετρος Sommerfield (σχέση 2.3). Στις μετρήσεις που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ο διορθωτικός παράγοντας f κυμάνθηκε μεταξύ 1.02 και 1.10.

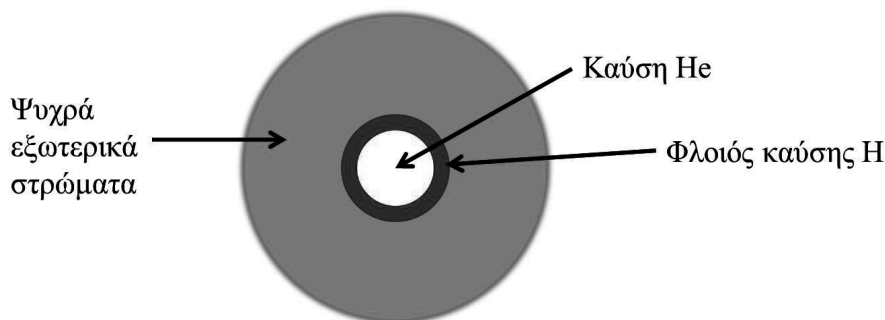
2.2 Πυρηνosύνθεση στα διάφορα στάδια της ζωής ενός αστέρα

Οι Burbidge, Burbidge, Fowler και Hoyle [22] το 1957 και ο Cameron [23], σε ανεξάρτητη εργασία το ίδιο έτος, μελέτησαν το “σενάριο” της σύνθεσης των στοιχείων στο εσωτερικό των αστέρων. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι οι μεγάλες πυκνότητες που επικρατούν στο εσωτερικό των αστέρων σε συνδυασμό με τις μεγάλες χρονικές κλίμακες που διαρκούν καθιστούν δυνατή την παραγωγή όλων των στοιχείων. Λίγα χρόνια αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι Hoyle και Taylor [24] απέδειξαν ότι τα μοντέλα των Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle και Cameron αδυνατούσαν να αναπαράγουν τις παρατηρούμενες στο σύμπαν ποσότητες ^4He . Στην ίδια εργασία έδειξαν ότι η σύνθεση του εν λόγω πυρήνα στα πρώτα λεπτά μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (“*Big Bang*”) είναι ένα πιθανό ενδεχόμενο. Η υπόθεση αυτή ενισχύθηκε από μεταγενέστερες εργασίες, οι οποίες υποδεικνύουν ότι σημαντικές ποσότητες ελαφρών στοιχείων, όπως ισότοπα υδρογόνου (^1H , ^2H , ^3H), ηλίου (^3He , ^4He), λιθίου (^6Li , ^7Li) και βηρυλλίου (^7Be), παράχθησαν στο αρχέγονο σύμπαν. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία συντέθηκαν είτε στο εσωτερικό των αστέρων, σε κάποιο από τα διάφορα στάδια της εξέλιξής τους, είτε κατά τη βίαιη καταστροφή τους [18].

Η γέννηση ενός αστέρα λαμβάνει χώρα σε νεφελώματα όταν μεγάλες ποσότητες αερίου, αποτελούμενες ως επί το πλείστον από υδρογόνο και λιγότερο από βαρύτερα στοιχεία, υφίστανται βαρυτική κατάρρευση. Υπό συνθήκες βαρυτικής κατάρρευσης η θερμοκρασία στο εσωτερικό του αστέρα αυξάνεται μέχρι να φτάσει στο λεγόμενο “σημείο ανάφλεξης” ($1-2 \times 10^7 \text{ K}$). Στο σημείο αυτό, στον πυρήνα του, ξεκινάει η θερμοπυρηνική σύντηξη του υδρογόνου σε ήλιο μέσω μιας αλληλουχίας αντιδράσεων γνωστής ως “κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου”.

Όσο ο αστέρας έχει αποθέματα σε καύσιμο υδρογόνο αποφεύγεται η περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση καθώς επιτυγχάνονται συνθήκες θερμοδυναμικής και υδροστατικής ισορροπίας. Η θερμοκρασία αλλά και ο ρυθμός έκλυσης ενέργειας από τον πυρήνα του μεταβάλλονται ελάχιστα στο χρονικό διάστημα που διαρκεί ο κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου. Το διάστημα αυτό εξαρτάται από τη μάζα του αστέρα. Για αστέρες μάζας $M \approx M_{\odot}$ (M_{\odot} = μάζα ήλιου) τα αποθέματα σε υδρογόνο θα διαρκέσουν για περίπου 10 δισεκατομμύρια χρόνια. Αστέρες μεγαλύτερης μάζας καταναλώνουν ταχύτερα το αρχικό καύσιμο υδρογόνο καθώς παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα ένας αστέρας μάζας $M=10M_{\odot}$ έχει φωτεινότητα $L=10^4 L_{\odot}$ [18].

Όταν τα αποθέματα του πυρήνα σε υδρογόνο εξαντληθούν δεν παράγεται πλέον η ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση της θερμοδυναμικής/υδροστατικής ισορροπίας με αποτέλεσμα την επαναφορά του αστέρα σε κατάσταση βαρυτικής κατάρρευσης. Η συστολή του αστέρα οδηγεί στην περαιτέρω αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του μέχρι να ξεκινήσει η καύση του He .

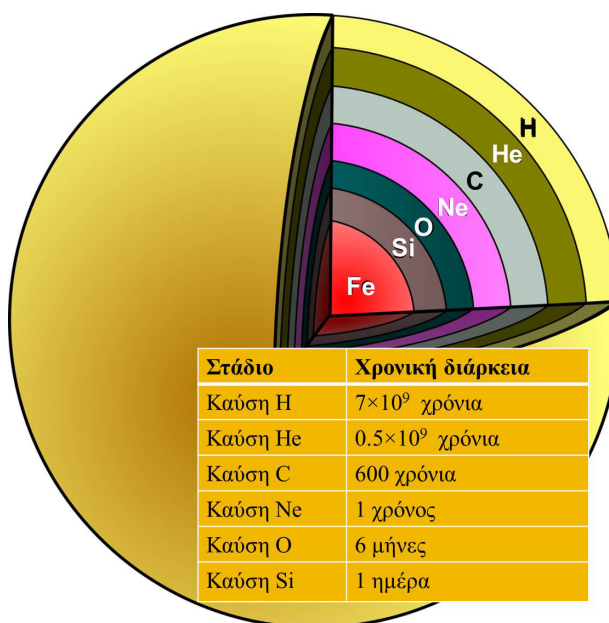


Σχήμα 2.5: Όταν τα αποθέματα σε καύσιμο H εξαντληθούν στον πυρήνα του αστέρα αρχίζει η βαρυτική κατάρρευσή του. Η κατάρρευση θα σταματήσει όταν η πίεση και η θερμοκρασία αυξηθούν αρκετά ώστε να ξεκινήσει η καύση του He . Η καύση του H συνεχίζεται σε εξωτερικούς φλοιούς του αστέρα.

Ταυτόχρονα με την καύση του He , που εξελίσσεται στον πυρήνα του αστέρα, συνεχίζει η καύση του υδρογόνου σε εξωτερικό φλοιό του (σχήμα 2.5). Όταν εξαντληθεί το καύσιμο- He αρχίζει για ακόμα μία φορά η βαρυτική κατάρρευση του αστέρα. Η κατάρρευση θα σταματήσει μόνο εάν ο αστέρας έχει αρκετή μάζα ($M > 8M_{\odot}$) ώστε να είναι εφικτή η αύξηση της πυκνότητας και της θερμοκρασίας σε επίπεδα που επιτρέπουν την έναρξη της καύσης του C . Για αστέρες μάζας $M \approx 11M_{\odot}$ η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι και την καύση του Si που είναι και η τελευταία φάση καύσης.

Κάθε φάση διαρκεί λιγότερο από την προηγούμενη. Η τελευταία φάση (καύση Si) διαρκεί μία έως και λίγες ημέρες. Η κατάρρευση του κάθε στρώματος αποτρέπεται λόγω της θερμότητας και της πίεσης που δημιουργεί η καύση του αμέσως εσωτερικού στρώματος. Μετά την παραγωγή των στοιχείων στην περιοχή του Fe ($A \approx 60$), η σύντηξη ανακόπτεται από το υψηλό δυναμικό Coulomb και τη μεγάλη ενέργεια σύνδεσης των πυρήνων στην περιοχή αυτή. Η κατάρρευση του πυρήνα είναι πλέον αναπόφευκτη. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται

²Η φωτεινότητα ενός αστέρα ορίζεται ως ο ρυθμός της εκλυόμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, από το σύνολο της επιφάνειας του αστέρα.



Σχήμα 2.6: Η δομή ενός αστέρα μάζας $M=25M_{\odot}$. Στο σχήμα φαίνονται και οι τυπικοί χρόνοι που διαρκεί το κάθε στάδιο της εξέλιξης ενός τέτοιου αστέρα.

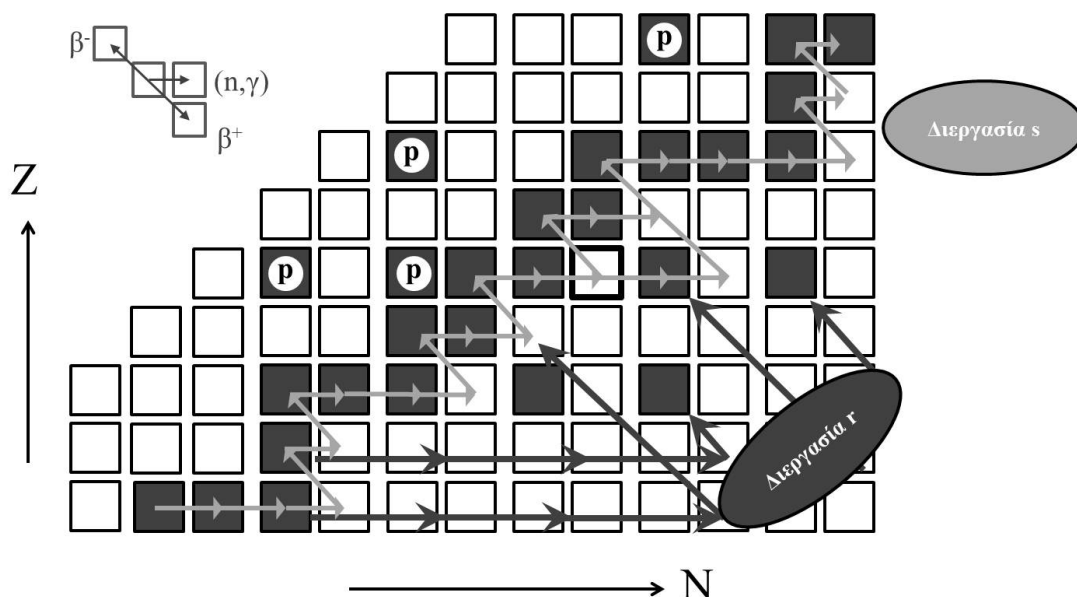
η δομή ενός αστέρα μεγάλης μάζας καθώς και η τυπική χρονική διάρκεια του κάθε κύκλου για αστέρα μάζας $M=25M_{\odot}$.

2.3 Πυρηνosύνθεση πάνω από το σίδηρο

Μέχρι την περιοχή του σιδήρου η πυρηνosύνθεση λαμβάνει χώρα μέσω αντιδράσεων σύλληψης φορτισμένων σωματιδίων. Στην περιοχή αυτή, συναντώνται οι πυρήνες με τις μεγαλύτερες ενέργειες σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το υψηλό δυναμικό Coulomb των εν λόγω πυρήνων έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική πτώση στις τιμές της ενεργού διατομής των παραπάνω αντιδράσεων. Αντιθέτως, ο ρυθμός μίας αντίδρασης σύλληψης νετρονίου δεν επηρεάζεται από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα-στόχου. Για θερμοκρασίες όμοιες με αυτές που επικρατούν σε αστρικά περιβάλλοντα οι ενεργές διατομές αντιδράσεων νετρονικής σύλληψης είναι αρκετά υψηλές. Ως αποτέλεσμα, η πυρηνosύνθεση των βαρύτερων του σιδήρου στοιχείων λαμβάνει χώρα κυρίως μέσω αντιδράσεων (n, γ) οι οποίες συνοδεύονται από β^- αποδιεγέρσεις.

Η πυρηνosύνθεση των βαρύτερων του σιδήρου στοιχείων μέσω αντιδράσεων νετρονικής

σύλληψης περιλαμβάνει δύο μηχανισμούς. Την αργή διεργασία s (“slow neutron capture process”) και την ταχεία διεργασία r (“rapid neutron capture process”). Οι δύο αυτοί μηχανισμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Ιδεατό τμήμα του χάρτη των ισωτόπων [13]. Στο σχήμα φαίνονται οι “διαδρομές” των δύο διεργασιών νετρονικής σύλληψης s και r με γκρι και μαύρα βέλη, αντίστοιχα. Με μαύρα τετράγωνα απεικονίζονται οι σταθεροί πυρήνες ενώ με λευκά οι ασταθείς. Οι πυρήνες που σημειώνονται με το λατινικό γράμμα “ p ”, είναι πλούσιοι σε πρωτόνια πυρήνες που παράγονται μέσω της p -διεργασίας (§ 2.3.1).

Κάθε μηχανισμός εξελίσσεται σε διαφορετικά αστρικά περιβάλλοντα και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η s -διεργασία λαμβάνει χώρα σε αστρικές συνθήκες θερμοκρασίας $T=(1-3)\times 10^8$ K και πυκνότητας νετρονίων $\rho_n=10^7-10^{11}$ νετρόνια/cm³ [25]. Τέτοια αστρικά περιβάλλοντα συναντώνται στο φλοιό καύσης He των λεγόμενων “AGB³” αστέρων αλλά και αστέρων μάζας $M\geq 25M_{\odot}$ [1]. Οι τυπικοί χρόνοι της διεργασίας αυτής κυμαίνονται από 10 έως 10000 έτη [25]. Η μικρή ροή νετρονίων σε συνδυασμό με τους μικρούς χρόνους ημιζωής των πυρήνων κοντά στην κοιλάδα σταθερότητας, έχει ως αποτέλεσμα τη σύνθεση στοιχείων

³Ως AGB-αστέρες χαρακτηρίζονται οι αστέρες οι οποίοι μετά το πέρας της φάσης καύσης του ηλίου εισέρχονται στο λεγόμενο “Ασυμπτωτικό Κλάδο των Γιγάντων” (“Asymptotic Giant Branch”, AGB). Σε αυτόν τον κλάδο εισέρχονται αστέρες μάζας $M=0.6-10 M_{\odot}$.

κατά μήκος της κοιλάδας σταθερότητας ή κοντά σε αυτήν, καθώς, η σταθερά αποδιέγερσης μέσω β^- εκπομπής είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σταθερά σύλληψης νετρονίου ($\lambda_\beta \gg \lambda_{n\gamma}$) και επομένως ο παραγόμενος από μία νετρονική σύλληψη ραδιενεργός πυρήνας διασπάται πριν συλλάβει ένα επιπλέον νετρόνιο. Η διεργασία s παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7 με γκρι βέλη.

Η r -διεργασία, από την άλλη μεριά, λαμβάνει χώρα σε αστρικά περιβάλλοντα με πυκνότητες νετρονίων $\rho_n \approx 10^{20}$ νετρόνια/cm³ και θερμοκρασίες $T = (1-2) \times 10^9$ K [25]. Τέτοιες συνθήκες αναπτύσσονται σε αστέρες νετρονίων, οι οποίοι θεωρούνται το πιθανότερο σημείο διεξαγωγής της r -διεργασίας [1]. Οι τυπικοί χρόνοι πραγματοποίησης μίας αντίδρασης νετρονικής σύλληψης σε τέτοια περιβάλλοντα είναι της τάξης του 1 sec. Έτσι, οι παραγόμενοι πυρήνες δεν προλαβαίνουν να διασπαστούν μέσω εκπομπής β^- , καθώς, οι χρόνοι ημιζωής των πυρήνων αυτών είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δύο αντιδράσεων νετρονικής σύλληψης ($\lambda_\beta \ll \lambda_{n\gamma}$). Ως εκ τούτου, η r -διεργασία οδηγεί στη σύνθεση ασταθών και πλούσιων σε νετρόνια πυρήνων, οι οποίοι βρίσκονται απομακρυσμένοι από την κοιλάδα σταθερότητας [25]. Η “διαδρομή” της διεργασίας r ανακόπτεται όταν σχηματιστεί ένας πυρήνας με μέσο χρόνο ζωής μικρότερο από το μέσο χρόνο που απαιτείται για τη σύλληψη ενός νετρονίου ($\lambda_\beta > \lambda_{n\gamma}$). Η διεργασία r φαίνεται στο σχήμα 2.7 με μαύρα βέλη.

2.3.1 Οι p -πυρήνες και η διεργασία σύνθεσής τους

Στο σχήμα 2.7 διακρίνονται τέσσερις σταθεροί πυρήνες, οι οποίοι σημειώνονται με το λατινικό γράμμα p . Οι πυρήνες αυτοί δεν μπορούν να παραχθούν ούτε μέσω της s - ούτε μέσω της r -διεργασίας, καθώς, οι “διαδρομές” των διεργασιών αυτών ανακόπτονται από σταθερούς, ισοβαρείς τους πυρήνες, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Οι τέσσερις αυτοί πυρήνες παράγονται από τη λεγόμενη “ p -διεργασία”. Η διεργασία p είναι υπεύθυνη για την πυρηνοσύνθεση 35 σταθερών, πλούσιων σε πρωτόνια πυρήνων, των λεγόμενων “ p -πυρήνων”. Οι πυρήνες αυτοί βρίσκονται βορειοδυτικά της κοιλάδας σταθερότητας μεταξύ των ισοτόπων ^{74}Se και ^{196}Hg .

Η σύνθεση των p -πυρήνων πραγματοποιείται μέσω ενός πολύπλοκου δικτύου αντιδράσεων φωτοδιάσπασης, (γ, p) , (γ, n) και (γ, α) , αλλά και των αντίστροφων αντιδράσεων (p, γ) , (n, γ) και (α, γ) . Οι αντιδράσεις αυτές συνοδεύονται από β^+ αποδιεγέρσεις και αντιδράσεις σύλληψης τροχιακού ηλεκτρονίου (“*Electron Capture*”, EC).

Στο δίκτυο σύνθεσης των p -πυρήνων παίρνουν, ιδανικά, μέρος πυρήνες που έχουν δημιουργηθεί μέσω της s -διεργασίας (“ s -πυρήνες”). Για το λόγο αυτό, απαραίτητη συνθήκη για τη έναρξη της p -διεργασίας είναι ένα περιβάλλον πλούσιο σε s -πυρήνες. Επιπλέον, για να καταστεί δυνατή η φωτοδιάσπαση των πυρήνων αυτών, απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες ($T=1.8-3.3 \times 10^9$ K [1]), οι οποίες θα διαρκούν για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω φωτοδιάσπαση των παραγόμενων p -πυρήνων.

Οι παραπάνω συνθήκες πληρούνται στο στρώμα καύσης O/Ne αστέρων μάζας $M > 10M_{\odot}$ λίγο πριν την έκρηξη τους ως υπερκαινοφανείς αστέρες (“*Supernova*”) καθώς επίσης και κατά την έκρηξή τους υπό τη μορφή υπερκαινοφανούς αστέρα τύπου II^4 (SNII)[1, 26].

Τελευταίες έρευνες προτείνουν ότι εκτός των παραπάνω, κατάλληλα περιβάλλοντα για τη διεξαγωγή της p -διεργασίας δημιουργούνται και σε ένα διπλό σύστημα αστέρων κατά την έκρηξη υπερκαινοφανούς τύπου I_a^5 , σε κάποιες περιπτώσεις έκρηξης αστέρων μάζας $130M_{\odot} \leq M \leq 250M_{\odot}$, στο εσωτερικό λευκών νάνων μάζας $M < 1.4M_{\odot}$ και κατά την έκρηξη υπερκαινοφανών αστέρων τύπου I_b και I_c^6 [1, 27].

2.4 Οι περιεκτικότητες των p -πυρήνων και οι αβεβαιότητές τους

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες, στο ηλιακό σύστημα⁷, περιεκτικότητες των πυρήνων που έχουν παραχθεί μέσω της s -, της r - και της p -διεργασίας. Μεταξύ αυτών, σπανιότεροι είναι οι p -πυρήνες, οι περιεκτικότητες των οποίων είναι περίπου 100 φορές μικρότερες από αυτές των γειτονικών s - και r -ισοτόπων.

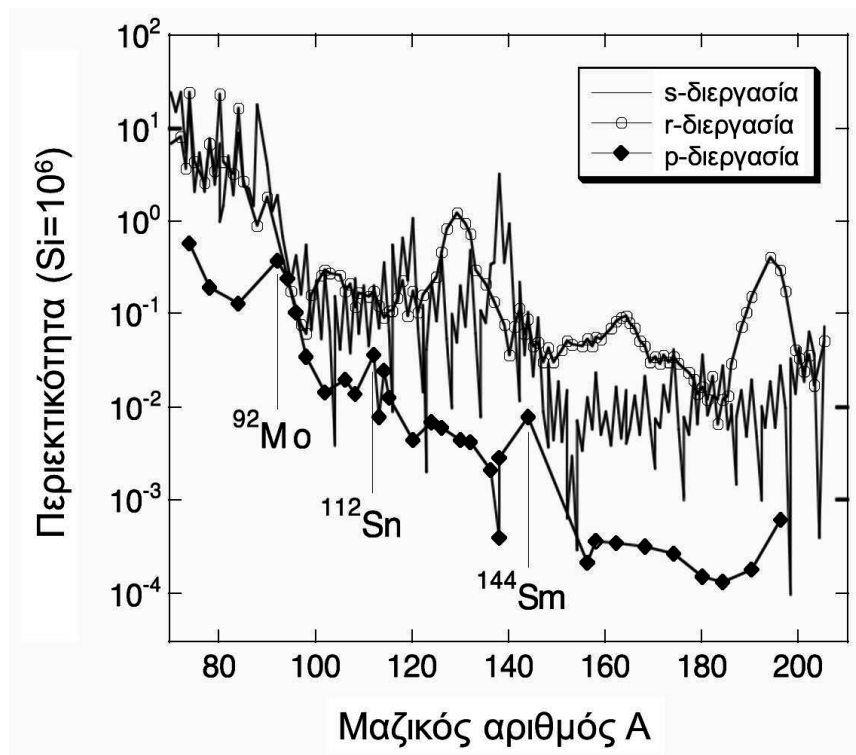
Οι περιεκτικότητες των p -πυρήνων εκφράζονται από τον λεγόμενο “*Κανονικοποιημένο*

⁴Υπερκαινοφανής αστέρας τύπου II ονομάζεται η έκρηξη ενός αστέρα μεγάλης μάζας ($8M_{\odot} \leq M \leq 50M_{\odot}$).

⁵Τύπου I_a υπερκαινοφανής έκρηξη είναι η θερμοπυρηνική έκρηξη που θα υποστεί ένας λευκός νάνος όταν εξαιτίας της ύλης που έχει εκλύσει από τον αστέρα συνοδό του, η μάζα του ξεπεράσει τα $1.44M_{\odot}$ (“*όριο Chandrasekhar*”).

⁶Πρόερχονται από τη βαρυτική κατάρρευση αστέρων μεγάλης μάζας που έχουν χάσει το εξωτερικό τους περίβλημα

⁷Η μέτρηση των περιεκτικότητων των p -πυρήνων εκτός του ηλιακού συστήματος είναι εξαιρετικά δύσκολη καθώς η διακριτική ικανότητα των οργάνων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μετρήσεις δεν επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ ισοτόπων.



Σχήμα 2.8: Περιεκτικότητες των s -, r - και p -πυρήνων στο ηλιακό σύστημα [25]. Στο σχήμα αυτό, είναι εμφανές ότι οι p -πυρήνες είναι οι σπανιότεροι ανάμεσα στους βαρείς πυρήνες. Οι περιεκτικότητες έχουν κανονικοποιηθεί στα 10^6 άτομα Si .

Παράγοντα Υπερπαραγωγής”, ο οποίος δίνεται από τον λόγο:

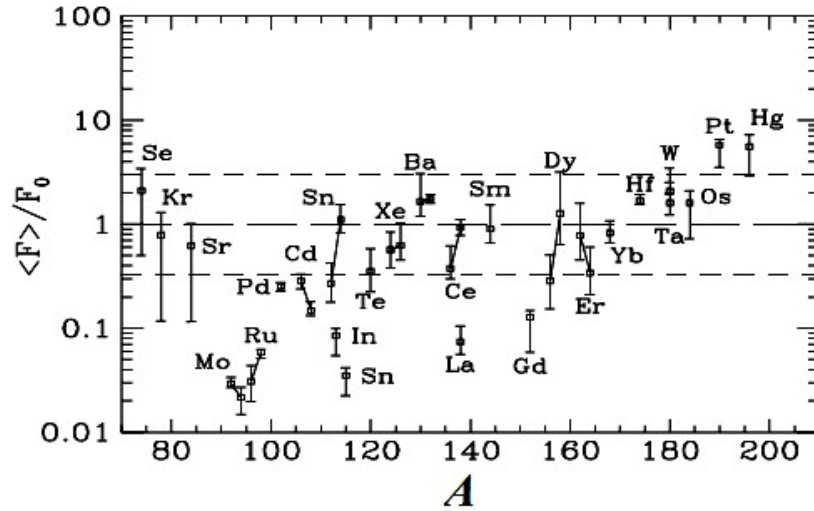
$$F = \frac{\langle F \rangle}{F_0} \quad (2.20)$$

όπου $\langle F \rangle$ είναι ο μέσος παράγοντας υπερπαραγωγής του εν λόγω p -πυρήνα σε έναν αστέρα μάζας M_{tot} και ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$\langle F \rangle = \frac{m}{M_{tot} X_{\odot}} \quad (2.21)$$

Στην τελευταία σχέση με m συμβολίζεται η συνολική μάζα του συγκεκριμένου p -πυρήνα στον υπό εξέταση αστέρα και X_{\odot} ο λόγος της μάζας του πυρήνα αυτού στο ηλιακό σύστημα προς τη μάζα του ηλιακού συστήματος. Ο παράγοντας F_0 της σχέσης (2.20) εκφράζει τη συνολική παραγωγή p -πυρήνων από έναν αστέρα και ορίζεται ως η μέση τιμή των μέσων παραγόντων υπερπαραγωγής των 35 p -πυρήνων:

$$F_0 = \frac{1}{35} \sum_1^{35} \langle F \rangle \quad (2.22)$$



Σχήμα 2.9: Κανονικοποιημένοι παράγοντες υπερπαραγωγής των 35 *p*-πυρήνων, όπως υπολογίστηκαν [1] για υπερκαινοφανείς εκρήξεις τύπου II αστέρων μάζας $13M_{\odot} < M < 25M_{\odot}$.

Εφόσον οι υπολογιζόμενες περιεκτικότητες είναι ίσες με τις παρατηρούμενες στο ηλιακό σύστημα ο κανονικοποιημένος παράγοντας υπερπαραγωγής θα ισούται με τη μονάδα. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζονται οι τιμές των κανονικοποιημένων παραγόντων υπερπαραγωγής για τους 35 *p*-πυρήνες, όπως υπολογίστηκαν για αστέρες μάζας $13M_{\odot} < M < 25M_{\odot}$ από τους Arnould και Goriely στην εργασία [1]. Τα εύρη που φαίνονται στο σχήμα αυτό αντιστοιχούν στα όρια των θεωρητικών υπολογισμών και εκφράζουν τις αβεβαιότητες των αστροφυσικών και πυρηνικών προτύπων που υπεισέρχονται σε αυτούς. Συγκεκριμένα εκφράζουν αβεβαιότητες α) στην περιγραφή της πίεσης και της θερμοκρασίας του αστρικού περιβάλλοντος, β) της κατανομής των αρχικών *s*-πυρήνων και γ) των ρυθμών των αντιδράσεων που παίρνουν μέρος στο δίκτυο σύνθεσης των *p*-πυρήνων.

Μία από τις βασικότερες αδυναμίες των μοντέλων σύνθεσης των *p*-πυρήνων, είναι οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των παρατηρούμενων στο ηλιακό σύστημα και των θεωρητικά υπολογιζόμενων περιεκτικότητων των πυρήνων αυτών. Οι εν λόγω αποκλίσεις είναι εμφανείς στο σχήμα 2.9 όπου :

1. Η κεντρική οριζόντια γραμμή αντιστοιχεί στη μονάδα. Οι περιεκτικότητες των ισotόπων που βρίσκονται πάνω στη γραμμή αυτή έχουν προβλεφθεί με εξαιρετική ακρίβεια από τα μοντέλα της *p*-διεργασίας.
2. Οι δύο εστιγμένες οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στην τιμή $\langle F \rangle / F_0 = 3$. Οι αποκλί-

σεις μεταξύ των παρατηρούμενων και των θεωρητικά υπολογιζόμενων περιεκτικοτήτων των πυρήνων που βρίσκονται ανάμεσα σε αυτές τις γραμμές δεν ξεπερνούν το 300%.

3. Οι θεωρητικά προβλεπόμενες περιεκτικότητες των πυρήνων που βρίσκονται εκτός των εστιγμένων γραμμών αποκλίνουν έως και έναν παράγοντα του ≈ 90 (^{92}Mo) από αυτές που παρατηρούνται στο ηλιακό σύστημα.

Σύμφωνα με τους Arnould και Goriely [1], σε πολλές περιπτώσεις, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μπορεί να οφείλονται και στις πυρηνικές παραμέτρους που υπεισέρχονται στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενη ενότητα, οι τελευταίες εισάγονται στους υπολογισμούς των περιεκτικοτήτων μέσω των ρυθμών και κατά συνέπεια των ενεργών διατομών των αντιδράσεων που παίρνουν μέρος στο δίκτυο της p -διεργασίας. Ο πειραματικός προσδιορισμός των ενεργών διατομών όλων των αντιδράσεων που συνθέτουν το δίκτυο αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολος καθώς το πλήθος τους ξεπερνάει τις 20000. Η δυσκολία αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι μεγάλο μέρος των περίπου 2000 πυρήνων που συμμετέχουν στις αντιδράσεις αυτές είναι ασταθείς. Συνεπώς, όλοι οι υπολογισμοί των περιεκτικοτήτων των p -πυρήνων βασίζονται, αναγκαστικά, σε ενεργές διατομές που υπολογίζονται με τη θεωρία Hauser-Feshbach. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο έλεγχος της εγκυρότητας των πυρηνικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στη θεωρία Hauser-Feshbach και συγκεκριμένα του Οπτικού Δυναμικού πρωτονίου-πυρήνα.

Κεφάλαιο 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν σε τρία εργαστήρια επιταχυντών και συγκεκριμένα στο πρώην Εργαστήριο Φυσικής Ακτινοβολιών (Institut für Strahlenphysik, IfS) του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης με χρήση ενός επιταχυντού μονού σταδίου (single-stage) Dynamitron, στο εργαστήριο του επιταχυντού Dynamitron Tandem (Dynamitron Tandem Laboratorium, DTL) του Πανεπιστημίου του Bochum, Γερμανία και στο Εργαστήριο του Επιταχυντού Tandem του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”. Τα χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας των εν λόγω επιταχυντών παρουσιάζονται λεπτομερώς στις αναφορές [16] και [28].

Οι μετρήσεις στη Στουτγκάρδη είχαν ως στόχο τον προσδιορισμό των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ με τη μέθοδο μέτρησης των γωνιακών κατανομών της ακτινοβολίας γ που εκπέμπεται από τις εν λόγω αντιδράσεις. Τα πειράματα στο Bochum έγιναν με την τεχνική των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων της γ -ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τις αντιδράσεις $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$, $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$, $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$, $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$, ενώ στο “Δημόκριτο”, οι μετρήσεις είχαν ως αντικείμενο την ανάλυση των στόχων Se και Mo που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω πειράματα.

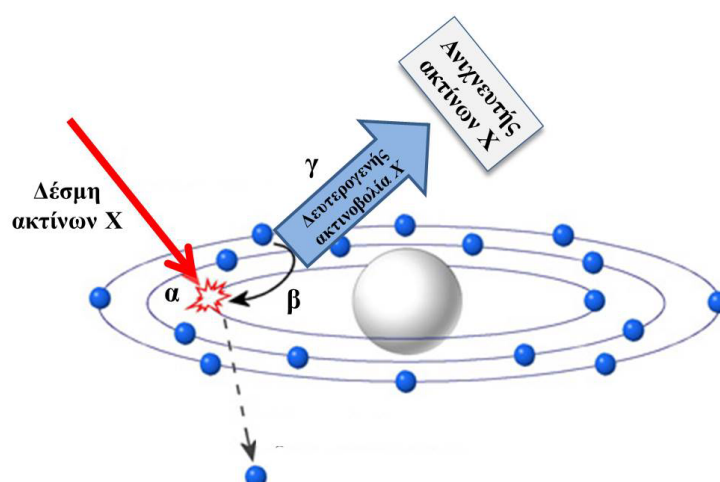
Στη συνέχεια παρουσιάζονται πρώτα οι μετρήσεις στο “Δημόκριτο”, μετά οι μετρήσεις στη Στουτγκάρδη και τέλος τα πειράματα στο Bochum.

3.1 Μετρήσεις στο Εργαστήριο Tandem του “Δημόκριτου” (Αναλύσεις στόχων)

3.1.1 Αναλύσεις στόχων με την μέθοδο XRF

Η αρχή της μεθόδου XRF

Η ανάλυση των στόχων ^{78}Se και ^{80}Se έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου Φθορισμού ακτίνων X (“*X-ray Fluorescence*”, XRF) [29]. Η μέθοδος XRF είναι μία μη καταστροφική, αναλυτική μέθοδος. Η βασική αρχή της μεθόδου απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου Φθορισμού ακτίνων X (XRF). Τα τρία στάδια της μεθόδου σημειώνονται με τα γράμματα α, β και γ.

Η μέθοδος μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια τα οποία λαμβάνουν χώρα σε ατομικό επίπεδο:

1. Ο στόχος βομβαρδίζεται από μονοχρωματική δέση ακτίνων X με ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων του στόχου στο φλοιό K. Ως αποτέλεσμα τα άτομα του στόχου ιονίζονται εξαιτίας της διαφυγής ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από τους φλοιούς K και L στο συνεχές.
2. Καθώς η διαδικασία αυτή αφήνει το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση, ηλεκτρόνια ανώτερων στιβάδων μεταπίπτουν στις στιβάδες K και L καλύπτοντας τις κενές οπές και

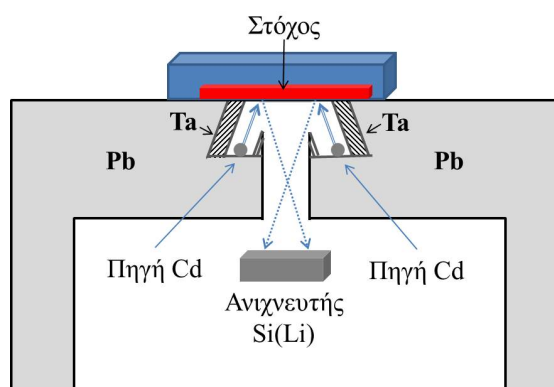
δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μία πιο σταθερή κατάσταση. Η μετάπτωση αυτή των ηλεκτρονίων συνοδεύεται από εκπομπή δευτερογενούς ακτινοβολίας X .

3. Η ανίχνευση αυτής της ακτινοβολίας οδηγεί στην ταυτοποίηση του ατόμου, καθώς, η ενέργειά της είναι χαρακτηριστική για κάθε άτομο και εξαρτάται αποκλειστικά από τον ατομικό αριθμό του.

Σε αντίθεση με τη μέθοδο RBS (§3.1.2), η μελέτη της διαστρωμάτωσης ενός δείγματος μέσω της μεθόδου XRF είναι αδύνατη. Επιπλέον, εξαιτίας φαινομένων ενδοαπορρόφησης, δεν μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση ελαφρών στοιχείων ($Z < 13$).

Η διάταξη XRF

Οι μετρήσεις XRF της παρούσας εργασίας έγιναν στο εργαστήριο XRF του ΙΠΣΦ του “Δημόκριτου”. Η σχετική πειραματική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Πειραματική διάταξη μετρήσεων XRF στο ΙΠΣΦ του “Δημόκριτου”.

Η πρωτογενής δέσμη ακτίνων X παράγεται από μία ραδιενεργό πηγή Cd σύμφωνα με την αντίδραση:



Η οπή που δημιουργείται στη σιβάδα K του ^{109}Ag συμπληρώνεται από ηλεκτρόνια ανώτερων φλοιών με ταυτόχρονη εκπομπή ακτίνων X ενέργειας 22.104 keV. Η επιλογή της ραδιενεργού πηγής έγινε με κριτήριο την ενέργεια των ακτίνων X που εκπέμπει, η οποία, έπρεπε να υπερβαίνει την ενέργεια ιονισμού των ηλεκτρονίων της σιβάδας K του ατόμου

Se (12.658 keV). Οι δευτερογενείς ακτίνες X που παράγονταν από την αποδιέγερση των ατόμων του στόχου ανιχνεύονταν από έναν ανιχνευτή Si(Li) ενεργού επιφανείας 30 mm².

Αποτελέσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις λεπτοί, ισοτοπικά εμπλουτισμένοι στόχοι *Se*. Τα αποτελέσματα της ανάλυσής τους δίνονται στον Πίνακα 3.1. Όλοι οι στόχοι παρασκευάστηκαν στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου της Κολωνίας με εξάχνωση του εκάστοτε εμπλουτισμένου ισοτόπου πάνω σε δίσκο Τα πάχους 0.2 mm² και διαμέτρου 4 cm.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα μετρήσεων του πάχους των στόχων *Se* με τη μέθοδο XRF.

Αντίδραση	Πάχος (μgr/cm ²)	Ισοτοπικός εμπλουτισμός (%)
⁷⁸ Se(p,γ) ⁷⁹ Br	87 ± 9	97.8
⁸⁰ Se(p,γ) ⁸¹ Br	106 ± 11	98.0
⁸⁰ Se(p,γ) ⁸¹ Br	132 ± 13	98.0

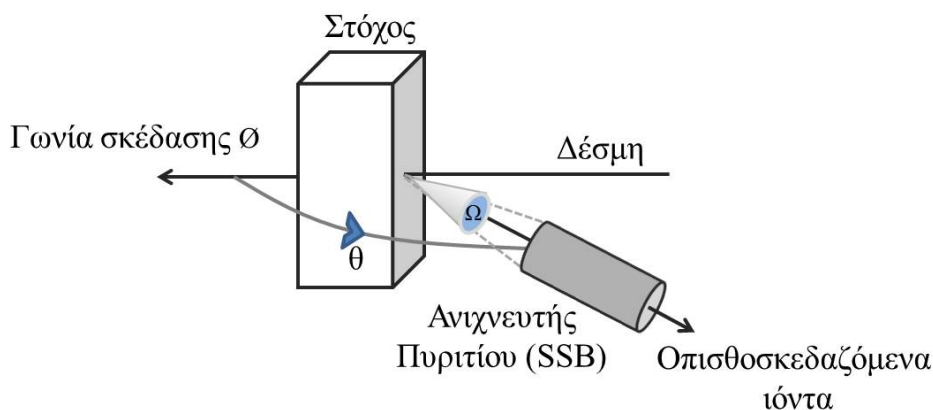
3.1.2 Αναλύσεις στόχων με την μέθοδο RBS

Η αρχή της μεθόδου RBS

Τα πάχη των στόχων *Mo* που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις των ενεργών διατομών που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία προσδιορίστηκαν με χρήση της μεθόδου Οπισθοσκέδασης Rutherford (“*Rutherford Backscattering Spectrometry*”, RBS) στο “Δημόκριτο”. Η σκέδαση Rutherford λαμβάνει χώρα όταν τα ιόντα της δέσμης σκεδάζονται ελαστικά από το πεδίο Coulomb των πυρήνων του στόχου. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη RBS. Ένας ανιχνευτής πυριτίου επιφανειακού φραγμού (surface barrier Si-detector, SSB) τοποθετείται σε μεγάλη¹, ως προς την κατεύθυνση της δέσμης, γωνία (~170°). Η δέσμη ιόντων προσπίπτει στο στόχο αλληλεπιδρώντας με όλους τους δυνατούς τρόπους,

¹Η εφαρμογή της μεθόδου στις πίσω γωνίες ($150^\circ \leq \theta < 180^\circ$) επιλέγεται εξαιτίας της αυξημένης διακριτικής ικανότητας της μεθόδου στις γωνίες αυτές (σχέση 3.1).

όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 1. Από τα ιόντα της δέσμης που σκεδάστηκαν ελαστικά ανιχνεύονται αυτά που βρίσκονται εντός της στερεάς γωνίας Ω που καλύπτει ο ανιχνευτής. Η βασική αρχή της μεθόδου βασίζεται στο ότι για ορισμένη γωνία ανίχνευσης η ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων της δέσμης, μπορεί να συσχετισθεί με το είδος και τη θέση των ατόμων στον στόχο, όπως αποδεικνύεται παρακάτω.



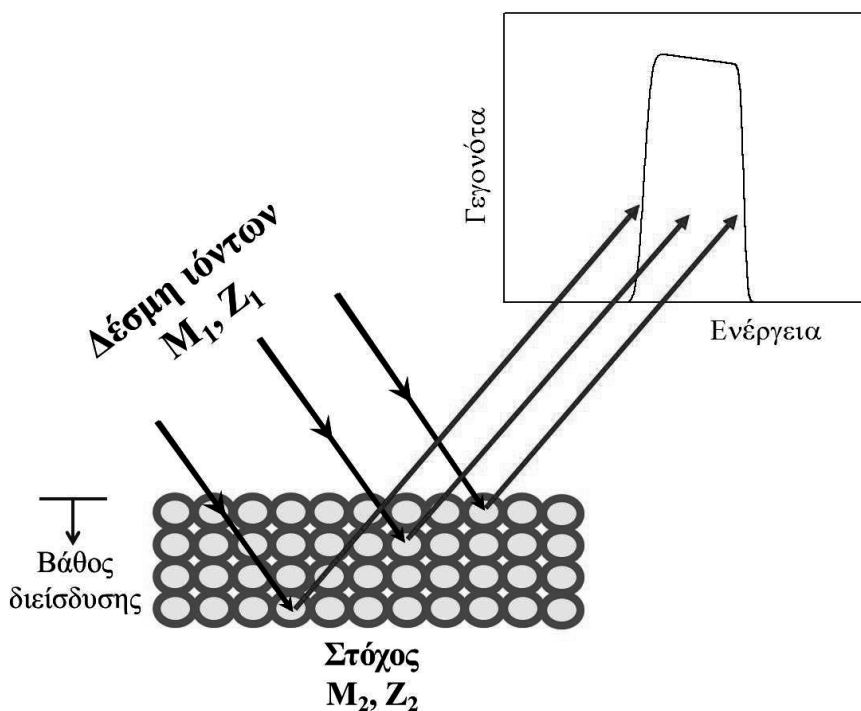
Σχήμα 3.3: Πειραματική διάταξη ανάλυσης με τη μέθοδο RBS.

Έστω δέσμη ιόντων μάζας M_1 και ενέργειας E_0 προσκρούει σε στόχο με πυρήνες μάζας M_2 . Κατά τη σκέδαση ένα μέρος της ενέργειας μεταφέρεται στα άτομα του στόχου. Ο λόγος E_1/E_0 της ενέργειας E_1 των σκεδαζόμενων ιόντων της δέσμης προς την αρχική ενέργεια E_0 ονομάζεται κινηματικός παράγοντας K και δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{(M_2^2 - M_1^2 \cdot \sin^2\theta)^{1/2} + M_1 \cdot \cos\theta}{M_1 + M_2} \right]^2 \quad (3.1)$$

όπου θ η γωνία σκέδασης. Από την εξίσωση (3.1) είναι φανερό ότι η μέτρηση της ενέργειας του ανιχνευόμενου σωματιδίου οδηγεί στον προσδιορισμό της μάζας του στόχου και αντίστροφα, αν η μάζα M_2 του στόχου είναι γνωστή, η ενέργεια των σκεδαζόμενων ιόντων της δέσμης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.1) καθώς όλοι οι άλλοι παράμετροι (E_0 , M_1 και θ) είναι δεδομένοι σε ένα πείραμα.

Κατά την πρόσκρουση της δέσμης στο στόχο, μέρος των ιόντων της σκεδάζονται από άτομα που βρίσκονται στην επιφάνειά στόχου ενώ τα υπόλοιπα διεισδύουν σε βαθύτερα στρώματα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Στην πρώτη περίπτωση τα σκεδαζόμενα ιόντα χάνουν ενέργεια, $\Delta E_{sc} = E_0 - E_1$, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.1). Στη



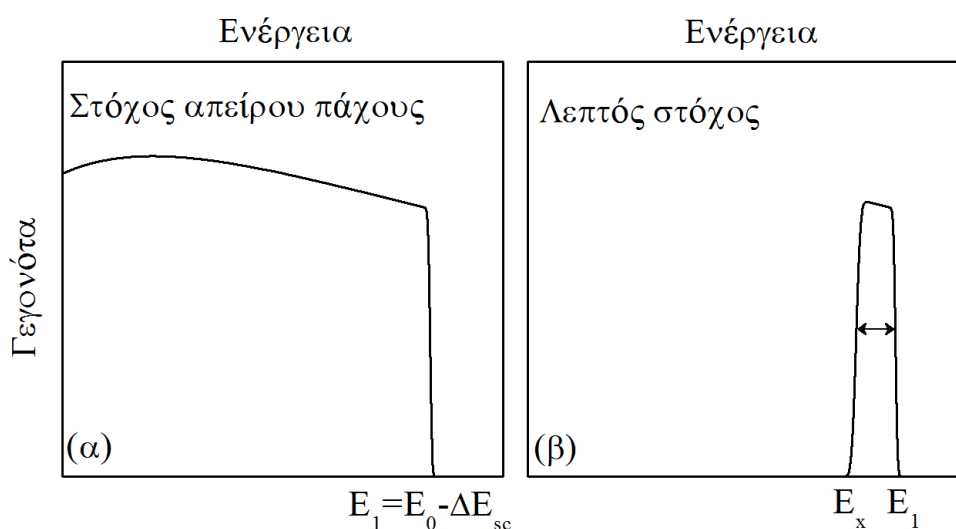
Σχήμα 3.4: Αρχή της οπισθοσκέδασης Rutherford. Καθώς η δέσμη διεισδύει σε βαθύτερα στρώματα οι απώλειες στην ενέργεια των ανιχνευόμενων ιόντων αυξάνονται κυρίως εξαιτίας αλληλεπιδράσεων της δέσμης με τα ηλεκτρόνια του στόχου.

δεύτερη περίπτωση, θα χάσουν επιπλέον ενέργεια κυρίως εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τα ηλεκτρόνια του στόχου. Η δέσμη θα συνεχίσει να διεισδύει σε βαθύτερα στρώματα του στόχου και είτε θα εξέλθει από αυτόν (λεπτός στόχος) είτε θα σταματήσει μέσα σε αυτόν (στόχος "απείρου πάχους"). Ο υπολογισμός του πάχους ενός λεπτού στόχου βασίζεται στο γεγονός ότι τα ιόντα που σκεδάστηκαν από το τελευταίο στρώμα του στόχου θα υποστούν τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας. Η μέτρηση της ενέργειας E_x των εν λόγω ιόντων συνδέεται άμεσα με το πάχος x του στόχου μέσω της σχέσης:

$$E_x = x \left(K \varepsilon_{in} + \frac{\varepsilon_{out}}{|\cos\theta|} \right) \quad (3.2)$$

όπου K ο κινηματικός παράγοντας και ε_{in} , ε_{out} η ισχύς πέδησης ("stopping power") των ατόμων του στόχου κατά την είσοδο της δέσμης σ' αυτόν και κατά την απομάκρυνση των σκεδαζόμενων ιόντων, αντίστοιχα [30]. Για δεδομένη δέσμη ιόντων και δεδομένο στόχο οι

τιμές ε_{in} και ε_{out} είναι καταγεγραμμένες στη βιβλιογραφία, ενώ ο κινηματικός παράγοντας K υπολογίζεται από τη σχέση (3.1). Στην περίπτωση που ο υπό εξέταση στόχος είναι αρκετά παχύς, ώστε να σταματάει δέσμη δεδομένης ενέργειας και δεδομένου ιόντος, ο στόχος θεωρείται “απείρου πάχους” για τη συγκεκριμένη δέσμη. Η εφαρμογή της μεθόδου RBS για την ανάλυση στόχου “απείρου πάχους” είναι αδύνατη. Στα σχήματα 3.5(α) και 3.5(β) παρουσιάζονται τα RBS φάσματα που αναμένονται από την ακτινοβολήση ενός στόχου “απείρου πάχους” και ενός λεπτού στόχου, αντίστοιχα.



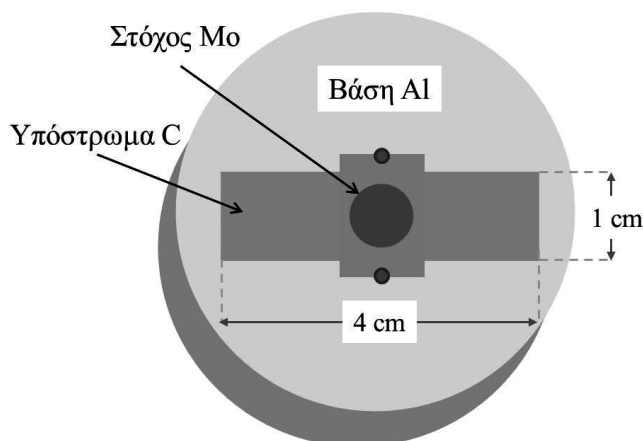
Σχήμα 3.5: Φάσματα οπισθοσκεδαζόμενων ιόντων από (α) στόχο “απείρου πάχους” και (β) λεπτό στόχο.

Η διάταξη RBS

Οι στόχοι του Mo που χρησιμοποιήθηκαν ήταν λεπτά, αυτο-υποστηριζόμενα (“*self-supporting*”) φύλλα, ισοτοπικά εμπλουτισμένα στο εκάστοτε ισότοπο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη διάταξη RBS του Εργαστηρίου Επιταχυντού Tandem στο “Δημόκριτο”. Η διάμετρος της δέσμης στο στόχο ήταν ίση με 2 mm^2 , ενώ η έντασή της δεν ξεπερνούσε τα 10 nA . Για την ανίχνευση των σκεδαζόμενων σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε ένας ανιχνευτής Si επιφανειακού φραγμού που ήταν τοποθετημένος στις 170° ως προς τον άξονα της δέσμης και σε απόσταση 14 cm από το στόχο. Μπροστά από τον ανιχνευτή τοποθετήθηκε κυκλική μάσκα Τα με σκοπό τη μείωση του εύρους $\Delta\theta$ στην αζιμουθιακή κατανομή των

ανιχνευόμενων σωματιδίων. Λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση του ανιχνευτή από το στόχο και τη διάμετρο της μάσκας, το εύρος $\Delta\theta$ υπολογίστηκε² μικρότερο των 0.8° . Το πάχος του ανιχνευτή επιλέχθηκε ίσο με 300 μm , ώστε να σταματάει πρωτόνια ενέργειας 2.5 MeV, που ήταν η μεγαλύτερη ενέργεια δέσμης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις μετρήσεις. Η επιλογή του πάχους του ανιχνευτή έγινε μετά από προσομοίωση Monte Carlo της πορείας δέσμης πρωτονίων 2.5 MeV μέσα σε στόχο Si, με χρήση του κώδικα SRIM (έκδοση 2003) [31].

Ο στόχος ήταν στερεωμένος σε μία ειδική βάση στήριξης, κατασκευασμένη από Al. Μία οπή μήκους 4 cm και ύψους 1 cm στο κέντρο της βάσης (σχήμα 3.6) επέτρεπε την ελεύθερη διέλευση της δέσμης. Μετά τη διέλευσή της από την οπή, η δέσμη προσέπιπτε και σταματούσε σε ένα παχύ υπόστρωμα άνθρακα στο εσωτερικό της βάσης.



Σχήμα 3.6: Βάση στήριξης λεπτών, αυτο-υποστηριζόμενων στόχων στη διάταξη RBS.

Σκοπός της όλης κατασκευής είναι η αποφυγή της αλληλεπίδρασης της δέσμης με στοιχεία μάζας παραπλήσιας με αυτή του υπό εξέταση στόχου. Όπως αποδεικνύεται από τη σχέση (3.1), η διαφορά στην ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων από το στόχο και από το υπόστρωμα ιόντων και κατά συνέπεια ο διαχωρισμός των αντίστοιχων κορυφών εξαρτάται από τη διαφορά των μαζών τους.

²

$$\Delta\theta = \frac{2A}{d^2} \quad (3.3)$$

όπου A το εμβαδόν της μάσκας T_a και d η απόσταση του ανιχνευτή από τον στόχο.

Στα σχήματα 3.9 έως 3.14 παρουσιάζονται τα φάσματα RBS που μετρήθηκαν από το βομβαρδισμό των στόχων Mo με δέσμη πρωτονίων μαζί με τις αντίστοιχες καμπύλες προσομοίωσής τους. Η ανάλυση των φασμάτων έγινε με χρήση του κώδικα *SIMNRA* [32]. Σε κάθε περίπτωση γινόταν προσομοίωση της κορυφής των ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων. Για την ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων χρησιμοποιήθηκαν πρότυποι στόχοι Al, Ni και Mo, οι οποίοι, βομβαρδίστηκαν με δέσμη πρωτονίων ενέργειας 1.4 και 2.5 MeV. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι κορυφές των ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων, καθώς, σύμφωνα με όσα αναφέρονται παραπάνω, για δεδομένη μάζα στόχου και γωνία σκέδασης οι ενέργειες των εν λόγω κορυφών μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση (3.1). Για τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε η ελαστική κορυφή των πρωτονίων που σκεδάστηκαν από τον πρότυπο στόχο του Mo . Στην προσομοίωση μίας κορυφής υπεισέρχονται οι εξής παράμετροι:

1. Η διαφορική ενεργός διατομή $d\sigma/d\Omega$ της αντίδρασης που οδηγεί στην κορυφή,
2. ο αριθμός A των σωματιδίων που ανιχνεύονται,
3. το ολικό φορτίο Q των σωματιδίων της δέσμης που προσπίπτουν στο στόχο,
4. η στερεά γωνία Ω που καλύπτει ο ανιχνευτής και
5. το πάχος ξ του στόχου.

Για ορισμένη γωνία ανίχνευσης θ οι παράμετροι αυτές συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{A}{(Q \times \Omega)\xi} \quad (3.4)$$

Επομένως, για τον υπολογισμό του πάχους ξ του υπό εξέταση στόχου, πρέπει κανείς να γνωρίζει την τιμή των υπολοίπων τεσσάρων παραμέτρων. Ο αριθμός A των ανιχνευόμενων σωματιδίων υπολογίζεται από την εμβαδομέτρηση της κορυφής, η ενεργός διατομή της αντίδρασης $Mo(p,p)Mo$ υπακούει στην εξίσωση Rutherford για τις ενέργειες δέσμης που πραγματοποιήθηκαν αυτές οι μετρήσεις:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = K \frac{4}{\sin^4\theta} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right) \quad (3.5)$$

όπου K ο κινηματικός παράγοντας και Z_1 , Z_2 οι ατομικοί αριθμοί των σωματιδίων της δέσμης και του πυρήνα-στόχου, αντίστοιχα. Σε αυτού του είδους τις μετρήσεις, η στερεά

γωνία Ω που καλύπτει ο ανιχνευτής και το φορτίο Q που προσπίπτει στο στόχο υπολογίζονται συνήθως ως γινόμενο ($Q \times \Omega$), με σκοπό τη μείωση των σφαλμάτων που επιφέρει ο επιμέρους υπολογισμός τους.

Μέτρηση φορτίου

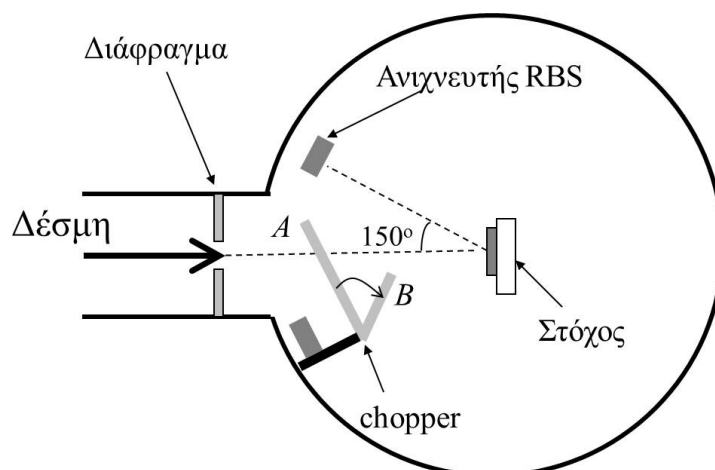
Για τη μέτρηση του γινομένου ($Q \times \Omega$) χρησιμοποιήθηκε ο λεγόμενος “ανακόπτης δέσμης” (*chopper*) [33] που εγκαταστάθηκε πρόσφατα στη διάταξη RBS. Όπως περιγράφεται παρακάτω, η μέτρηση του γινομένου ($Q \times \Omega$) με χρήση ενός *chopper*, είναι ουσιαστικά μία σχετική, ως προς κάποιο πρότυπο στόχο “απείρου πάχους”, μέτρηση.

Το *chopper* αποτελείται από ένα έλασμα αλουμινίου, τοποθετημένο μέσα στο θάλαμο σκέδασης, στην οπή από όπου θα διέλθει η δέσμη όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Το έλασμα μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον κάθετο σε αυτό νοητό άξονα που διέρχεται από το στερεωμένο άνω άκρο του. Η περιστροφή του ελάσματος γίνεται μεταξύ δύο καλά καθορισμένων θέσεων με τη βοήθεια ενός κινητήρα. Όταν το έλασμα βρίσκεται στη θέση A (σχήμα 1.6) πρέπει να “κόβει” πλήρως τη δέσμη ενώ όταν βρίσκεται στη θέση B (σχήμα 1.6) να μην παρεμβάλλεται καθόλου στην πορεία της. Η συχνότητα της περιστροφής ρυθμίζεται εξωτερικά. Στις παρούσες μετρήσεις είχε ρυθμιστεί στα 0.1 Hertz (1 s στη θέση In για κάθε 10 s μέτρησης).

Στην επιφάνεια του ελάσματος που θα συναντήσει η δέσμη έχει εξαχνωθεί ένα λεπτό στρώμα Au πάχους 10 $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$. Ένας δεύτερος ανιχνευτής Si, επιφάνειας 3 mm^2 (με χρήση μάσκας Ta) και πάχους 300 μm , είχε τοποθετηθεί στο θάλαμο σκέδασης σε απόσταση 2 cm από το έλασμα με σκοπό την καταγραφή των ιόντων της δέσμης που σκεδάζονται από το στρώμα Au όταν το *chopper* βρίσκεται στη θέση A . Η θέση του ανιχνευτή ήταν κατάλληλη ώστε να μην ανιχνεύει τα ιόντα της δέσμης που σκεδάζονται από το στόχο όταν το *chopper* βρίσκεται στη θέση B .

Για τη βαθμονόμηση του *chopper* απαιτείται ένας στόχος Au, “απείρου πάχους”, του ίδιου δηλαδή υλικού με αυτό που εξαχνώθηκε στο έλασμα. Στο σχήμα 3.8 φαίνονται τα φάσματα των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων από (α) το λεπτό στρώμα Au στην επιφάνεια του ελάσματος και (β) τον “απείρου πάχους” στόχο Au καθώς και η προσομοίωση του τελευταίου με το πρόγραμμα SIMNRA.

Σύμφωνα με τη σχέση (3.4), ο μοναδικός άγνωστος που υπεισέρχεται στην ανάλυση του φάσματος που συλλέχθηκε για τον πρότυπο στόχο Au είναι το γινόμενο $(Q \times \Omega)_{Au}$ καθώς η ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευ-



Σχήμα 3.7: Όταν το έλασμα του chopper βρίσκεται στη θέση A η δέσμη σταματάει στο έλασμα και ένας ανιχνευτής Si καταγράφει τα οπισθοσκεδαζόμενα από το στρώμα Au ιόντα. Όταν το έλασμα βρίσκεται στη θέση B η δέσμη εισέρχεται στο θάλαμο σκέδασης χωρίς να αλληλεπιδράσει με αυτό [34].

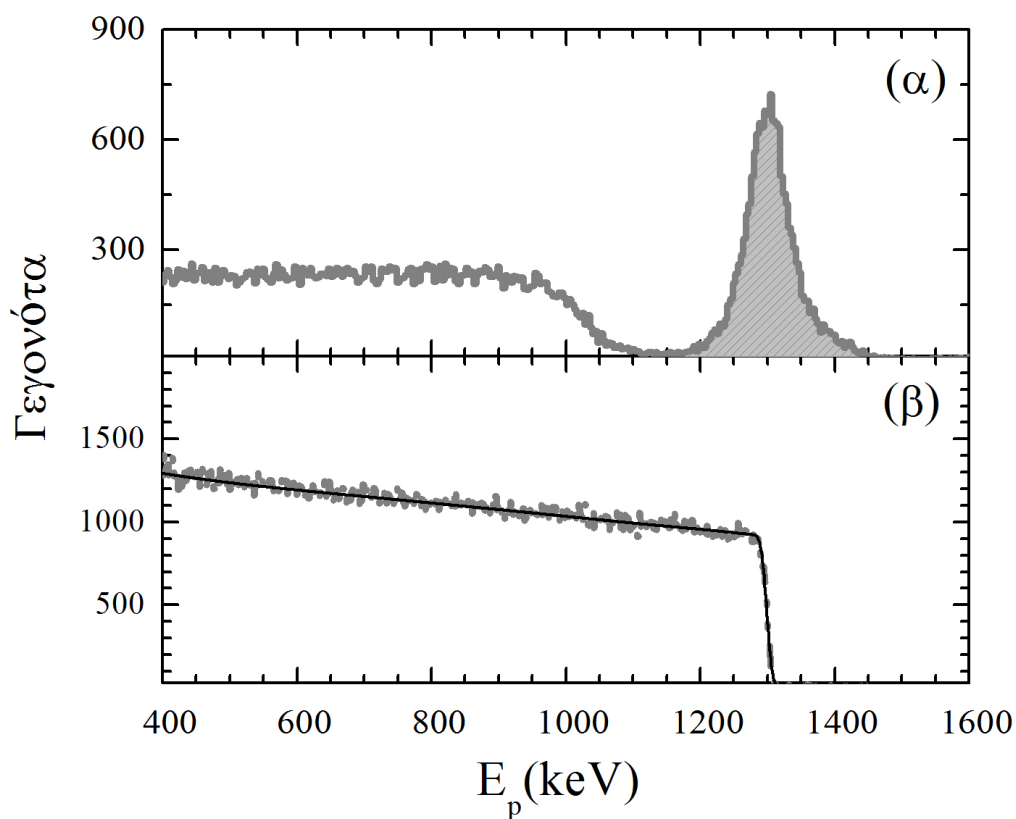
τή υπολογίστηκαν όπως αναφέρεται παραπάνω, ενώ η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{197}\text{Au}(p,p)^{197}\text{Au}$ υπολογίζεται από την εξίσωση Rutherford (σχέση 3.5). Το πάχος δεν αποτελεί άγνωστο στην ανάλυση ενός στόχου “απείρου πάχους” αφού μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, αρκεί να είναι αρκετά μεγάλη ώστε η προσομοιωμένη καμπύλη να έχει τη μορφή του σχήματος 3.5(α). Έχοντας δεδομένους τους παραπάνω παράγοντες, το γινόμενο $(Q \times \Omega)_{\text{Au}}$ υπολογίζεται από την προσομοίωση του πειραματικού φάσματος. Το γινόμενο αυτό είναι ανάλογο του εμβαδού $E_{ch,0}$ της κορυφής των ελαστικά σκεδαζόμενων πρωτονίων από το στρώμα Au του ελάσματος του chopper (σχήμα 3.8(α)).

Μετά τη βαθμονόμηση του chopper, το γινόμενο $(Q \times \Omega)_{\text{Mo}}$ του φορτίου της δέσμης που προσέπιπτε στους στόχους Mo και της στερεάς γωνίας του ανιχνευτή υπολογιζόταν σε κάθε περίπτωση από τη σχέση:

$$(Q \times \Omega)_{\text{Mo}} = E_{ch,x} \frac{(Q \times \Omega)_{\text{Au}}}{E_{ch,0}} \quad (3.6)$$

όπου $E_{ch,x}$ το εμβαδόν της κορυφής των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων από το στρώμα Au του chopper στη συγκεκριμένη μέτρηση.

Το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν κάποιες από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους μέτρησης φορτίου (ολοκληρωτής φορτίου, σχετική ως προς κάποιο πρότυπο στόχο μέτρηση φορτίου) συνδέεται με την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων από το στόχο.

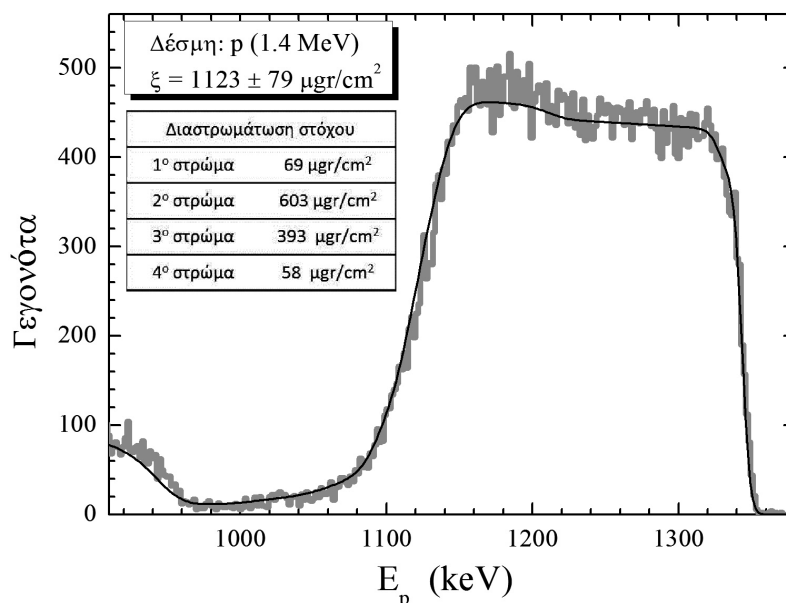


Σχήμα 3.8: Φάσμα οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων από (α) το λεπτό υπόστρωμα Au στην επιφάνεια του ελάσματος του chopper και (β) στόχο Au “άπειρου πάχους”.

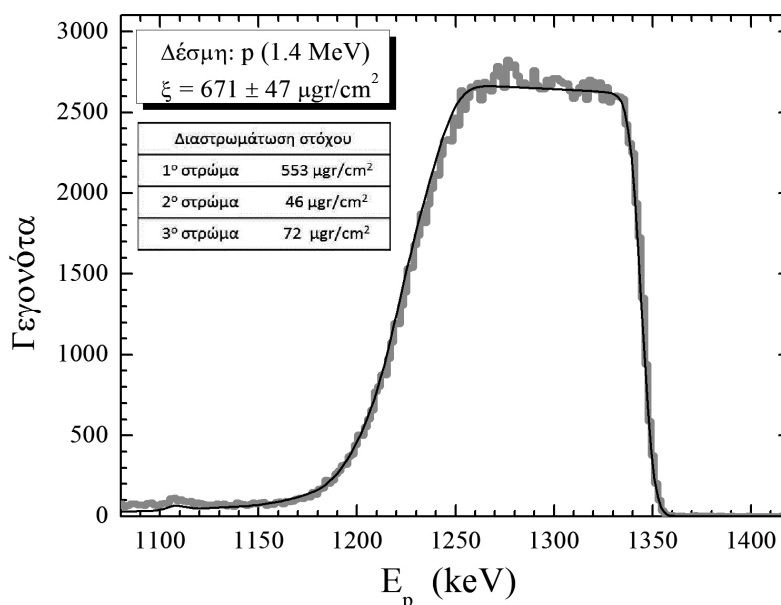
Συγκεκριμένα, οι περισσότερες μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι στόχοι διαφορετικού ατομικού αριθμού θα παράγουν διαφορετικό αριθμό δευτερογενών ηλεκτρονίων όταν θα βομβαρδιστούν από την ίδια δέσμη. Η μέτρηση του φορτίου της δέσμης με χρήση ενός chopper είναι μία σχετική μέτρηση αλλά με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί ως πρότυπο ένα στόχο “άπειρου πάχους” του ίδιου υλικού με αυτό που έχει εξαχνωθεί στο έλασμα του chopper. Έχοντας πλέον απαλλαγεί από το συστηματικό σφάλμα της κυμαινόμενης παραγωγής δευτερογενών ηλεκτρονίων η ακρίβεια στη μέτρηση φτάνει το 3%.

Αποτελέσματα

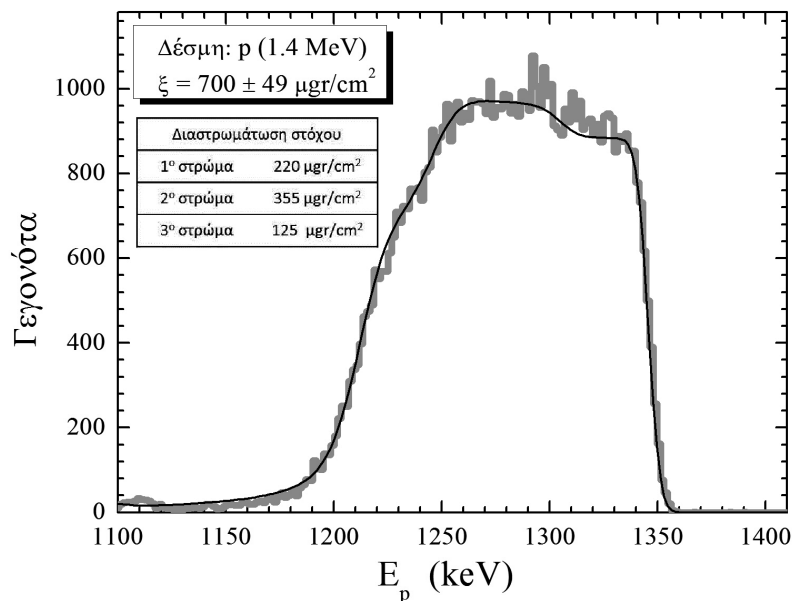
Στη συνέχεια δίνονται τα φάσματα RBS που μετρήθηκαν για τους στόχους Mo μαζί με τα αντίστοιχα φάσματα προσομοίωσης (συνεχείς καμπύλες) που προέκυψαν από το λογισμικό *SIMNRA*.

Στόχος ^{92}Mo , 92.8%, GSI Γερμανία, rolling

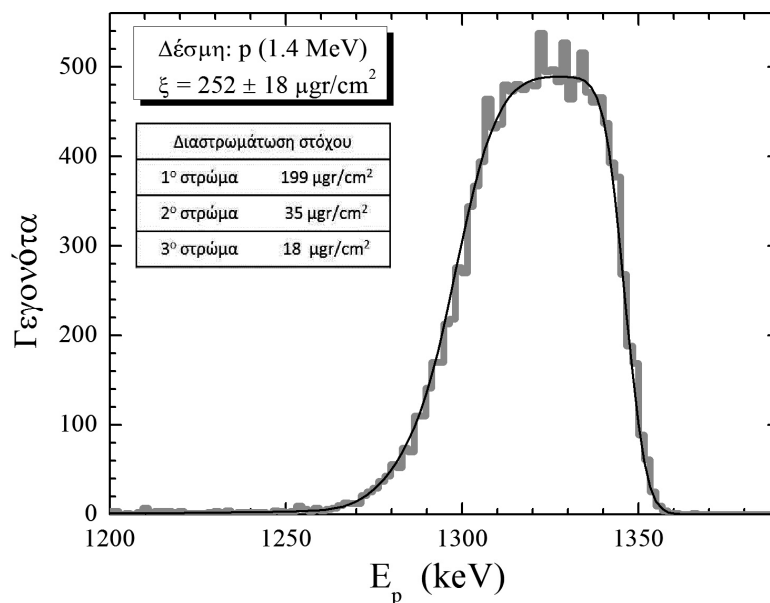
Σχήμα 3.9: Φάσμα RBS του στόχου ^{92}Mo . Η συνεχής γραμμή είναι η προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA.

Στόχος ^{94}Mo , $92.0 \pm 0.5\%$, GSI Γερμανία, rolling

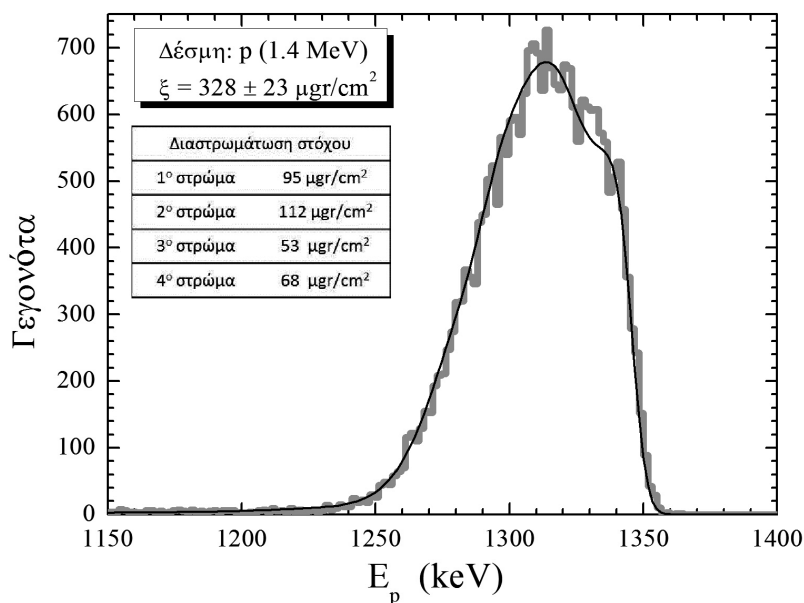
Σχήμα 3.10: Φάσμα RBS του στόχου ^{94}Mo . Η συνεχής γραμμή είναι η προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA.

Στόχος ^{96}Mo , $95.9 \pm 0.5\%$, LNL Ιταλία, rolling

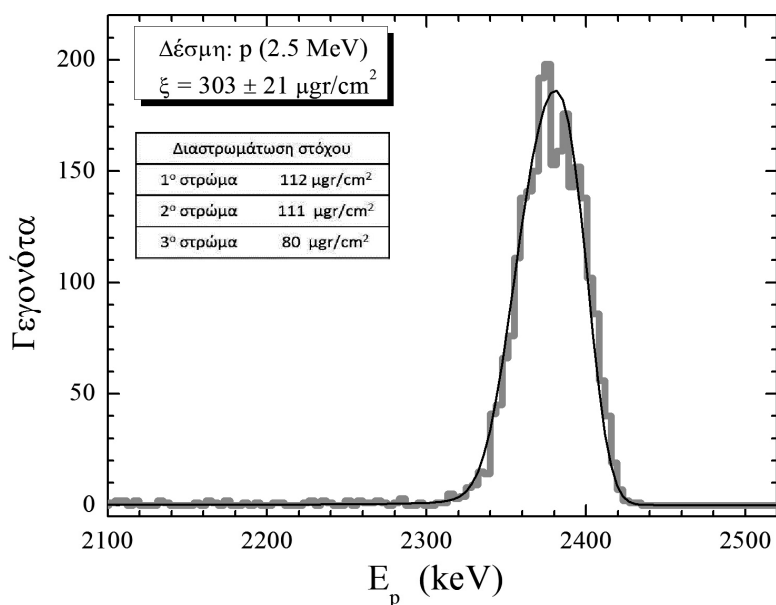
Σχήμα 3.11: Φάσμα RBS του στόχου ^{96}Mo . Η συνεχής γραμμή είναι η προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA.

Στόχος ^{97}Mo , $92.9 \pm 0.5\%$, ΙΚΡ Γερμανία, rolling

Σχήμα 3.12: Φάσμα RBS του στόχου ^{97}Mo . Η συνεχής γραμμή αναπαριστά την προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA.

Στόχος ^{98}Mo , $97.6 \pm 0.8\%$, ΙΚΡ Γερμανία, rolling

Σχήμα 3.13: Φάσμα RBS του στόχου ^{98}Mo . Η συνεχής γραμμή αναπαριστά την προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA.

Στόχος ^{100}Mo , 92.2% , ΙΚΡ Γερμανία, rolling

Σχήμα 3.14: Φάσμα RBS του στόχου ^{100}Mo . Η συνεχής γραμμή αναπαριστά την προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA.

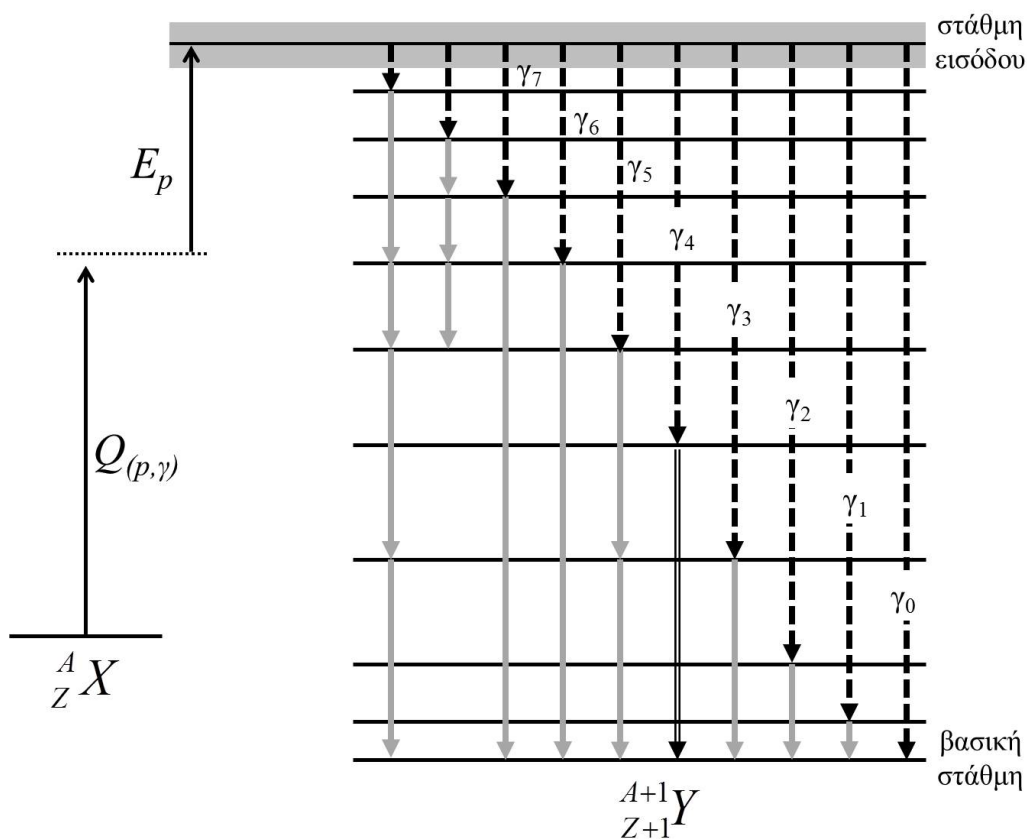
3.2 Μετρήσεις ενεργών διατομών στη Στουτγκάρδη (Μετρήσεις γωνιακών κατανομών ακτίνων γ)

3.2.1 Μέθοδος και βασικές εξισώσεις

Ο μηχανισμός δημιουργίας ενός σύνθετου πυρήνα από μία αντίδραση σύλληψης πρωτονίου φαίνεται στο σχήμα 3.15. Πρωτόνιο ενέργειας E_p προσπίπτει σε έναν πυρήνα-στόχο A_ZX και σχηματίζεται ο σύνθετος πυρήνας ${}^{A+1}_{Z+1}Y$, σε μία διεγερμένη κατάσταση (στάθμη εισόδου-entry state) ενέργειας:

$$E^* = E_{c.m.} + Q_{(p,\gamma)} \quad (3.7)$$

όπου $E_{c.m.}$ η ενέργεια της δέσμης στο σύστημα του κέντρου μάζας και $Q_{(p,\gamma)}$, η Q -value της αντίδρασης.



Σχήμα 3.15: Δημιουργία και αποδιέγερση ενός σύνθετου πυρήνα παραγόμενου από μία αντίδραση σύλληψης πρωτονίου [13]

Ο παραγόμενος πυρήνας αποδιεγείρεται μέσω ακτίνων γ οι οποίες από τη στάθμη εισόδου μεταβαίνουν είτε στη βασική στάθμη (ground state), είτε σε άλλες διεγερμένες στάθμες που αποδιεγείρονται με τη σειρά τους. Εξαιτίας του ενεργειακού διασκελισμού³ της δέσμης ΔE κατά την αλληλεπίδρασή της με το στόχο, ο σύνθετος πυρήνας μπορεί να σχηματιστεί σε μία από τις πολλές ενεργειακές του καταστάσεις στο εύρος $E^* \pm \Delta E/2$. Στις παρούσες μετρήσεις, το εύρος ΔE κυμάνθηκε μεταξύ 5 και 11 keV για τα ισότοπα του *Se* και από 10 keV έως 76 keV για τα ισότοπα του *Mo*.

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης που μελετάται προσδιορίζεται από τη μέτρηση του αριθμού των παραγόμενων πυρήνων. Επειδή ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται μέσω ακτίνων γ ο αριθμός τους μπορεί να προσδιοριστεί από τη μέτρηση του αριθμού των πρωτογενών⁴ φωτονίων (εστιγμένα βέλη στο σχήμα 3.15). Φυσικά, όλοι οι διεγερμένοι πυρήνες καταλήγουν στη βασική στάθμη, οπότε εναλλακτικά ο αριθμός αυτός αντιστοιχεί στον αριθμό φωτονίων που τελικά τροφοδοτούν τη θεμελιώδη στάθμη. Εξαιτίας των υψηλών τιμών Q που συνήθως παρουσιάζουν οι αντιδράσεις σύλληψης, η ενέργεια της στάθμης εισόδου και κατά συνέπεια οι ενέργειες των πρωτογενών ακτίνων γ είναι υψηλές (>6 MeV). Για την ανίχνευση φωτονίων τόσο μεγάλης ενέργειας απαιτούνται ανιχνευτικές διατάξεις υψηλής ανιχνευτικής ικανότητας⁵. Επιπλέον, η αποδιέγερση της στάθμης εισόδου μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω πρωτογενών μεταπτώσεων που απολήγουν σε στάθμες του συνεχούς για τις οποίες δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα. Ο συνδυασμός των παραπάνω επιφέρουν δυσκολίες στην εφαρμογή της μεθόδου μέσω των πρωτογενών φωτονίων.

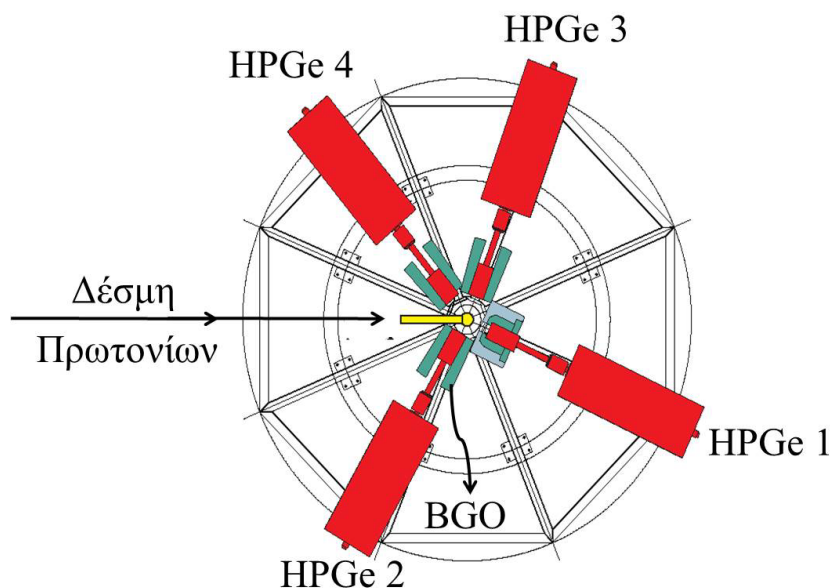
3.2.2 Η ανιχνευτική διάταξη στη Στουτγκάρδη

Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η ανιχνευτική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Στουτγκάρδης για τη μελέτη των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$. Η διάταξη αποτελούνταν από τέσσερις ανιχνευτές Ge υψηλής καθαρότητας (HPGe). Η σχετική ανιχνευτική ικανότητα των τριών από αυτούς ήταν 100% ενώ του τέταρτου 76%. Οι

³Είναι ο όρος που περιγράφει τον ενεργειακό διασκορπισμό της δέσμης λόγω της μεταφοράς μέρους της ενέργειάς της στα ηλεκτρόνια ή στα άτομα του στόχου εξαιτίας ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων.

⁴Ως πρωτογενείς χαρακτηρίζονται οι μεταπτώσεις γ που αποδιεγείρουν τη στάθμη εισόδου ενώ ως δευτερογενείς αυτές που αποδιεγείρουν διακριτές στάθμες που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από πρωτογενείς μεταπτώσεις γ .

⁵Η απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα των ανιχνευτών Ge που συνήθως χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις γωνιακών κατανομών είναι πολύ μικρή ($\approx 0.05\%$ για ακτίνες γ ενέργειας 6 MeV).



Σχήμα 3.16: Η ανιχνευτική διάταξη στο IfS του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης [16].

ανιχνευτές Ge περιβάλλονταν από κρυστάλλους BGO που εξασφάλιζαν την καταστολή του υποβάθρου Compton. Κάθε ανιχνευτής Ge λειτουργούσε σε “αντισύμπτωση” με τον ανιχνευτή BGO που τον περιέβαλλε, το οποίο σημαίνει ότι αν και οι δύο ανιχνεύσουν κάποιο γεγονός, εντός ενός προκαθορισμένου “χρονικού παραθύρου”, το γεγονός αυτό θα απορριφθεί [16].

Οι ανιχνευτές ήταν τοποθετημένοι πάνω σε μία γωνιομετρική τράπεζα σε αποστάσεις από το στόχο που κυμαίνονταν μεταξύ 13 και 20 cm. Στη πρώτη σειρά πειραμάτων, μελετήθηκε η αντίδραση $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ σε ενέργειες από 1.7 έως 3.0 MeV και σε γωνίες ανίχνευσης 20° , 65° , 90° και 140° ως προς τον άξονα της δέσμης. Σε κάθε ενέργεια δέσμης, επιπλέον φάσματα λαμβάνονταν σε γωνίες 35° , 50° , 105° και 125° , με στροφή της γωνιομετρικής τράπεζας κατά 15° . Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων μετρήθηκε η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ σε ενέργειες από 1.5 έως 3.5 MeV. Οι ανιχνευτές ήταν τοποθετημένοι σε γωνίες 20° , 55° , 90° και 130° ενώ δεδομένα λαμβάνονταν και για τις γωνίες των 30° , 45° , 100° και 120° μετά από στροφή της τράπεζας κατά 10° . Το ρεύμα της δέσμης πρωτονίων στο στόχο κυμαίνονταν μεταξύ 3 και 15 μA . Για να αποφευχθεί η απώλεια υλικού λόγω της θέρμανσης του στόχου, τα υποστρώματα Ta ψύχονταν με νερό καθ’ όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

3.2.3 Προσδιορισμός της ενεργού διατομής αντίδρασης σύλληψης με τη μέθοδο των γωνιακών κατανομών ακτίνων γ

Για τον υπολογισμό της ολικής ενεργού διατομής σ_T μίας αντίδρασης μέσω της μέτρησης γωνιακών κατανομών ακτίνων γ χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\sigma_T = \frac{A}{N_A \xi} Y \quad (3.8)$$

Στην παραπάνω σχέση, A είναι το ατομικό βάρος του στόχου σε gr/mol, N_A ο αριθμός Avogadro σε πυρήνες/mol, ξ το πάχος του στόχου σε gr/cm² και Y ο αριθμός των παραγόμενων πυρήνων ανά σωματίδιο δέσμης (απόλυτη απόδοση της αντίδρασης), ο οποίος, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προσδιορίζεται από τη μέτρηση του αριθμού των ακτίνων γ που τροφοδοτούν τη βασική στάθμη. Αν υποθέσουμε ότι η βασική στάθμη τροφοδοτείται από N διαφορετικές “διαδοχές γ ” (“ γ -cascades”), τότε η απόλυτη απόδοση Y της αντίδρασης ισούται με το άθροισμα:

$$Y = \sum_{i=1}^N A_0^i \quad (3.9)$$

όπου A_0^i συντελεστής, ο οποίος αντιστοιχεί στον ανά μονάδα φορτίου της δέσμης αριθμό των ακτίνων γ που προέρχονται από την i διαδοχή και απολήγουν στη βασική στάθμη. Ο συντελεστής A_0^i λαμβάνεται από την προσαρμογή της γωνιακής κατανομής της i μετάπτωσης με τον τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια.

Για τον υπολογισμό της γωνιακής κατανομής μίας μετάπτωσης ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Για κάθε ενέργεια δέσμης E και κάθε γωνία ανίχνευσης θ , τα συλλεγόμενα από τους ανιχνευτές Ge φάσματα αναλύονται με σκοπό τον προσδιορισμό του εμβαδού I της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στην υπό εξέταση μετάπτωση.
2. Το εμβαδόν I διορθώνεται ως προς τον διορθωτικό παράγοντα του νεκρού χρόνου ω και την απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα του ανιχνευτή στη γωνία θ μέσω της σχέσης:

$$I'(E, \theta) = \frac{I(E, \theta) \cdot \omega(\theta)}{\epsilon_{abs}(\theta)} \quad (3.10)$$

3. Οι διορθωμένες εντάσεις της σχέσης (3.10) κανονικοποιούνται σε φορτίο 1 mC και στη συνέχεια, για κάθε ενέργεια δέσμης E , παριστάνονται σε γράφημα συναρτήσεως

της γωνίας ανίχνευσης θ . Ο προσδιορισμός της απόλυτης απόδοσης A_0 μίας μετάπτωσης, επιτυγχάνεται μέσω προσαρμογής των πειραματικών σημείων του παραπάνω γραφήματος με τη συνάρτηση:

$$W(\theta) = A_0 \left(1 + \sum_k \alpha_k P_k(\cos\theta) \right), \quad (k = 2, 4, \dots) \quad (3.11)$$

όπου $P_k(\cos\theta)$ πολυώνυμο Legendre k βαθμού. Οι συντελεστές A_0 και k προκύπτουν από την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων.

Υπολογισμός του νεκρού χρόνου

Με τον όρο νεκρό χρόνο αναφερόμαστε στο χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία ενός σήματος από τις ηλεκτρονικές μονάδες της διάταξης (προενισχυτή, ενισχυτή, ADC). Στις περιπτώσεις που ο ανιχνευτής καταγράφει δύο διαφορετικά γεγονότα με χρονική διαφορά μικρότερη του χρόνου αυτού το σύστημα των ηλεκτρονικών αδυνατεί να επεξεργαστεί το δεύτερο σήμα. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι οι απώλειες χρήσιμων γεγονότων, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση.

Ο υπολογισμός του νεκρού χρόνου στις μετρήσεις των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στην περίπτωση της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ έγινε χρήση μίας ραδιενεργού πηγής ^{133}Ba . Η μεταστοιχείωση του ^{133}Ba σε ^{133}Cs μέσω σύλληψης ηλεκτρονίου (EC) πραγματοποιείται με ταυτόχρονη εκπομπή ακτίνων γ , που προέρχονται από την αποδιέγερση του παραγόμενου πυρήνα ^{133}Cs . Η ισχυρότερη από αυτές (62.05%) έχει ενέργεια 356 keV.

Για τον προσδιορισμό του νεκρού χρόνου, η πηγή του ^{133}Ba τοποθετήθηκε σε σταθερή θέση στον πειραματικό χώρο και λαμβάνονταν δύο φάσματα της πηγής αυτής, χωρίς τη δέσμη πρωτονίων και στη συνέχεια κατά τη διάρκεια της αντίδρασης (με δέσμη πρωτονίων να βομβαρδίζει το στόχο). Ο λόγος των εμβαδών της κορυφής των 356 keV I_{off} και I_{on} χωρίς τη δέσμη πρωτονίων και με τη δέσμη πρωτονίων να αντιδρά με το στόχο χρησιμοποιήθηκε ως διορθωτικός παράγοντας με τον οποίο πολλαπλασιάζονταν τα εμβαδά των υπό εξέταση φωτοκορυφών. Ο διορθωτικός παράγοντας ω υπολογίστηκε για κάθε γωνία ανίχνευσης και κάθε ενέργεια δέσμης που μελετήθηκε:

$$\omega = \frac{I_{off}}{I_{in}} \quad (3.12)$$

Στην περίπτωση της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ ο νεκρός χρόνος υπολογιζόταν αντίστοιχα με τη βοήθεια μίας ραδιενεργού πηγής ^{137}Cs . Η πηγή του ^{137}Cs εκπέμπει φωτόνια

662 keV που δυστυχώς είναι δίπλα στην ισχυρή φωτοκορυφή της μετάπτωσης $2^+ \rightarrow 0^+$ της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, p'\gamma)^{80}\text{Se}$, στα 666 keV. Για αυτό το λόγο, τα αποτελέσματα της διόρθωσης του νεκρού χρόνου με τη βοήθεια της κορυφής των 662 keV συγκρίθηκαν και με το διορθωτικό παράγοντα :

$$\omega = \frac{t_R}{t_L} \quad (3.13)$$

που προέκυψε με χρήση του πραγματικού χρόνου (“*Real time*”) συλλογής φασμάτων t_R και του χρόνου t_L (“*Live time*”) που κατέγραψαν τα ηλεκτρονικά. Τελικά χρησιμοποιήθηκε ο διορθωτικός παράγοντας ω της δεύτερης μεθόδου καθώς ο πρώτος βρέθηκε να είναι ακόμα και μικρότερος της μονάδας, σε πολλές περιπτώσεις.

Διορθώσεις λόγω αθροιστικών φαινομένων

Το φαινόμενο των τυχαίων αθροίσεων παρατηρείται στις περιπτώσεις όπου δύο φωτόνια προσπίπτουν σε έναν ανιχνευτή με χρονική διαφορά μικρότερη από το χρόνο απόκρισης του εν λόγω ανιχνευτή. Ο διαχωρισμός των γεγονότων αυτών είναι αδύνατος με αποτέλεσμα την εμφάνιση εικονικών “αθροιστικών” κορυφών στο φάσμα και την απώλεια χρησιμων γεγονότων από τις υπό εξέταση φωτοκορυφές. Για τον έλεγχο της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της μελέτης των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ χρησιμοποιήθηκε μία ισχυρή πηγή ^{57}Co τοποθετημένη στην ακριβή θέση των στόχων. Παρατηρήθηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη λόγω φαινομένων τυχαίας άθροισης είναι μικρότερη του 1% [35].

Απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα

Η απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα του κάθε κρυστάλλου HPGe που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των αντιδράσεων της παρούσας εργασίας δίνεται αναλυτικά στη διατριβή [16]. Η ανιχνευτική ικανότητα που δίνεται για κάθε ανιχνευτή στη διατριβή αυτή είναι ίδια με αυτή των μετρήσεων της παρούσας εργασίας καθώς οι αντιδράσεις $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ μελετήθηκαν με ακριβώς την ίδια πειραματική διάταξη αμέσως μετά το πέρας των μετρήσεων της εν λόγω διατριβής. Σύμφωνα με τη διατριβή [16] η απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα ϵ_{abs} ενός ανιχνευτή HPGe για φωτόνιο ενέργειας E_γ περιγράφεται από τη γενική σχέση :

$$\epsilon_{abs}(E_\gamma) = p_1 \exp [-p_2 \log (E_\gamma - p_3 + p_4 \exp (-p_5 E_\gamma))] \quad (3.14)$$

με τις παραμέτρους p_1 , p_2 , p_3 , p_4 και p_5 να έχουν υπολογιστεί πειραματικά για κάθε ανιχνευτή και σε κάθε γεωμετρική διάταξη.

Ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων

Για την ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ χρησιμοποιήθηκε μία πηγή ^{226}Ra ενώ για τα φάσματα της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ μία πηγή ^{152}Eu .

Μετά την ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων έγινε έλεγχος για να εξακριβωθεί αν η ενίσχυση των σημάτων παρέμενε σταθερή. Για το λόγο αυτό, στα φάσματα της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ εξετάστηκε, για κάθε γωνία και κάθε ενέργεια δέσμης, αν το κεντροειδές της κορυφής των 356 keV του ^{133}Ba “μετακινείται” ή όχι. Στα φάσματα της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ έγινε το ίδιο για την κορυφή των 666 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, p'\gamma)^{80}\text{Se}$. Παρατηρήθηκε ότι τα κεντροειδή των παραπάνω φωτοκορυφών παρέμεναν σταθερά.

Απώλειες στόχου

Η ακτινοβολήση ενός στόχου προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του. Πολλές φορές, η αύξηση αυτή είναι αρκετή ώστε μέρος του υλικού του στόχου να εξαχνωθεί με αποτέλεσμα την μεταβολή του πάχους του κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης. Η μεταβολή αυτή επιφέρει σφάλματα στον προσδιορισμό της ενεργού διατομής καθώς το πάχος του στόχου υπεισέρχεται σε αυτήν. Ο έλεγχος του πάχους του στόχου είναι, συνεπώς, απαραίτητος, όχι μόνο πριν και μετά τις μετρήσεις αλλά και καθ' όλη τη διάρκειά τους. Για το σκοπό αυτό οι στόχοι του ^{78}Se και του ^{80}Se ακτινοβολούνταν ανά τακτά διαστήματα με δέσμη πρωτονίων ενέργειας 2.4 και 2.5 MeV, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών έδειξαν ότι οι μεταβολές στο πάχος των παραπάνω στόχων δε ξεπέρασαν το 3%.

3.2.4 Ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντού Dynamitron

Η δέσμη των πρωτονίων οδηγείται από τον επιταχυντή στο χώρο του πειράματος μέσα από ένα σύστημα ηλεκτρικών και μαγνητικών φακών. Η παραμένουσα μαγνήτιση στο μαγνήτη ανάλυσης έχει ως αποτέλεσμα μία πιθανή απόκλιση της τάξης των μερικών keV στην ενέργεια της δέσμης, σε σχέση με την ονομαστική ενέργεια που προκαθορίζει ο πειραματιστής με τη βοήθεια του πεδίου B του μαγνήτη ανάλυσης. Για τον ακριβή υπολογισμό της απόκλισης αυτής έγινε βαθμονόμηση του επιταχυντού Dynamitron. Έτσι, στα πλαίσια

των μετρήσεων της παρούσας εργασίας, έλαβαν χώρα τρεις βαθμονομήσεις του επιταχυντή. Από μία πριν τη μελέτη των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ με το στόχο των 106 $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$ και μία μετά τις μετρήσεις της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ με το στόχο των 132 $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$ (§3.1.1).

Η μέθοδος που ακολουθείται για την ενεργειακή βαθμονόμηση ενός επιταχυντή περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία [16], σύμφωνα με την οποία, η ενέργεια της δέσμης στο σύστημα του εργαστηρίου E_{lab} συνδέεται με το πεδίο B του μαγνήτη ανάλυσης μέσω της σχέσης:

$$E_{lab} = mc^2 \left[\left(1 + \frac{q^2 B^2}{k^2 m^2 c^4} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3.15)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός, m και q η μάζα και το φορτίου του ιόντος που “επιλέγει” ο μαγνήτης ανάλυσης και k σταθερά η οποία προσδιορίζεται πειραματικά.

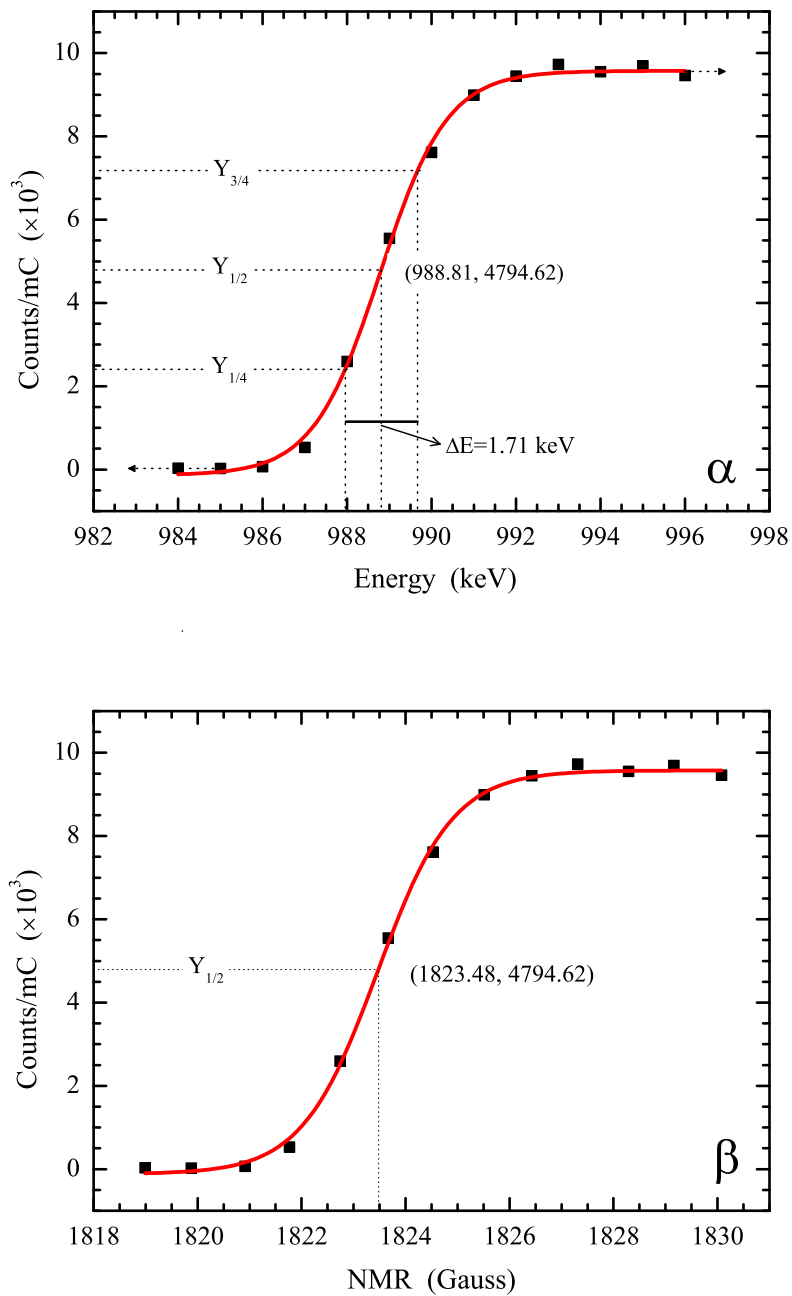
Στις παρούσες μετρήσεις, ο προσδιορισμός της σταθεράς k έγινε μέσω της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ με βάση τον λεπτό συντονισμό που παρουσιάζει για ενέργεια πρωτονίων ίση με $E_R = 991.9 \pm 0.1$ keV. Για το σκοπό αυτό, στόχος ^{27}Al βομβαρδίστηκε με δέσμη πρωτονίων ενέργειας $E_p = 980-996$ keV με βήμα 2 ή 3 keV στα άκρα του παραπάνω ενεργειακού φάσματος, 1 keV καθώς η ενέργεια της δέσμης πλησίαζε σε αυτή του συντονισμού και 0.5 ή 1 keV όταν διαπιστώθηκε αισθητή αύξηση στη ένταση της ακτινοβολίας, γεγονός που υποδηλώνει την έναρξη του συντονισμού. Η φωτοκορυφή που αναλύθηκε για τις ανάγκες της βαθμονόμησης έχει ενέργεια 1779 keV και προέρχεται από τη μετάπτωση $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ του πυρήνα ^{28}Si .

Στα σχήματα 3.17α και 3.17β παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες, στη μονάδα του φορτίου, εντάσεις της φωτοκορυφής των 1779 keV συναρτήσει της ενέργειας E_p της δέσμης πρωτονίων και του πεδίου B_{NMR} του μαγνήτη ανάλυσης, αντίστοιχα.

Μετά από προσαρμογή των πειραματικών σημείων του γραφήματος 3.17β με σιγμοειδή Boltzmann συνάρτηση (συνεχής γραμμή) προέκυψε η τιμή του πεδίου B_R στο μέσο της καμπύλης ανόδου. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ενέργεια E_R του συντονισμού. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η σταθερά k από τη σχέση:

$$k = \frac{qB_R}{(E_R^2 + 2m_0c^2E_R)^{1/2}} \quad (3.16)$$

Οι διορθωμένες ενέργειες δέσμης υπολογίστηκαν από τη σχέση (3.15). Η απόκλιση στη ενέργεια της δέσμης κυμάνθηκε μεταξύ 6 και 19 keV. Για τον υπολογισμό του ενεργειακού εύρους ΔE της δέσμης έγινε προσαρμογή των πειραματικών σημείων του γραφήματος



Σχήμα 3.17: Ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή Dynamitron του IfS στη Στουτγκάρδη.

3.17α (συνεχής γραμμή). Η διαφορά των ενεργειών της δέσμης που αντιστοιχούν στο 25% και 75% της μέγιστης απόδοσης της κορυφής των 1779 keV είναι ίση με το ενεργειακό εύρος ΔE [18]. Στις παρούσες μετρήσεις, το εύρος ΔE υπολογίστηκε ίσο με 1.7 keV και 1.2 keV για τις μετρήσεις των στόχων του ^{78}Se και των δύο στόχων του ^{80}Se , αντίστοιχα.

3.3 Μετρήσεις ενεργών διατομών στο Bochum (Μετρήσεις γωνιακά ολοκληρωμένων μεταπτώσεων γ)

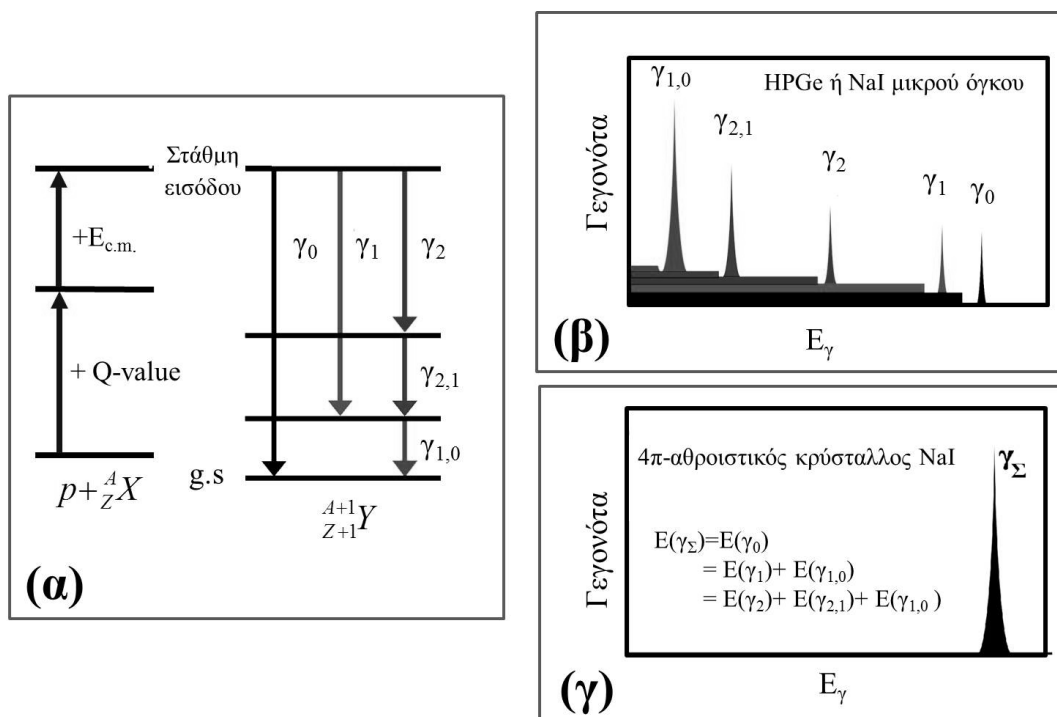
3.3.1 Μέθοδος και βασικές εξισώσεις

Όπως προαναφέρθηκε, η ενεργός διατομή μίας αντίδρασης σύλληψης προσδιορίζεται από τις απόλυτες εντάσεις των μεταπτώσεων γ που “τροφοδοτούν” τη βασική στάθμη ή εναλλακτικά εκείνων που αποδιεγείρουν τη στάθμη εισόδου. Κάνοντας χρήση ενός ανιχνευτή NaI, μεγάλου όγκου, σαν αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στο Bochum, το πρόβλημα απλοποιείται σημαντικά, καθώς, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής [19].

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, που ονομάστηκε τεχνική των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων μεταπτώσεων γ ή απλά αθροιστική μέθοδος, η σχετικά αργή χρονική απόκριση (>250 ns) ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών NaI έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός των μεταπτώσεων γ που λαμβάνουν χώρα διαδοχικά σχηματίζοντας μία “διαδοχή γ ” (γ -cascade). Έτσι οι διαδοχικές ακτίνες γ αθροίζονται σε μία κορυφή, τη λεγόμενη αθροιστική κορυφή. Η ενέργεια της αθροιστικής κορυφής είναι ίση με την ενέργεια της στάθμης εισόδου $E^* = E_{c.m.} + Q_{(p,\gamma)}$, όπου $E_{c.m.}$ η ενέργεια της δέσμης στο σύστημα του κέντρου μάζας και $Q_{(p,\gamma)}$, η Q -value της αντίδρασης.

Στο σχήμα 3.18 φαίνεται η βασική αρχή λειτουργίας ενός αθροιστικού κρυστάλλου για την περιγραφή της οποίας θεωρούμε το απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα του σχήματος 3.18(α). Αν κάποιος χρησιμοποιήσει ένα συνήθη ανιχνευτή Ge ή έναν ανιχνευτή NaI μικρών διαστάσεων ($3'' \times 3''$) θα συλλέξει ένα φάσμα όμοιο με αυτό που φαίνεται στο σχήμα 3.18(β), οπότε, θα πρέπει να αναλύσει και τις τρεις κορυφές (γ_0 , $\gamma_{1,0}$ και $\gamma_{2,0}$) που μας ενδιαφέρουν. Σε αντίθεση, αν χρησιμοποιήσει έναν αθροιστικό κρύσταλλο το προς ανάλυση φάσμα θα έχει τη μορφή του σχήματος 3.18(γ). Σε αυτήν την περίπτωση η προς ανάλυση κορυφή είναι μία. Το δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα ενός αθροιστικού κρυστάλλου είναι πως εξαιτίας του μεγάλου του όγκου η αθροιστική κορυφή, ιδανικά, είναι απαλλαγμένη από το

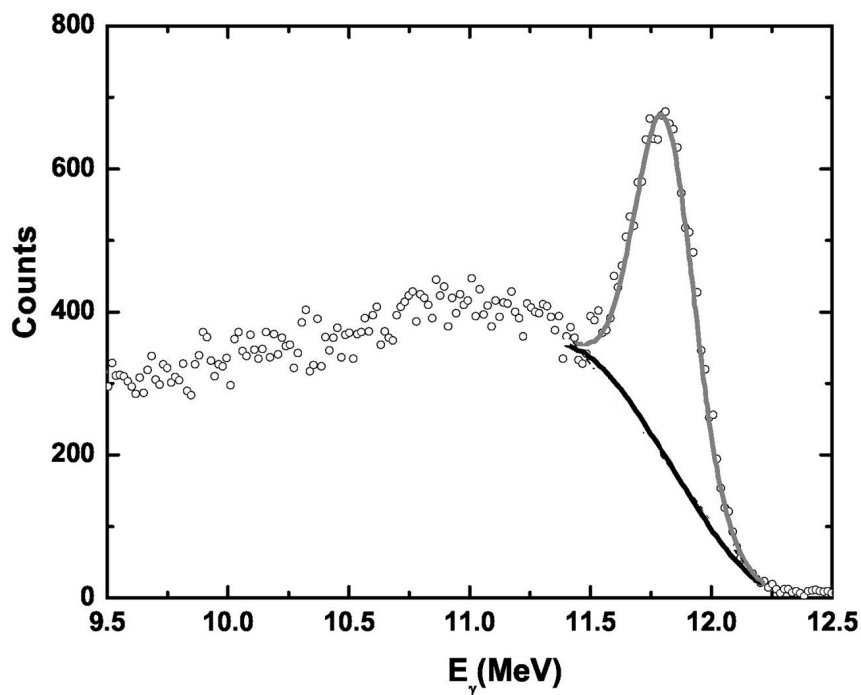
υπόβαθρο που οφείλεται στο φαινόμενο Compton. Επιπλέον, εξαιτίας των υψηλών τιμών Q , που συνήθως παρουσιάζουν οι αντιδράσεις σύλληψης, η αθροιστική κορυφή συχνά εμφανίζεται απομονωμένη στο υψηλοενεργειακό κομμάτι του φάσματος.



Σχήμα 3.18: (α): Απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα ενός σύνθετου πυρήνα, παραγόμενου σε μία αντίδραση σύλληψης. (β): Πρότυπο φάσμα ακτίνων γ από έναν ανιχνευτή HPGe ή έναν ανιχνευτή NaI μικρών διαστάσεων. (γ): Πρότυπο φάσμα ακτίνων γ από έναν ανιχνευτή NaI μεγάλου όγκου [13].

Η ιδανική, όμως, εικόνα του σχήματος 3.18(γ) δεν είναι αυτή που θα συναντήσει κανείς σε ένα πραγματικό πείραμα. Τα φάσματα δεν περιέχουν μία μόνο κορυφή καθώς αρκετές ακτίνες γ υψηλής ενέργειας δεν απορροφούνται πλήρως, παρά τον μεγάλο όγκο του κρυστάλλου, με αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιου υποβάθρου Compton και άλλων διακριτών κορυφών. Επιπλέον, στις περιπτώσεις που ο σύνθετος πυρήνας εμφανίζει στάθμες οι οποίες αποδιεγείρονται με σωματιδιακή εκπομπή ή στάθμες των οποίων οι χρόνοι ημιζωής υπερβαίνουν το χρόνο απόκρισης του κρυστάλλου, υπάρχει σημαντική πιθανότητα να εμφανιστούν περισσότερες από μία αθροιστικές κορυφές στο φάσμα. Χαρακτηριστική περίπτωση των παραπάνω είναι αυτή της αντίδρασης ${}^{92}\text{Mo}(p, \gamma){}^{93}\text{Tc}$ (§4.3). Η ολική ενεργός διατομή στις αντιδράσεις αυτές θεωρείται ίση με το άθροισμα των επιμέρους ενεργών δια-

τομών. Ένα τυπικό φάσμα από τον αθροιστικό κρύσταλλο του πανεπιστημίου του Bochum φαίνεται στο σχήμα 3.19.

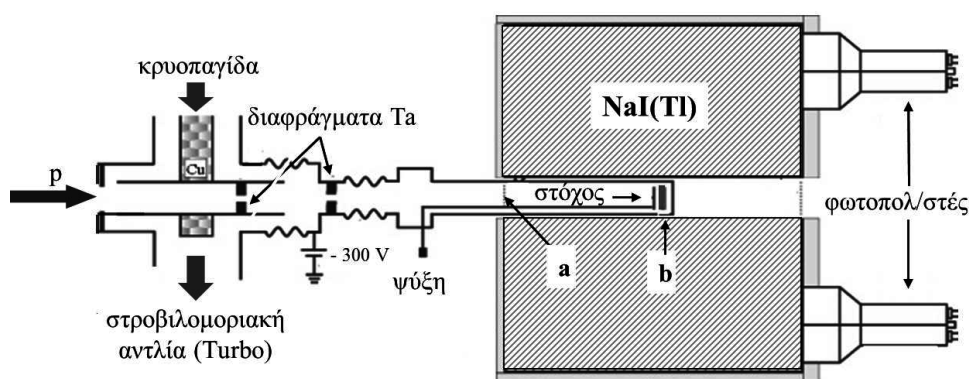


Σχήμα 3.19: Τυπικό φάσμα αθροιστικής κορυφής που έχει ληφθεί με τον ανιχνευτή NaI του πανεπιστημίου του Bochum. Η γκρι συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή της αθροιστικής κορυφής με κανονική κατανομή. Η μορφή του υποβάθρου κάτω από την κορυφή έγινε με προσαρμογή αυτού με πολυωνυμική συνάρτηση 3^{ου} βαθμού (μαύρη συνεχής γραμμή).

Η αφαίρεση του υποβάθρου στα φάσματα των περισσότερων από τις αντιδράσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία έγινε θεωρώντας καμπύλη η οποία περιγράφεται από μια πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού, όπως φαίνεται στο πρότυπο φάσμα 3.19. Μοναδικές εξαιρέσεις ήταν τα φάσματα της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$ τα οποία αναλύθηκαν όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.3 καθώς και τα φάσματα της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$ όπου χρησιμοποιήθηκαν πολυωνυμικές συναρτήσεις 2^{ου} βαθμού. Η επιλογή των συγκεκριμένων συναρτήσεων έγινε μετά από πλήθος δοκιμών στις οποίες θεωρήθηκαν πολυώνυμα 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού. Στην κάθε περίπτωση οι εντάσεις των κορυφών δε διέφεραν περισσότερο από τα αντίστοιχα σφάλματα.

3.3.2 Η ανιχνευτική διάταξη στο Bochum

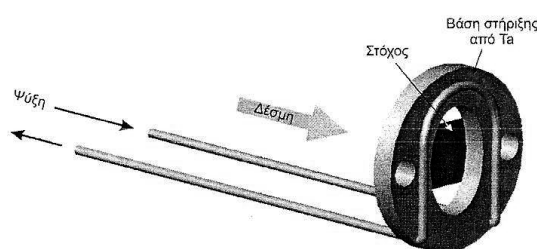
Η ανιχνευτική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Bochum παρουσιάζεται στο σχήμα 3.20. Η διάταξη αποτελείται από έναν ανιχνευτή NaI(Tl), διαστάσεων $12'' \times 12''$ [12]. Στο κέντρο του ανιχνευτή και κατά μήκος του άξονά του υπάρχει μία οπή διαμέτρου 35 mm. Η στερεά γωνία που καλύπτεται για φωτόνια που εκπέμπονται στο κέντρο του είναι σχεδόν 4π (98%). Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή είναι περίπου 2% στην ενέργεια των 10 MeV [36].



Σχήμα 3.20: Η πειραματική διάταξη του αθροιστικού κρυστάλλου στο DTL του Πανεπιστημίου του Bochum [37].

Η εστίαση της δέσμης εξασφαλίζεται από δύο ηλεκτρικά μονωμένα διαφράγματα τανταλίου τα οποία είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις 1.85 και 0.65 m από τον στόχο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20. Το πρώτο διάφραγμα, διαμέτρου 2 mm, αποσκοπεί στην εστίαση της δέσμης (“collimator”), ενώ το δεύτερο, διαμέτρου 3 mm, εμποδίζει τη διέλευση των ιόντων της δέσμης που σκεδάστηκαν από το πρώτο (“antiscatterer”). Η διάμετρος της δέσμης πάνω στο στόχο δεν ξεπερνάει τελικά τα 3 mm.

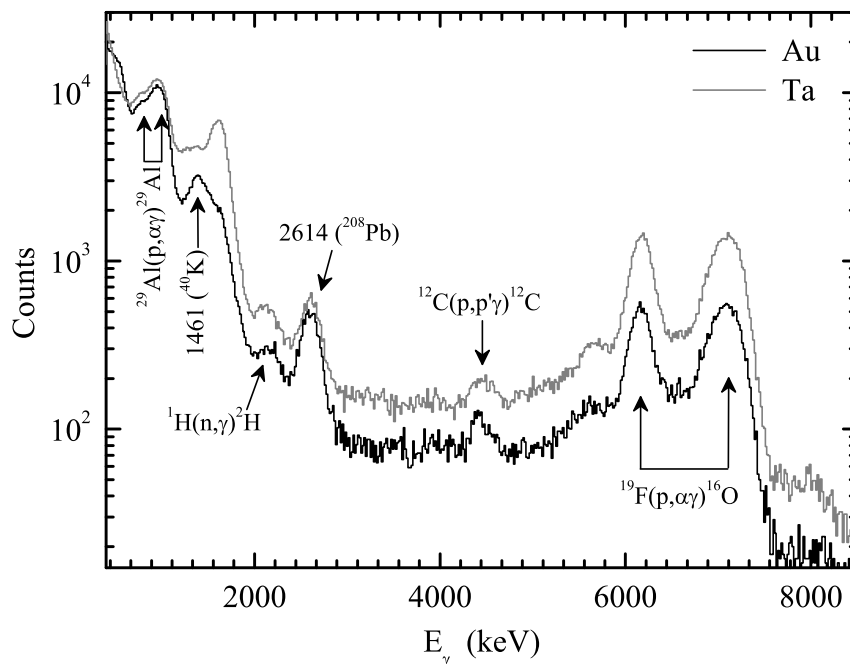
Κατά τις μετρήσεις, ο στόχος ήταν τοποθετημένος στο τέλος της γραμμής σε μία ειδική βάση στήριξης (σχήμα 3.21). Η βάση αποτελείται από έναν κυκλικό δίσκο ($\varnothing 3$ cm), κατασκευασμένο από Ta. Στο κέντρο του δίσκου υπάρχει μία οπή διαμέτρου 1 cm από όπου τα ιόντα της δέσμης διέρχονται χωρίς να αλληλεπιδράσουν με τα υλικά της βάσης. Ο δίσκος τανταλίου είναι στερεωμένος σε έναν σωλήνα ($\varnothing 3$ mm) από ανοξείδωτο ατσάλι που ταυτόχρονα λειτουργούσε ως ψυκτικό σύστημα του στόχου καθώς τον διέρρεε αέρας



Σχήμα 3.21: Βάση στήριξης στόχων μαζί με το σύστημα ψύξης στο DTL του Πανεπιστημίου του Bochum [19].

καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο, όλοι οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αρκετά λεπτοί με αποτέλεσμα να τους διαπερνάει η δέσμη. Για το λόγο αυτό, το πίσω μέρος του δίσκου είχε καλυφθεί με δύο φύλλα χρυσού πάχους $\sim 97 \text{ mgr/cm}^2$ το καθένα. Η επιλογή του χρυσού ως υπόστρωμα έγινε μετά από τον βομβαρδισμό των φύλλων Au και ενός φύλλου Ta, το οποίο είχε τοποθετηθεί στο τέρμα της γραμμής μεταφοράς, με δέσμη πρωτονίων ενέργειας 2.8 MeV. Από τη σύγκριση των δύο φασμάτων που φαίνονται στο σχήμα 3.22 συμπεράναμε πως το φύλλο Ta συνεισφέρει περισσότερο στη δημιουργία του ανεπιθύμητου υποβάθρου, πιθανόν λόγω προσμιξεων (F και C).

Ο ανιχνευτής διαθέτει έξι φωτοπολλαπλασιαστές, τα σήματα των οποίων λαμβάνονται με κατάλληλη υψηλή τάση (500 V) και στη συνέχεια αθροίζονται σε ένα σήμα. Το αθροιστικό σήμα, αφού ενισχυθεί κατάλληλα από ένα φασματικό ενισχυτή οδηγείται σε έναν πολυκαναλικό αναλυτή (ADC) με τη βοήθεια του οποίου λαμβάνεται το αντίστοιχο φάσμα. Το ρεύμα της δέσμης πρωτονίων στο στόχο κυμάνθηκε από 0.7 nA έως 0.2 μA . Για τη μέτρησή του χρησιμοποιήθηκε ένας βαθμονομημένος ολοκληρωτής φορτίου οι ενδείξεις του οποίου συνοδεύονται με σχετικό σφάλμα που δεν υπερβαίνει το 3%. Μεταξύ του δευτέρου διαφράγματος και του στόχου εφαρμόστηκε τάση $V = -300 \text{ V}$ με σκοπό τον περιορισμό των δευτερογενών ηλεκτρονίων στο χώρο παραγωγής τους. Για τον ίδιο σκοπό ο στόχος ήταν βραχυκυκλωμένος με τον θάλαμό του, ο οποίος λειτουργούσε ως Faraday cup. Ένα σύστημα αντλιών κενού διατηρούσε συνθήκες υψηλού κενού, της τάξης των 10^{-7} mbar , σε όλο το μήκος της γραμμής. Παράλληλα, κοντά στα διαφράγματα είχε τοποθετηθεί μία κρουπαγίδα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της εναπόθεσης υδρογονανθράκων στο στόχο.



Σχήμα 3.22: Φάσματα ακτίνων γ από την αντίδραση δέσμης πρωτονίων 2.8 MeV με α) φύλλο Au τοποθετημένο στο πίσω μέρος της βάσης στήριξης του στόχου και β) φύλλο Ta, τοποθετημένο στο τέρμα της γραμμής μεταφοράς.

3.3.3 Προσδιορισμός της ενεργού διατομής με την αθροιστική μέθοδο

Η ολική ενεργός διατομή σ_T μίας αντίδρασης σύλληψης υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma_T = \frac{AY_\Sigma}{N_A \xi \varepsilon_\Sigma} \quad (3.17)$$

όπου:

- A το ατομικό βάρος του στόχου σε g/mol,
- N_A ο αριθμός Avogadro σε άτομα/mol,
- ξ το πάχος του στόχου σε g/cm²,
- ε_Σ η ανιχνευτική ικανότητα του κρυστάλλου στην εκάστοτε αθροιστική κορυφή και
- Y_Σ η διορθωμένη στο νεκρό χρόνο και κανονικοποιημένη στο συλλεγόμενο φορτίο ένταση της αθροιστικής κορυφής.

Σε όλες τις μετρήσεις των ισοτόπων του Mo που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της διατριβής αυτής οι εντάσεις Y_{Σ} υπολογίστηκαν με προσαρμογή μίας κατανομής Gauss στις εκάστοτε αθροιστικές κορυφές, έπειτα από αφαίρεση κατάλληλου υποβάθρου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανάλυσης φασμάτων TV [38]. Τα πάχη ξ των στόχων προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο RBS, όπως περιγράφηκε στην §3.1.2. Για τον υπολογισμό της απόδοσης ε_{Σ} του κρυστάλλου ακολουθήθηκε η μέθοδος που αναπτύχθηκε στη διατριβή [19] και δημοσιεύτηκε στην εργασία [37]. Επειδή η απόδοση ε_{Σ} εξαρτάται από την συγκεκριμένη αντίδραση που μελετάται, η μέθοδος προσδιορισμού της απόδοσης παρουσιάζεται αναλυτικά και στην παρούσα διατριβή.

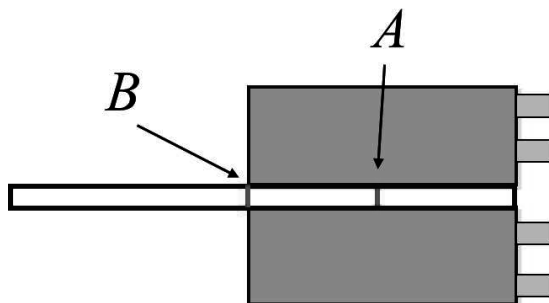
3.3.4 Απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή NaI

Ο υπολογισμός της ανιχνευτικής ικανότητας του κρυστάλλου NaI είναι ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία της ανάλυσης καθώς εξαρτάται από τις άγνωστες πολλαπλότητες (multiplicities) των γ -cascades που συνεισφέρουν στην αθροιστική κορυφή. Ως πολλαπλότητα μίας διαδοχής ακτίνων γ ορίζουμε τον αριθμό των φωτονίων που παίρνουν μέρος σε αυτή. Η μετάπτωση στην οποία παίρνει μέρος μία μόνο ακτίνα γ μεταβαίνοντας από τη στάθμη εισόδου στη βασική έχει πολλαπλότητα $M=1$, αν πάρουν μέρος δύο ακτίνες γ όπως οι γ_1 και $\gamma_{1,0}$ του σχήματος 3.18(a) θα ισχύει $M=2$. Στο ίδιο σχήμα, η αποδιέγερση μπορεί να συμβεί και μέσω της αλληλουχίας γ_2 , $\gamma_{2,1}$ και $\gamma_{1,0}$, στην περίπτωση αυτή η πολλαπλότητα θα είναι ίση με $M=3$. Η αύξηση της πολλαπλότητας μίας διαδοχής γ οδηγεί στη μείωση της ανιχνευτικής ικανότητας άθροισης του συστήματος, όπως σχολιάζεται παρακάτω.

Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της απόλυτης απόδοσης ενός ανιχνευτή NaI πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί η πολλαπλότητα της διαδοχής γ που αποδιηγεί τη στάθμη εισόδου. Για την ακρίβεια, καθώς η στάθμη εισόδου του σύνθετου πυρήνα αποδιηγείται μέσω περισσοτέρων της μίας γ -διαδοχής, το μέγεθος το οποίο χρειάζεται να προσδιοριστεί είναι η μέση πολλαπλότητα $\langle M \rangle$, η οποία, ορίζεται ως το άθροισμα:

$$\langle M \rangle = \sum_i B_i M_i \quad (3.18)$$

με M_i την πολλαπλότητα της i διαδοχής γ που παίρνει μέρος στην αποδιέγερση της στάθμης εισόδου και B_i την αντίστοιχη πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η εκάστοτε διαδοχή (συντελεστής διακλάδωσης). Ωστόσο, στην πλειοψηφία των αντιδράσεων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην πυρηνική αστροφυσική παρουσιάζεται έλλειψη δεδομένων για τις τιμές



Σχήμα 3.23: Οι θέσεις A στο κέντρο και B στην είσοδο του κρυστάλλου.

των συντελεστών B_i . Η έλλειψη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη μίας νέας μεθόδου για τον υπολογισμό των μέσων πολλαπλοτήτων, ανεξάρτητης των συντελεστών διακλάδωσης, της λεγόμενης μεθόδου “In/Out”.

Η μέθοδος In/Out

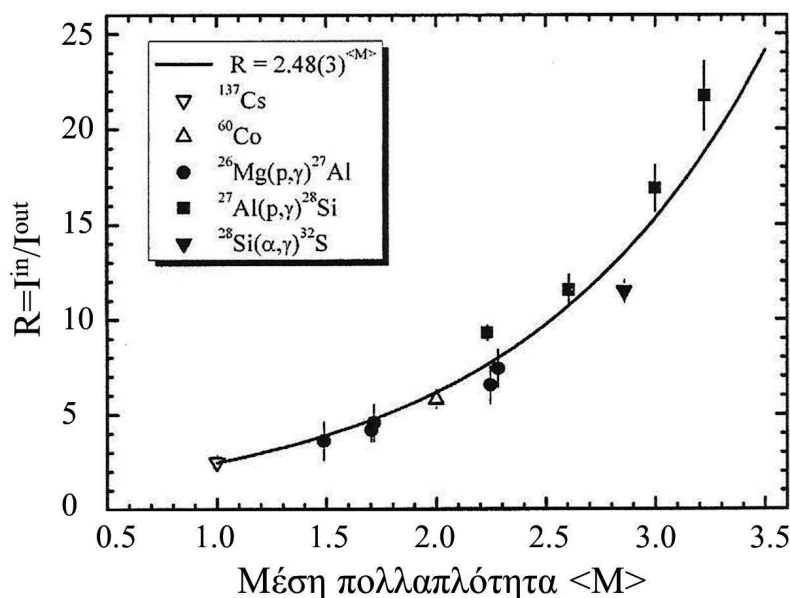
Η μέθοδος “In/Out” βασίζεται στο γεγονός ότι η αθροιστική ικανότητα του κρυστάλλου εξαρτάται από τη θέση του στόχου σε σχέση με το ανιχνευτή. Αν ο στόχος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του ανιχνευτή (θέση A του σχήματος 3.23) η ένταση I_{Σ}^{in} της αθροιστικής κορυφής μεγιστοποιείται καθώς η στερεά γωνία που καλύπτει ο ανιχνευτής είναι η μέγιστη δυνατή. Αν ο στόχος τοποθετηθεί στην είσοδο του κρυστάλλου (θέση B του σχήματος 3.23), η στερεά γωνία υποδιπλασιάζεται. Ο λόγος R των εντάσεων της αθροιστικής κορυφής I_{Σ}^{in} και I_{Σ}^{out} στο κέντρο και στην είσοδο του κρυστάλλου, αντίστοιχα, εξαρτάται από τη μέση πολλαπλότητα $\langle M \rangle$ της αποδιέγερσης καθώς:

- Αν $M=1$, η ένταση I_{Σ}^{out} της μοναδικής ακτίνας γ που ανιχνεύεται θα ισούται με το μισό της έντασης I_{Σ}^{in} , ως συνέπεια του υποδιπλασιασμού της στερεάς γωνίας.
- Αν $M=2$, ο λόγος R των δύο εντάσεων θα είναι ίσος με τέσσερα.
- Αν $M=3$, η ένταση I_{Σ}^{out} στην είσοδο του κρυστάλλου θα φτάσει στο ένα όγδοο της έντασης I_{Σ}^{in} .

Η μέτρηση, συνεπώς, του λόγου $R = I_{\Sigma}^{in} / I_{\Sigma}^{out}$ θα οδηγήσει στον υπολογισμό της μέσης πολλαπλότητας $\langle M \rangle$ και ακολούθως της ανιχνευτικής ικανότητας άθροισης του κρυστάλλου.

Ο έλεγχος της βασικής αρχής της μεθόδου έγινε μέσω βαθμονομημένων ραδιενεργών πηγών, ενώ η συσχέτιση του λόγου R με τη μέση πολλαπλότητα $\langle M \rangle$ και την απόλυτη απόδοση του κρυστάλλου μέσω συστηματικής μελέτης συντονιστικών αντιδράσεων αλλά και προσομοιώσεων Monte Carlo που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος *GEANT4* [39]. Αναλυτικά:

1. Η πρώτη δοκιμή της μεθόδου *In/Out* πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση δύο βαθμονομημένων ραδιενεργών πηγών ακτίνων γ , μίας πηγής ^{137}Cs , πολλαπλότητας $M=1$, και μίας πηγής ^{60}Co , πολλαπλότητας $M=2$. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στη διδακτορική διατριβή [19], επιβεβαίωσαν τις αρχικές υποθέσεις.
2. Το επόμενο βήμα ήταν η δοκιμή της μεθόδου για πολλαπλότητες $M > 2$. Η δοκιμή αυτή επιτεύχθηκε μέσω αντιδράσεων συντονισμού με γνωστούς συντελεστές διακλάδωσης. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η οποία ήρθε σε πλήρη συμφωνία με την πρώτη, φαίνονται στο σχήμα 3.24. Επιπλέον, κατέστη δυνατή η προσαρμογή



Σχήμα 3.24: Λόγοι $R = I^{in}/I^{out}$ όπως υπολογίστηκαν για τρεις αντιδράσεις συντονισμού και για δύο βαθμονομημένες ραδιενεργές πηγές γνωστών πολλαπλοτήτων. Η συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει την προσαρμογή των σημείων με τη συνάρτηση $R = 2.48(3)^{\langle M \rangle}$ [37].

των πειραματικών δεδομένων με τη συνάρτηση :

$$R = 2.48(3)^{\langle M \rangle} \quad (3.19)$$

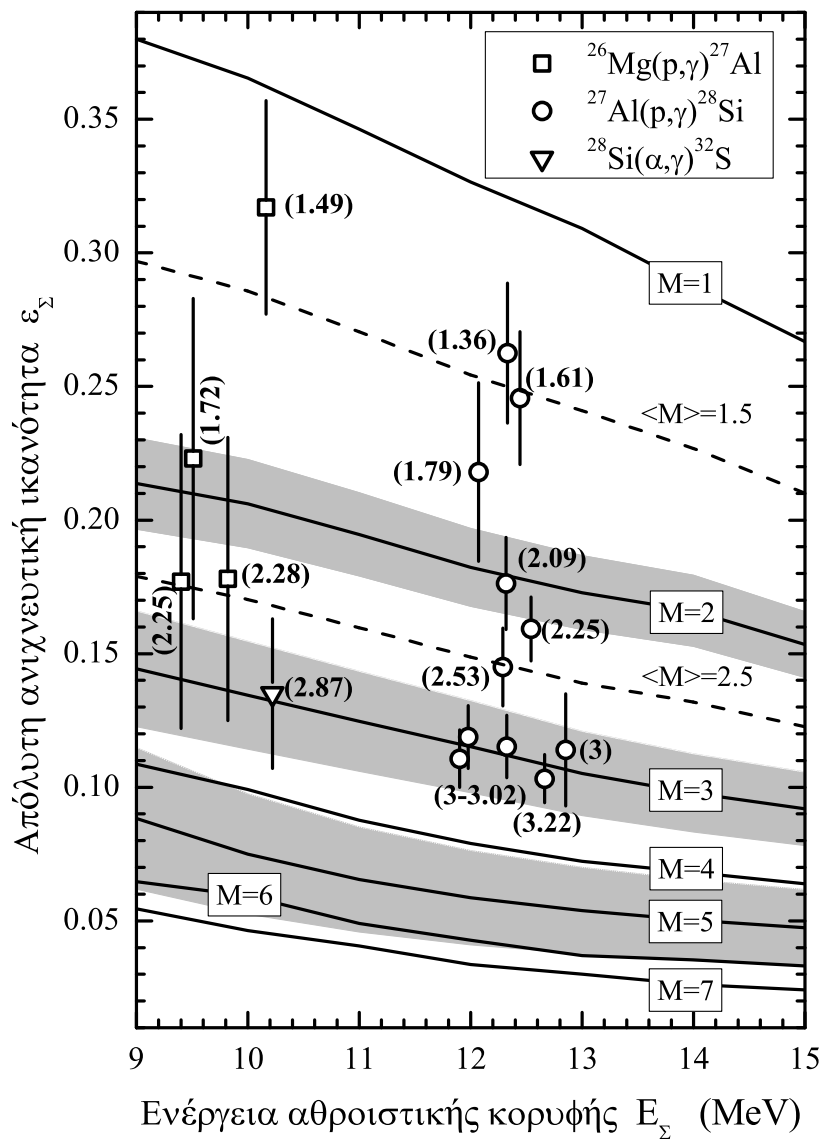
Σε όλες τις παραπάνω δοκιμές καθώς και σε οποιαδήποτε μέτρηση ακολούθησε η θέση B θεωρήθηκε σε απόσταση $d=16.8$ cm από το κέντρο του ανιχνευτή.

3. Στη συνέχεια έπρεπε να συσχετιστεί η μέση πολλαπλότητα $\langle M \rangle$ με την ανιχνευτική ικανότητα άθροισης του κρυστάλλου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων σε συντονισμούς των οποίων τα “πλάτη” (strengths) ω_γ και οι συντελεστές διακλάδωσης B_i ήταν γνωστά από τη βιβλιογραφία [37]. Η απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα ε_Σ υπολογιζόταν σε κάθε περίπτωση από τη σχέση :

$$\omega_\gamma = \frac{1}{\varepsilon_\Sigma} \frac{I_\Sigma}{N_B} \frac{2}{\lambda^2} \frac{A}{N_A} \frac{M}{M+m} T(E) \quad (3.20)$$

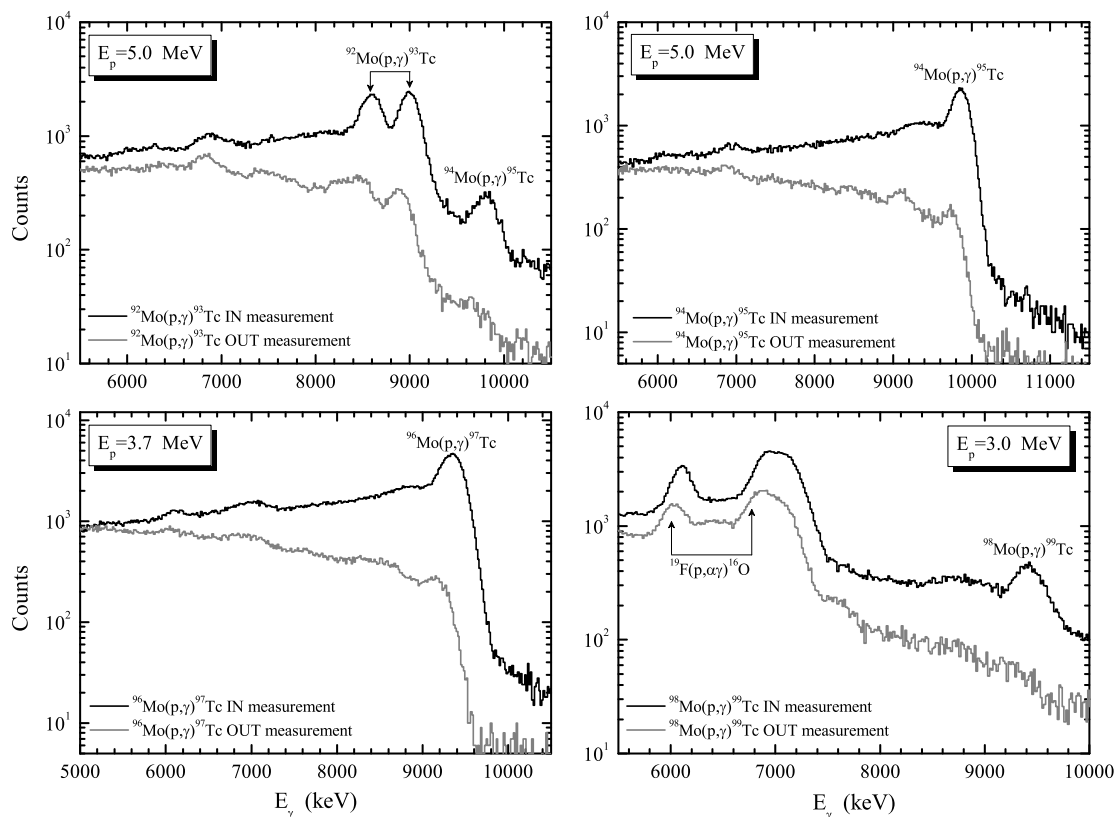
όπου I_Σ η ένταση της αθροιστικής κορυφής, N_B ο αριθμός των σωματιδίων της δέσμης που προσπίπτουν στο στόχο, A το ατομικό βάρος του στόχου, N_A ο αριθμός Avogadro, m και M οι μάζες της δέσμης και του στόχου, αντίστοιχα, λ το μήκος κύματος της δέσμης και $T(E)$ η ισχύς ανάσχεσης της δέσμης στο στόχο. Σε συνδυασμό με τις παραπάνω μετρήσεις, η εξάρτηση της ανιχνευτικής ικανότητας του κρυστάλλου από τη μέση πολλαπλότητα και την ενέργεια της αθροιστικής κορυφής, μελετήθηκε με τη βοήθεια προσομοιώσεων Monte Carlo με χρήση του προγράμματος *GEANT4*. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών παρουσιάζονται στο σχήμα 3.25 μαζί με τα πειραματικά δεδομένα των παραπάνω μετρήσεων.

Οι σκιασμένες περιοχές του σχήματος 3.25 αντιπροσωπεύουν αβεβαιότητες στις προσομοιώσεις εξαιτίας των διάφορων συνδυασμών ακτίνων γ που μπορούν να λάβουν μέρος στην αποδιέγερση μίας στάθμης δεδομένης ενέργειας και πολλαπλότητας. Οι αβεβαιότητες αυτές υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος *GEANT4* και αντιστοιχούν σε σχετικό σφάλμα ίσο με 8, 15, 21 και 30% για $\langle M \rangle=2, 3, 4$ και 5. Για πολλαπλότητες μεγαλύτερες του 5 το σφάλμα ξεπερνάει το 40% ενώ για $\langle M \rangle=1$ είναι μηδενικό αφού η μετάπτωση λαμβάνει χώρα μέσω μοναδικής ακτίνης γ . Γίνεται λοιπόν προφανές πως αν είναι δυνατή η μέτρηση του λόγου $R = I^{in}/I^{out}$, η μέση πολλαπλότητα $\langle M \rangle$ υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.19) και στη συνέχεια υπεισέρχεται στη μήτρα του γραφήματος 3.25 από όπου εξάγουμε την απόλυτη ανιχνευτική ικανότητα άθροισης του συστήματος.



Σχήμα 3.25: Ανιχνευτική ικανότητα του αθροιστικού κρυστάλλου του Πανεπιστημίου του Bochum ως συνάρτηση της μέσης πολλαπλότητας $\langle M \rangle$ και της ενέργειας ϵ_{Σ} της αθροιστικής κορυφής [37]. Οι συνεχείς γραμμές αντιπροσωπεύουν προσομοιώσεις με χρήση του προγράμματος *GEANT4* ενώ τα σημεία πειραματικές μετρήσεις. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν σε αβεβαιότητες σύμφωνα με το πρόγραμμα *GEANT4*.

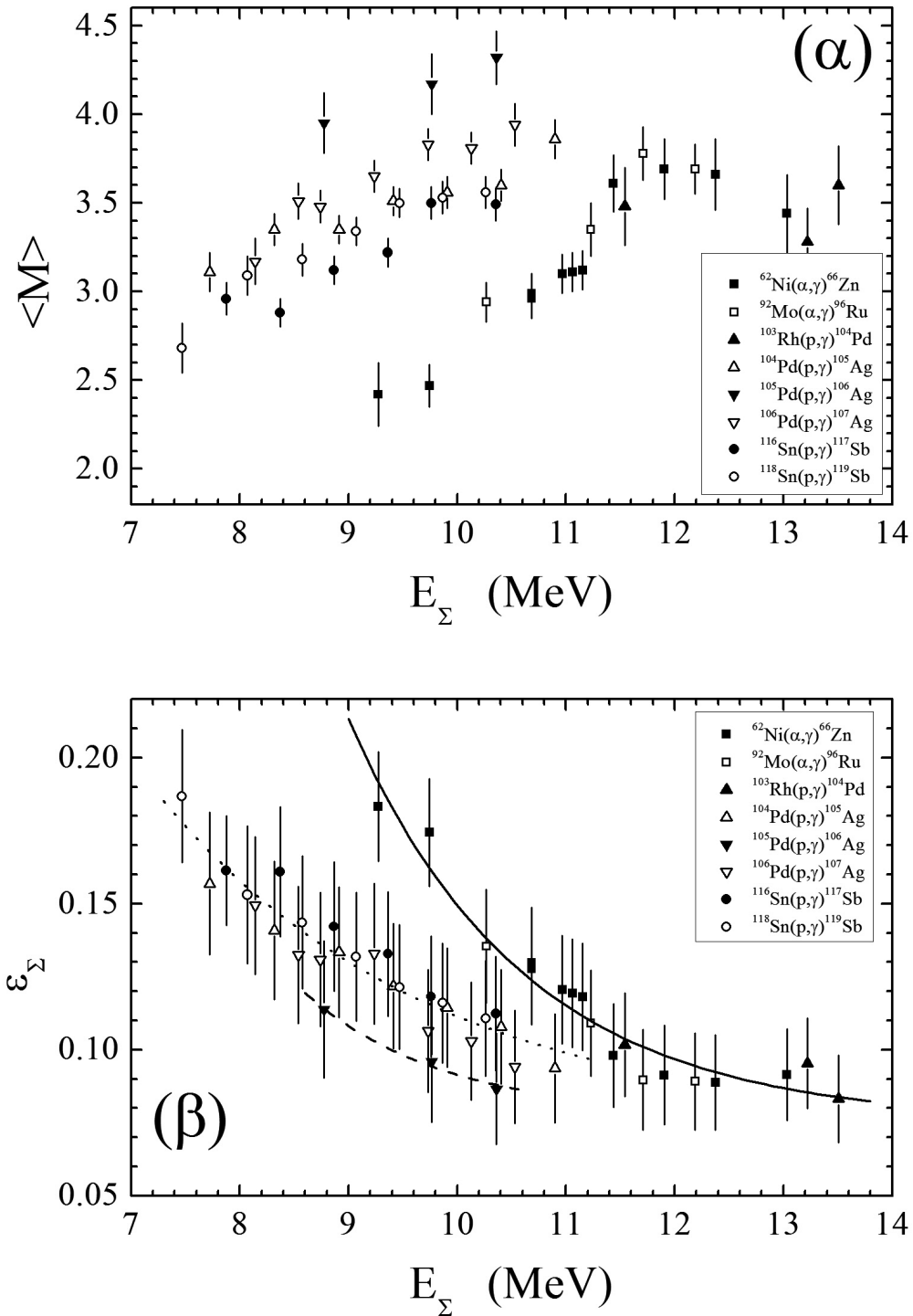
Στο σχήμα 3.26 φαίνονται τυπικά φάσματα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας στις θέσεις *A* και *B*.



Σχήμα 3.26: Φάσματα ακτίνων γ των αντιδράσεων $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$, $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$, $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$. Οι μαύρες συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τα φάσματα που συλλέχθηκαν με το στόχο τοποθετημένο στο κέντρο του ανιχνευτή NaI (θέση A) ενώ οι γκρι με το στόχο σε απόσταση $d=16.8$ cm από το κέντρο (θέση B).

Μετά από μεγάλο αριθμό μετρήσεων με τη μέθοδο *In/Out* [19] σε αυτόν τον κρύσταλλο παρατηρήθηκε ότι η μέση πολλαπλότητα εξαρτάται από το είδος του παραγόμενου πυρήνα και πιο συγκεκριμένα η μέση πολλαπλότητα που αντιστοιχεί σε περιττούς-περιττούς πυρήνες είναι μεγαλύτερη από αυτή ενός άρτιου-περιττού πυρήνα και ακόμα μεγαλύτερη από τη μέση πολλαπλότητα ενός άρτιου-άρτιου πυρήνα.

Στο σχήμα 3.27 φαίνεται η ομαδοποίηση των αντιδράσεων ανάλογα με το είδος του παραγόμενου πυρήνα η οποία απεικονίζεται στις τιμές της μέσης πολλαπλότητας $\langle M \rangle$ και συνεπώς στις αντίστοιχες τιμές της ανιχνευτικής ικανότητας άθροισης.



Σχήμα 3.27: (α): Μέση πολλαπλότητα $\langle M \rangle$ των διαδοχών γ που μετρήθηκαν [19] με την τεχνική In/Out για τις αντιδράσεις σύλληψης που δίνονται στο ένθετο με τα αντίστοιχα σύμβολα. (β): Αντίστοιχες απόλυτες αποδόσεις ε_Σ των αθροιστικών κορυφών των εκάστοτε αντιδράσεων στο ένθετο.

Πίνακας 3.2: Πειραματικές τιμές του λόγου $R = I^{in}/I^{out}$ της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$ μαζί με τις αντίστοιχες τιμές της μέσης πολλαπλότητας $\langle M \rangle$ και της ανιχνευτικής ικανότητας ε_{Σ} του συστήματος.

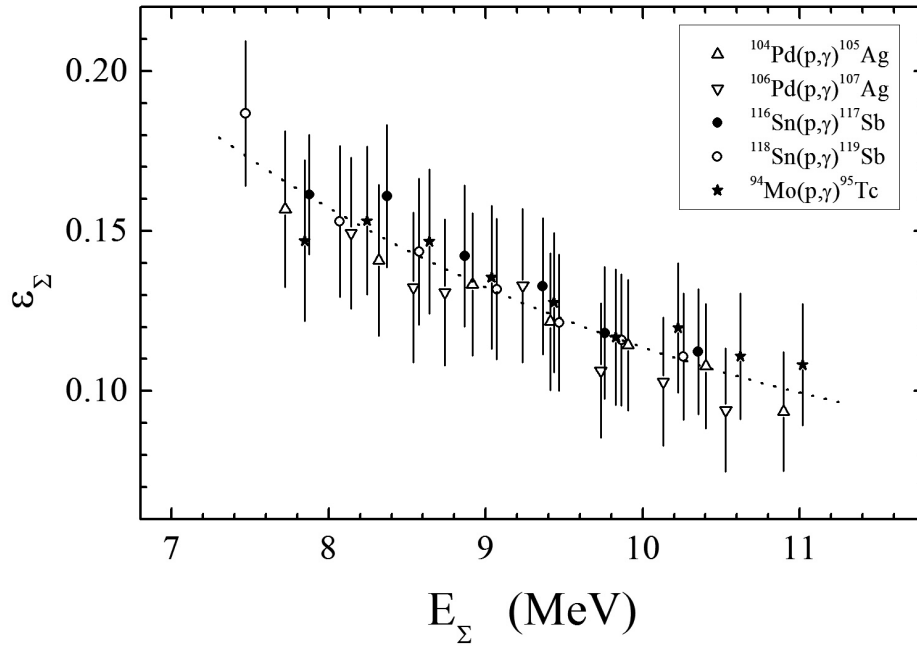
E_p (keV)	$E_{\gamma 0}$ (keV)	R	$\langle M \rangle$	ε_{Σ}
3000	7847	21.03 ± 1.65	3.35 ± 0.09	0.1470 ± 0.0252
3400	8244	15.51 ± 1.10	3.02 ± 0.08	0.1532 ± 0.0232
3800	8640	16.21 ± 1.08	3.07 ± 0.07	0.1467 ± 0.0226
4200	9037	19.16 ± 1.53	3.25 ± 0.09	0.1355 ± 0.0224
4600	9434	20.81 ± 1.64	3.34 ± 0.09	0.1276 ± 0.0218
5000	9830	24.47 ± 1.63	3.52 ± 0.07	0.1168 ± 0.0212
5400	10227	20.47 ± 1.75	3.32 ± 0.09	0.1198 ± 0.0203
5800	10623	23.17 ± 2.51	3.46 ± 0.12	0.1109 ± 0.0197
6200	11019	22.50 ± 6.10	3.43 ± 0.30	0.1083 ± 0.0190

Οι τρεις συνεχείς γραμμές στο σχήμα 3.27(β) αντιστοιχούν σε προσαρμογές των πειραματικών δεδομένων με εκθετικές συναρτήσεις $1^{\eta\varsigma}$ τάξης:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_0 + \alpha \exp(-E_{\Sigma}/\beta) \quad (3.21)$$

όπου ε_0 , α και β σταθερές οι οποίες προσδιορίστηκαν με προσαρμογή των πειραματικών σημείων που μετρήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [19]. Στα δεδομένα της παραπάνω εργασίας για άρτιους-περιττούς παραγόμενους πυρήνες προστέθηκαν οι λόγοι R που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία για το ισότοπο του ^{94}Mo καθώς και οι λόγοι που μετρήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας [34] για άρτιους-άρτιους πυρήνες. Οι τιμές του λόγου R , της μέσης πολλαπλότητας $\langle M \rangle$ (σχέση 3.19) και της απόλυτης ανιχνευτικής ικανότητας ε_{Σ} (σχήμα 3.25) για την αντίδραση $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$ παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

Η προσαρμογή των δεδομένων της διατριβής [19] και της παρούσας εργασίας για άρτιους-περιττούς πυρήνες φαίνεται στο σχήμα 3.28. Στον πίνακα 3.3 αναγράφονται οι τιμές των παραμέτρων ε_0 , α και β για άρτιο-άρτιο, άρτιο-περιττό και περιττό-περιττό παραγόμενο πυρήνα με βάση δεδομένα των τριών παραπάνω εργασιών.



Σχήμα 3.28: Ανιχνευτική ικανότητα του αθροιστικού κρυστάλλου του Πανεπιστημίου του Bochum για άρτιους-περιττούς παραγόμενους πυρήνες. Η συνεχής γραμμή αναπαριστά την προσαρμογή των πειραματικών σημείων με εκθετική συνάρτηση 1^{75} τάξης.

Πίνακας 3.3: Παράμετροι ε_0 , α και β της σχέσης (3.21) για άρτιο-άρτιο, άρτιο-περιττό και περιττό-περιττό παραγόμενο πυρήνα. Ο υπολογισμός των εν λόγω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε μέσω προσαρμογής πειραματικών σημείων των διατριβών [19], [34] καθώς και της παρούσας διατριβής.

Είδος παραγόμενου πυρήνα	ε_0	α	β
άρτιος-άρτιος	0.070	12.576	1958.2
άρτιος-περιττός	0.056	0.959	3564.3
περιττός-περιττός	0.043	0.379	5172.7

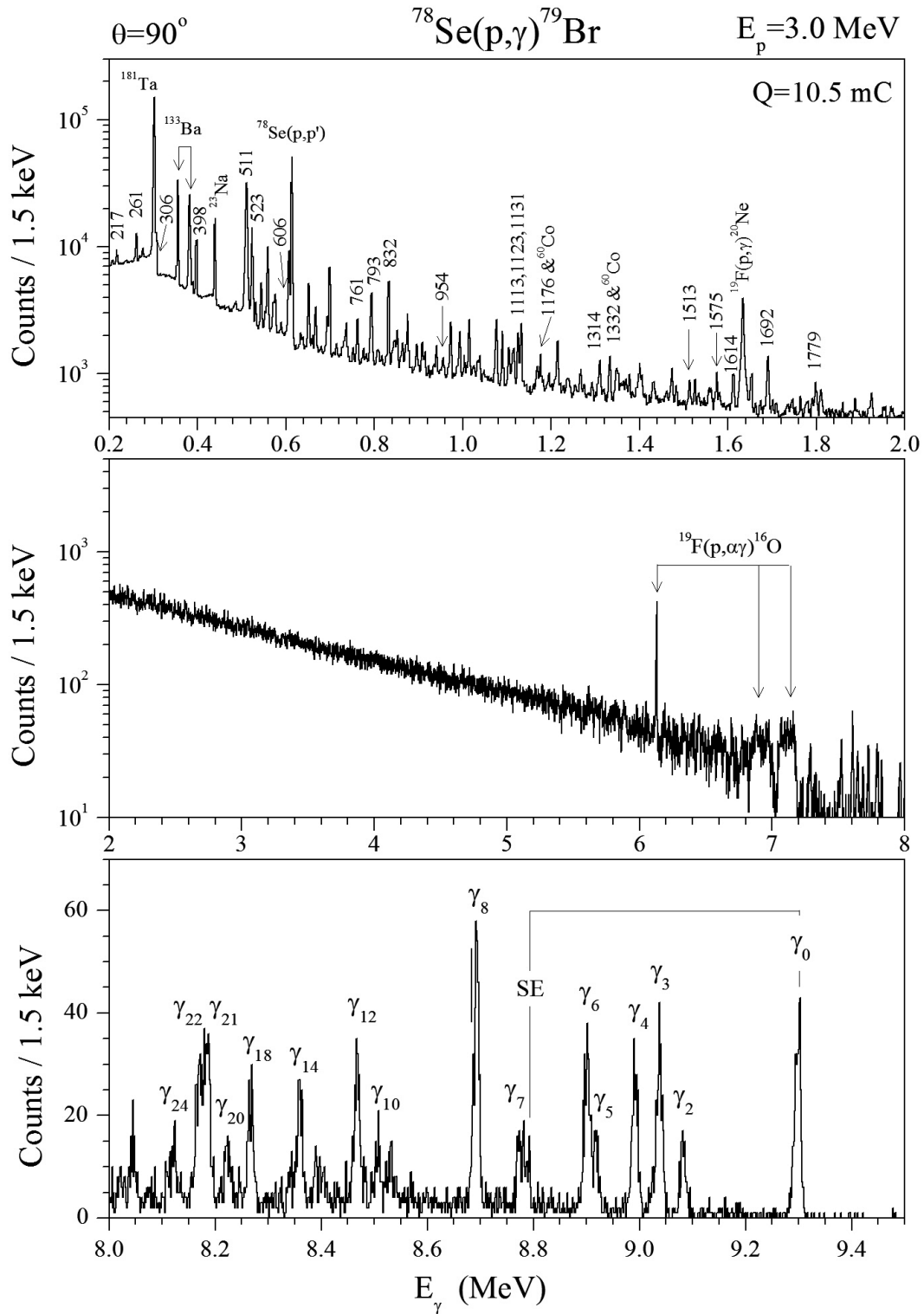
Κεφάλαιο 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Η αντίδραση $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$

Η αντίδραση $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ μελετήθηκε με τη μέθοδο των γωνιακών κατανομών σε δώδεκα συνολικά ενέργειες δέσμης από 1.7 έως 3.0 MeV. Το ρεύμα της δέσμης στο στόχο κυμάνθηκε μεταξύ 3 και 14 μA ($Q=5-66 \text{ mC}$). Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα λεπτό φύλλο ^{78}Se , ισοτοπικά εμπλουτισμένο κατά 97.8%, το οποίο είχε εξαχνωθεί πάνω σε ένα παχύ υπόστρωμα Ta. Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν στραμμένος κατά 15° ως προς το κάθετο στη δέσμη επίπεδο. Το πάχος του προσδιορίστηκε ίσο με $87 \pm 9 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$ με τη βοήθεια της τεχνικής XRF. Κάθε ανιχνευτής έδινε δύο σήματα που οδηγούνταν σε δύο διαφορετικούς ενισχυτές με σκοπό την καταγραφή δύο φασμάτων που θα καλύπτουν διαφορετικές ενεργειακές περιοχές. Το πρώτο από αυτά κατέγραφε φωτόνια με μέγιστη ενέργεια $\sim 3.5 \text{ MeV}$ έτσι ώστε να έχει όσο το δυνατόν καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Το δεύτερο κάλυπτε όλο το ενεργειακό εύρος μέχρι περίπου τα 15 MeV.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ που μετρήθηκε για ενέργεια δέσμης $E_p=3.0 \text{ MeV}$ και γωνία ανίχνευσης $\theta=90^\circ$ ως προς τη διεύθυνση της δέσμης. Στο φάσμα διακρίνονται όλες οι φωτοκορυφές που αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της ολικής ενεργού διατομής. Οι κορυφές αυτές σημειώνονται με αριθμούς που αντιστοιχούν στην ενέργειά τους. Παρατηρούνται, επίσης, κορυφές που προέρχονται από την αντίδραση της δέσμης με το υπόστρωμα Ta καθώς επίσης και κορυφές των αντιδρά-



Σχήμα 4.1: Τυπικό φάσμα ακτίνων γ που συλλέχθηκε με στόχο ^{78}Se στην ενέργεια $E_p=3.0\text{ MeV}$ και σε γωνία ανίχνευσης $\theta=90^\circ$ ως προς τον άξονα της δέσμης.

σεων $^{19}\text{F}(p,\gamma)^{20}\text{Ne}$ και $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}^1$. Στο υψηλοενεργειακό τμήμα του φάσματος φαίνονται οι κορυφές των πρωτογενών φωτονίων, οι οποίες, σημειώνονται με το συμβολισμό γ_i , με i τον αριθμό της στάθμης του σύνθετου πυρήνα που απολήγουν. Με SE συμβολίζεται η πρώτη διαφεύγουσα φωτοκορυφή της γ_0 . Η κορυφή γ_0 , η πρωτογενής, δηλαδή, μετάπτωση στη βασική στάθμη, ήταν διακριτή σε όλα τα φάσματα που συλλέχθηκαν. Υπήρχαν, όμως, πρωτογενείς μεταπτώσεις, όπως οι μεταπτώσεις γ_9 και γ_{11} , οι οποίες δεν παρατηρήθηκαν σε κάποιο από τα συλλεγόμενα φάσματα. Η απουσία αυτών των φωτοκορυφών μπορεί να αποδοθεί στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των ιδιοστροφορμών της στάθμης εισόδου και της στάθμης στην οποία απολήγουν.

Για τον υπολογισμό της ιδιοστροφορμής \vec{J}_c της στάθμης εισόδου χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$\vec{J}_c = \vec{S} + \vec{l}_b \quad (4.1)$$

όπου \vec{l}_b η τροχιακή στροφορμή του βλήματος ($l_b=0$ ή 1 για δέσμη πρωτονίων χαμηλής ενέργειας) και \vec{S} η ιδιοστροφορμή του καναλιού εισόδου. Η τελευταία ισούται με το διανυσματικό άθροισμα της ιδιοστροφορμής \vec{s}_b του βλήματος ($s_b=1/2$ για πρωτόνια) και της ιδιοστροφορμής \vec{I} της θεμελιώδους στάθμης του στόχου:

$$\vec{S} = \vec{s}_b + \vec{I} \quad (4.2)$$

Η ομοτιμία π_c της στάθμης εισόδου υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\pi_c = \pi_t(-1)^{l_b} \quad (4.3)$$

όπου π_t η ομοτιμία της θεμελιώδους στάθμης του πυρήνα-στόχου. Με βάση τα παραπάνω η ιδιοστροφορμή και η ομοτιμία της στάθμης εισόδου ισούται με:

$$J_c = \begin{cases} \frac{1}{2}^+ & \text{για } l_b = 0 \\ \frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}^- & \text{για } l_b = 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

Από τις δύο αυτές τιμές επικρατέστερη είναι η πρώτη, καθώς, σε χαμηλές ενέργειες πρωτονίων η δέσμη αποτελείται κυρίως από κύματα s ($l_b = 0$).

Για τις τιμές της ιδιοστροφορμής και της ενέργειας των σταθμών του σύνθετου πυρήνα ^{79}Br λάβαμε υπόψη τις βάσεις δεδομένων Nudat2 [40] και Firestone [41]. Ενδεικτικά, στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές της ιδιοστροφορμής και της ενέργειας για τέσσερις από

¹Το ^{19}F συναντάται συχνά ως πρόσμιξη σε στόχους Ta. Η παρουσία του οφείλεται στη μέθοδο παρασκευής του ίδιου του υλικού.

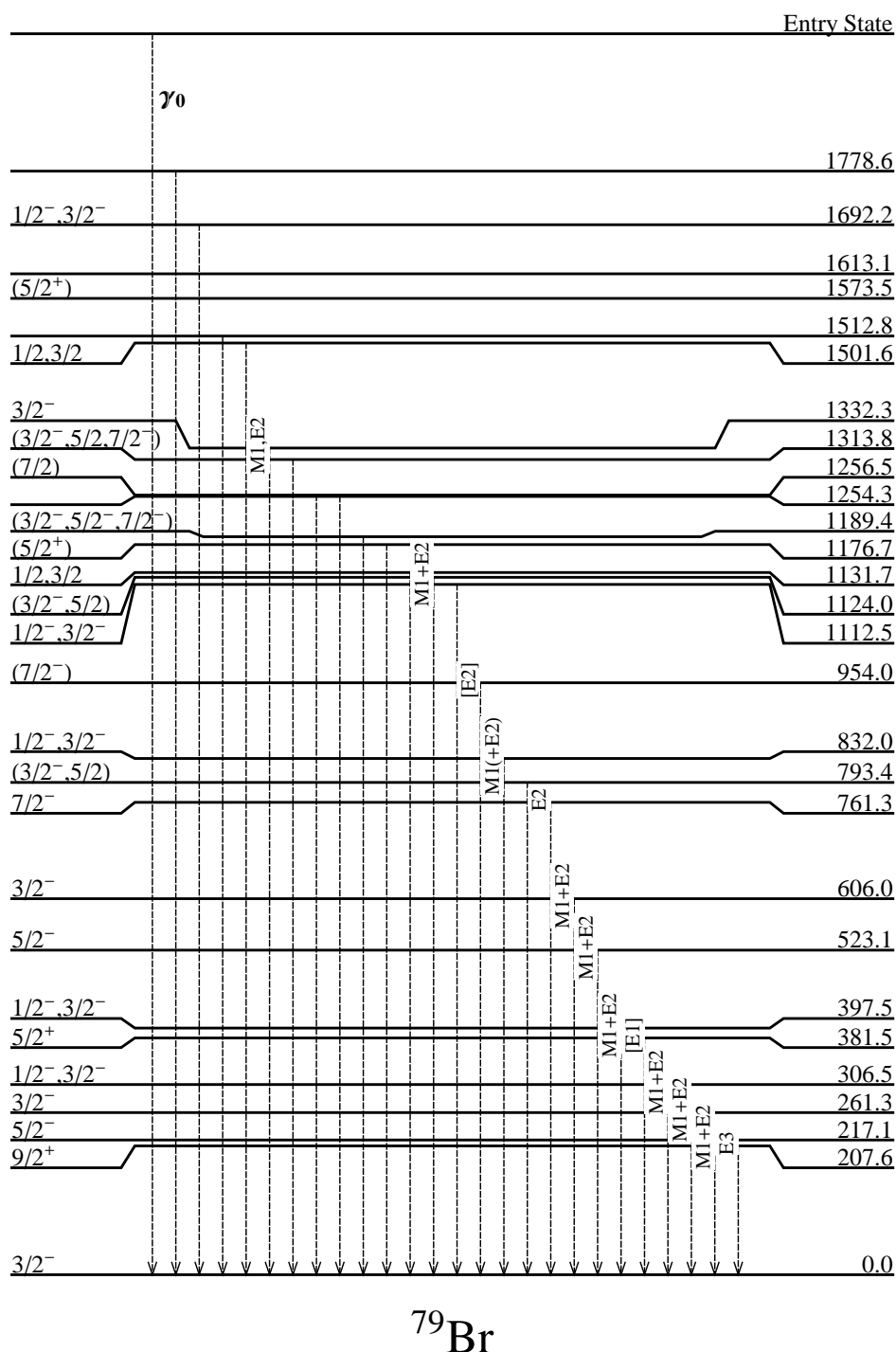
τις στάθμες, που σύμφωνα πάντα με τα πειραματικά φάσματα, δεν τροφοδοτούνται από πρωτογενείς μεταπτώσεις. Η σύγκριση της ιδιοστροφορμής κάθε μίας από τις εν λόγω στάθμες με την επικρατούσα ιδιοστροφορμή της στάθμης εισόδου ($J_c=1/2^+$) δίνει διαφορές $\Delta J \geq 3$. Επομένως είναι αναμενόμενη η απουσία των συγκεκριμένων μεταπτώσεων στα πειραματικά φάσματα.

Πίνακας 4.1: Ενέργεια και ιδιοστροφορμή των διεγερμένων σταθμών του σύνθετου πυρήνα ^{79}Br που, σύμφωνα με τα πειραματικά φάσματα, δεν τροφοδοτήθηκαν από πρωτογενείς ακτίνες γ . Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα αυτό λήφθησαν από τις βάσεις δεδομένων Nudat2 [40] και Firestone [41].

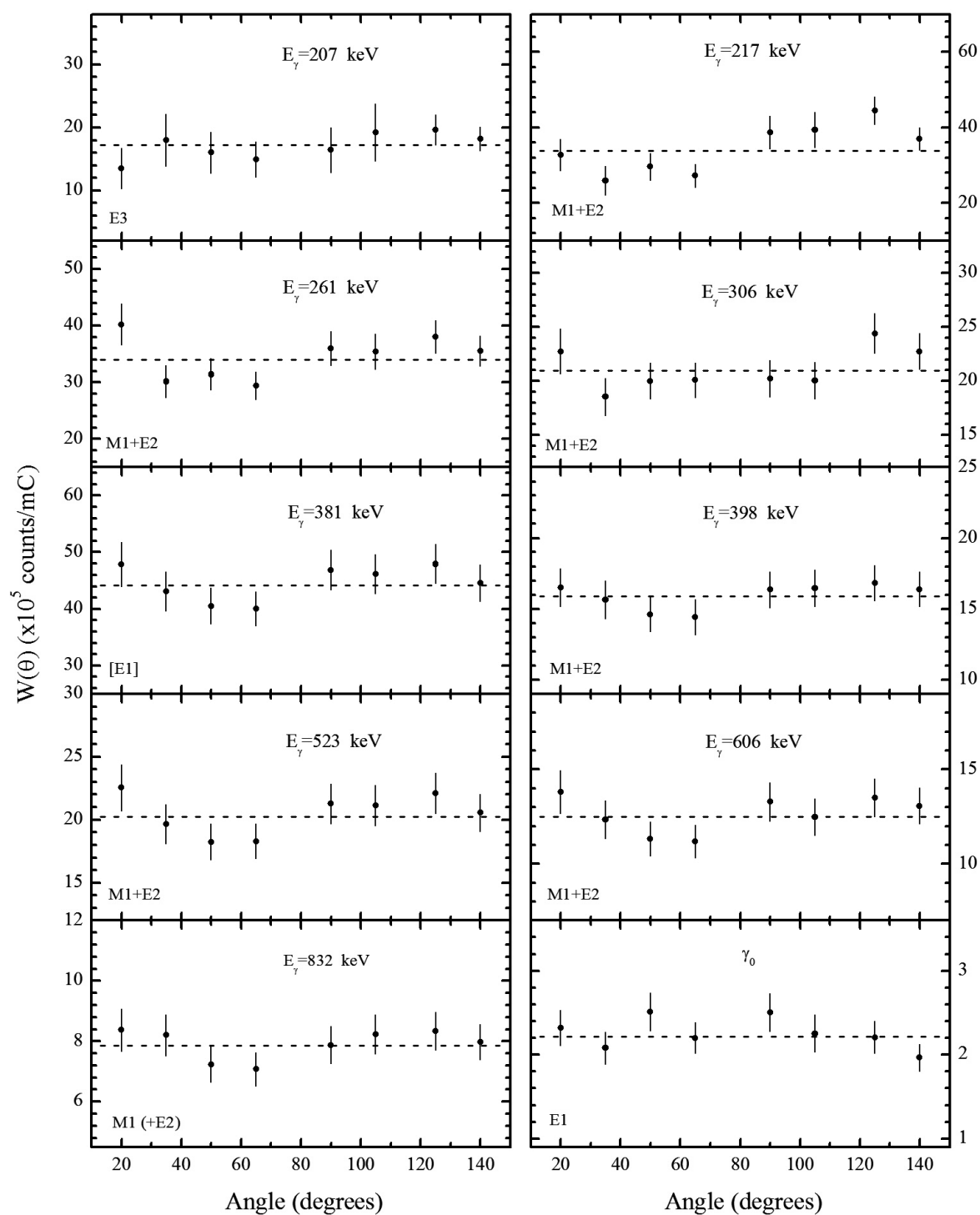
Συμβολισμός μετάπτωσης	Ενέργεια τελικής στάθμης, E_f	Ιδιοστροφορμή τελικής στάθμης, J_f
γ_9	761	$7/2^-$
γ_{11}	797	$13/2^+$
γ_{13}	907	$7/2^-$
γ_{15}	954	$7/2^-$

Από την ανάλυση των εμπειροχόμενων στα φάσματα ακτίνων γ και με οδηγό τη βάση δεδομένων Nudat2 [40] και Firestone [41] για τις διεγερμένες στάθμες του πυρήνα ^{79}Br συμπεράναμε ότι η αντίδραση $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$ οδηγεί στο ενεργειακό διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 4.2 για τον πυρήνα ^{79}Br . Στο ενεργειακό αυτό διάγραμμα έχουμε συμπεριλάβει όλες τις διεγερμένες καταστάσεις που τροφοδοτούν τη βασική στάθμη καθώς και τις αντίστοιχες μεταπτώσεις (εστιγμένα βέλη) που, ως εκ τούτου, έχουν ληφθεί υπόψη στον προσδιορισμό της ενεργού διατομής σύμφωνα με την εξίσωση 3.9. Οι στάθμες που ενώ αποδιηγείρονται στη βασική οδηγούν σε μη αναλύσιμες ή μη διακριτές φωτοκορυφές δεν συμπεριλήφθηκαν στο παραπάνω διάγραμμα.

Οι εντάσεις των κορυφών που συνεισφέρουν στην ενεργό διατομή υπολογίστηκαν για κάθε ενέργεια δέσμης και κάθε γωνία ανίχνευσης με χρήση του κώδικα ανάλυσης φασμάτων TV [38]. Στις περισσότερες περιπτώσεις για τον υπολογισμό της έντασης της προς ανάλυση φωτοκορυφής γινόταν προσαρμογή με κατανομή κατανομή. Όταν στην κορυφή υπήρχε συνεισφορά από μία ή περισσότερες γειτονικές κορυφές γινόταν πολλαπλή προσαρμογή με κανονικές κατανομές. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, όπου η φωτοκορυφή ήταν “καθαρή” και πολύ μικρής



Σχήμα 4.2: Ενεργειακό διάγραμμα του παραγόμενου πυρήνα ^{79}Br της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$. Στα δεξιά της κάθε στάθμης αναγράφεται η ενέργειά της και στα αριστερά η ιδιοτροφορμή και η ομοτιμία της. Στο διάγραμμα φαίνονται και οι μεταπτώσεις που τροφοδοτούν τη βασική στάθμη του πυρήνα και οδήγησαν σε αναλύσιμη φωτοκορυφή.



Σχήμα 4.3: Γωνιακές κατανομές ακτίνων γ της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$. Οι τιμές των συντελεστών A_0 που υπεισέρχονται στον προσδιορισμό της ενεργού διατομής υπολογίστηκαν από το μέσο όρο των πειραματικών σημείων των γωνιακών κατανομών.

έντασης γινόταν απλή ολοκλήρωση. Χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιας κορυφής ήταν η κορυφή γ_0 . Στις κορυφές των 1176 και 1332 keV έγινε αρχικά αφαίρεση του φάσματος υποβάθρου που είχε ληφθεί πριν ή μετά την κάθε ακτινοβολήση, καθώς, οι εν λόγω κορυφές είχαν συνεισφορές από τις κορυφές 1173 και 1332 keV μίας πηγής ^{60}Co που υπήρχε στον πειραματικό χώρο. Το υπόβαθρο θεωρήθηκε γραμμικό σε όλες τις περιπτώσεις.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τυπικές γωνιακές κατανομές των ισχυρότερων από τις μεταπτώσεις γ που χρησιμοποιήσαμε για τον προσδιορισμό της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$ στην ενέργεια των 3.0 MeV. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, δεν παρατηρήθηκε σημαντική γωνιακή εξάρτηση. Η εικόνα ήταν η ίδια σε όλες τις μεταπτώσεις που αναλύθηκαν και για κάθε ενέργεια δέσμης. Για το λόγο αυτό, οι συντελεστές A_0 υπολογίστηκαν από το μέσο όρο των πειραματικών σημείων των γωνιακών κατανομών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, αφού πρώτα προηγήθηκε έλεγχος που έδειξε ότι οι τιμές των συντελεστών A_0 , όπως προκύπτουν από α) την προσαρμογή των γωνιακών κατανομών με τη συνάρτηση (3.11) και β) το μέσο όρο των σημείων δε διαφέρουν περισσότερο από 4%. Οι τιμές των επιμέρους ενεργών διατομών του συνόλου των μεταπτώσεων που αναλύθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 για όλες τις ενέργειες δέσμης που μελετήθηκε η αντίδραση $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι τιμές των μερικών ενεργών διατομών σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα ^{79}Br στη βασική (σ_g) και στη μετασταθή (σ_{meta}) κατάσταση του καθώς και η ολική ενεργός διατομή και ο αστροφυσικός παράγοντας της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$. Ο αστροφυσικός παράγοντας S προσδιορίστηκε μέσω των σχέσεων (2.9) και (2.3) ενώ ο διορθωτικός παράγοντας του φαινομένου screening f_s υπολογίστηκε από την έκφραση (2.19). Για τον υπολογισμό της ενέργειας της δέσμης στο σύστημα κέντρου μάζας χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$E_{c.m.} = \frac{m_t}{m_p + m_t} E_{eff} \quad (4.5)$$

όπου, m_t και m_p οι ατομικές μάζες του στόχου ^{78}Se και του πρωτονίου, αντίστοιχα, και E_{eff} η δραστική ενέργεια αλληλεπίδρασης, η οποία αντιστοιχεί στην ενέργεια της δέσμης στο κέντρο του στόχου [18] και δίνεται από τη σχέση:

$$E_{eff} = E_p - \Delta E/2 \quad (4.6)$$

Η απώλεια ενέργειας της δέσμης ΔE ανά μονάδα πάχους των στόχων Se υπολογίστηκε μέσω προσομοίωσης με χρήση του προγράμματος *SRIM* [31]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται μαζί με τη συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή τους στο Παράρτημα Α'.

Πίνακας 4.2: Ενεργές διατομές των μεταπτώσεων που συνεισφέρουν στην ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$ καθώς και οι ενεργές διατομές των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79,g}\text{Br}$, $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79,m}\text{Br}$ και $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$ μαζί με τον αστροφυσικό παράγοντα.

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	Screening factor	$\sigma_{207(meta)}$ μb	σ_{217} μb	σ_{261} μb	σ_{306} μb
1706	1681 ± 1	1.082	-	3.63 ± 0.85	5.24 ± 0.75	3.02 ± 0.52
1907	1879 ± 1	1.069	-	12.5 ± 1.64	14.8 ± 1.7	9.46 ± 1.09
2007	1978 ± 1	1.063	-	18.1 ± 3.73	24 ± 2.7	13.3 ± 1.7
2208	2177 ± 1	1.055	-	53.2 ± 6.75	58.9 ± 6.7	40.6 ± 4.6
2309	2276 ± 1	1.051	-	79.1 ± 10.5	88.1 ± 9.6	52.2 ± 6.1
2409	2376 ± 1	1.048	63.6 ± 8.8	123 ± 15.7	133 ± 15	86.7 ± 9.9
2510	2475 ± 1	1.045	81.1 ± 9.7	156 ± 19.3	171 ± 18	104 ± 12
2610	2574 ± 1	1.042	108 ± 13	233 ± 27	251 ± 26	158 ± 17
2711	2673 ± 1	1.04	157 ± 18	342 ± 42	342 ± 36	228 ± 24
2811	2773 ± 1	1.038	205 ± 26	425 ± 47	436 ± 46	291 ± 30
2912	2872 ± 1	1.036	279 ± 31	557 ± 63	570 ± 61	350 ± 37
3010	2969 ± 1	1.034	392 ± 43	772 ± 94	773 ± 83	477 ± 50
$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{381} μb	σ_{398} μb	σ_{523} μb	σ_{606} μb	σ_{761} μb	σ_{793} μb
1681 ± 1	4.87 ± 0.76	2.92 ± 0.31	2.67 ± 0.28	2.17 ± 0.23	0.29 ± 0.05	0.71 ± 0.08
1879 ± 1	14.9 ± 1.6	7.86 ± 0.81	7.39 ± 0.76	6.31 ± 0.64	0.84 ± 0.09	2.15 ± 0.23
1978 ± 1	27.1 ± 2.9	12.62 ± 1.32	12 ± 1.2	9.75 ± 1.00	1.34 ± 0.16	3.27 ± 0.35
2177 ± 1	72.5 ± 7.6	31.04 ± 3.23	32.1 ± 3.3	23.7 ± 2.5	4.34 ± 0.49	8.75 ± 0.93
2276 ± 1	106 ± 11	41.9 ± 4.3	48 ± 4.9	34 ± 3.5	6.41 ± 0.72	13.4 ± 1.4
2376 ± 1	166 ± 17	69.7 ± 7.3	71.9 ± 7.5	54.1 ± 5.6	9.39 ± 1.06	20.2 ± 2.1
2475 ± 1	206 ± 21	81.4 ± 8.3	93 ± 9.5	63.8 ± 6.5	12.9 ± 1.4	26.4 ± 2.7
2574 ± 1	308 ± 32	121 ± 12	137 ± 14	93.1 ± 9.7	19.2 ± 2.1	37.9 ± 4.0
2673 ± 1	433 ± 44	171 ± 18	194 ± 20	129 ± 13	26.6 ± 3.0	53.3 ± 5.5
2773 ± 1	551 ± 56	209 ± 22	251 ± 26	167 ± 17	36.5 ± 4.2	68.1 ± 7.0
2872 ± 1	713 ± 72	260 ± 27	324 ± 33	208 ± 21	49.2 ± 5.3	88.8 ± 9.2
2969 ± 1	1007 ± 104	361 ± 37	461 ± 48	284 ± 30	72.2 ± 7.9	123 ± 13

Συνέχεια στην επόμενη σελίδα

Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{832} μb	σ_{954} μb	σ_{1113} μb	σ_{1123} μb	σ_{1131} μb	σ_{1175} μb
1681 ± 1	1.39 ± 0.14	-	0.23 ± 0.03	0.39 ± 0.05	0.81 ± 0.09	0.25 ± 0.04
1879 ± 1	3.88 ± 0.40	-	0.54 ± 0.06	0.97 ± 0.11	1.81 ± 0.19	0.54 ± 0.07
1978 ± 1	6.33 ± 0.65	-	0.94 ± 0.12	1.75 ± 0.18	2.83 ± 0.29	1.12 ± 0.14
2177 ± 1	15.7 ± 1.6	1.32 ± 0.19	1.98 ± 0.22	4.7 ± 0.50	7.37 ± 0.77	2.78 ± 0.31
2276 ± 1	21.2 ± 2.2	2.1 ± 0.26	3.15 ± 0.33	7.34 ± 0.74	10.2 ± 1.0	4.07 ± 0.48
2376 ± 1	32.7 ± 3.4	3.11 ± 0.40	4.91 ± 0.50	10.8 ± 1.1	16.8 ± 1.7	6.41 ± 0.67
2475 ± 1	41.5 ± 4.2	4.59 ± 0.52	5.67 ± 0.60	13.7 ± 1.4	20.3 ± 2.1	7.75 ± 0.88
2574 ± 1	61.3 ± 6.5	6.37 ± 0.72	8.13 ± 0.83	20 ± 2.1	29 ± 3.0	11.9 ± 1.2
2673 ± 1	85.3 ± 8.8	8.85 ± 0.98	11.4 ± 1.2	28.9 ± 3.0	40.5 ± 4.1	17.2 ± 1.9
2773 ± 1	108 ± 11	12.1 ± 1.4	14.3 ± 1.5	38.1 ± 3.9	51.8 ± 5.3	21.4 ± 2.4
2872 ± 1	133 ± 14	17 ± 2.1	16.9 ± 1.8	47.4 ± 5.0	62.7 ± 6.4	28.8 ± 3.0
2969 ± 1	179 ± 18	24.4 ± 2.8	24 ± 2.6	68.8 ± 7.2	89 ± 9.2	38.8 ± 4.1
$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{1256} μb	σ_{1313} μb	σ_{1332} μb	σ_{1513} μb	σ_{1575} μb	σ_{1613} μb
1681 ± 1	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.34 ± 0.04	0.14 ± 0.03	0.31 ± 0.04	0.16 ± 0.03
1879 ± 1	0.17 ± 0.04	-	0.8 ± 0.09	0.46 ± 0.06	0.71 ± 0.08	0.44 ± 0.05
1978 ± 1	0.27 ± 0.04	0.16 ± 0.05	1.18 ± 0.16	0.67 ± 0.08	1.04 ± 0.11	0.69 ± 0.08
2177 ± 1	0.57 ± 0.09	0.36 ± 0.08	3.13 ± 0.35	1.4 ± 0.17	3.12 ± 0.34	1.68 ± 0.22
2276 ± 1	0.82 ± 0.12	0.45 ± 0.11	4.39 ± 0.47	2.41 ± 0.30	3.76 ± 0.40	2.92 ± 0.37
2376 ± 1	1.01 ± 0.12	0.75 ± 0.09	6.53 ± 0.70	4.09 ± 0.42	6.47 ± 0.67	4.36 ± 0.49
2475 ± 1	1.38 ± 0.19	0.98 ± 0.13	8.33 ± 0.86	5.05 ± 0.53	7.55 ± 0.79	5.22 ± 0.63
2574 ± 1	2.24 ± 0.30	1.31 ± 0.26	12.4 ± 1.3	7.14 ± 0.81	11.3 ± 1.2	6.82 ± 0.83
2673 ± 1	3.07 ± 0.43	1.79 ± 0.35	17.2 ± 1.8	9.66 ± 1.07	15.2 ± 1.6	9.5 ± 1.10
2773 ± 1	3.72 ± 0.53	2.07 ± 0.30	21.2 ± 2.2	11.2 ± 1.2	20.2 ± 2.1	13.4 ± 1.6
2872 ± 1	4.24 ± 0.62	3.33 ± 0.67	27.2 ± 2.8	13.2 ± 1.7	25.2 ± 2.7	17.4 ± 2.2
2969 ± 1	6.51 ± 0.79	3.84 ± 0.50	38 ± 4.0	20.5 ± 2.2	32.2 ± 3.3	18.9 ± 2.3

Συνέχεια στην επόμενη σελίδα

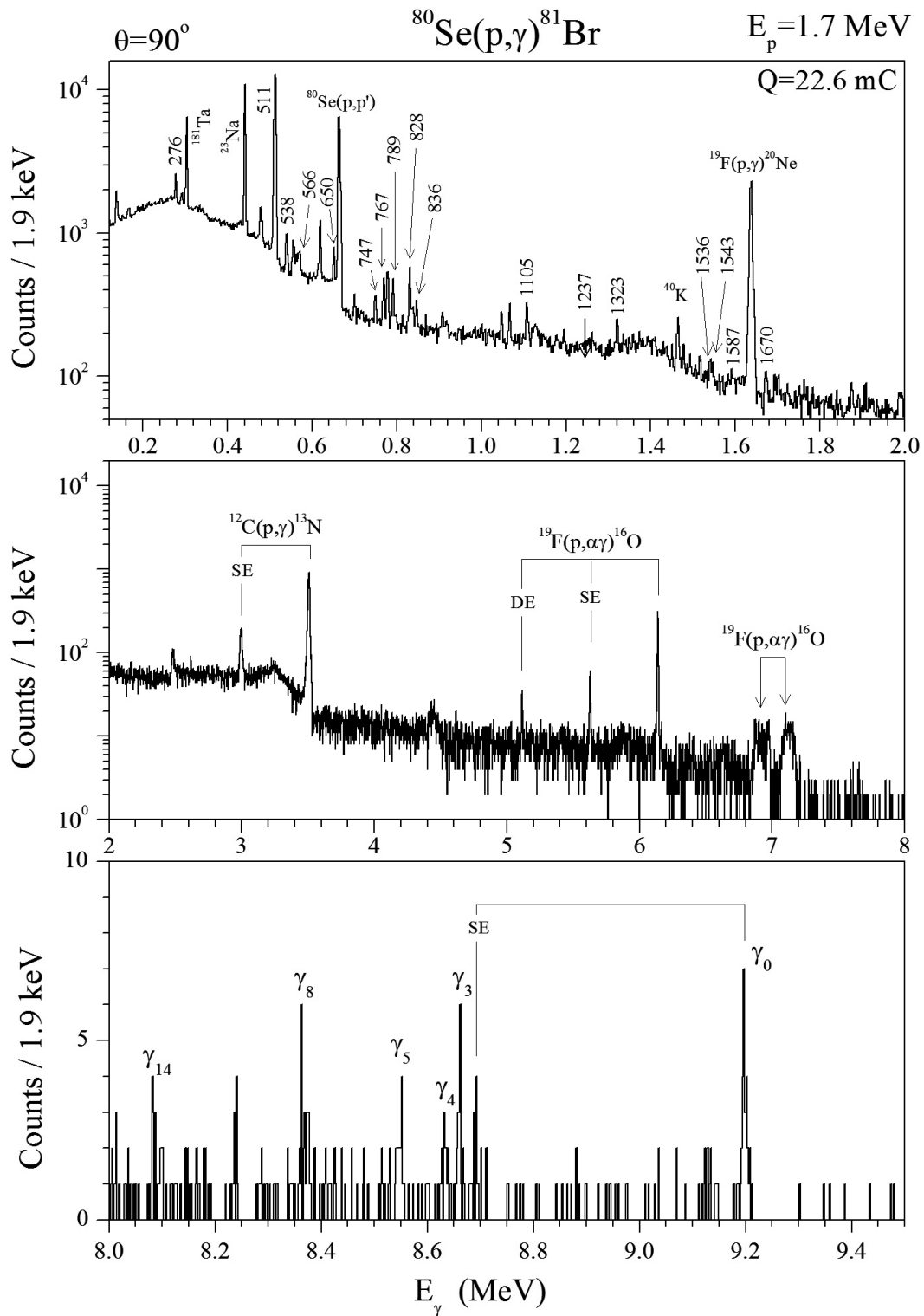
Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{1691} μb	σ_{1779} μb	$\sigma_{\gamma 0}$ μb	σ_g μb	σ_T μb	$S - factor$ ($\times 10^6 \text{ MeV}\cdot\text{b}$)
1681 ± 1	0.46 ± 0.06	0.13 ± 0.02	0.61 ± 0.08	30.9 ± 3.6	30.9 ± 3.6	7.75 ± 0.90
1879 ± 1	1.21 ± 0.12	0.11 ± 0.02	1.75 ± 0.19	89.6 ± 9.4	89.6 ± 9.4	6.24 ± 0.65
1978 ± 1	1.92 ± 0.19	0.25 ± 0.05	2.17 ± 0.23	143 ± 15	143 ± 15	5.65 ± 0.61
2177 ± 1	6.04 ± 0.63	0.37 ± 0.10	5.4 ± 0.57	381 ± 40	381 ± 40	5.48 ± 0.57
2276 ± 1	6.87 ± 0.71	0.46 ± 0.11	8.86 ± 1.0	548 ± 57	592 ± 62	5.41 ± 0.56
2376 ± 1	11.9 ± 1.2	1.05 ± 0.12	11.9 ± 1.2	857 ± 90	920 ± 96	5.50 ± 0.57
2475 ± 1	14.9 ± 1.5	1.15 ± 0.21	16.0 ± 1.7	1068 ± 111	1149 ± 119	4.62 ± 0.48
2574 ± 1	20.4 ± 2.1	1.59 ± 0.26	16.3 ± 1.7	1575 ± 164	1683 ± 175	4.65 ± 0.48
2673 ± 1	32 ± 3.2	2.74 ± 0.33	30.8 ± 3.2	2234 ± 233	2391 ± 249	4.65 ± 0.48
2773 ± 1	38.7 ± 3.9	4.55 ± 0.48	26.5 ± 2.9	2821 ± 294	3026 ± 315	4.22 ± 0.44
2872 ± 1	50.2 ± 5.1	8.3 ± 0.94	55.5 ± 5.9	3631 ± 381	3910 ± 409	3.98 ± 0.42
2969 ± 1	66.6 ± 6.7	12.2 ± 1.4	50.5 ± 5.3	5004 ± 528	5396 ± 567	4.11 ± 0.43

4.2 Η αντίδραση $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ μελετήθηκε στην ενεργειακή περιοχή μεταξύ 1.5 και 3.5 MeV. Μετρήθηκαν συνολικά 18 ενέργειες δέσμης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ισοτοπικά εμπλουτισμένοι (98%) στόχοι ^{80}Se , πάχους $106 \pm 11 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$ και $132 \pm 13 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$. Η ανάλυση των στόχων πραγματοποιήθηκε με χρήση της μεθόδου XRF (§3.1.1). Και οι δύο στόχοι αποτελούνταν από ένα φύλλο ^{80}Se , το οποίο είχε εναποτεθεί πάνω σε έναν παχύ δίσκο Ta. Το ρεύμα της δέσμης πρωτονίων στο στόχο κυμάνθηκε μεταξύ 3 και 7.5 μA ($Q=3-35 \mu\text{C}$).

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα ακτίνων γ της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$. Το φάσμα αυτό μετρήθηκε για ενέργεια δέσμης 1.7 MeV και γωνία ανίχνευσης $\theta = 90^\circ$. Οι φωτοκορυφές που προέρχονται από μεταπτώσεις που τροφοδοτούν τη βασική στάθμη και που ως εκ τούτου αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της ολικής ενεργού διατομής σημειώνονται με αριθμούς που αντιστοιχούν στην ενέργειά τους. Στο μεσαίο τμήμα του φάσματος διακρίνονται κορυφές που προέρχονται από την αντίδραση της δέσμης με προσμίξεις του υποδάθρου Ta αλλά και από αντιδράσεις με το στρώμα άνθρακα που έχει, πιθανόν, εναποτεθεί στην επιφάνεια του στόχου. Στο υψηλοενεργειακό τμήμα του φάσματος φαίνονται οι ισχυρότερες από τις φωτοκορυφές των πρωτογενών ακτίνων γ . Η κορυφή γ_0 ήταν διακριτή



Σχήμα 4.4: Τυπικό φάσμα ακτίνων γ από ισοτοπικά εμπλουτισμένο στόχο ^{80}Se για ενέργεια δέσμης ίση με 1.7 MeV και για γωνία ανίχνευσης $\theta = 90^\circ$. Με SE και DE συμβολίζεται η πρώτη και η δεύτερη διαφεύγουσα, αντίστοιχα.

σε όλα τα φάσματα. Με SE και DE συμβολίζεται η πρώτη και η δεύτερη διαφεύγουσα, αντίστοιχα. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα κάποιες από τις πρωτογενείς μεταπτώσεις δεν παρατηρήθηκαν στα πειραματικά φάσματα, λόγω του ότι οι ιδιοστροφορμές της στάθμης εισόδου και των στάθμων που τροφοδοτούν οι εν λόγω μεταπτώσεις παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές.

Για τον υπολογισμό της ιδιοστροφορμής J_c και της ομοτιμίας π_c της στάθμης εισόδου χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (4.1) και (4.3). Από τις σχέσεις αυτές και για $s_b=1/2$, $J_t^{\pi_t} = 0^+$ προέκυψαν οι τιμές της σχέσης (4.4).

Το ενεργειακό διάγραμμα του παραγόμενου πυρήνα της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα των βάσεων Nudat2 [40] και Firestone [41]. Στο διάγραμμα συμπεριλήφθηκαν μόνο οι στάθμες που οδηγούν σε αναλύσιμες φωτοκορυφές μεταπτώσεων που τροφοδοτούν τη βασική κατάσταση αλλά και μία ισομερής στάθμη στα 536.2 keV ($T_{1/2}=34.6$ μs). Η μετάπτωση της στάθμης των 536.2 keV στη 1^{η} διεγερμένη του ^{81}Br ($E_l=276$ keV), αναλύθηκε για τον προσδιορισμό της μερικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81,m}\text{Br}$.

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται γωνιακές κατανομές των περισσότερων από τις μεταπτώσεις της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ για ενέργεια δέσμης $E_p=1.7$ MeV. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, δεν παρατηρήθηκε σημαντική γωνιακή εξάρτηση. Για το λόγο αυτό, οι συντελεστές A_0 υπολογίστηκαν και σε αυτήν την περίπτωση από το μέσο όρο των πειραματικών σημείων των γωνιακών κατανομών (σχήμα 4.6). Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργού διατομής των μεταπτώσεων που αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό της ολικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$. Οι τιμές της ολικής ενεργού διατομής και του αστροφυσικού παράγοντα S δίνονται στον ίδιο πίνακα μαζί με την μερική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81,m}\text{Br}$.

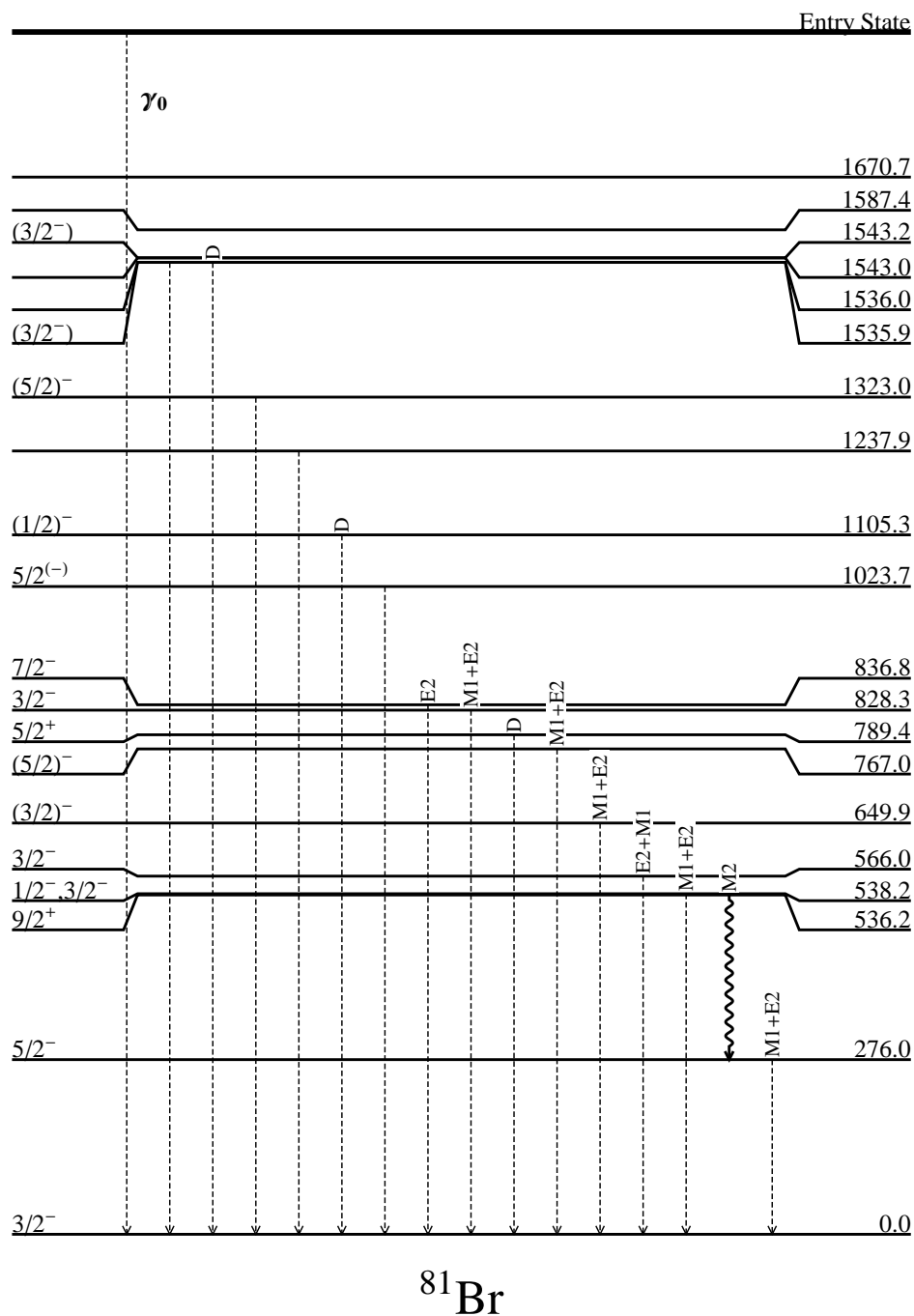
Στην περίπτωση των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ το συνολικό σχετικό σφάλμα δεν ξεπέρασε το 11% και 15%, αντίστοιχα. Σε αυτό συνεισφέρουν α) το σφάλμα της μέτρησης του στόχου (10%) και β) το σφάλμα της απόλυτης απόδοσης A_0 της εκάστοτε κορυφής, το οποίο θεωρήθηκε ίσο με τη σταθμισμένη τυπική απόκλιση των κανονικοποιημένων στη μονάδα του φορτίου και διορθωμένων ως προς το νεκρό χρόνο και την ανιχνευτική ικανότητα εντάσεων της φωτοκορυφής. Στο τελευταίο συνεισφέρουν τα επιμέρους σφάλματα i) του φορτίου της δέσμης Q που προσπίπτει στο στόχο (5%), ii) του νεκρού χρόνου (<5%), iii) της ανιχνευτικής ικανότητας ϵ_{abs} του αντίστοιχου ανιχνευτή (5%) και iv) το σφάλμα στην εμβαδομέτρηση της κορυφής.

Πίνακας 4.3: Ενεργές διατομές των μεταπτώσεων που συνεισφέρουν στην ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ καθώς και οι τιμές της μερικής και της ολικής ενεργού διατομής της εν λόγω αντίδρασης μαζί με τον αστροφυσικό παράγοντα S .

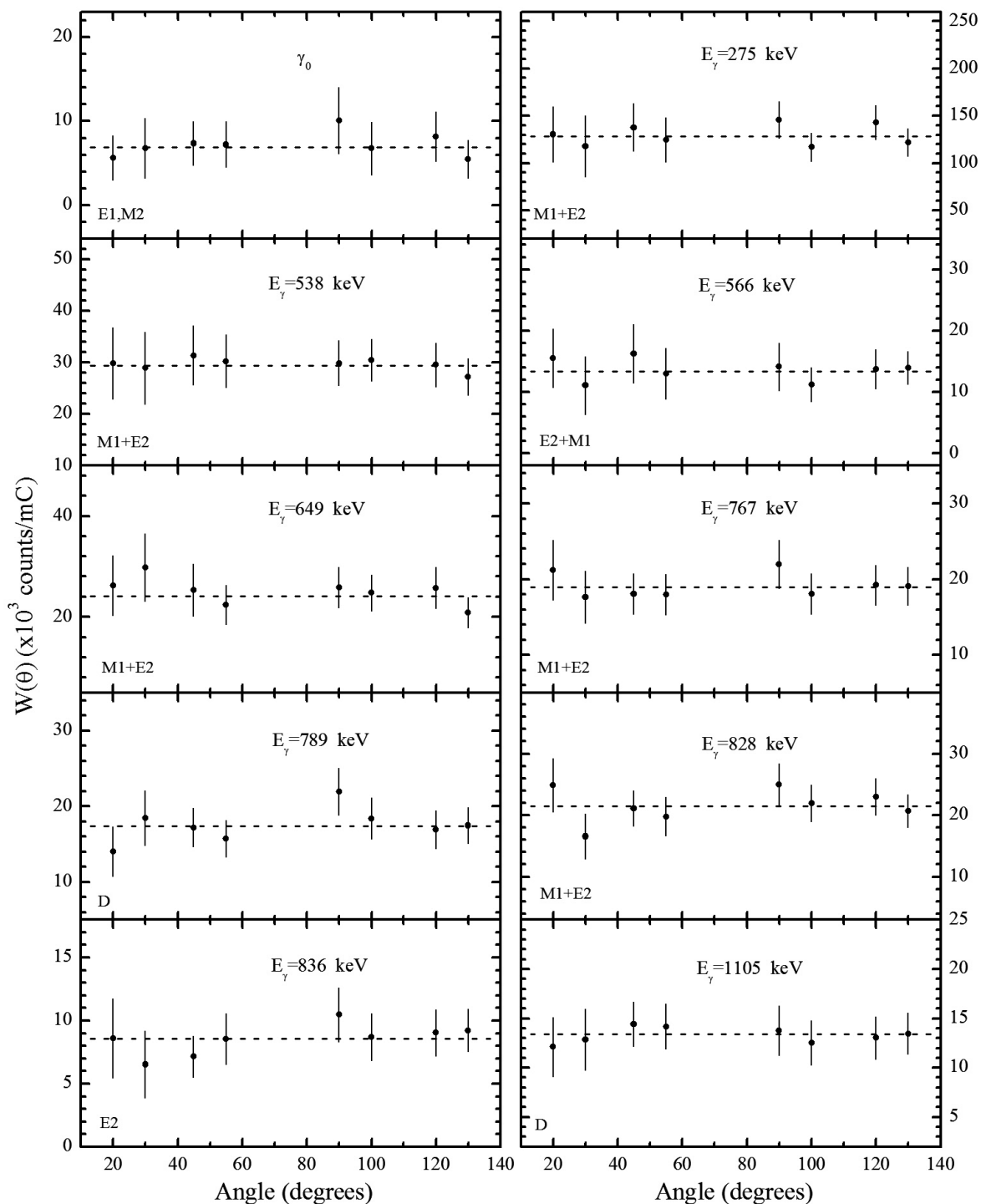
E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	Screening factor	σ_{275} μb	σ_{538} μb	σ_{566} μb	σ_{649} μb
1506	1482 ± 1	1.100	4.98 ± 0.69	0.83 ± 0.14	0.49 ± 0.11	0.72 ± 0.12
1707	1681 ± 1	1.082	19.2 ± 2.2	4.39 ± 0.50	1.99 ± 0.27	3.59 ± 0.42
1808	1782 ± 1	1.075	38.0 ± 4.0	7.81 ± 0.83	3.52 ± 0.39	7.16 ± 0.76
1908	1880 ± 1	1.069	60.9 ± 6.5	12.3 ± 1.3	5.57 ± 0.63	10.9 ± 1.2
2010	1981 ± 1	1.063	110 ± 12	23.3 ± 2.5	10.3 ± 1.1	20.0 ± 2.1
2109	2078 ± 1	1.059	178 ± 19	34.7 ± 3.7	16.0 ± 1.7	29.9 ± 3.2
2211	2180 ± 1	1.055	279 ± 29	55.6 ± 5.8	24.9 ± 2.6	47.2 ± 5.0
2310	2277 ± 1	1.051	402 ± 42	78.3 ± 8.2	36.5 ± 3.9	64.7 ± 6.8
2412	2379 ± 1	1.048	561 ± 59	104 ± 11	48.7 ± 5.1	82.4 ± 8.6
2511	2476 ± 1	1.045	788 ± 83	148 ± 16	67.5 ± 7.1	123 ± 13
2613	2577 ± 1	1.042	980 ± 103	173 ± 18	81.2 ± 8.6	140 ± 15
2664	2627 ± 1	1.041	1372 ± 144	249 ± 26	114.8 ± 12.1	214 ± 22
2714	2677 ± 1	1.040	1043 ± 109	149 ± 16	78.1 ± 8.2	128 ± 13
2815	2777 ± 1	1.038	681 ± 72	94.2 ± 9.9	51.3 ± 5.5	82.0 ± 8.6
2916	2876 ± 1	1.036	609 ± 64	85.4 ± 9.0	44.1 ± 4.7	70.6 ± 7.4
3117	3076 ± 1	1.032	319 ± 34	48.4 ± 5.1	26.7 ± 2.9	47.1 ± 5.0
3319	3274 ± 1	1.029	285 ± 30	37.0 ± 4.0	29.7 ± 3.6	33.4 ± 3.6
3519	3473 ± 1	1.027	355 ± 38	40.7 ± 4.5	56.6 ± 7.4	40.0 ± 5.6
$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{747} μb	σ_{767} μb	σ_{789} μb	σ_{828} μb	σ_{836} μb	σ_{1105} μb
1482 ± 1	0.03 ± 0.01	0.64 ± 0.09	0.59 ± 0.08	0.76 ± 0.09	0.32 ± 0.05	0.46 ± 0.07
1681 ± 1	0.10 ± 0.01	2.82 ± 0.32	2.59 ± 0.30	3.20 ± 0.36	1.28 ± 0.17	1.99 ± 0.24
1782 ± 1	0.21 ± 0.02	5.50 ± 0.58	5.20 ± 0.55	6.89 ± 0.73	2.11 ± 0.23	4.26 ± 0.46
1880 ± 1	0.35 ± 0.04	8.81 ± 0.94	8.71 ± 0.93	10.0 ± 1.1	3.32 ± 0.38	6.30 ± 0.68
1981 ± 1	0.62 ± 0.07	16.9 ± 1.8	16.5 ± 1.7	17.5 ± 1.8	6.67 ± 0.72	11.3 ± 1.2
2078 ± 1	1.01 ± 0.11	26.0 ± 2.8	26.3 ± 2.8	28.4 ± 3.0	11.1 ± 1.2	18.3 ± 2.0
2180 ± 1	1.58 ± 0.17	41.1 ± 4.3	40.5 ± 4.3	43.3 ± 4.6	17.6 ± 1.9	28.2 ± 3.0
2277 ± 1	2.32 ± 0.25	60.1 ± 6.3	59.8 ± 6.3	62.3 ± 6.5	25.3 ± 2.7	40.3 ± 4.2
2379 ± 1	3.27 ± 0.34	83.5 ± 8.8	85.2 ± 8.9	84.7 ± 8.9	39.9 ± 4.2	53.1 ± 5.6
2476 ± 1	4.66 ± 0.49	116 ± 12	120 ± 13	116 ± 12	53.3 ± 5.6	77.4 ± 8.1
2577 ± 1	5.52 ± 0.58	145 ± 15	148 ± 16	139 ± 15	73.5 ± 7.8	89.9 ± 9.5
2627 ± 1	7.68 ± 0.81	199 ± 21	205 ± 21	197 ± 21	95.4 ± 10.0	124 ± 13
2677 ± 1	5.86 ± 0.62	147 ± 15	153 ± 16	127 ± 13	84.4 ± 8.9	79.7 ± 8.4
2777 ± 1	3.77 ± 0.40	94.2 ± 9.9	93.1 ± 9.8	81.4 ± 8.6	55.7 ± 5.9	54.8 ± 5.8
2876 ± 1	3.37 ± 0.36	82.3 ± 8.6	81.8 ± 8.6	71.8 ± 7.5	52.3 ± 5.5	46.5 ± 5.0
3076 ± 1	2.04 ± 0.22	45.5 ± 4.8	44.4 ± 4.7	47.3 ± 5.0	29.6 ± 3.2	32.4 ± 3.5
3274 ± 1	1.89 ± 0.20	35.9 ± 3.8	36.6 ± 3.9	34.0 ± 3.7	23.4 ± 2.5	26.4 ± 2.9
3473 ± 1	2.00 ± 0.23	35.2 ± 5.5	36.9 ± 4.0	41.1 ± 4.5	23.6 ± 2.6	28.9 ± 3.3

Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{1236} μb	σ_{1323} μb	σ_{1536} μb	σ_{1543} μb	σ_{1587} μb
1482 ± 1	-	0.10 ± 0.03	0.13 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.26 ± 0.04
1681 ± 1	-	0.19 ± 0.06	0.48 ± 0.09	0.61 ± 0.10	0.57 ± 0.10
1782 ± 1	0.40 ± 0.07	0.28 ± 0.06	0.84 ± 0.11	0.92 ± 0.11	0.52 ± 0.08
1880 ± 1	0.69 ± 0.13	0.58 ± 0.13	1.66 ± 0.21	1.51 ± 0.20	1.13 ± 0.17
1981 ± 1	0.94 ± 0.15	0.54 ± 0.11	2.69 ± 0.31	2.82 ± 0.32	1.92 ± 0.23
2078 ± 1	1.75 ± 0.29	1.48 ± 0.30	3.98 ± 0.48	4.53 ± 0.53	2.90 ± 0.38
2180 ± 1	2.11 ± 0.33	2.07 ± 0.30	6.82 ± 0.76	6.55 ± 0.73	4.73 ± 0.55
2277 ± 1	4.92 ± 0.72	2.67 ± 0.42	9.15 ± 1.03	9.28 ± 1.04	6.42 ± 0.77
2379 ± 1	9.09 ± 1.17	3.76 ± 0.48	12.2 ± 1.3	12.0 ± 1.3	8.84 ± 0.97
2476 ± 1	10.3 ± 1.3	6.06 ± 0.78	17.3 ± 1.9	17.5 ± 1.9	13.3 ± 1.5
2577 ± 1	10.6 ± 1.4	8.61 ± 1.09	20.6 ± 2.3	20.8 ± 2.3	15.4 ± 1.7
2627 ± 1	14.3 ± 1.7	10.3 ± 1.3	28.1 ± 3.0	28.9 ± 3.1	21.8 ± 2.4
2677 ± 1	12.5 ± 1.6	8.52 ± 1.03	18.0 ± 1.9	17.0 ± 1.9	13.9 ± 1.5
2777 ± 1	18.3 ± 2.3	5.73 ± 0.80	11.7 ± 1.3	11.5 ± 1.3	8.76 ± 1.06
2876 ± 1	14.1 ± 1.7	5.29 ± 0.72	11.0 ± 1.2	10.7 ± 1.2	8.09 ± 0.94
3076 ± 1	22.0 ± 2.4	2.77 ± 0.55	5.73 ± 0.75	7.76 ± 0.97	5.35 ± 0.72
3274 ± 1	29.9 ± 3.3	1.37 ± 0.37	5.20 ± 0.68	5.67 ± 0.71	2.67 ± 0.46
3473 ± 1	26.6 ± 3.0	2.81 ± 0.84	5.27 ± 0.91	6.31 ± 0.93	2.20 ± 0.51
$E_{c.m.}$ (keV)	σ_{1670} μb	$\sigma_{\gamma 0}$ μb	σ_m μb	σ_T μb	$S - factor$ ($\times 10^9$ MeV·b)
1482 ± 1	0.23 ± 0.05	-	-	10.7 ± 1.3	15.0 ± 1.8
1681 ± 1	0.80 ± 0.12	1.02 ± 0.18	1.43 ± 0.22	44.8 ± 4.8	13.2 ± 1.4
1782 ± 1	1.51 ± 0.17	2.02 ± 0.24	1.97 ± 0.23	87.2 ± 9.5	12.9 ± 1.4
1880 ± 1	2.23 ± 0.27	2.01 ± 0.30	4.77 ± 0.53	137 ± 15	11.0 ± 1.2
1981 ± 1	3.96 ± 0.43	4.83 ± 0.55	7.12 ± 0.79	251 ± 27	11.3 ± 1.2
2078 ± 1	6.64 ± 0.74	8.90 ± 1.06	11.3 ± 1.5	399 ± 44	10.7 ± 1.2
2180 ± 1	9.58 ± 1.04	9.48 ± 1.09	18.4 ± 2.0	620 ± 67	10.1 ± 1.1
2277 ± 1	13.8 ± 1.5	14.7 ± 1.7	24.2 ± 2.7	893 ± 98	9.27 ± 1.02
2379 ± 1	19.2 ± 2.0	16.6 ± 1.8	28.5 ± 3.4	1227 ± 137	8.24 ± 0.92
2476 ± 1	26.6 ± 2.9	22.7 ± 2.5	64.4 ± 7.0	1726 ± 191	7.84 ± 0.87
2577 ± 1	32.6 ± 3.5	22.4 ± 2.5	73.8 ± 8.4	2106 ± 232	6.52 ± 0.72
2627 ± 1	45.1 ± 4.8	39.2 ± 4.3	96.4 ± 10.5	2966 ± 325	7.66 ± 0.84
2677 ± 1	30.4 ± 3.2	22.3 ± 2.4	90.5 ± 10.2	2118 ± 236	4.59 ± 0.51
2777 ± 1	18.9 ± 2.1	13.8 ± 1.7	57.8 ± 7.0	1380 ± 164	2.14 ± 0.25
2876 ± 1	17.4 ± 1.9	13.8 ± 1.5	59.6 ± 6.6	1228 ± 144	1.39 ± 0.16
3076 ± 1	10.3 ± 1.2	8.10 ± 0.97	29.7 ± 4.4	704 ± 96	0.44 ± 0.06
3274 ± 1	8.05 ± 0.95	5.71 ± 0.73	23.8 ± 3.6	602 ± 92	0.22 ± 0.03
3473 ± 1	7.99 ± 1.07	5.87 ± 0.84	-	717 ± 103	0.17 ± 0.02



Σχήμα 4.5: Ενεργειακό διάγραμμα του παραγόμενου πυρήνα ^{81}Br της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$. Στα δεξιά της κάθε στάθμης αναγράφεται η ενέργειά της και στα αριστερά η ιδιοστροφορμή και η ομοτιμία της. Στο διάγραμμα φαίνονται και οι μεταπτώσεις που τροφοδοτούν τη βασική στάθμη του πυρήνα και οδήγησαν σε αναλύσιμη φωτοκορυφή.



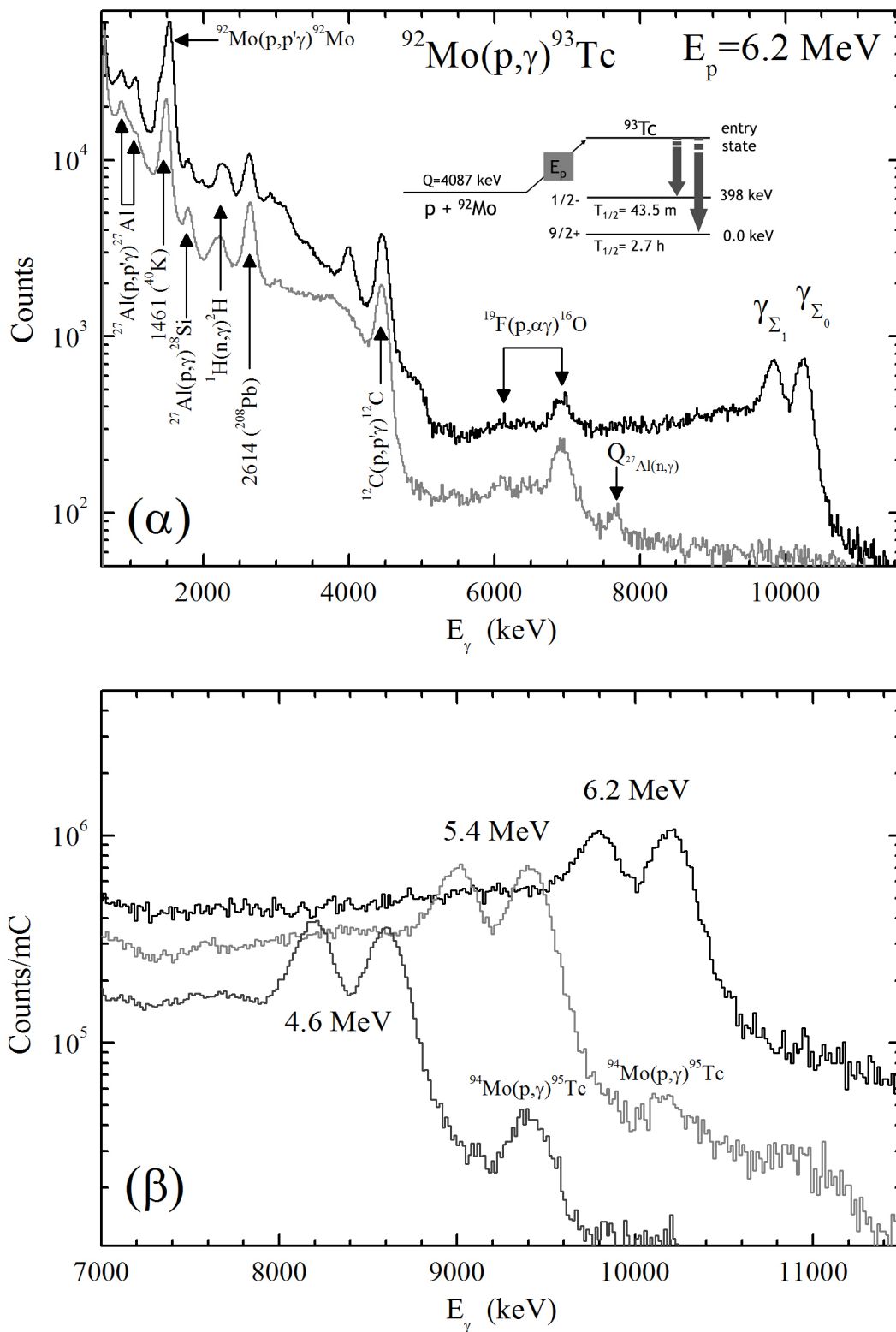
Σχήμα 4.6: Γωνιακές κατανομές ακτίνων γ της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$. Οι τιμές των συντελεστών A_0 που υπεισέρχονται στον προσδιορισμό της ενεργού διατομής υπολογίστηκαν από το μέσο όρο των πειραματικών σημείων των γωνιακών κατανομών.

4.3 Η αντίδραση $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$

Η αντίδραση $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ μελετήθηκε στην ενεργειακή περιοχή από 2.0 έως 6.2 MeV. Χρησιμοποιήθηκε αυτο-υποστηριζόμενος, ισοτοπικά εμπλουτισμένος (92.8%) στόχος ^{92}Mo , το πάχος του οποίου ήταν $1123 \pm 79 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$ με βάση την ανάλυση RBS. Το ρεύμα της δέσμης πρωτονίων στο στόχο κυμάνθηκε μεταξύ 0.8 και 80 nA ($Q=0.7-50 \mu\text{C}$). Στο σχήμα 4.7(α) φαίνονται τυπικά φάσματα ακτίνων γ που μετρήθηκαν με τον αθροιστικό κρύσταλλο του NaI. Το φάσμα με μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στο φάσμα φωτονίων που ανιχνεύθηκαν με στόχο ^{92}Mo , στα 6.2 MeV ενώ το φάσμα με γκρι μετρήθηκε με τη δέσμη να προσπίπτει στα φύλλα Au που είχαν στερεωθεί στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου, στην ίδια ενέργεια δέσμης.

Εκτός από την αθροιστική κορυφή γ_{Σ_0} , που αντιστοιχεί στην άθροιση όλων των ακτίνων γ μίας διαδοχής από τη στάθμη εισόδου στη βασική κατάσταση, παρατηρεί κανείς και μία δεύτερη αθροιστική κορυφή γ_{Σ_1} , που προκύπτει από την άθροιση των φωτονίων που καταλήγουν στη μετασταθή στάθμη του σύνθετου πυρήνα ^{93}Tc στα 392 keV. Η εμφάνιση της δεύτερης αυτής αθροιστικής κορυφής οφείλεται στο χρόνο ημιζωής της εν λόγω μετασταθούς στάθμης (43.5 m), οποίος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο απόκρισης του ανιχνευτή (250 ns). Ως αποτέλεσμα η μετάπτωση της στάθμης αυτής στη βασική κατάσταση του ^{93}Tc δεν αθροίζεται με τα υπόλοιπα φωτόνια της διαδοχής, δημιουργώντας, με αυτόν τον τρόπο, μία δεύτερη αθροιστική κορυφή με ενέργεια κατά 392 keV μικρότερη από αυτήν της γ_{Σ_0} . Εκτός από τις αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$, στο φάσμα εμφανίζονται οι κορυφές των αντιδράσεων $^{92}\text{Mo}(p,p'\gamma)^{92}\text{Mo}$, $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}(p,p'\gamma)^{12}\text{C}$, $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$, $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$, $^{27}\text{Al}(p,p'\gamma)^{27}\text{Al}$ καθώς και οι κορυφές στα 1461 και 2614 keV από τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα ^{40}K και ^{208}Pb .

Στο σχήμα 4.7(β) παρουσιάζονται φάσματα της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ που μετρήθηκαν σε ενέργειες δέσμης πρωτονίων 4.6, 5.4 και 6.2 MeV. Στα φάσματα των 4.6 και 5.4 MeV εκτός των κορυφών γ_{Σ_0} και γ_{Σ_1} διακρίνεται καθαρά και η αθροιστική κορυφή της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$, η ένταση της οποίας είναι συγκρίσιμη με αυτή των κορυφών γ_{Σ_0} και γ_{Σ_1} παρά το γεγονός ότι η συγκέντρωση του ^{94}Mo είναι πολύ μικρή στο εν λόγω δείγμα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις υψηλές τιμές της ενεργού διατομής που παρουσιάζει η αντίδραση $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$, οι οποίες, είναι έως και 7.5 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ στις ενέργειες αυτές. Η εμβαδομέτρηση των δύο αθροιστικών κορυφών γ_{Σ_0} και γ_{Σ_1} έγινε μέσω προσομοίωσης με καμπύλες Gauss



Σχήμα 4.7: (α) Με μαύρο χρώμα φάσμα από την αντίδραση $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ στα 6.2 MeV, ενώ με γκρι το αντίστοιχο, με τη δέσμη πρωτονίων να προσπίπτει σε φύλλα Au, τοποθετημένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου. (β) Αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 4.6, 5.4$ και 6.2 MeV.

Πίνακας 4.4: Ενεργές διατομές των αντιδράσεων $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,g}\text{Tc}$, $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,m}\text{Tc}$ και $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ μαζί με τον αστροφυσικό παράγοντα S .

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	screening factor f_s	σ_g (μb)	σ_m (μb)	σ_T (μb)	$S - factor$ ($\times 10^9 \text{ MeV}\cdot\text{b}$)
2000	1941 ± 8	1.102	1.68 ± 0.66	3.17 ± 0.48	4.85 ± 0.82	81.1 ± 13.6
2400	2340 ± 7	1.076	6.83 ± 1.05	14.4 ± 2.2	21.2 ± 2.4	29.9 ± 3.4
2800	2739 ± 6	1.059	24.4 ± 4.3	33.2 ± 4.8	57.7 ± 6.5	12.2 ± 1.4
3800	3733 ± 5	1.037	188 ± 30	137 ± 21	325 ± 37	2.57 ± 0.29
4200	4130 ± 5	1.032	325 ± 44	212 ± 32	537 ± 55	1.63 ± 0.17
4600	4527 ± 5	1.028	504 ± 77	269 ± 40	773 ± 87	1.03 ± 0.12
5000	4924 ± 4	1.024	686 ± 95	346 ± 51	1032 ± 108	0.67 ± 0.07
5400	5321 ± 4	1.022	817 ± 117	466 ± 70	1283 ± 136	0.44 ± 0.05
5800	5718 ± 4	1.019	1071 ± 151	666 ± 105	1736 ± 184	0.34 ± 0.04
6200	6114 ± 4	1.017	1229 ± 183	671 ± 107	1899 ± 212	0.23 ± 0.03

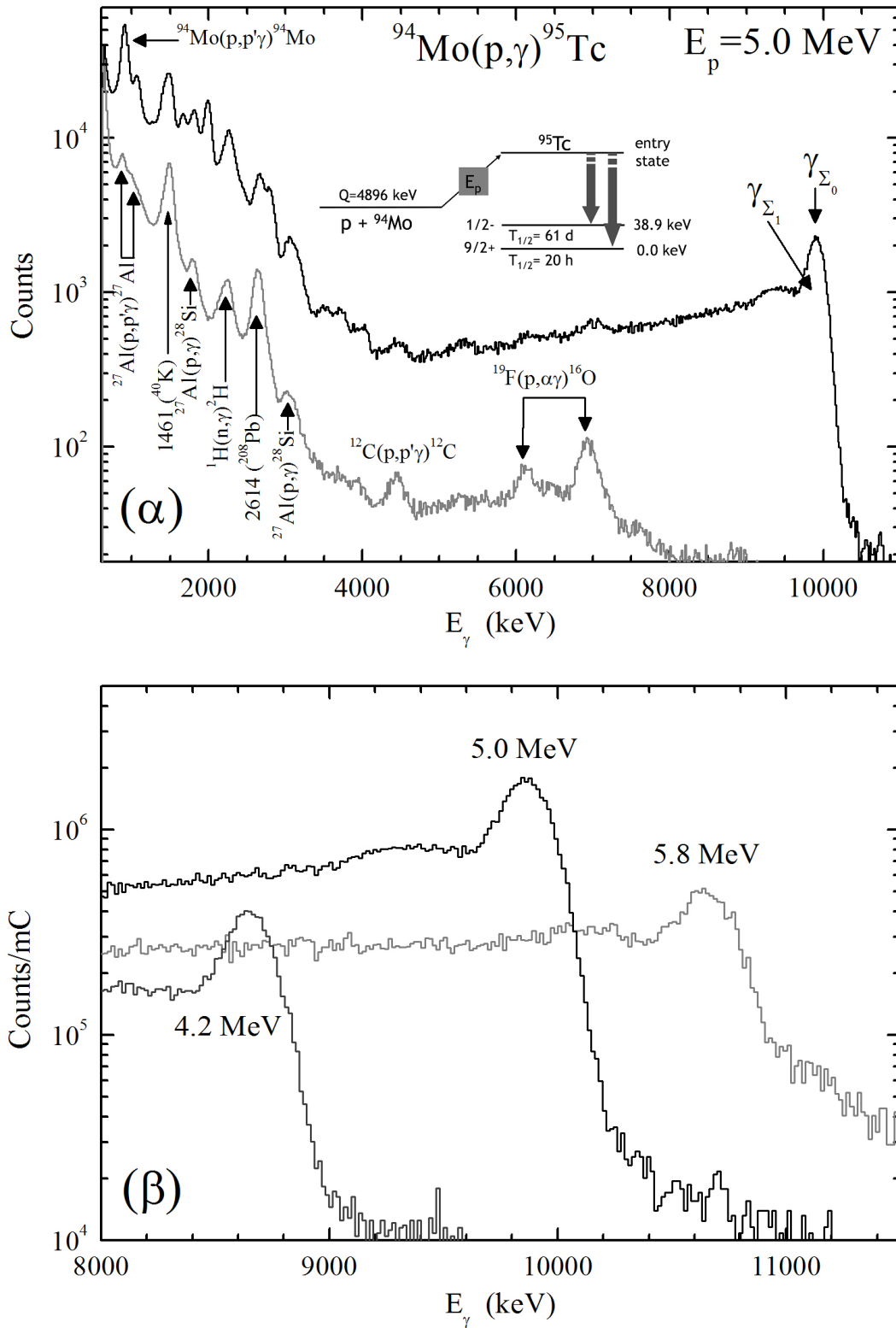
μετά την αφαίρεση του υποβάθρου για την οποία θεωρήθηκαν πολυώνυμα 3^{ου} και 1^{ου} βαθμού, αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της ανιχνευτικής ικανότητας του κρυστάλλου έγινε εφαρμογή της μεθόδου In/Out.

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές των μερικών ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,g}\text{Tc}$ και $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,m}\text{Tc}$ καθώς και οι τιμές της ολικής ενεργού διατομής σ_T και του αστροφυσικού παράγοντα S της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$, για όλες τις ενέργειες δέσμης που μελετήθηκαν. Η ολική ενεργός διατομή σ_T σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονται περισσότερες από μία αθροιστικές κορυφές θεωρείται ίση με το άθροισμα των μερικών ενεργών διατομών. Ο αστροφυσικός παράγοντας S υπολογίστηκε από τις σχέσεις (2.9) και (2.3). Για την ενέργεια στο σύστημα του κέντρου μάζας και το διορθωτικό παράγοντα screening f_s χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (4.5) και (2.19), αντίστοιχα. Η δραστική ενέργεια της δέσμης E_{eff} υπολογίστηκε από τη σχέση (4.6) ενώ η απώλεια ενέργειας της δέσμης πρωτονίων στο κέντρο των στόχων Mo υπολογίστηκε μέσω προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος *SRIM*. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α'.

4.4 Η αντίδραση $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$

Για τη μελέτη της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$ έγινε χρήση δέσμης πρωτονίων ενέργειας 3.0 έως 6.2 MeV και έντασης 1 έως 18 nA ($Q=0.9-6 \mu\text{C}$) στο στόχο. Ο στόχος ήταν ένα ισοτοπικά εμπλουτισμένο ($92.0\pm 0.5\%$) φύλλο ^{94}Mo , πάχους $671 \pm 47 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$ (RBS). Ένα τυπικό φάσμα της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$, το οποίο μετρήθηκε για ενέργεια δέσμης 5.0 MeV, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8(α) με μαύρο χρώμα. Στο φάσμα φαίνεται η αθροιστική κορυφή της παρούσας αντίδρασης καθώς και οι κορυφές των αντιδράσεων $^{94}\text{Mo}(p,p'\gamma)^{94}\text{Mo}$, $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}(p,p'\gamma)^{12}\text{C}$, $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$, $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ και $^{27}\text{Al}(p,p'\gamma)^{27}\text{Al}$. Η αντίδραση $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$ οδηγεί στη δημιουργία του σύνθετου πυρήνα ^{95}Tc , ο οποίος, όπως και στην περίπτωση της προηγούμενης ενότητας, εμφανίζει μία μεταστάθη στάθμη αλλά μόλις 39 keV υψηλότερα από τη βασική. Η μικρή ενεργειακή διαφορά καθιστά αδύνατο το διαχωρισμό των δύο αθροιστικών κορυφών καθώς η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή φτάνει τα 200 keV για ακτίνες γ σε αυτήν την ενεργειακή περιοχή. Στο ίδιο σχήμα με γκρι χρώμα φαίνεται και το συλλεγόμενο φάσμα από το βομβαρδισμό των φύλλων Au που είναι στερεωμένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου.

Στο σχήμα 4.8(β) παρουσιάζονται φάσματα της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$ που μετρήθηκαν σε ενέργειες δέσμης 4.2, 5.0 και 5.8 MeV. Όπως παρατηρείται στα φάσματα αυτά, παρά το γεγονός ότι είναι κανονικοποιημένα στο ίδιο φορτίο (1 mC), οι αθροιστικές κορυφές δεν παρουσιάζουν σταθερά αυξανόμενη ή μειούμενη ένταση όπως στα αντίστοιχα φάσματα της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ (σχήμα 4.7β). Η ενεργός διατομή μίας μη συντονιστικής αντίδρασης (p,γ) έχει, γενικά, την τάση να αυξάνει με την αύξηση της ενέργειας της δέσμης με εξαίρεση τις ενεργειακές περιοχές που κάποιο ανταγωνιστικό κανάλι ανοίγει. Στις περιοχές αυτές η ενεργός διατομή της αντίδρασης (p,γ) πέφτει καθώς το ανταγωνιστικό κανάλι απορροφά ροή. Στην προκειμένη περίπτωση η πτώση που παρατηρείται οφείλεται στο κανάλι $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94}\text{Tc}$ το οποίο ανοίγει στα 5038 keV. Οι τιμές της ενεργού διατομής σ_T και του αστροφυσικού παράγοντα S που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5. Η ανιχνευτική ικανότητα του κρυστάλλου υπολογίστηκε με βάση τη μέθοδο In/Out.



Σχήμα 4.8: (α) Με μαύρο χρώμα φάσμα από την αντίδραση $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$ στα 5.0 MeV, ενώ με γκρι το αντίστοιχο, με τη δέσμη πρωτονίων να προσπίπτει σε φύλλα Au, τοποθετημένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου. (β) Αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 4.2, 5.0$ και 5.8 MeV.

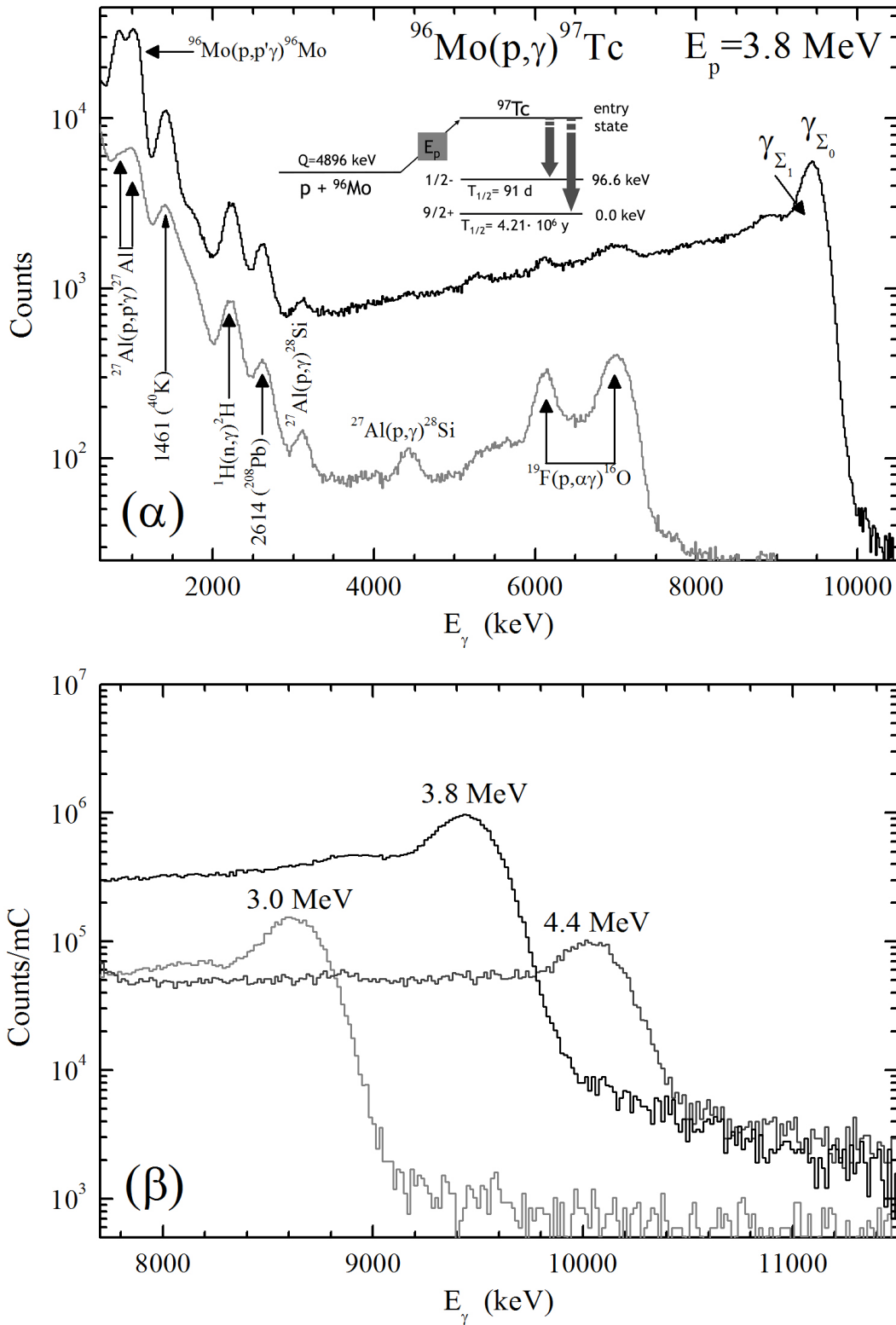
Πίνακας 4.5: Ενεργός διατομή σ_T και αστροφυσικός παράγοντας S της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$.

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	screening factor f_s	σ_T (μb)	$S - factor$ ($\times 10^9 \text{ MeV}\cdot\text{b}$)
3000	2950 ± 4	1.053	258 ± 49	23.6 ± 4.4
3400	3348 ± 3	1.044	577 ± 98	13.7 ± 2.3
3800	3744 ± 3	1.037	1229 ± 212	9.48 ± 1.63
4200	4141 ± 3	1.032	2255 ± 411	6.71 ± 1.22
4600	4538 ± 3	1.027	3742 ± 701	4.90 ± 0.92
5000	4934 ± 3	1.024	6518 ± 1283	4.18 ± 0.82
5400	5330 ± 2	1.021	2894 ± 541	0.99 ± 0.18
5800	5727 ± 2	1.019	1679 ± 327	0.33 ± 0.06
6200	6123 ± 2	1.017	1146 ± 222	0.13 ± 0.03

4.5 Η αντίδραση $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$

Η αντίδραση $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ μελετήθηκε στην ενεργειακή περιοχή από 2.2 έως 5.2 MeV. Η ένταση της δέσμης στο στόχο κυμάνθηκε από 2 έως 49 nA, ρεύμα που αντιστοιχεί σε ολικό συλλεγόμενο φορτίο μεταξύ 2 και 18 μC . Για τις μετρήσεις της παρούσας αντίδρασης χρησιμοποιήθηκε ένας αυτο-υποστηριζόμενος, ισοτοπικά εμπλουτισμένος ($95.9 \pm 0.5\%$) στόχος ^{96}Mo . Το πάχος του στόχου υπολογίστηκε ίσο με $700 \pm 49 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ με τη βοήθεια της μεθόδου RBS. Στο σχήμα 4.9(α) παρουσιάζονται τυπικά φάσματα ακτίνων γ από το βομβαρδισμό του στόχου ^{96}Mo (μαύρο χρώμα) και των φύλλων Au (γκρι χρώμα) όπως συλλέχθηκαν για ενέργεια δέσμης $E_p=3.8 \text{ MeV}$. Στο σχήμα 4.9(β) φαίνονται τα φάσματα της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης 3.0, 3.8 και 4.4 MeV. Το άνοιγμα του καναλιού $^{96}\text{Mo}(p,n)^{96}\text{Tc}$ στα 3756 keV προκαλεί πτώση στην ενεργό διατομή της αντίδρασης (p,γ) και κατά συνέπεια στην ένταση των αθροιστικών της κορυφών. Για τους λόγους που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα η δεύτερη αθροιστική κορυφή, που προκαλεί η μετασταθής στάθμη των 97 keV του σύνθετου πυρήνα ^{97}Tc , δεν είναι δυνατόν να διαχωριστεί από τη βασική αθροιστική κορυφή.

Η ενεργός διατομή σ_T και ο αστροφυσικός παράγοντας S της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ για όλες τις ενέργειες δέσμης που μελετήθηκε αναγράφονται στον πίνακα 4.6. Η ολική ανιχνευτική ικανότητα του κρυστάλλου υπολογίστηκε με βάση τη μέθοδο In/Out.



Σχήμα 4.9: (α) Με μαύρο χρώμα φάσμα από την αντίδραση $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ στα 3.8 MeV, ενώ με γκρι το αντίστοιχο, με τη δέσμη πρωτονίων να προσπίπτει σε φύλλα Au, τοποθετημένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου. (β) Αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 3.0, 3.8$ και 4.4 MeV.

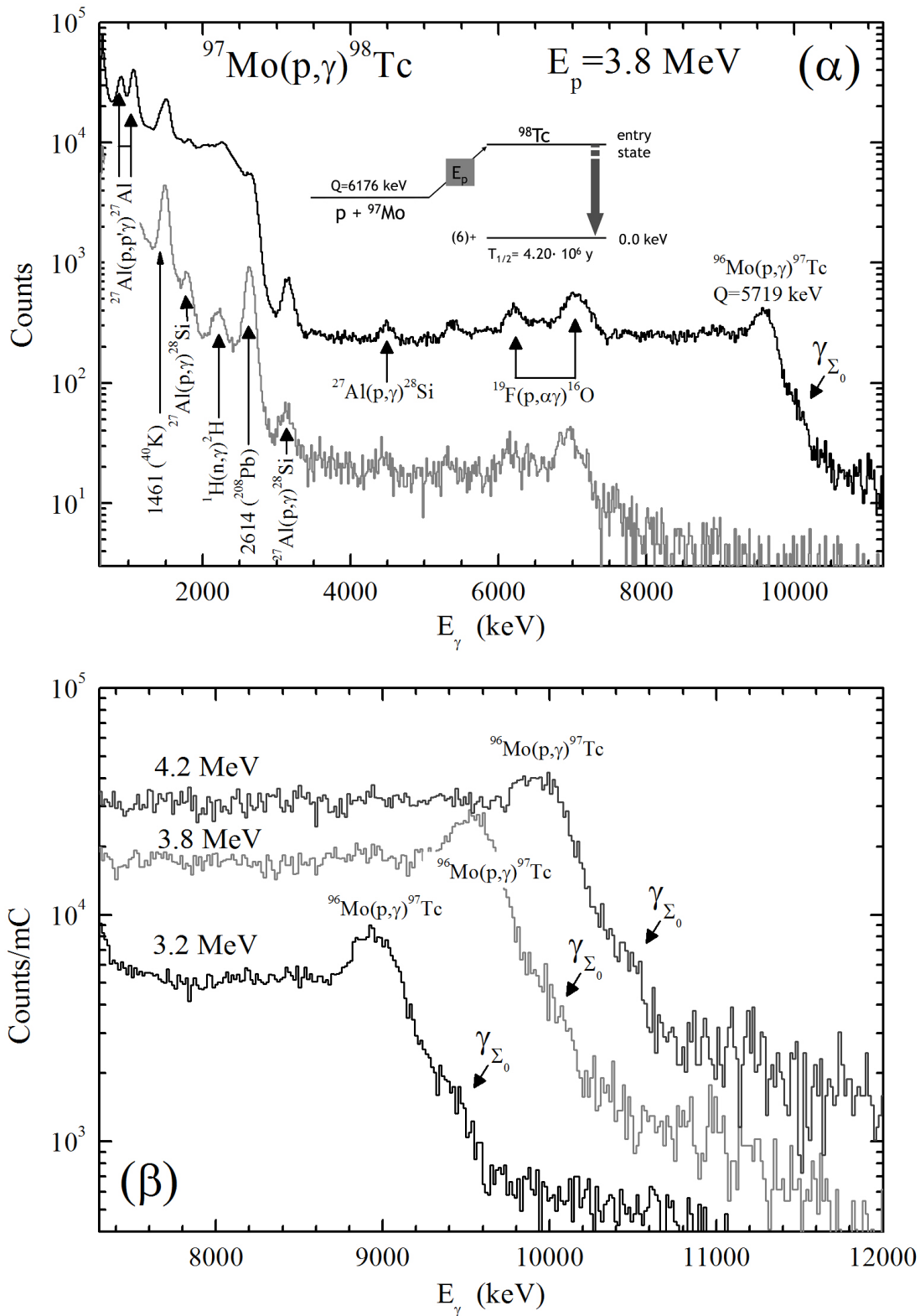
Πίνακας 4.6: Ενεργός διατομή σ_T και αστροφυσικός παράγοντας S της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$.

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	screening factor f_s	σ_T (μb)	$S - factor$ ($\times 10^9 \text{ MeV}\cdot\text{b}$)
2200	2155 ± 4	1.086	17.2 ± 3.4	70.3 ± 14.0
2600	2553 ± 4	1.066	125 ± 24	61.1 ± 11.5
3000	2950 ± 4	1.053	532 ± 96	48.9 ± 8.8
3400	3348 ± 3	1.044	1631 ± 300	38.8 ± 7.1
3700	3645 ± 3	1.038	3079 ± 560	31.0 ± 5.6
3800	3745 ± 3	1.037	3775 ± 707	29.2 ± 5.5
4000	3943 ± 3	1.034	1659 ± 312	7.81 ± 1.47
4400	4340 ± 3	1.029	371 ± 67	0.72 ± 0.13
4800	4736 ± 3	1.026	292 ± 63	0.26 ± 0.06
5200	5133 ± 3	1.023	356 ± 77	0.16 ± 0.04

4.6 Η αντίδραση $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$

Στο σχήμα 4.10(α) με μαύρο χρώμα παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ για ενέργεια δέσμης ίση με 3.8 MeV. Η αθροιστική κορυφή της εν λόγω αντίδρασης επικάθεται στα δεξιά της κατά πολύ ισχυρότερης κορυφής της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ χωρίς όμως να επικαλύπτεται από αυτήν. Η διαφορά στις ενεργές διατομές των δύο αυτών αντιδράσεων, η οποία φτάνει έως και ένα παράγοντα 85, οφείλεται εν μέρη στο ανοιχτό κανάλι της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,n)^{97}\text{Tc}$ ($Q_{(p,n)} = -1103 \text{ keV}$) το οποίο απορροφά ροή από το κανάλι (p,γ) . Στο ίδιο σχήμα με γκρι χρώμα παρουσιάζεται και το φάσμα φωτονίων που συλλέχθηκε από το βομβαρδισμό των φύλλων Au που είναι στερεωμένα στο πίσω μέρος του στόχου. Στο σχήμα 4.10(β) φαίνονται τα φάσματα της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης στα 3.2, 3.8 και 4.2 MeV.

Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργού διατομής και του αστροφυσικού παράγοντα της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης μεταξύ 3.0 και 5.0 MeV. Για τη διεξαγωγή των παρόντων μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένας λεπτός, ισοτοπικά εμπλουτισμένος ($92.9 \pm 0.5\%$) στόχος ^{97}Mo , το πάχος του οποίου μετρήθηκε με ανάλυση RBS και βρέθηκε ίσο με $252 \pm 18 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$. Το ρεύμα της δέσμης πρωτονίων στο στόχο κυμάν-



Σχήμα 4.10: (α) Με μαύρο χρώμα φάσμα από την αντίδραση $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ στα 3.8 MeV, ενώ με γκρι το αντίστοιχο, με τη δέσμη πρωτονίων να προσπίπτει σε φύλλα Au, τοποθετημένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου. (β) Αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 3.2, 3.8$ και 4.2 MeV.

Πίνακας 4.7: Ενεργός διατομή και αστροφυσικός παράγοντας της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$.

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	screening factor f_s	σ_T (μb)	$S - factor$ ($\times 10^7 \text{ MeV}\cdot\text{b}$)
3000	2962 ± 1	1.053	4.83 ± 1.81	42.5 ± 15.9
3200	3161 ± 1	1.048	8.97 ± 2.28	39.0 ± 9.9
3400	3359 ± 1	1.043	10.5 ± 3.5	24.2 ± 8.1
3600	3557 ± 1	1.040	13.9 ± 5.1	17.8 ± 6.5
3800	3755 ± 1	1.037	20.6 ± 8.8	15.5 ± 6.7
4000	3953 ± 1	1.034	26.4 ± 11.1	12.2 ± 5.1
4200	4151 ± 1	1.031	33.6 ± 16.1	9.81 ± 4.71
4600	4548 ± 1	1.027	49.8 ± 30.0	6.42 ± 3.87
5000	4944 ± 1	1.024	78.1 ± 26.9	4.94 ± 1.70

θηκε μεταξύ 3 και 90 nA ($Q=5-80 \mu\text{C}$). Για τον υπολογισμό της ανιχνευτικής ικανότητας του κρυστάλλου εφαρμόστηκε η σχέση (3.21) και καθώς ο παραγόμενος πυρήνας ^{98}Tc της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ είναι ένας περιπτώς-περιπτώς πυρήνας χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι του πίνακα 3.3.

4.7 Η αντίδραση $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$

Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$ μετρήθηκε στην ενεργειακή περιοχή μεταξύ 2.0 και 5.0 MeV. Χρησιμοποιήθηκε ένας αυτο-υποστηριζόμενος στόχος ^{98}Mo , ισοτοπικά εμπλουτισμένος κατά $97.6 \pm 0.8\%$. Το πάχος του βρέθηκε ίσο με $328 \pm 23 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$ με τη βοήθεια της μεθόδου RBS. Το ρεύμα της δέσμης πρωτονίων στο στόχο κυμάνθηκε μεταξύ 3 και 172 nA ($Q=6-200 \mu\text{C}$). Η ανάλυση της αθροιστικής κορυφής της παρούσας αντίδρασης στη θέση Out του ανιχνευτή ήταν εξαιρετικά δύσκολη (σχήμα 3.26) σε όλες τις ενεργειές δέσμης που μελετήθηκαν. Για το λόγο αυτό για τον υπολογισμό της απόλυτης ανιχνευτικής ικανότητας του κρυστάλλου έγινε χρήση της σχέσης (3.21) θεωρώντας τις παραμέτρους που αντιστοιχούν σε άρτιο-περιπτώ παραγόμενο πυρήνα (πίνακας 3.3). Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργού διατομής σ_T και του αστροφυσικού παράγοντα S για κάθε ενέργεια δέσμης που μελετήθηκε η παρούσα αντίδραση.

Στο σχήμα 4.11(a) φαίνεται ένα τυπικό φάσμα ακτίνων γ που συλλέχθηκε από το βομ-

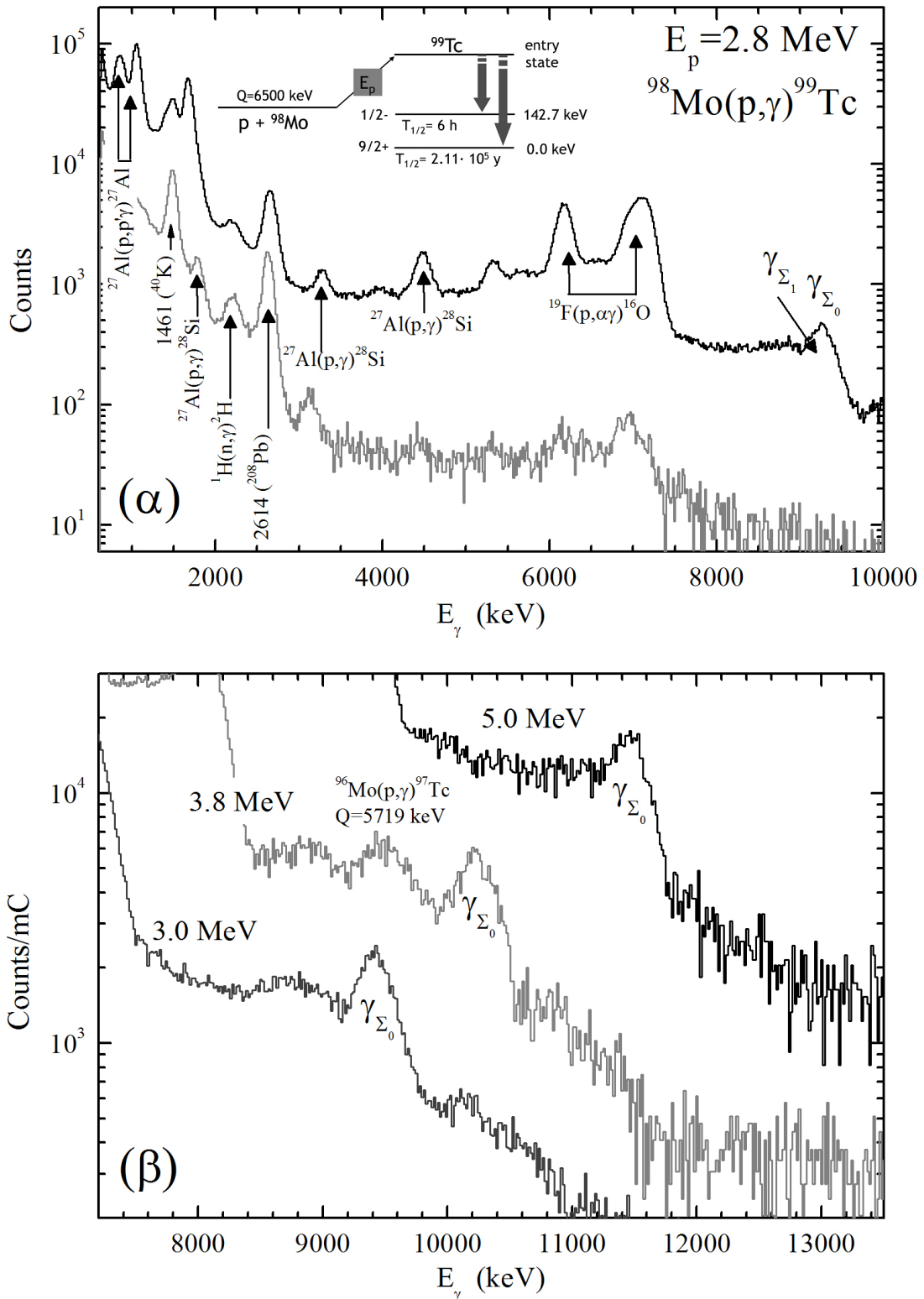
Πίνακας 4.8: Ενεργός διατομή σ_T και αστροφυσικός παράγοντας S της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$.

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	screening factor f_s	σ_T (μb)	$S - factor$ ($\times 10^7 \text{ MeV}\cdot\text{b}$)
2000	1969 ± 2	1.099	4.17 ± 0.92	5778 ± 1279
2200	2167 ± 2	1.085	16.2 ± 3.5	6166 ± 1336
2400	2366 ± 2	1.075	50.2 ± 10.8	6231 ± 1345
2500	2465 ± 2	1.070	81.3 ± 17.8	6078 ± 1331
2600	2564 ± 2	1.066	68.8 ± 14.8	3194 ± 687
2800	2762 ± 2	1.059	14.3 ± 3.1	276 ± 60
3000	2961 ± 2	1.053	14.3 ± 3.1	127 ± 27
3400	3357 ± 2	1.043	22.7 ± 4.9	52.5 ± 11.3
3800	3754 ± 2	1.037	45.3 ± 9.9	34.3 ± 7.5
4400	4348 ± 1	1.029	93.9 ± 20.3	18.0 ± 3.9
5000	4943 ± 1	1.024	143 ± 31	9.04 ± 1.97

βαρδισμό του στόχου ^{98}Mo (μαύρη γραμμή) και των φύλλων Au στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου (γκρι γραμμή) με δέσμη πρωτονίων ενέργειας $E_p = 2.8 \text{ MeV}$. Εκτός της αθροιστικής κορυφής της παρούσας αντίδρασης εμφανίζονται οι κορυφές των αντιδράσεων $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$, $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$, $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ και $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$. Η ενέργεια της μοναδικής μετασταθούς στάθμης του σύνθετου πυρήνα ^{99}Tc είναι ίση με 143 keV και κατά συνέπεια η αθροιστική της κορυφή δε διακρίνεται στο φάσμα καθώς αλληλεπικαλύπτεται με την αθροιστική κορυφή της βασικής στάθμης. Στο σχήμα 4.11(β) παρουσιάζονται τα φάσματα ακτίνων γ της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης 3.0 , 3.8 και 5.0 MeV . Στο φάσμα των 3.8 MeV παρατηρείται και η αθροιστική κορυφή της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$, η ενεργός διατομή της οποίας παρουσιάζει μέγιστο στην ενέργεια αυτή.

4.8 Η αντίδραση $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$

Η μελέτη της αντίδρασης $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$ πραγματοποιήθηκε για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 4.0$, 4.4 , 4.8 και 5.2 MeV . Το ρεύμα της δέσμης στο στόχο κυμάνθηκε μεταξύ 3 και 10 nA ($Q = 4\text{-}10 \mu\text{C}$). Ο στόχος ήταν ένα λεπτό φύλλο ^{100}Mo , ισοτοπικά εμπλουτισμένο κατά 92.2% και πάχους $303 \pm 21 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$, σύμφωνα με την ανάλυση RBS.



Σχήμα 4.11: (α) Με μαύρο χρώμα φάσμα από την αντίδραση $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$ στα 2.8 MeV, ενώ με γκρι το αντίστοιχο, με τη δέσμη πρωτονίων να προσπίπτει σε φύλλα Au, τοποθετημένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου. (β) Αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 3.0, 3.8$ και 5.0 MeV .

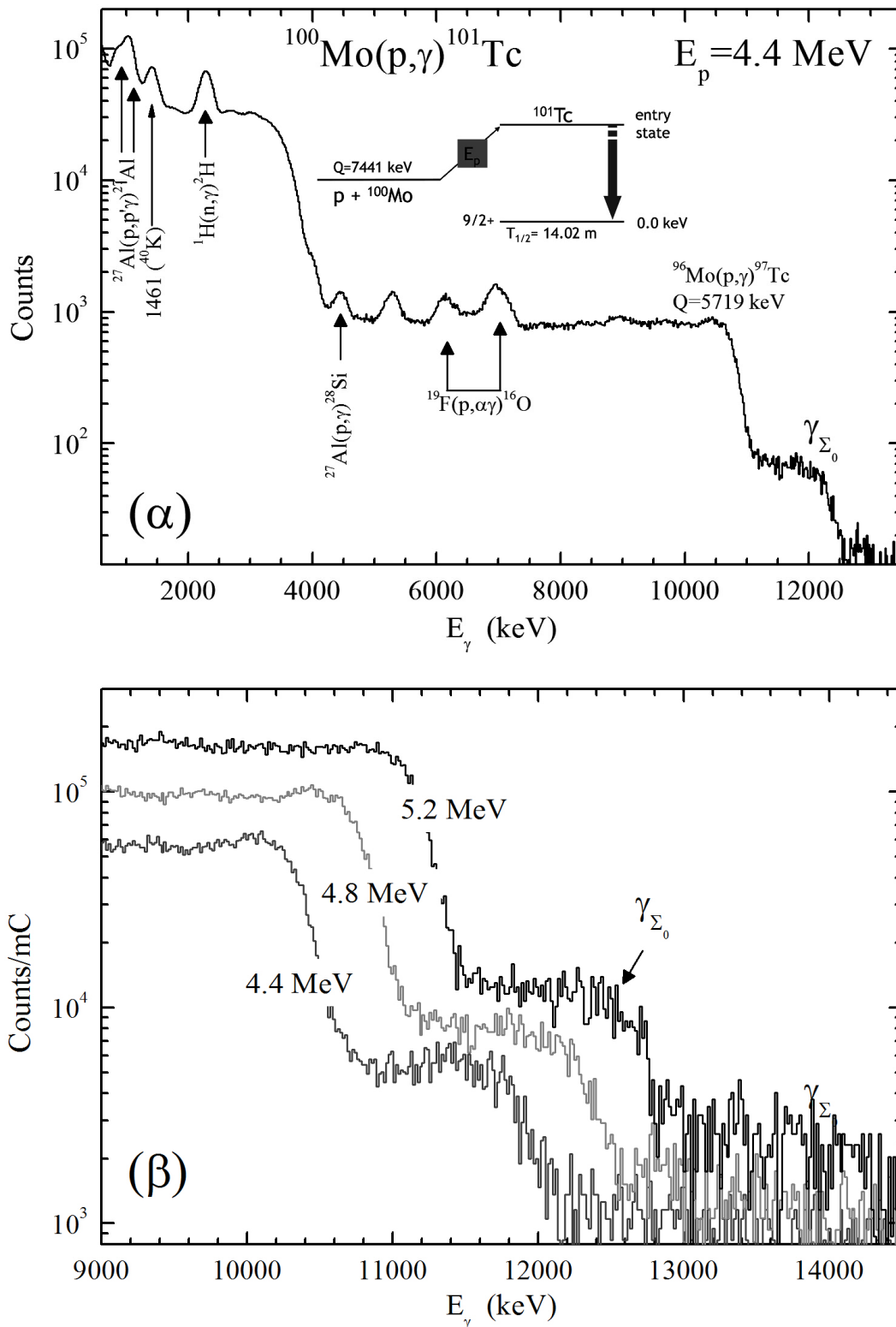
Στο σχήμα 4.12(a) παρουσιάζεται το φάσμα ακτίνων γ της παρούσας αντίδρασης για ενέργεια $E_p=4.4$ MeV. Στο φάσμα αυτό παρατηρείται ότι για $E_\gamma \approx 3.5$ MeV το υπόβαθρο αυξάνεται σημαντικά εξαιτίας του καναλιού $^{100}\text{Mo}(p,n\gamma)^{100}\text{Tc}$ το οποίο ανοίγει για ενέργεια δέσμης $E_p=960$ keV ($Q_{p,n}=-950.4$ keV). Καθώς η κινητική ενέργεια των νετρονίων, που παράγονται στην παραπάνω αντίδραση, μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ των 0 και $(E_{c.m.} + Q_{p,n})$ keV, οι ακτίνες γ που συνοδεύουν την αποδιέγερση του παραγόμενου πυρήνα ^{100}Tc εκπέμπονται σε ένα συνεχές φάσμα ενεργειών δημιουργώντας το συνεχές υπόβαθρο του σχήματος 4.12(a). Στο σχήμα 4.12(β) φαίνονται τα φάσματα της αντίδρασης $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης 4.4, 4.8 και 5.2 MeV. Οι τιμές της ενεργού διατομής και του αστροφυσικού παράγοντα που μετρήθηκαν για την εν λόγω αντίδραση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται στον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9: Ενεργός διατομή σ_T και αστροφυσικός παράγοντας S της αντίδρασης $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$.

E_p (keV)	$E_{c.m.}$ (keV)	screening factor f_s	σ_T (μb)	$S - factor$ ($\times 10^7$ MeV·b)
4000	3953 ± 1	1.034	73.3 ± 16.5	33.8 ± 7.6
4400	4350 ± 1	1.029	137 ± 30	26.2 ± 5.8
4800	4746 ± 1	1.026	166 ± 37	14.8 ± 3.3
5200	5142 ± 1	1.023	306 ± 68	14.0 ± 3.1

Βασιζόμενοι στο γεγονός ότι ο παραγόμενος πυρήνας ^{101}Tc είναι ένας άρτιος-περιττός πυρήνας, η ολική ανιχνευτική ικανότητα του κρυστάλλου υπολογίστηκε από τη σχέση (3.21) εισάγοντας τις αντίστοιχες παραμέτρους του πίνακα 3.3.

Το σχετικό σφάλμα στην ενεργό διατομή των αντιδράσεων που μελετήθηκαν με τη μέθοδο των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων κυμάνθηκε από 14% έως 22% με μοναδικές εξαιρέσεις το πρώτο σημείο της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,g}\text{Tc}$ και το σύνολο των σημείων της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ όπου έφτασε μέχρι και το 60%. Στο ολικό σφάλμα συνεισφέρουν τα επιμέρους σφάλματα α) της μέτρησης του φορτίου που προσπίπτει στο στόχο (3%), β) της μέτρησης του πάχους του στόχου (7%), γ) της εμβαδομέτρησης της αθροιστικής κορυφής και δ) το σφάλμα από τον υπολογισμό της ανιχνευτικής ικανότητας άθροισης του κρυστάλλου, το οποίο, θεωρήθηκε ίσο με 8%, 15% και 21% για μετάπτωση μέσης πολλαπλότητας $\langle M \rangle = 2, 3$ και 4 [37], αντίστοιχα, ενώ θεωρήθηκε ίσο με 20% στις περιπτώσεις που η ανιχνευτική ικανότητα υπολογίστηκε από τη σχέση (3.21).



Σχήμα 4.12: (α) Με μαύρο χρώμα φάσμα από την αντίδραση $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$ στα 4.4 MeV, ενώ με γκρι το αντίστοιχο, με τη δέσμη πρωτονίων να προσπίπτει σε φύλλα Au, τοποθετημένα στο πίσω μέρος της βάσης του στόχου. (β) Αθροιστικές κορυφές της αντίδρασης $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_p = 4.4, 4.8$ και 5.2 MeV.

Κεφάλαιο 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Η σύνθεση των p -πυρήνων υλοποιείται μέσω ενός πολύπλοκου δικτύου αντιδράσεων, όπως συζητήθηκε στο κεφάλαιο 2. Το δίκτυο αυτό, αποτελείται από περίπου 20000 πυρηνικές αντιδράσεις και διασπάσεις β , στις οποίες παίρνουν μέρος σχεδόν 2000 πυρήνες με αποτέλεσμα όλα τα μοντέλα πυρηνοσύνθεσης των p -πυρήνων να βασίζονται, σχεδόν εξ ολοκλήρου, σε ενεργές διατομές που υπολογίζονται με την θεωρία Hauser-Feshbach (HF).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος των προβλέψεων της θεωρίας HF και συγκεκριμένα της εγκυρότητας των πυρηνικών μεγεθών που υπεισέρχονται σε αυτή. Από τα μεγέθη αυτά, σημαντικά είναι το Οπτικό Δυναμικό (“*Optical Model Potential*”, OMP) νουκλεονίου-πυρήνα και α -σωματιδίου-πυρήνα, οι Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων (“*Nuclear Level Densities*”, NLD) και οι Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ (“ *γ -Strength Functions*”, γ SF). Οι μετρήσεις ενεργών διατομών που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγιναν σε ενέργειες πολύ χαμηλότερες του αντίστοιχου δυναμικού Coulomb, με κυρίως στόχο τον έλεγχο των μοντέλων Οπτικού Δυναμικού πρωτονίου-πυρήνα, όπως αναπτύσσεται στις επόμενες παραγράφους. Οι απαραίτητοι θεωρητικοί υπολογισμοί για τον έλεγχο αυτό, έγιναν με τη βοήθεια του κώδικα TALYS (έκδοση 1.4) [5]. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί τόσο φαινομενολογικά όσο και (ημι)μικροσκοπικά μοντέλα Οπτικού Δυναμικού, Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων κλπ για τον υπολογισμό ενεργών διατομών. Στον πίνακα 5.1 αναγράφονται όλα τα μοντέλα Οπτικού Δυναμικού πρωτονίου-πυρήνα

(p -OMP), των Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων (NLD) και των Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ (γ SF) που χρησιμοποιήθηκαν από τον κώδικα *TALYS* στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 5.1: Φαινομενολογικά και (ημι)μικροσκοπικά μοντέλα στην έκδοση 1.4 του κώδικα *TALYS* που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Μέγεθος	Φαινομενολογικά πρότυπα	(Ημι)μικροσκοπικά μοντέλα
p -OMP	Οπτικό Δυναμικό Koning - Delaroche (KD) [7]	Οπτικό Δυναμικό Bauge, Delaroche και Girod (JLM) [6]
NLD	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αέριο Fermi σταθερής θερμοκρασίας (CTFG) [5] 2. Οπισθο-μετατοπισμένο αέριο Fermi (BFM) [42] 3. Γενικευμένο υπερρευστό (GSM) [43][44] 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μικροσκοπικό στατιστικό πρότυπο Demetriou-Goriely (HF-BCS) [45] 2. Μικροσκοπικό συνδυαστικό πρότυπο Hilaire-Goriely (HFB) [9]
γ SF	<ol style="list-style-type: none"> 1. Γενικευμένη Λορεντζιανή των Kopecky - Uhl (KU) [8] 2. Γενικευμένη Λορεντζιανή των Brink - Axel (BA) [46],[47] 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μικροσκοπικό πρότυπο Hartree-Fock BCS-Quasi-particle Random-phase Approximation (HFBCS-QRPA) [48] 2. Μικροσκοπικό πρότυπο Hartree-Fock-Bogolyubov-QRPA (HFB-QRPA) [9] 3. Υβριδικό πρότυπο του Goriely (Hybrid) [49]

Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται αναλυτικά τα δύο πρότυπα Οπτικού Δυναμικού νουκλεονίου-πυρήνα, το φαινομενολογικό πρότυπο των Koning-Delaroche και το (ημι)μικροσκοπικό πρότυπο των Bauge, Delaroche και Girod. Τα πρότυπα των Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων και των Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ περιγράφονται αναλυτικά στις εργασίες [5], [16] και [19] και για το λόγο αυτό δεν θα περιγραφούν στην παρούσα

εργασία.

5.2 Οπτικό Δυναμικό νουκλεονίου-πυρήνα

5.2.1 Το φαινομενολογικό πρότυπο Koning και Delaroche (KD)

Το μοντέλο του Οπτικού Δυναμικού (ΟΔ) βασίζεται στην παραδοχή ότι το δυναμικό που περιγράφει την περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ ενός προσπίπτοντος σωματιδίου και ενός πυρήνα-στόχου μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, στο πραγματικό μέρος $\mathcal{V}(r, E)$ που αντιπροσωπεύει την ελαστική σκέδαση και στο φανταστικό μέρος $\mathcal{W}(r, E)$ που περιγράφει όλες τις αντιδράσεις (απορρόφηση):

$$\mathcal{U}(r, E) = \mathcal{V}(r, E) + i\mathcal{W}(r, E) \quad (5.1)$$

Στο φαινομενολογικό πρότυπο των Koning και Delaroche (KD) οι όροι $\mathcal{V}(r, E)$ και $\mathcal{W}(r, E)$ περιγράφονται, αντίστοιχα, από τις εμπειρικές σχέσεις 5.2 και 5.3:

$$\mathcal{V}(r, E) = -\mathcal{V}_V(r, E) + \mathcal{V}_{SO}(r, E)\vec{l} \cdot \vec{\sigma} \quad (5.2)$$

$$\mathcal{W}(r, E) = -\mathcal{W}_V(r, E) - \mathcal{W}_D(r, E) + \mathcal{W}_{SO}(r, E)\vec{l} \cdot \vec{\sigma} \quad (5.3)$$

όπου r είναι το διάνυσμα θέσης, E η ενέργεια στο σύστημα του εργαστηρίου, \vec{l} η τροχιακή στροφορμή, $\vec{\sigma}$ ο πίνακας Pauli, \mathcal{V}_V και \mathcal{W}_V το πραγματικό και το φανταστικό δυναμικό “όγκου”, \mathcal{V}_{SO} και \mathcal{W}_{SO} το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του δυναμικού που οφείλεται στην αλληλεπίδραση ιδιοστροφορμής και τροχιακής στροφορμής (Spin-Orbit) και \mathcal{W}_D το φανταστικό δυναμικό “επιφανείας”. Οι επιμέρους όροι \mathcal{V}_V , \mathcal{W}_V , \mathcal{W}_D , \mathcal{V}_{SO} και \mathcal{W}_{SO} των σχέσεων (5.2) και (5.3) δίνονται από τις σχέσεις:

$$\mathcal{V}_V(r, E) = V_V(E)f(r, R_V, \alpha_V) \quad (5.4)$$

$$\mathcal{W}_V(r, E) = W_V(E)f(r, R_V, \alpha_V) \quad (5.5)$$

$$\mathcal{W}_D(r, E) = -4\alpha_D W_D(E) \frac{d}{dr} f(r, R_D, \alpha_D) \quad (5.6)$$

$$\mathcal{V}_{SO}(r, E) = V_{SO}(E) \left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, \alpha_{SO}) \quad (5.7)$$

$$\mathcal{W}_{SO}(r, E) = W_{SO}(E) \left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, \alpha_{SO}) \quad (5.8)$$

με m_π τη μάζα του πιονίου. Ο παράγοντας δομής $f(r, R_i, \alpha_i)$ έχει τη μορφή συνάρτησης Woods - Saxon:

$$f(r, R_i, \alpha_i) = (1 + \exp[(r - R_i)/\alpha_i])^{-1} \quad (5.9)$$

όπου α_i οι παράμετροι διαχύσεως, $R_i = r_i A^{1/3}$ η ακτίνα και A ο μαζικός αριθμός του πυρήνα.

Στην περίπτωση που το προσπίπτον σωματίδιο είναι φορτισμένο, στη σχέση 5.1 προστίθεται ο όρος του δυναμικού Coulomb V_C , ο οποίος θεωρείται ως το δυναμικό μιας ομοιόμορφα φορτισμένης σφαίρας:

$$V_C = \begin{cases} \frac{Zze^2}{2R_C} \left(3 - \frac{r^2}{R_C^2}\right), & \alpha\nu \ r \leq R_C \\ \frac{Zze^2}{r}, & \alpha\nu \ r \geq R_C \end{cases} \quad (5.10)$$

με Z, z τους ατομικούς αριθμούς του πυρήνα-στόχου και του βλήματος, αντίστοιχα, e το φορτίο του ηλεκτρονίου και R_C την ακτίνα Coulomb¹ του πυρήνα-στόχου. Τα βάρη δυναμικών $V_V(E), W_V(E), W_D(E), V_{SO}(E)$ και $W_{SO}(E)$ υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$V_V(E) = u_1 [1 - u_2(E - E_f) + u_3(E - E_f)^2 - u_4(E - E_f)^3] \quad (5.11)$$

$$W_V(E) = w_1 \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + w_2^2} \quad (5.12)$$

$$W_D(E) = d_1 \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + d_3^2} \exp[-d_2(E - E_f)] \quad (5.13)$$

$$V_{SO}(E) = u_{so1} \exp[-u_{so2}(E - E_f)] \quad (5.14)$$

$$W_{SO}(E) = w_{so1} \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + w_{so2}^2} \quad (5.15)$$

όπου E_f η ενέργεια Fermi², η οποία, για δέσμες νετρονίων και πρωτονίων εκφράζεται από τις σχέσεις (5.16) και (5.17), αντίστοιχα.

$$E_f^n = -\frac{1}{2} [S_n(Z, N) + S_n(Z, N + 1)] \quad (5.16)$$

$$E_f^p = -\frac{1}{2} [S_p(Z, N) + S_p(Z + 1, N)] \quad (5.17)$$

¹Η ακτίνα Coulomb ενός πυρήνα είναι η απόσταση στην οποία γίνεται αισθητό το δυναμικό Coulomb του πυρήνα αυτού.

Στις παραπάνω σχέσεις, S_n και S_p είναι οι ενέργειες διαχωρισμού νετρονίου και πρωτονίου ενός πυρήνα με N νετρόνια και Z πρωτόνια.

Οι παράμετροι $u_1, u_2, u_3, u_4, w_1, w_2, d_1, d_2, d_3, u_{so1}, u_{so2}$ καθώς και οι παράμετροι $r_V, \alpha_V, r_D, \alpha_D, r_{SO}, \alpha_{SO}$ και r_C που υπεισέρχονται στο γεωμετρικό τμήμα του δυναμικού $f(r, R_i, \alpha_i)$, υπολογίστηκαν από την προσαρμογή πειραματικών δεδομένων για πυρήνες μάζας $24 \leq A \leq 209$ και για ενέργειες δέσμης στην περιοχή $0.001 \leq E \leq 200$ MeV. Οι παράμετροι $u_i, w_i, d_i, u_{soi}, E_f^p$ καθώς και τα βάθη δυναμικών των σχέσεων (5.11)-(5.15) διαφέρουν από πυρήνα σε πυρήνα. Στις περιπτώσεις που για συγκεκριμένο πυρήνα υπάρχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα μπορεί να κατασκευαστεί ένα “τοπικό” Οπτικό Δυναμικό. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις χρησιμοποιείται το “καθολικό” ΟΔ. Αναλυτικές εκφράσεις των παραπάνω καθώς και των παραμέτρων $r_V, \alpha_V, r_D, \alpha_D, r_{SO}, \alpha_{SO}$ και r_C δίνονται στην αναφορά [5].

5.2.2 Το (ημι)μικροσκοπικό Οπτικό Δυναμικό των Bauge, Delaroche και Girod (BDG)

Το (ημι)μικροσκοπικό Οπτικό Δυναμικό των Bauge, Delaroche και Girod (BDG) που χρησιμοποιεί ο κώδικας *TALYS* είναι μία βελτιωμένη έκδοση του (ημι)μικροσκοπικού ΟΔ Jeukenne-Lejeune-Mahaux (JLM) [50]. Η βελτίωση αυτή, έγκειται στα ακόλουθα:

- Στο δυναμικό BDG έχει επιπλέον προστεθεί ο όρος που περιγράφει την αλληλεπίδραση τροχιακής στροφορμής-ιδιοστροφορμής.

$$\mathcal{U}_{BDG}(r, E) = \mathcal{U}_{JLM}(r, E) + \mathcal{U}_{n(p)}^{SO}(r, E) \quad (5.18)$$

- Οι ελεύθερες παράμετροι προσαρμόστηκαν σε μεγαλύτερο αριθμό πειραματικών σημείων από δεδομένα για πυρήνες μάζας $A=30$ έως 240 και για ενέργειες δέσμης από 10 keV έως 200 MeV.

Το δυναμικό \mathcal{U}_{JLM} αρχικά υπολογίζεται θεωρώντας το Οπτικό Δυναμικό για άπειρη, ομογενή πυρηνική ύλη $U_{JLM,NM}$:

$$\begin{aligned} U_{JLM,NM}(E)_{\rho,\alpha} = & \lambda_V(E) \left[V_0(\tilde{E}) \pm \lambda_{V1}(E)\alpha V_1\tilde{E} \right] \\ & + i\lambda_w(E) \left[W_0(\tilde{E}) \pm \lambda_{W1}(E)\alpha W_1\tilde{E} \right] \end{aligned} \quad (5.19)$$

²Ως ενέργεια Fermi ορίζεται η ενέργεια που αντιστοιχεί στο μισό της απόστασης μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας κατειλημμένης στάθμης του πυρήνα.

όπου E είναι η ενέργεια του βλήματος στο κέντρο μάζας, $\tilde{E} = E - V_C$ με V_C το δυναμικό Coulomb, V_0 , V_1 , W_0 και W_1 τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη του βαθμωτού και του διανυσματικού ΟΔ, αντίστοιχα, λ_V , λ_{V1} , λ_W και λ_{W1} συντελεστές κανονικοποίησης και α ο παράγοντας ασυμμετρίας³ της πυρηνικής ύλης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} \quad (5.20)$$

με $\rho = \rho_n - \rho_p$ την πυκνότητα της πυρηνικής ύλης και ρ_n , ρ_p τις πυκνότητες φορτίου του νετρονίου και του πρωτονίου, αντίστοιχα. Στη σχέση (5.19) το θετικό πρόσημο χρησιμοποιείται για δέσμη νετρονίων και το αρνητικό πρωτονίων [6]. Οι συντελεστές κανονικοποίησης λ_i εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$\lambda_V(E) = 0.951 + 0.0008 \ln(1000E) + 0.00018 [\ln(1000E)]^2 \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} \lambda_W(E) &= \left[1.24 - \left[1 + \exp\left(\frac{E-4.5}{2.9}\right) \right]^{-1} \right] \left[1 + 0.06 \exp\left[-\left(\frac{E-14}{3.7}\right)^2\right] \right] \\ &\times \left[1 - 0.09 \exp\left[-\left(\frac{E-80}{78}\right)^2\right] \right] \left[1 + \frac{E-80}{400} \Theta(E-80) \right] \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\lambda_{V1}(E) = 1.5 - 0.65 \left[1 + \exp\left(\frac{E-1.3}{3}\right) \right]^{-1} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{W1}(E) &= \left[1.1 + 0.44 \left[1 + \left[\exp\left(\frac{E-40}{50.9}\right) \right]^4 \right]^{-1} \right] \\ &\times \left[1 - 0.065 \exp\left[-\left(\frac{E-40}{13}\right)^2\right] \right] \left[1 - 0.083 \exp\left[-\left(\frac{E-200}{80}\right)^2\right] \right] \end{aligned} \quad (5.24)$$

Για ενέργειες δέσμης μεταξύ 20 και 50 MeV, οι αβεβαιότητες των παραμέτρων λ_V , λ_{V1} , λ_W και λ_{W1} είναι περίπου 1.5%, 10%, 10% και 10%, αντίστοιχα. Στην ενεργειακή αυτή περιοχή βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποίησαν οι Bauge, Delaroche και Girod για την προσαρμογή των παραπάνω παραμέτρων. Εκτός αυτής της περιοχής οι αβεβαιότητες μπορεί να είναι μέχρι και έναν παράγοντα 1.5.

³Ο παράγοντας ασυμμετρίας α υπεισέρχεται τόσο στα (ημι)μικροσκοπικά δυναμικά JLM και BDG όσο και στο φαινομενολογικό δυναμικό των Koning-Delaroche προκειμένου να γίνουν διορθώσεις για την περίσσεια νετρονίων έναντι των πρωτονίων που συνήθως συναντάται στην πυρηνική ύλη.

Στα δύο εν λόγω (ημι)μικροσκοπικά οπτικά δυναμικά η ενεργός αλληλεπίδραση νουκλεονίου - νουκλεονίου υπολογίζεται με βάση το ρεαλιστικό πρότυπο σκληρού πυρήνα [51]. Η μετάβαση από την άπειρη πυρηνική ύλη, σταθερής πυκνότητας ρ στην πεπερασμένη ύλη πυκνότητας $\rho = \rho(r)$ γίνεται μέσω της βελτιωμένης προσέγγισης τοπικής πυκνότητας (Improved Local Density Approximation, ILDA). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το Οπτικό Δυναμικό σε ένα σημείο του πυρήνα που απέχει απόσταση r από το κέντρο του και έχει πυκνότητα νουκλεονίων ίση με $\rho(r)$ είναι ίσο με το ΟΔ απείρου ομογενούς μέσου, σταθερής πυκνότητας $\rho = \rho(r)$. Η βελτίωση στην περίπτωση της ILDA έγκειται στη χρήση μίας συνάρτησης Gauss για την περιγραφή της εμβέλειας της ενεργού αλληλεπίδρασης νουκλεονίου-νουκλεονίου αντί της συνάρτησης δέλτα που χρησιμοποιείται στη βασική προσέγγιση τοπικής πυκνότητας (LDA). Το Οπτικό Δυναμικό πεπερασμένης πυρηνικής ύλης περιγράφεται από τη σχέση (5.25).

$$U_{JLM, FN}(r, E) = (t\sqrt{\pi})^{-3} \int \frac{U_{NM}(\rho(r'), E)}{\rho(r')} \exp\left(-|\vec{r} - \vec{r}'|^2/t_r^2\right) \rho(r') dr' \quad (5.25)$$

Στην παραπάνω σχέση t είναι ο παράγοντας μορφής της συνάρτησης Gauss, ο οποίος, παίρνει τις τιμές $t_r=1.25$ και $t_i=1.35$ στο πραγματικό και στο φανταστικό μέρος του Οπτικού Δυναμικού U_{FN} , αντίστοιχα.

Το δυναμικό U^{SO} που περιγράφει την αλληλεπίδραση ιδιοστροφορμής-τροχιακής στροφορμής εκφράζεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned} U_{n(p)}^{SO}(r, E) &= \lambda_{V_{SO}}(E)V_{SO}(r) + i\lambda_{W_{SO}}(E)W_{SO}(r) \\ &= (\lambda_{V_{SO}}(E) + i\lambda_{W_{SO}}(E)) \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{2}{3}\rho_{p,(n)} + \frac{1}{3}\rho_{n,(p)} \right) \end{aligned} \quad (5.26)$$

Οι συντελεστές κανονικοποίησης $\lambda_{V_{SO}}$ και $\lambda_{W_{SO}}$ δίνονται από τις εμπειρικές σχέσεις :

$$\lambda_{V_{SO}} = 130 \exp(-0.013E) + 40 \quad (5.27)$$

$$\lambda_{W_{SO}} = -0.2(E - 20) \quad (5.28)$$

Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση του (ημι)μικροσκοπικού Οπτικού Δυναμικού των Bauge, Delaroche και Girod (BDG). Η βελτίωση αυτή επιτεύχθηκε μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων λ_V , λ_{V1} , λ_W και λ_{W1} που υπεισέρχονται στο δυναμικό αυτό (σχέση 5.19). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα της εν λόγω διερεύνησης παρατίθενται σε επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

5.3 Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις θεωρητικές προβλέψεις του προτύπου Hauser-Feshbach

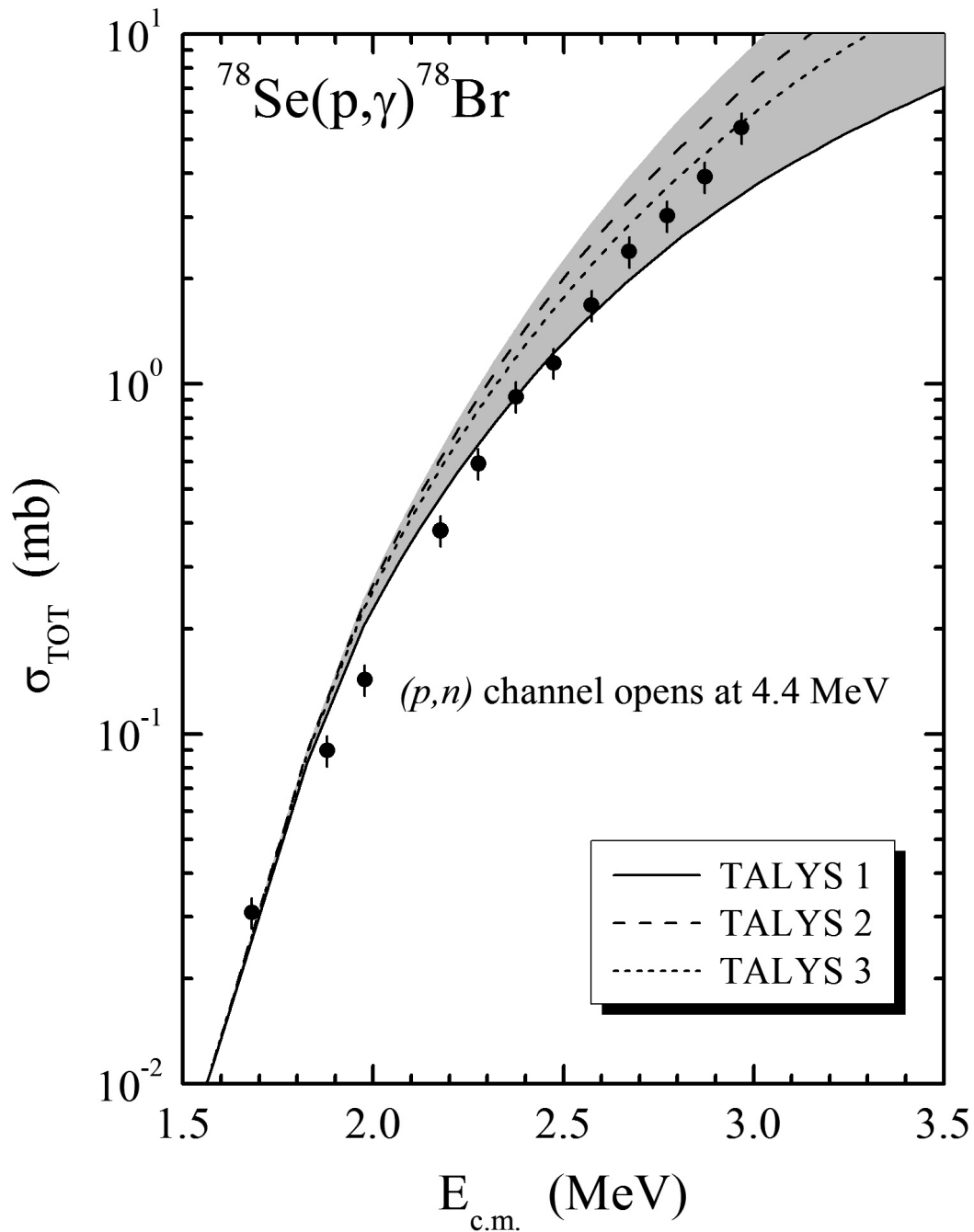
Οι ενεργές διατομές που μετρήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής παρουσιάζονται στα σχήματα 5.1 έως 5.13 μαζί με τις αντίστοιχες προβλέψεις της θεωρίας Hauser-Feshbach. Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αντιστοιχούν στους μαύρους κύκλους ενώ τα πειραματικά σημεία άλλων εργασιών σε ανοιχτούς κύκλους. Οι καμπύλες αντιστοιχούν στους τρεις βασικούς συνδυασμούς Οπτικού Δυναμικού (ΟΔ), Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων (NLD) και Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ (γ SF) που δίνονται στον πίνακα 5.2. Οι σκιασμένες περιοχές αντιπροσωπεύουν όλους τους δυνατούς

Πίνακας 5.2: Συνδυασμοί Οπτικού Δυναμικού, Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ που χρησιμοποιήθηκαν στους θεωρητικούς υπολογισμούς των ενεργών διατομών και παρουσιάζονται στα σχήματα 5.1 έως 5.13 ως TALYS-1, -2 και -3.

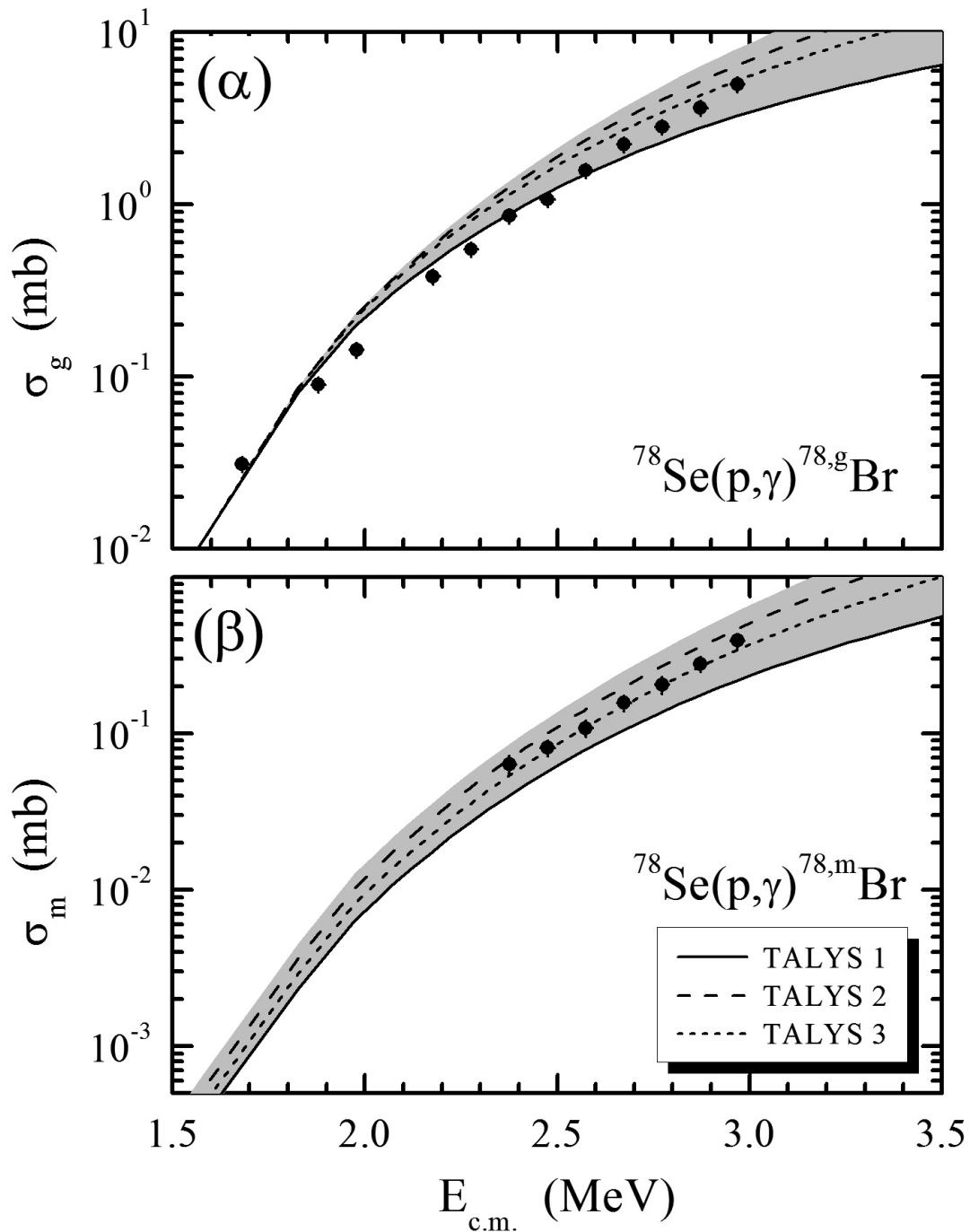
Συμβολισμός	Οπτικό Δυναμικό	Πυκνότητα Πυρηνικών Καταστάσεων	Συνάρτηση Ισχύος Ακτίνων γ
TALYS 1	KD [7]	CTFG [5]	KU [8]
TALYS 2	BDG [6]	HFBCS [45]	HFBCS-QRPA [48]
TALYS 3	BDG [6]	HFB [9]	HFB-QRPA [9]

συνδυασμούς των προτύπων που χρησιμοποιεί ο κώδικας *TALYS* για τα παραπάνω πυρηνικά μεγέθη (πίνακας 5.1). Όλα τα πειραματικά σημεία που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.1 έως 5.13, τόσο αυτά που μετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας όσο και αυτά της βιβλιογραφίας, έχουν διορθωθεί πρώτα ως προς το φαινόμενο Electron Screening (§ 2.1.3).

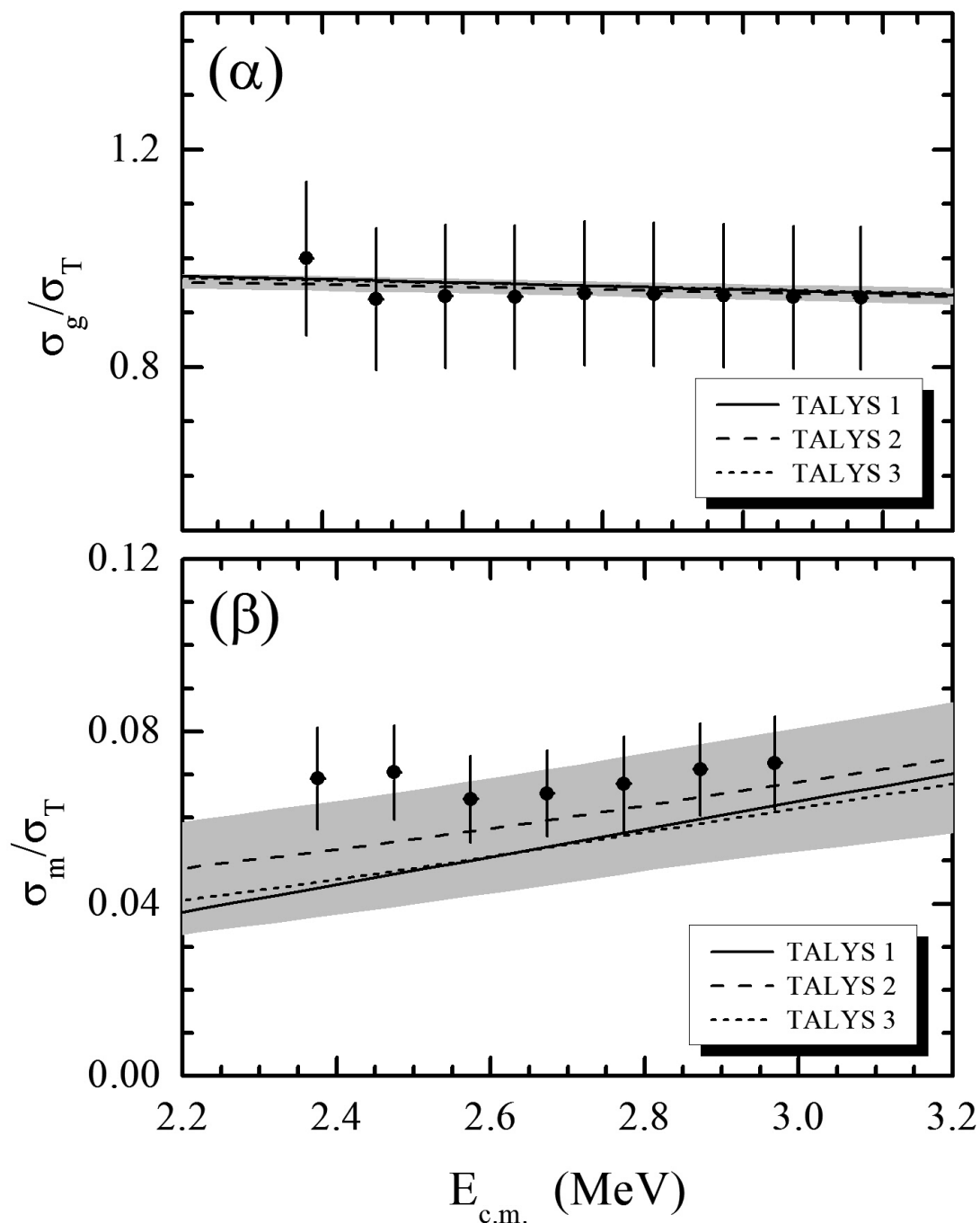
Στα σχήματα 5.4, 5.5, 5.9, 5.10 και 5.12 παρατηρείται πτώση των τιμών της ενεργού διατομής για ενέργειες δέσμης 2.7 MeV, 5.1 MeV, 3.8 MeV και 2.5 MeV, αντίστοιχα. Οι ενέργειες αυτές αντιστοιχούν στις ενέργειες κατωφλίου του καναλιού (p, n) της εκάστοτε αντίδρασης.



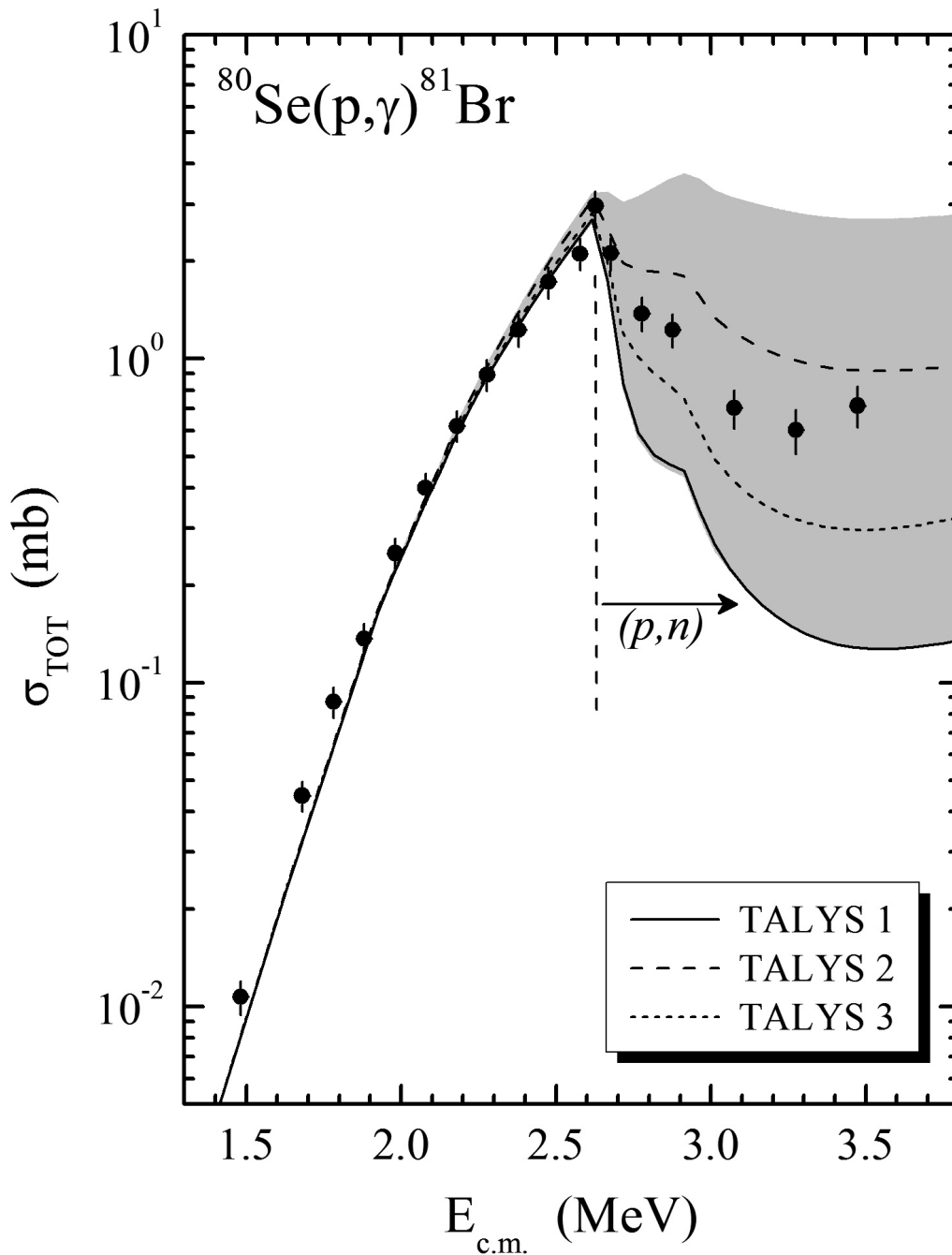
Σχήμα 5.1: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$ που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (μαύροι κύκλοι) και αντίστοιχοι θεωρητικοί υπολογισμοί με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή). Τα πειραματικά δεδομένα αντιστοιχούν στις τιμές του πίνακα 4.2. Οι συνδυασμοί των θεωρητικών υπολογισμών εξηγούνται στον πίνακα 5.2. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς Οπτικού Δυναμικού, Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και Συνάρτησης Ισχύος Ακτίνων γ που χρησιμοποιεί ο κώδικας *TALYS* (πίνακας 5.1).



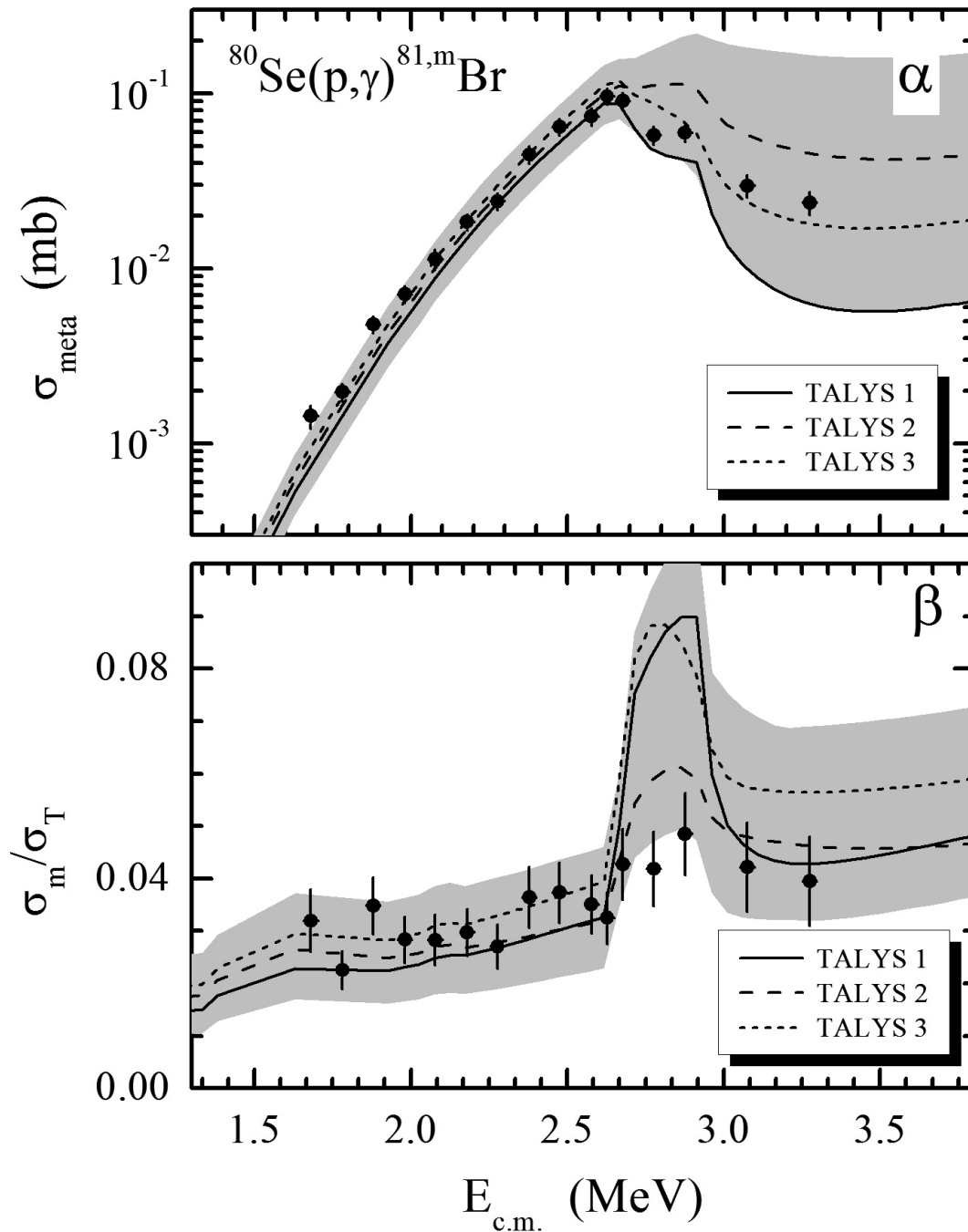
Σχήμα 5.2: Πειραματικά δεδομένα μερικών ενεργών διατομών σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ (α) στη βασική και (β) στη μετασταθή κατάσταση του. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (μαύροι κύκλοι) παρουσιάζονται μαζί με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς για τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εσοιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή).



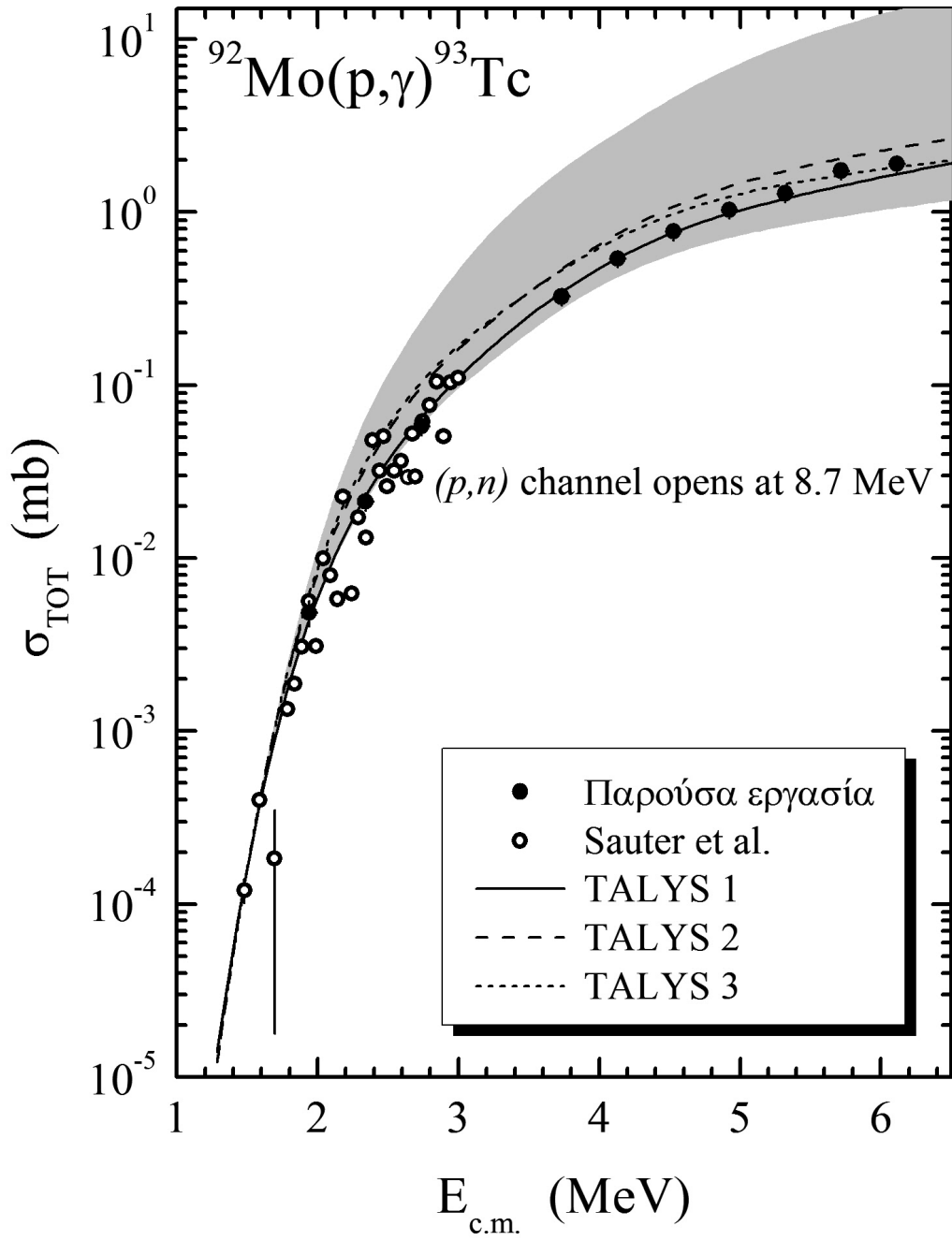
Σχήμα 5.3: (α) Λόγος της μερικής ενεργού διατομής σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα ^{79}Br στη βασική κατάσταση προς την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$. (β) Λόγος της μερικής ενεργού διατομής σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα ^{79}Br στη μετασταθή κατάσταση προς την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$.



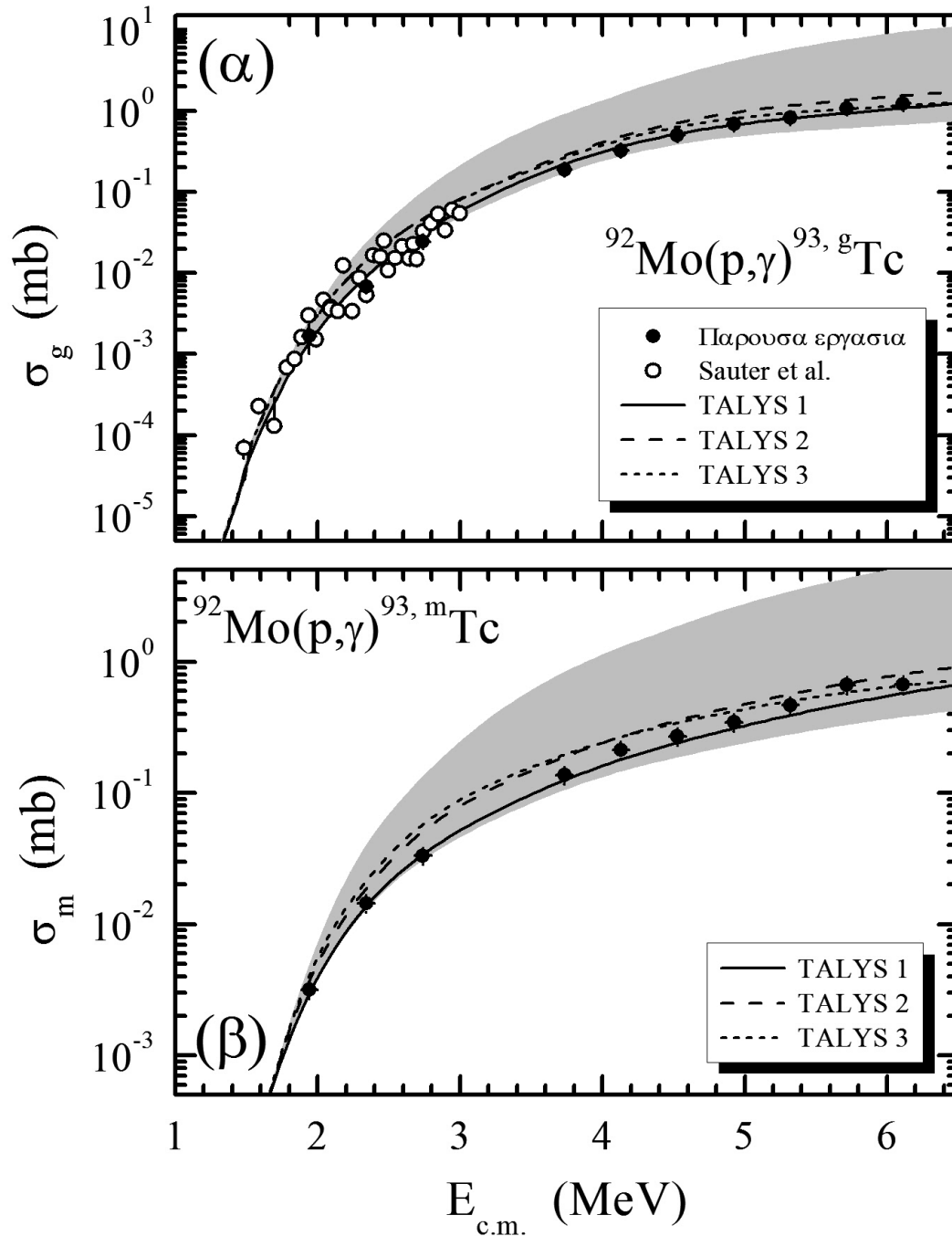
Σχήμα 5.4: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (πίνακας 4.3) παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους μαζί με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς για τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.



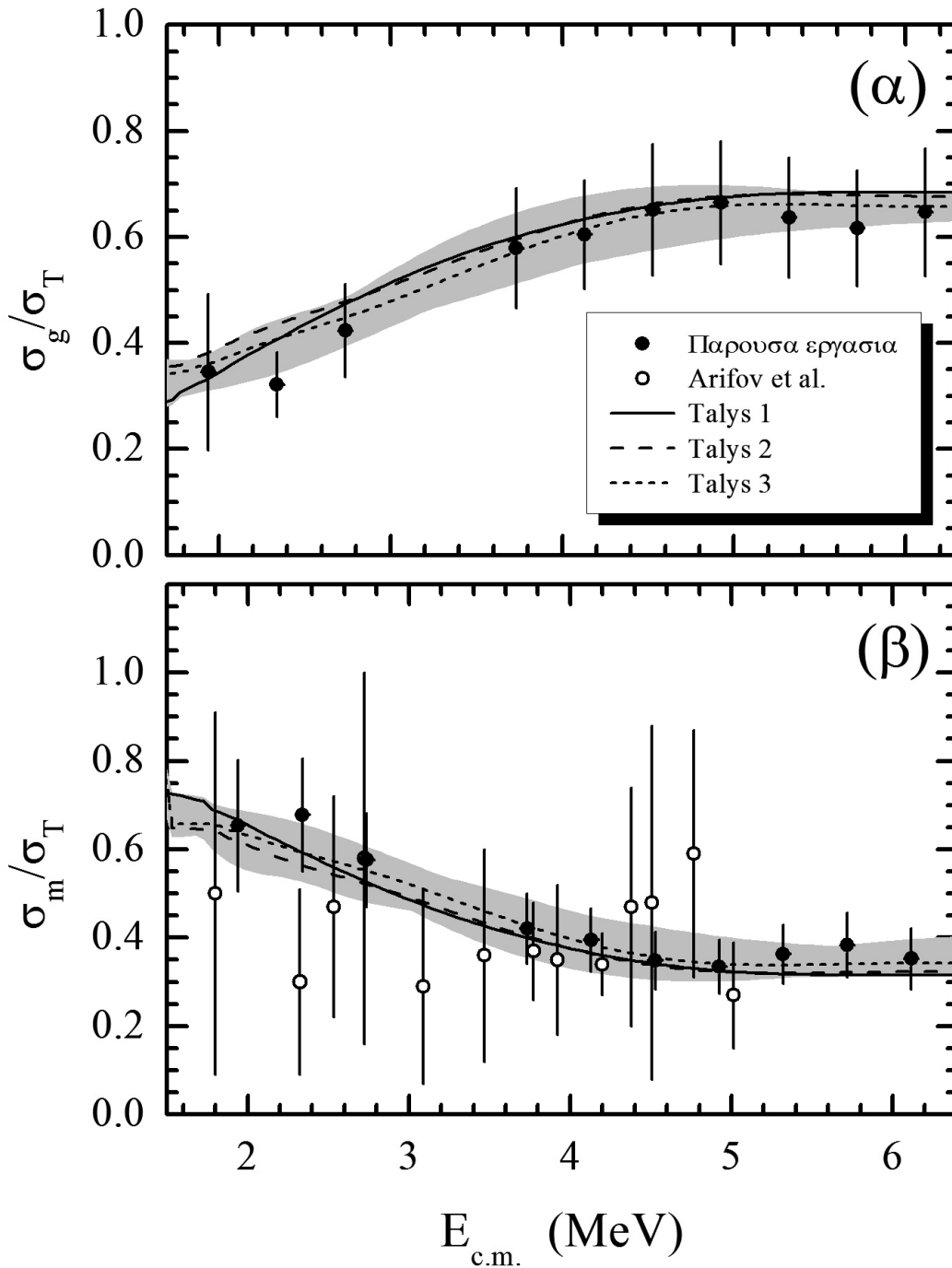
Σχήμα 5.5: α) Μερική ενεργός διατομή σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ στη μετασταθή κατάσταση. β) Λόγος της μερικής ενεργού διατομής σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα ^{81}Br στη μετασταθή κατάσταση προς την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$.



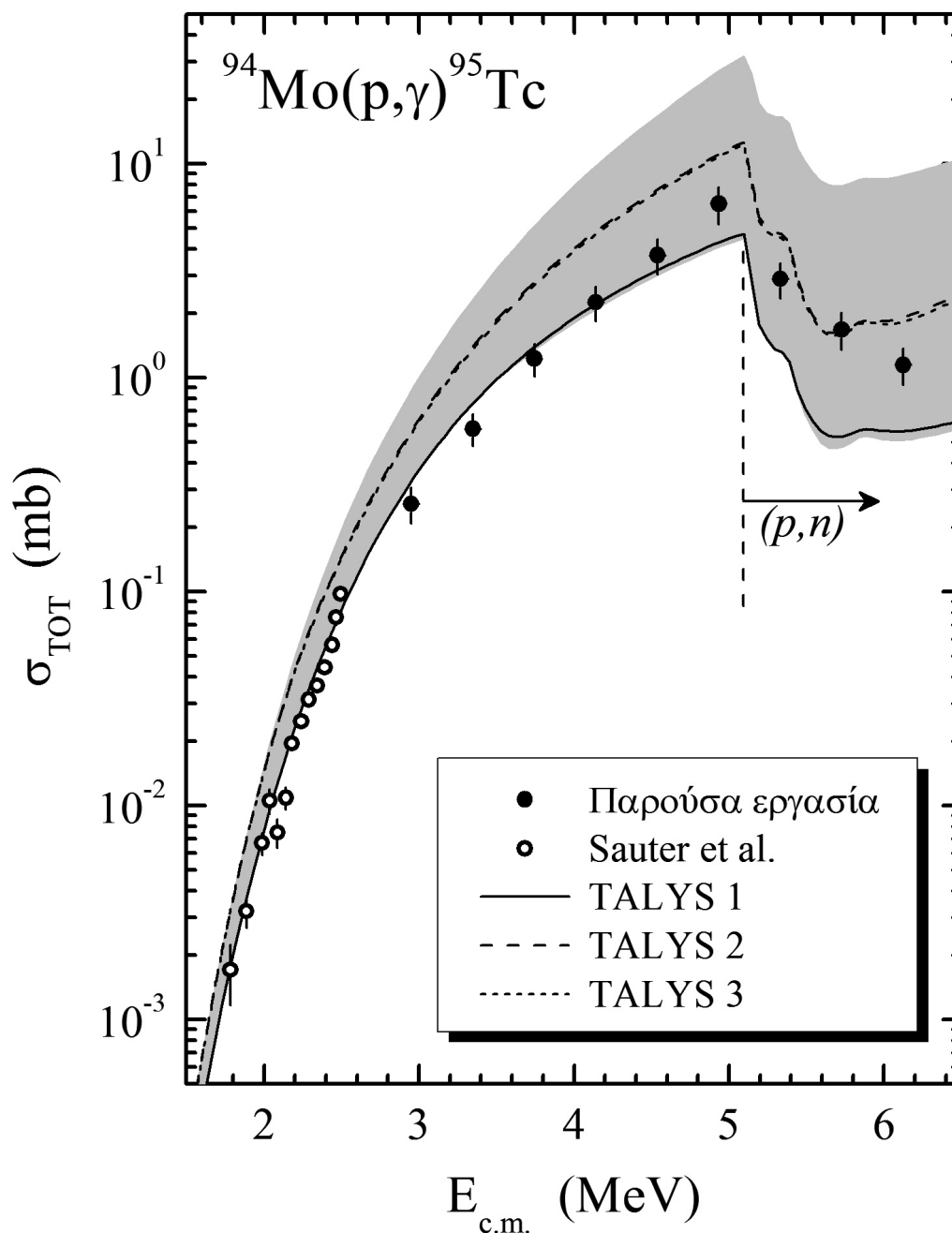
Σχήμα 5.6: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$. Με μαύρους κύκλους παρουσιάζονται δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (πίνακας 4.4) ενώ με ανοιχτούς κύκλους δεδομένα των Sauter et al. [3]. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν θεωρητικούς υπολογισμούς με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιασμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.



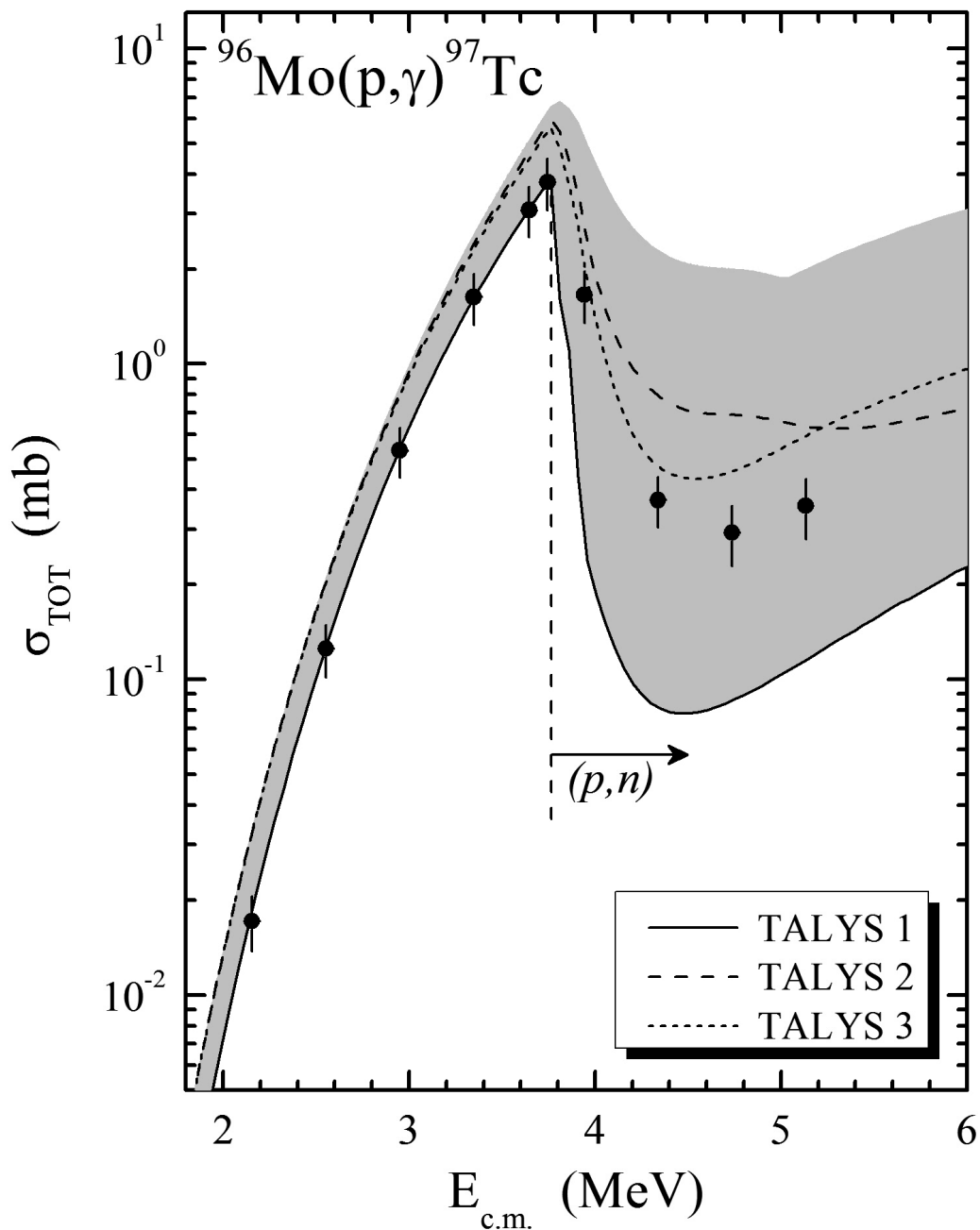
Σχήμα 5.7: Πειραματικά δεδομένα μερικών ενεργών διατομών σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ (α) στη βασική και (β) στη μετασταθή κατάσταση του. Με μαύρους κύκλους παρουσιάζονται τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία ενώ με ανοιχτούς κύκλους δεδομένα των Sauter et al. [3].



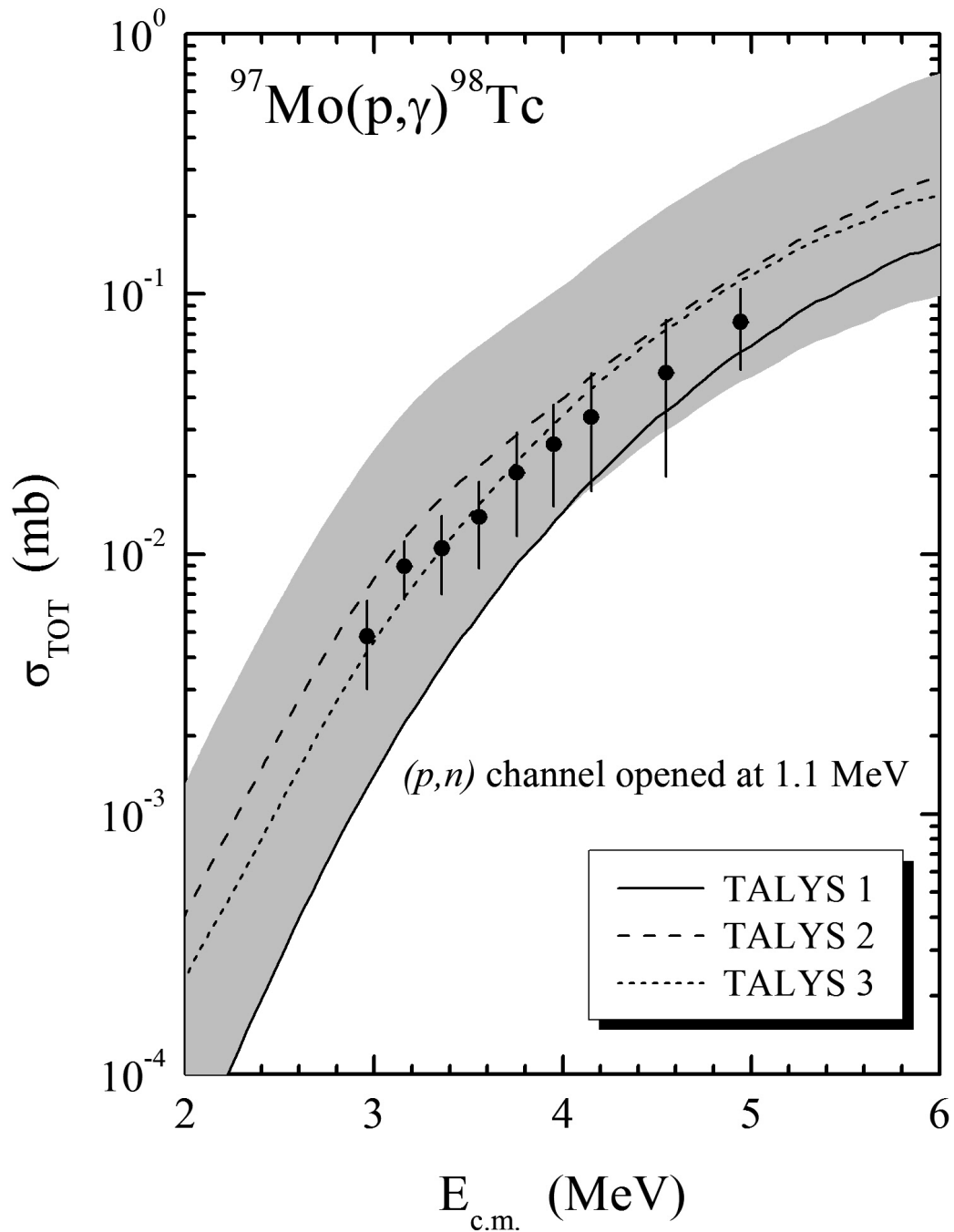
Σχήμα 5.8: (α) Λόγος της μερικής ενεργού διατομής σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα ^{93}Tc στη βασική κατάσταση προς την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$. (β) Λόγος της μερικής ενεργού διατομής σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα ^{93}Tc στη μετασταθή κατάσταση προς την ολική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$. Με μαύρους κύκλους παρουσιάζονται τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία ενώ με ανοιχτούς κύκλους δεδομένα των Arifov et al. [4].



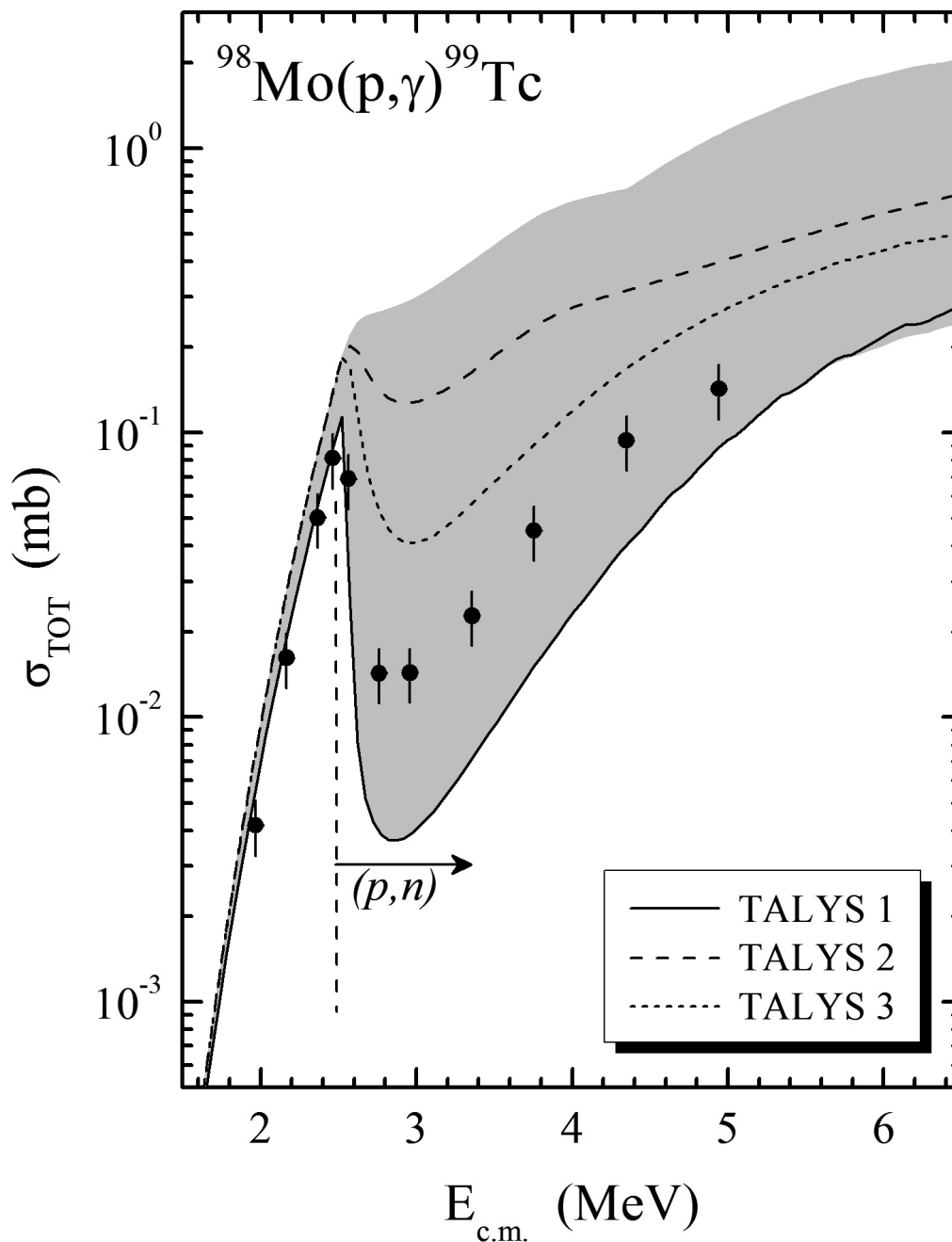
Σχήμα 5.9: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$. Με μαύρους κύκλους παρουσιάζονται δεδομένα της παρούσας εργασίας (πίνακας 4.5) ενώ με ανοιχτούς κύκλους δεδομένα των Sauter et al. [3]. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν θεωρητικούς υπολογισμούς με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.



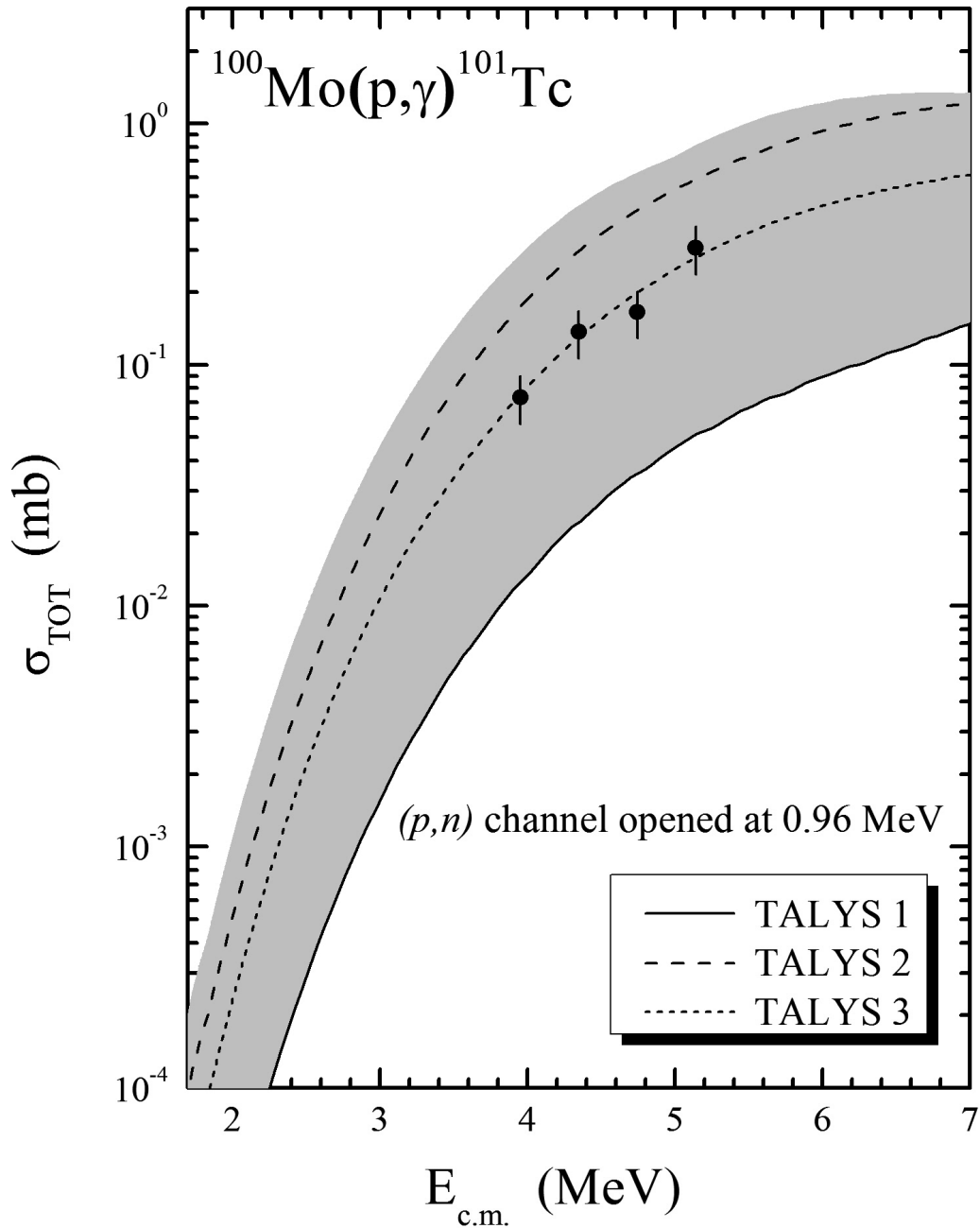
Σχήμα 5.10: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (πίνακας 4.6) παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους μαζί με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.11: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (πίνακας 4.7) παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους μαζί με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.12: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (πίνακας 4.8) παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους μαζί με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.13: Πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών της αντίδρασης $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$. Τα δεδομένα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία (πίνακας 4.9) παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους μαζί με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς με τους συνδυασμούς TALYS-1 (συνεχής γραμμή), TALYS-2 (εστιγμένη γραμμή) και TALYS-3 (διακεκομμένη γραμμή) που εξηγούνται στον πίνακα 5.2.

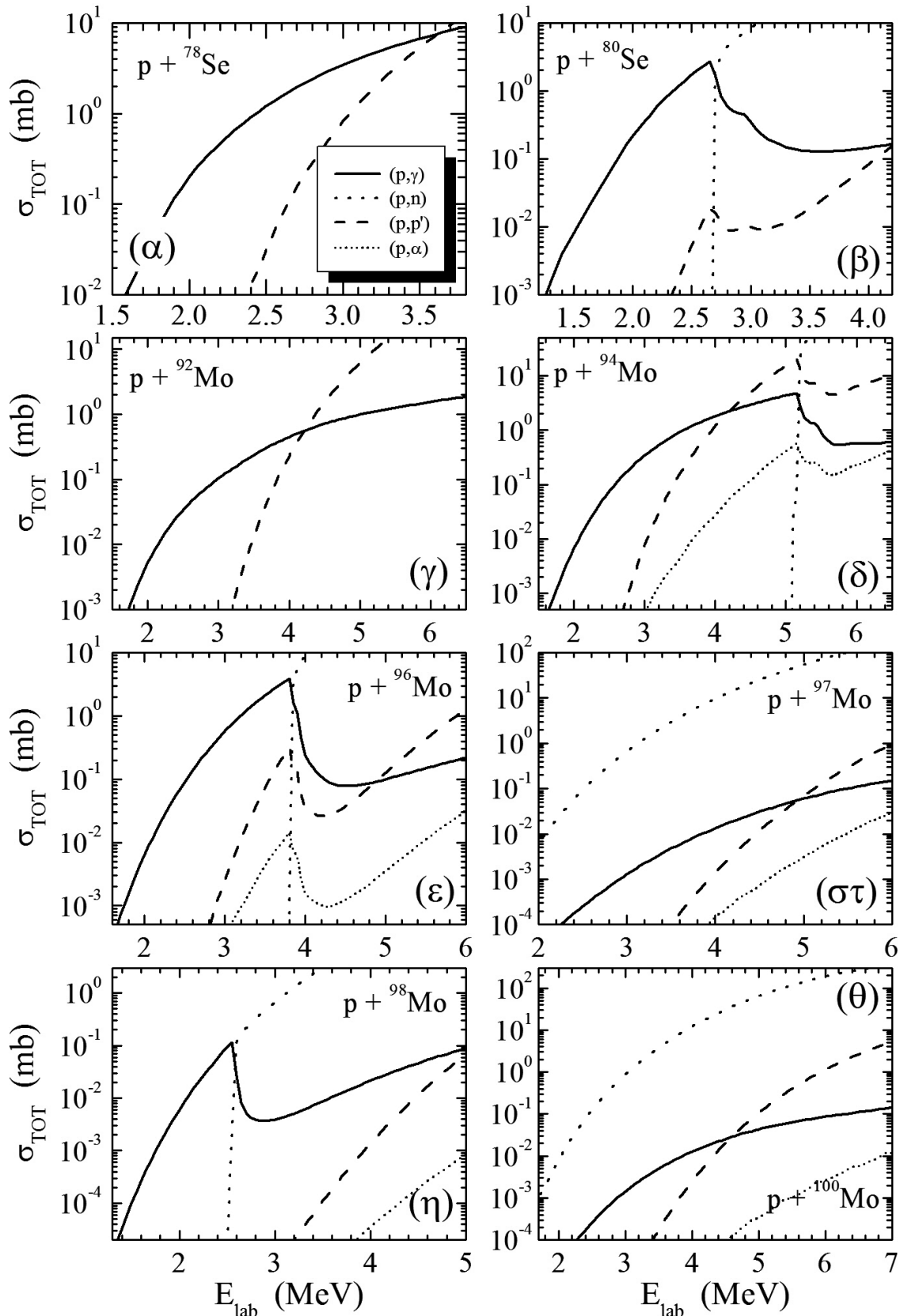
5.4 Βελτίωση των παραμέτρων του (ημι)μικροσκοπικού Οπτικού Δυναμικού BDG

Το Οπτικό Δυναμικό των Baugé, Delaroche και Girod, είναι ένα (ημι)μικροσκοπικό ΟΔ, το οποίο ως γενικευμένο έχει συγκριθεί με τον κύριο όγκο των πειραματικών δεδομένων που υπάρχουν για ενέργειες δέσμης μεγαλύτερες των 10 MeV αλλά δεν έχει ελεγχθεί για μικρότερες από αυτήν την τιμή ενέργειας. Η σύγκριση με τα δικά μας καινούρια δεδομένα αλλά και με άλλα υπάρχοντα της βιβλιογραφίας δείχνει ότι τον εν λόγω δυναμικό συστηματικά παρουσιάζει μία απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα στις χαμηλότερες ενέργειες και συγκεκριμένα δεν μπορεί να περιγράψει σωστά την κλίση της καμπύλης. Σε αντίθεση το ΟΔ των Koning και Delaroche περιγράφει πολύ καλά τόσο την κλίση όσο και την απόλυτη τιμή των ενεργών διατομών στις χαμηλότερες ενέργειες. Για το λόγο αυτό, τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων λ_v , λ_{v1} , λ_w και λ_{w1} του (ημι)μικροσκοπικού Οπτικού Δυναμικού BDG. Με τη βοήθεια του κώδικα *TALYS*, οι τιμές των παραμέτρων αυτών μεταβλήθηκαν με βήμα 2% σε ένα εύρος από 50% έως 150% της προκαθορισμένης τιμής που χρησιμοποιεί ο κώδικας με βάση τις σχέσεις (5.21) έως και (5.24). Σε όλες τις εν λόγω δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά μόνο οι πυκνότητες πυρηνικών καταστάσεων του προτύπου Αερίου Fermi Σταθερής Θερμοκρασίας (CTFG) και οι συναρτήσεις ισχύος Γενικευμένης Λορεντζιανής των Kopecky και Uhl (KU).

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε για τις αντιδράσεις:

- $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$,
- $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$,
- $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$,
- $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$,
- $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και
- $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις αντιδράσεις $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$, $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$ και $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$ αγνοήθηκαν και δεν θα παρουσιαστούν στην εργασία αυτή καθώς πα-

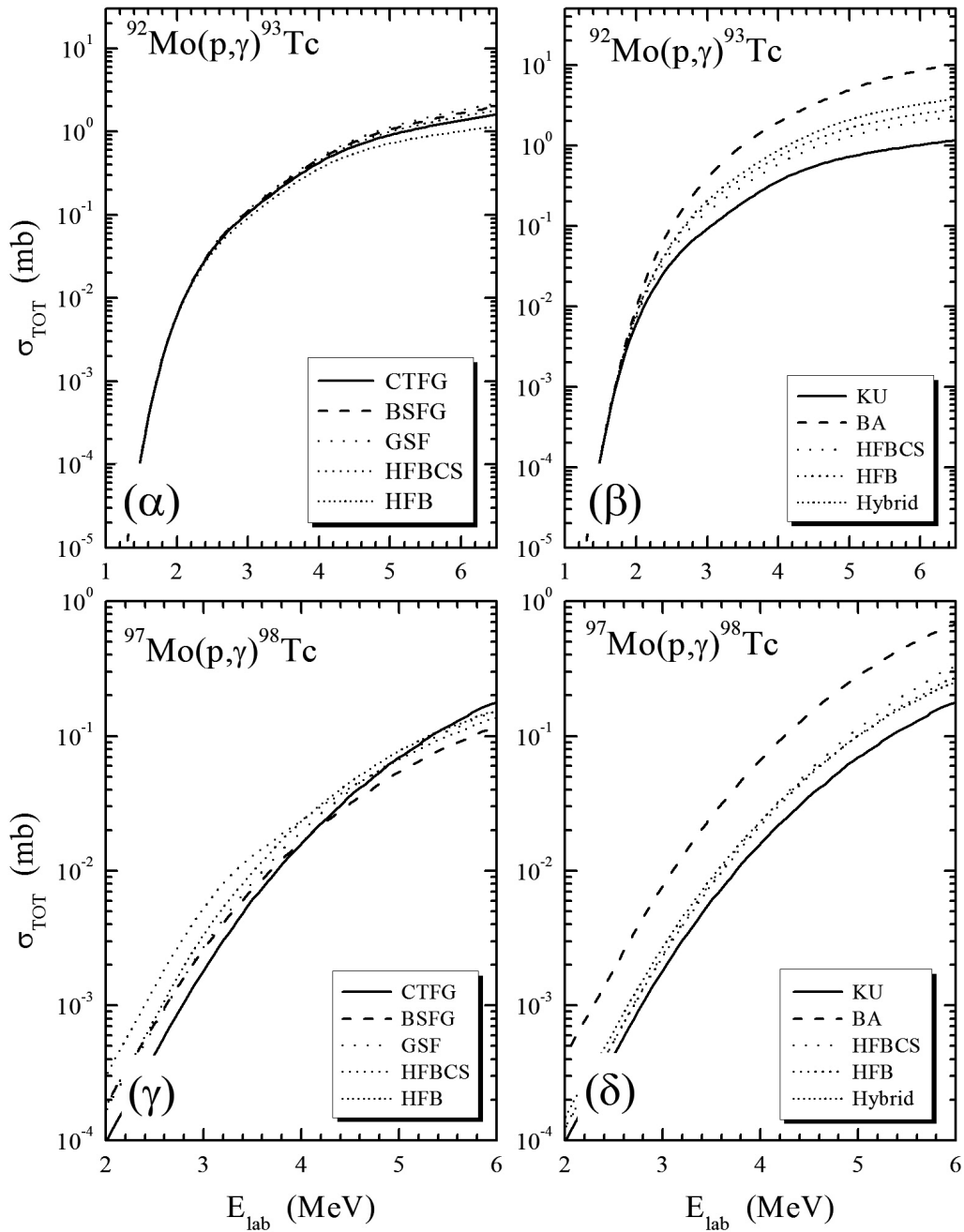


Σχήμα 5.14: Ενεργός διατομή των καναλιών (p, γ) , (p, n) , (p, p') και (p, α) για τα ισότοπα ^{78}Se , ^{80}Se , ^{92}Mo , ^{94}Mo , ^{96}Mo , ^{97}Mo , ^{98}Mo και ^{100}Mo , σύμφωνα με θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του κώδικα *Talys*.

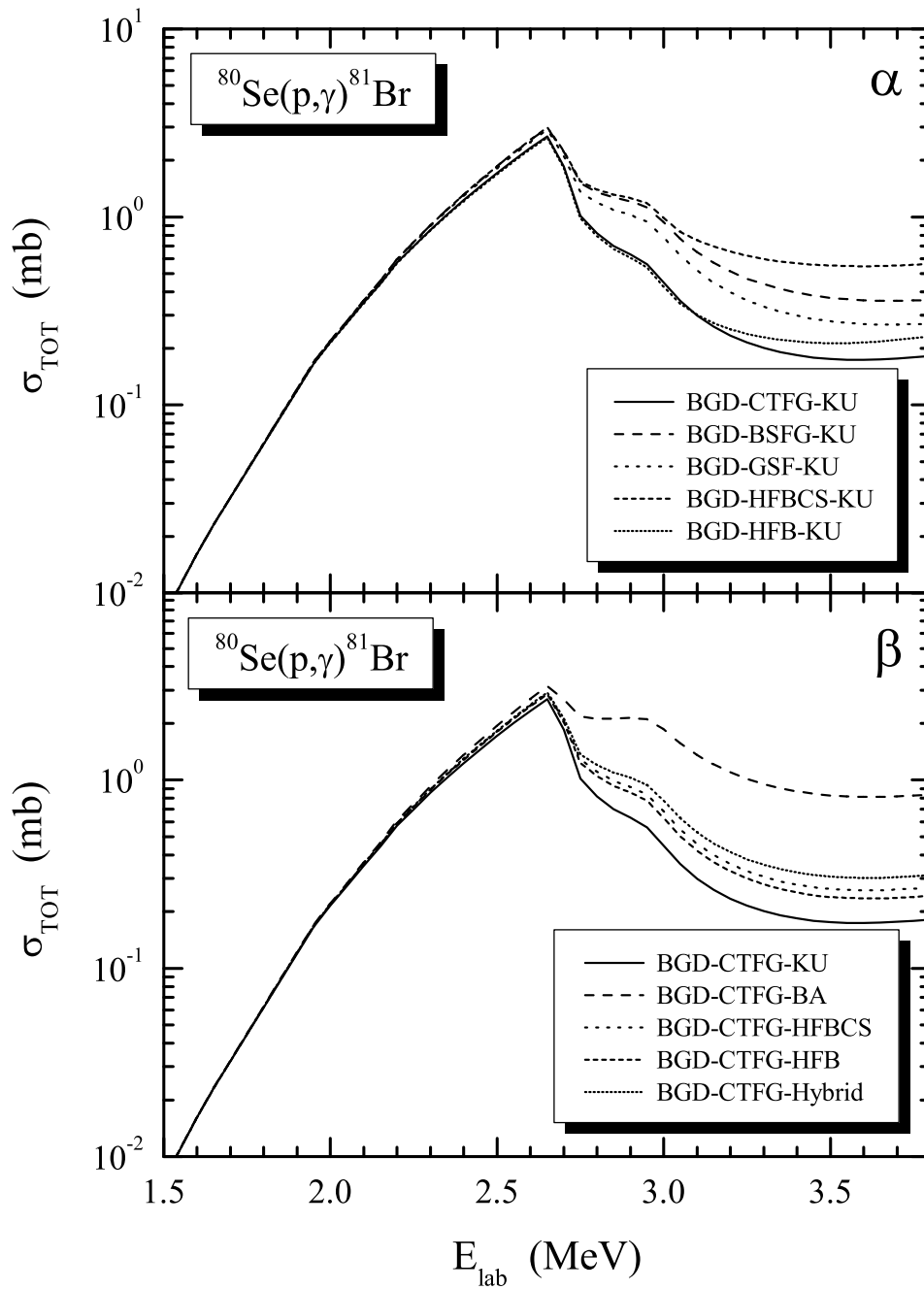
ρατηρήθηκε ότι το ανταγωνιστικό κανάλι (p, p') των εν λόγω αντιδράσεων είναι “ανοιχτό” και αρκετά ισχυρό στην ενεργειακή περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της παρούσας διατριβής (σχήματα 5.14(α), 5.14(γ) και 5.14(δ)). Στις περιπτώσεις αυτές στους υπολογισμούς υπεισέρχονται όχι μόνο το Οπτικό Δυναμικό αλλά και οι Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων και οι Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ . Ένα τυπικό παράδειγμα της εξάρτησης της ενεργού διατομής από τα εν λόγω μεγέθη παρουσιάζεται στα σχήματα 5.15(α) και 5.15(β) για την περίπτωση του ^{92}Mo . Οι καμπύλες που φαίνονται στο σχήμα αυτό υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας σε κάθε περίπτωση το Οπτικό Δυναμικό BDG και μεταβάλλοντας είτε το πρότυπο της Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων (σχήμα 5.15(α)) είτε το πρότυπο της Συναρτήσεως Ισχύος Ακτίνων γ (σχήμα 5.15(β)).

Επιπλέον, εξ' αρχής, εξαιρέθηκαν και οι αντιδράσεις $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$ καθώς οι ανταγωνιστικές αντιδράσεις $^{97}\text{Mo}(p, n)^{97}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, n)^{100}\text{Tc}$ παρουσιάζουν χαμηλό ενεργειακό κατώφλι (1114 keV και 960 keV, αντίστοιχα) και ως εκ τούτου και σε αυτήν την περίπτωση η ενεργός διατομή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στα πρότυπα Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων και Συναρτήσεων Ισχύος, όπως ενδεικτικά φαίνεται στα σχήματα 5.15(γ) και 5.15(δ) για τον πυρήνα ^{97}Mo .

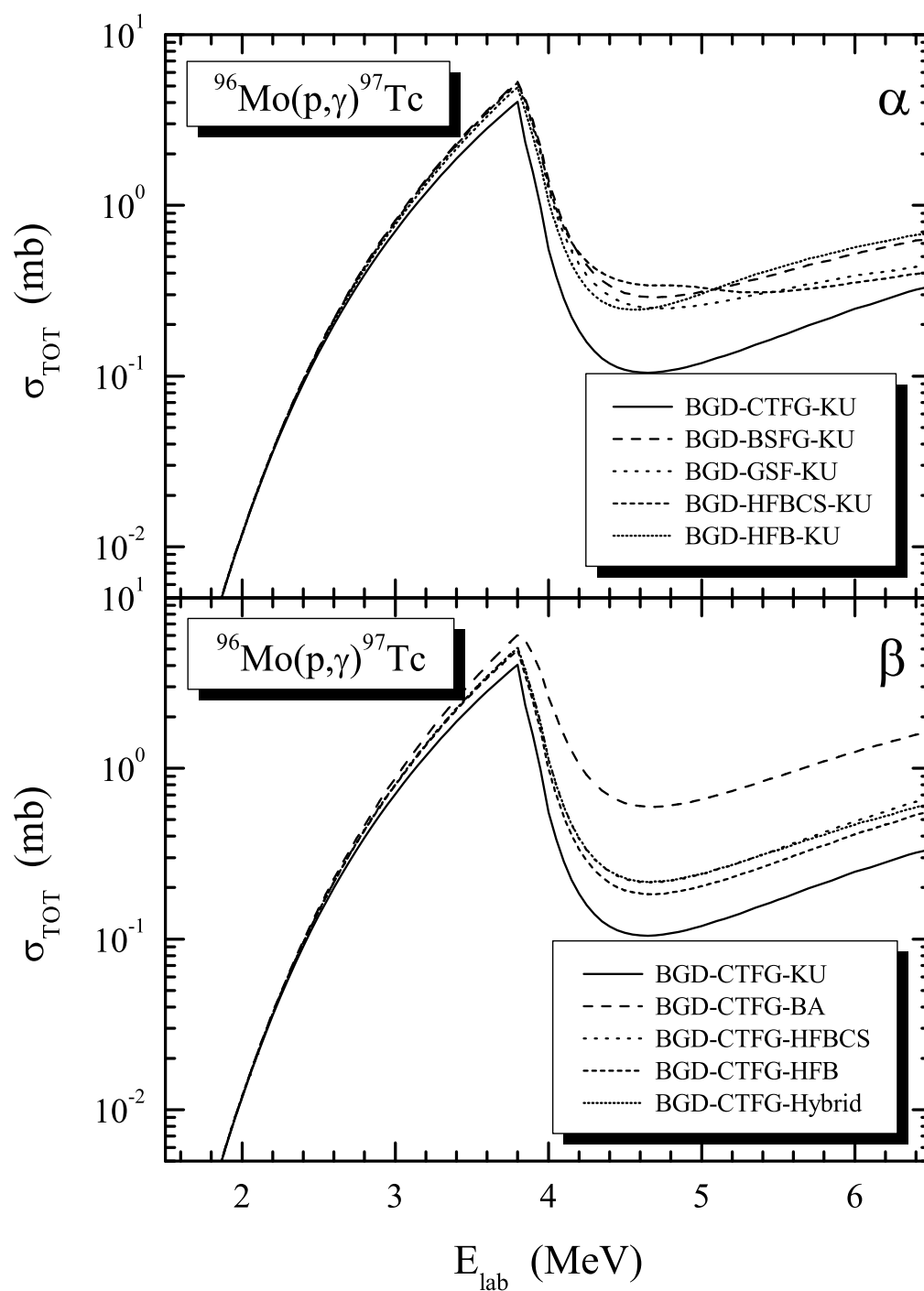
Αντιθέτως, στις ενεργειακές περιοχές που το κανάλι (p, n) των αντιδράσεων $p+^{80}\text{Se}$, $p+^{96}\text{Mo}$ και $p+^{98}\text{Mo}$ είναι “κλειστό”, το αντίστοιχο κανάλι (p, p') είναι είτε ασθενές είτε επίσης “κλειστό” (σχήματα 5.14(β), 5.14(ε) και 5.14(η), αντίστοιχα) με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται η παραπάνω εξάρτηση, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.16, 5.17 και 5.18.



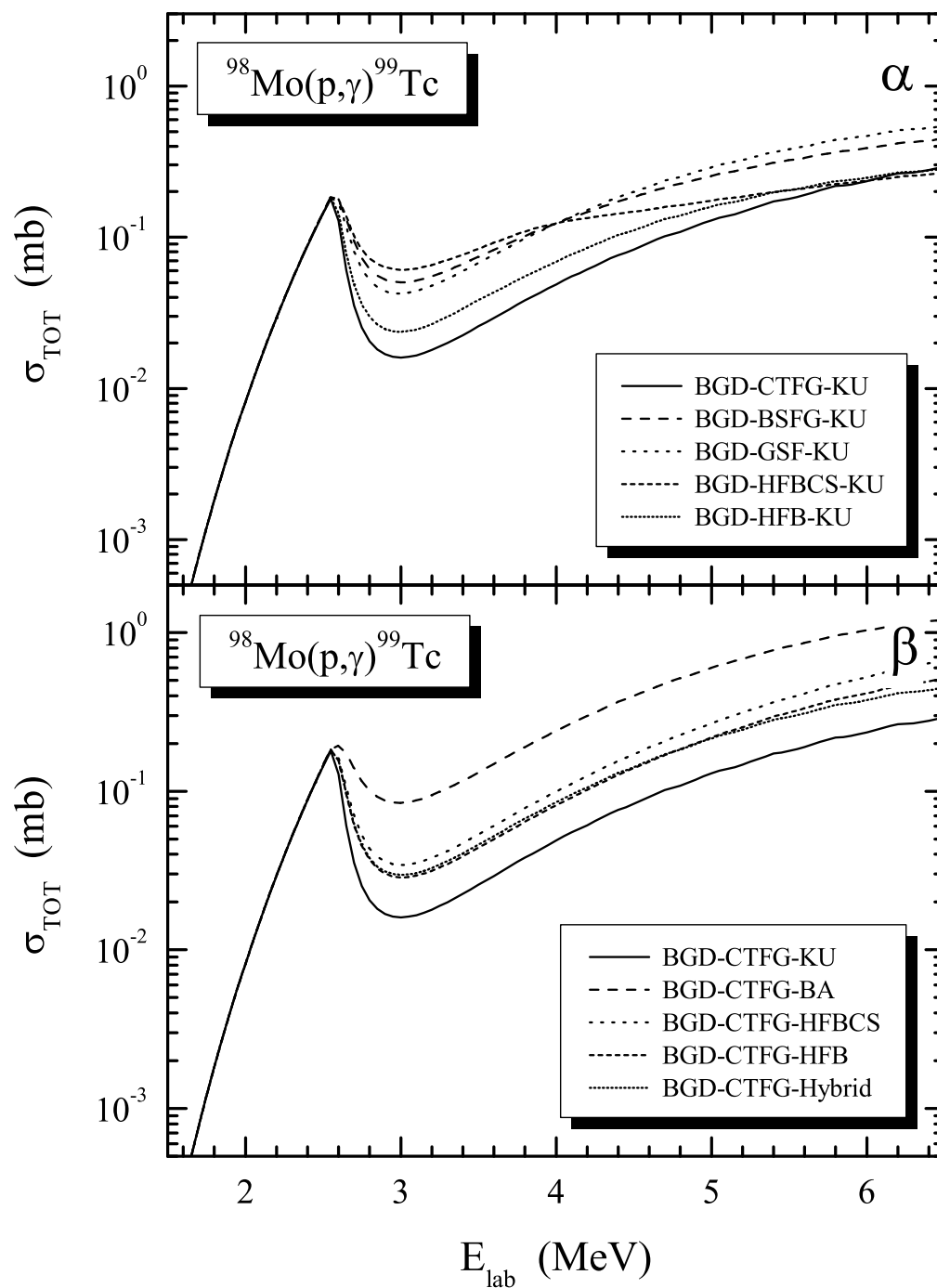
Σχήμα 5.15: Εξάρτηση της ενεργού διατομής των αντιδράσεων $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93}\text{Tc}$ και $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$ από τα διάφορα πρότυπα Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και Συνάρτησης Ισχύος Ακτίνων γ . (α),(γ): Η διακύμανση στην ενεργό διατομή οφείλεται μόνο στην αλλαγή του προτύπου Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων καθώς όλες οι καμπύλες αντιστοιχούν στα ίδια πρότυπα ΟΔ (BDG) και Συνάρτησης Ισχύος (KU). (β),(δ): Στο σχήμα αυτό, φαίνεται η εξάρτηση της ενεργού διατομής από τα διάφορα πρότυπα Συνάρτησης Ισχύος καθώς όλες οι καμπύλες υπολογίστηκαν για τα ίδια πρότυπα ΟΔ (BDG) και Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων (CTFG).



Σχήμα 5.16: Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ είναι ανεξάρτητη των προτύπων α) Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και β) Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ σε ενέργειες μικρότερες από την ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,n)^{80}\text{Br}$.



Σχήμα 5.17: Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ είναι ανεξάρτητη των προτύπων α) Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και β) Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ σε ενέργειες μικρότερες από την ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p, n)^{97}\text{Tc}$.

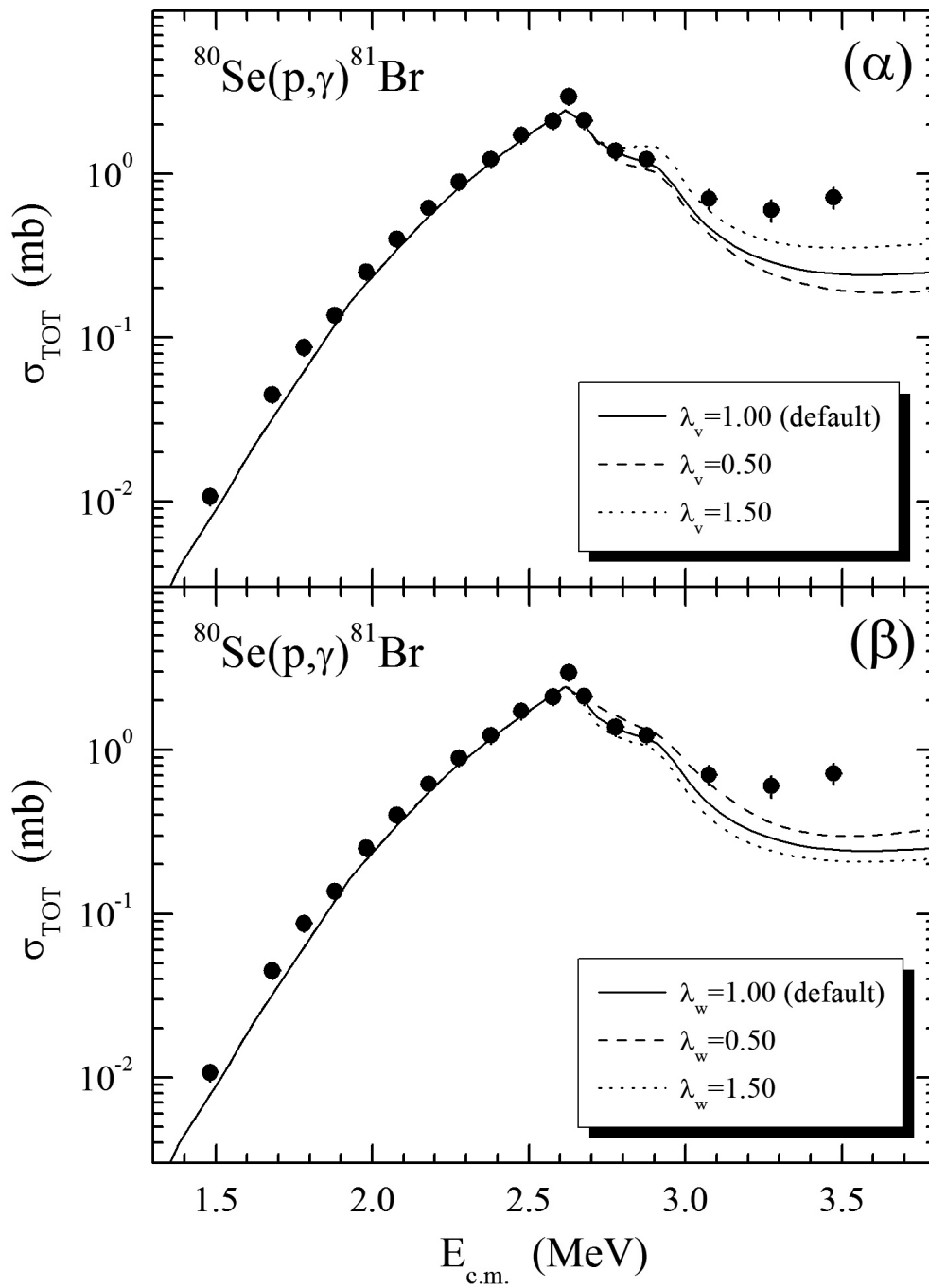


Σχήμα 5.18: Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ είναι ανεξάρτητη των προτύπων α) Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και β) Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ σε ενέργειες μικρότερες από την ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, n)^{98}\text{Tc}$.

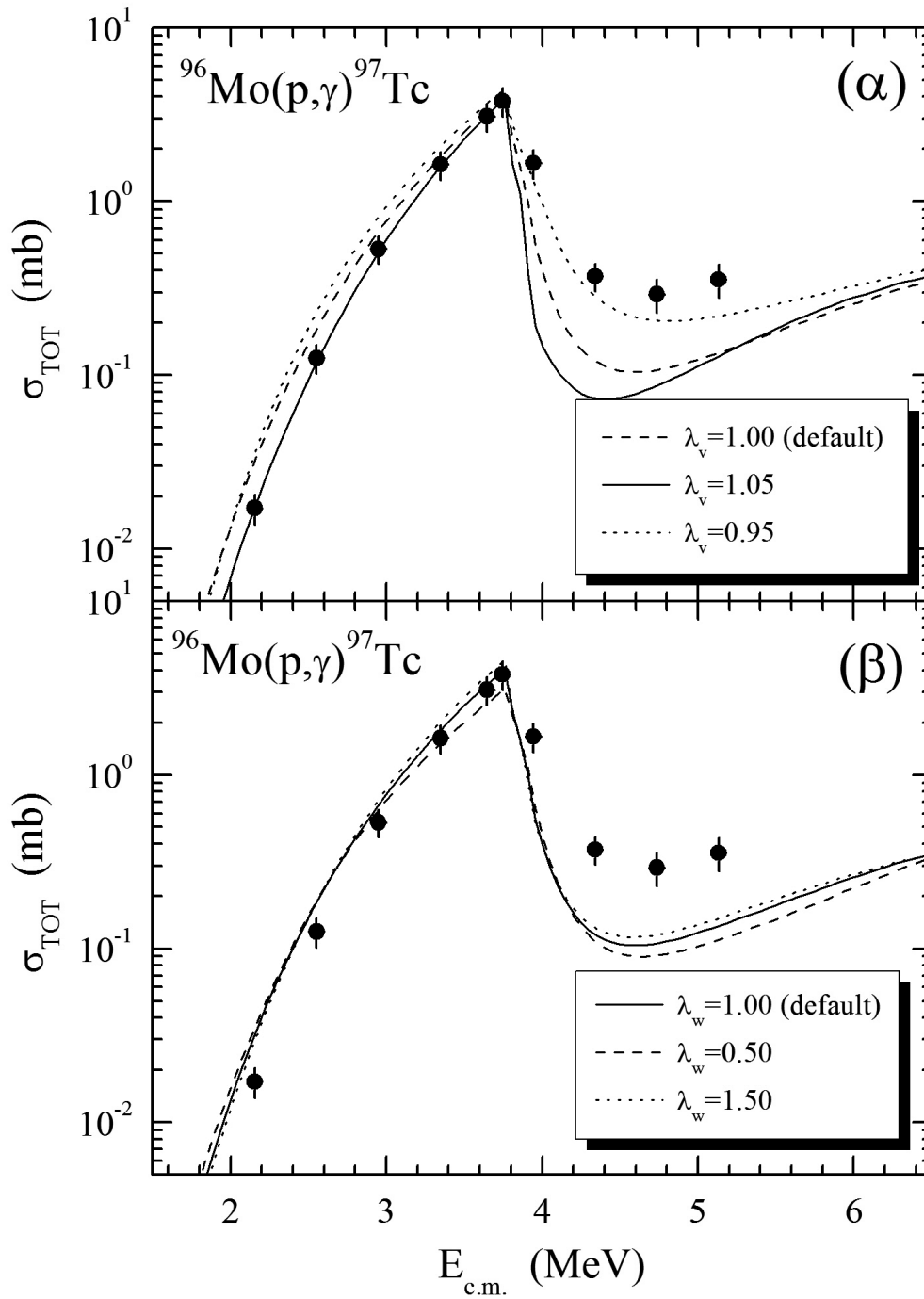
5.4.1 Βελτιστοποίηση των παραμέτρων λ_v και λ_w του ΟΔ BDG

Η εξάρτηση της ενεργού διατομής των αντιδράσεων $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ από τις παραμέτρους λ_v και λ_w απεικονίζεται στα σχήματα 5.19, 5.20 και 5.21, αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά, παρατηρείται ότι:

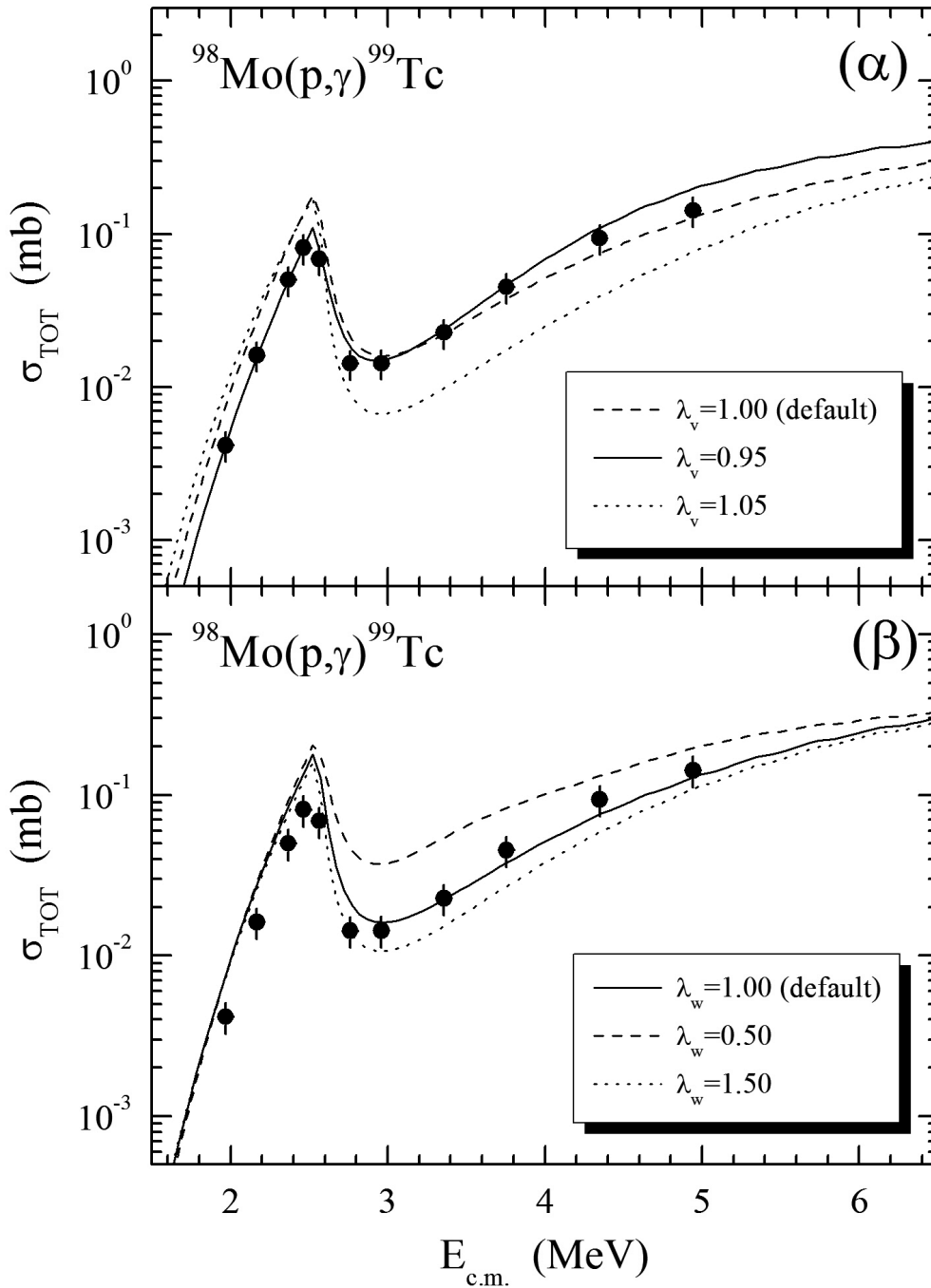
- Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ είναι ανεξάρτητη των παραμέτρων λ_v και λ_w για ενέργειες δέσμης μικρότερες από την ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, n)^{80}\text{Br}$ στα 2.69 MeV. Οι διαφορές που παρατηρούνται σε μεγαλύτερες ενέργειες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διερεύνηση καθώς, όπως αποδείχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχει ισχυρή εξάρτηση από τις παραμέτρους της Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και των Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ .
- Τα πειραματικά σημεία της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ προσαρμόζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο μετά από αύξηση της παραμέτρου λ_v μόλις κατά 5% ($\lambda_v=1.05$). Η ευαισθησία της αντίδρασης αυτής στη παράμετρο λ_v είναι εμφανής ακόμα και για μικρές μεταβολές της εν λόγω παραμέτρου. Αντιθέτως, η εξάρτησή της από την παράμετρο λ_w είναι ιδιαίτερα ασθενής, καθώς για μικρές μεταβολές των τιμών της ενεργού διατομής απαιτούνται μεγάλες μεταβολές στις τιμές της παραμέτρου λ_w . Οι ενεργειακές περιοχές με $E > 3795$ keV, ενέργεια που αντιστοιχεί στην ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p, n)^{96}\text{Tc}$, αγνοήθηκαν.
- Η βέλτιστη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ επιτυγχάνεται μετά από μείωση της παραμέτρου λ_v κατά 5% ($\lambda_v=0.95$). Η ενεργός διατομή της αντίδρασης αυτής είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις μεταβολές της παραμέτρου λ_v , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.21. Οι ενεργειακές περιοχές με $E > 2492$ keV αγνοήθηκαν λόγω της εξάρτησης της ενεργού διατομής από τα μοντέλα Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ (σχήμα 5.18) στις περιοχές αυτές. Όπως και στις δύο παραπάνω αντιδράσεις, για ενέργειες δέσμης μικρότερες από την ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, n)^{98}\text{Tc}$, η μεταβολή της παραμέτρου λ_w δεν επιφέρει, σχεδόν, καμία αλλαγή στην ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$.



Σχήμα 5.19: Πειραματικές ενεργές διατομές (κύκλοι) της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ και αντίστοιχοι υπολογισμοί με τον κώδικα TALYS μεταβάλλοντας τις παραμέτρους λ_v και λ_w του Οπτικού Δυναμικού BDG κατά 50% κάτω (εσοιγμένη καμπύλη) και κατά 50% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (συνεχής καμπύλη).

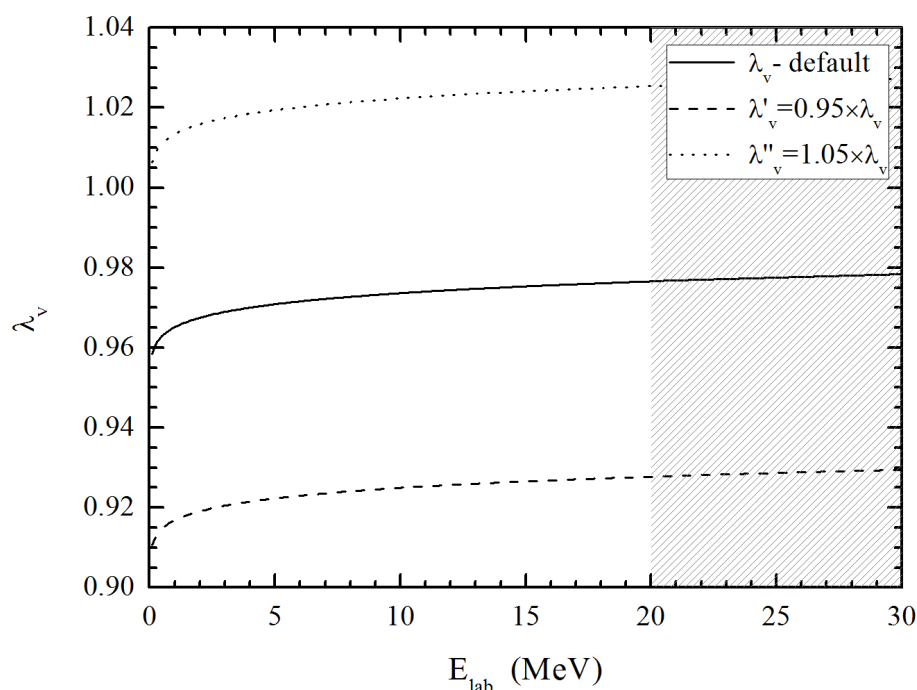


Σχήμα 5.20: Πειραματικές ενεργές διατομές (κύκλοι) της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$ και αντίστοιχοι υπολογισμοί με τον κώδικα TALYS μεταβάλλοντας (α) την παράμετρο λ_v κατά 5% πάνω (συνεχής καμπύλη) και κατά 5% κάτω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (εστιγμένη καμπύλη) και (β) την παράμετρο λ_w κατά 50% κάτω (εστιγμένη καμπύλη) και κατά 50% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (συνεχής καμπύλη).



Σχήμα 5.21: Πειραματικές ενεργές διατομές (κύκλοι) της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$ και αντίστοιχοι υπολογισμοί με τον κώδικα TALYS μεταβάλλοντας (α) την παράμετρο λ_v κατά 5% κάτω (συνεχής καμπύλη) και κατά 5% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (εστιγμένη καμπύλη) και (β) την παράμετρο λ_w κατά 50% κάτω (εστιγμένη καμπύλη) και κατά 50% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (συνεχής καμπύλη).

Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της παραμέτρου λ_v σε συνάρτηση με την ενέργεια δέσμης. Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στις προκαθορισμένες τιμές της εν λόγω παραμέτρου (σχέση 5.21) ενώ η εστιγμένη και η διακεκομμένη καμπύλη στις τιμές που προέκυψαν από την προσαρμογή της στα πειραματικά δεδομένα των αντιδράσεων $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ και $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$, αντίστοιχα. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στην ενεργειακή περιοχή που συναντάται η πλειοψηφία των δεδομένων της βιβλιογραφίας, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή των ελεύθερων παραμέτρων του ΟΔ BDG. Οι αβεβαιότητες της παραμέτρου λ_v στην περιοχή αυτή είναι μικρότερες του 1.5%.

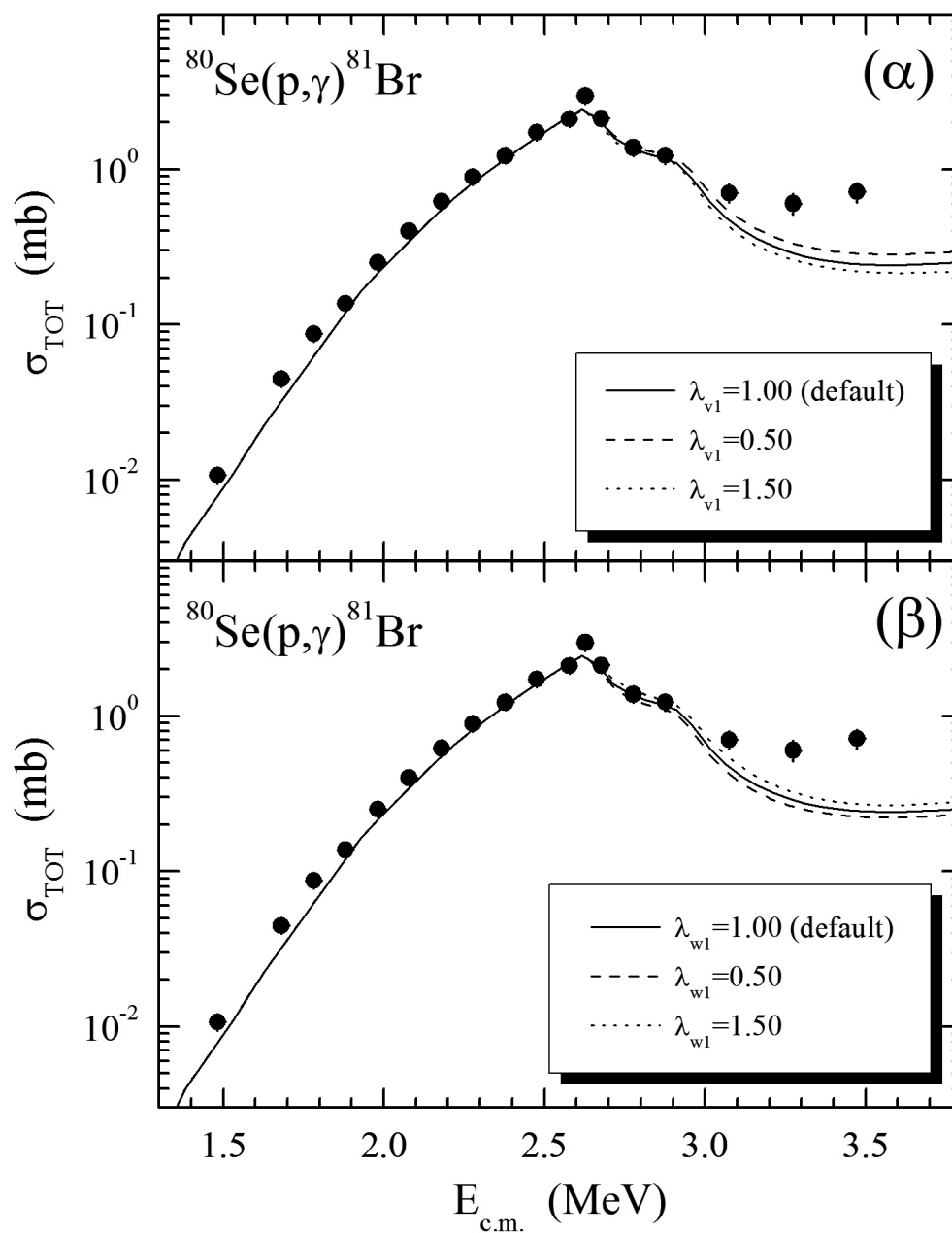


Σχήμα 5.22: Ενεργειακή εξάρτηση της παραμέτρου λ_v του (ημι)μικροσκοπικού Οπτικού Δυναμικού BDG. Με μαύρη συνεχή καμπύλη παρουσιάζονται οι τιμές της εν λόγω παραμέτρου, όπως υπολογίστηκαν από τη σχέση (5.21) ενώ με εστιγμένη και διακεκομμένη καμπύλη οι καινούργιες τιμές που προέκυψαν από την προσαρμογή του ΟΔ BDG σε δεδομένα της παρούσας εργασίας. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή που η παράμετρος λ_v παρουσιάζει τις μικρότερες αβεβαιότητες.

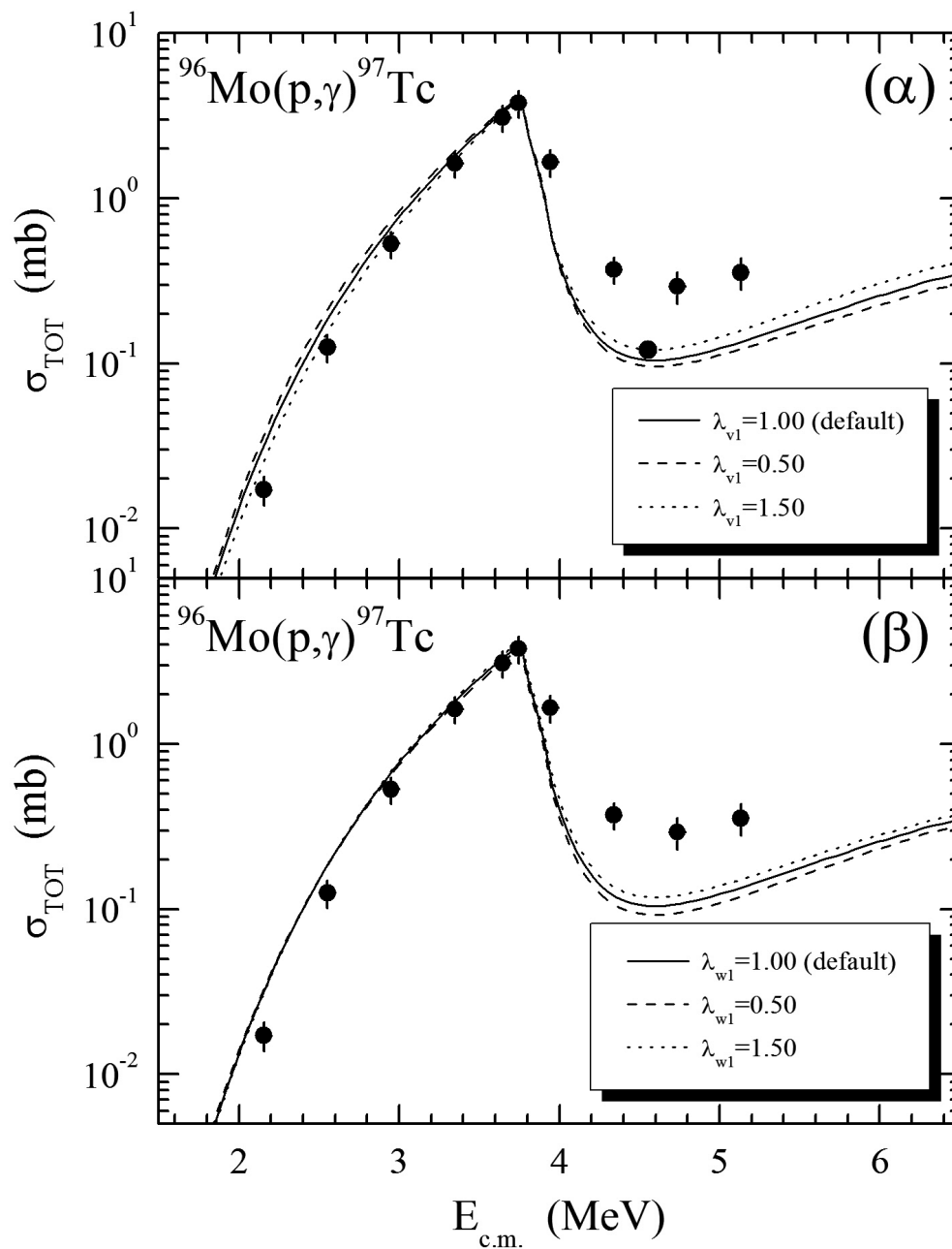
5.4.2 Βελτιστοποίηση των σταθερών λ_{v1} και λ_{w1} του ΟΔ BDG

Στα σχήματα 5.23, 5.24 και 5.25 παρουσιάζεται η ενεργός διατομή των αντιδράσεων $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$, αντίστοιχα, όπως υπολογίστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μαζί με θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του κώδικα *Talys* για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων λ_{v1} και λ_{w1} του ΟΔ BDG. Στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι:

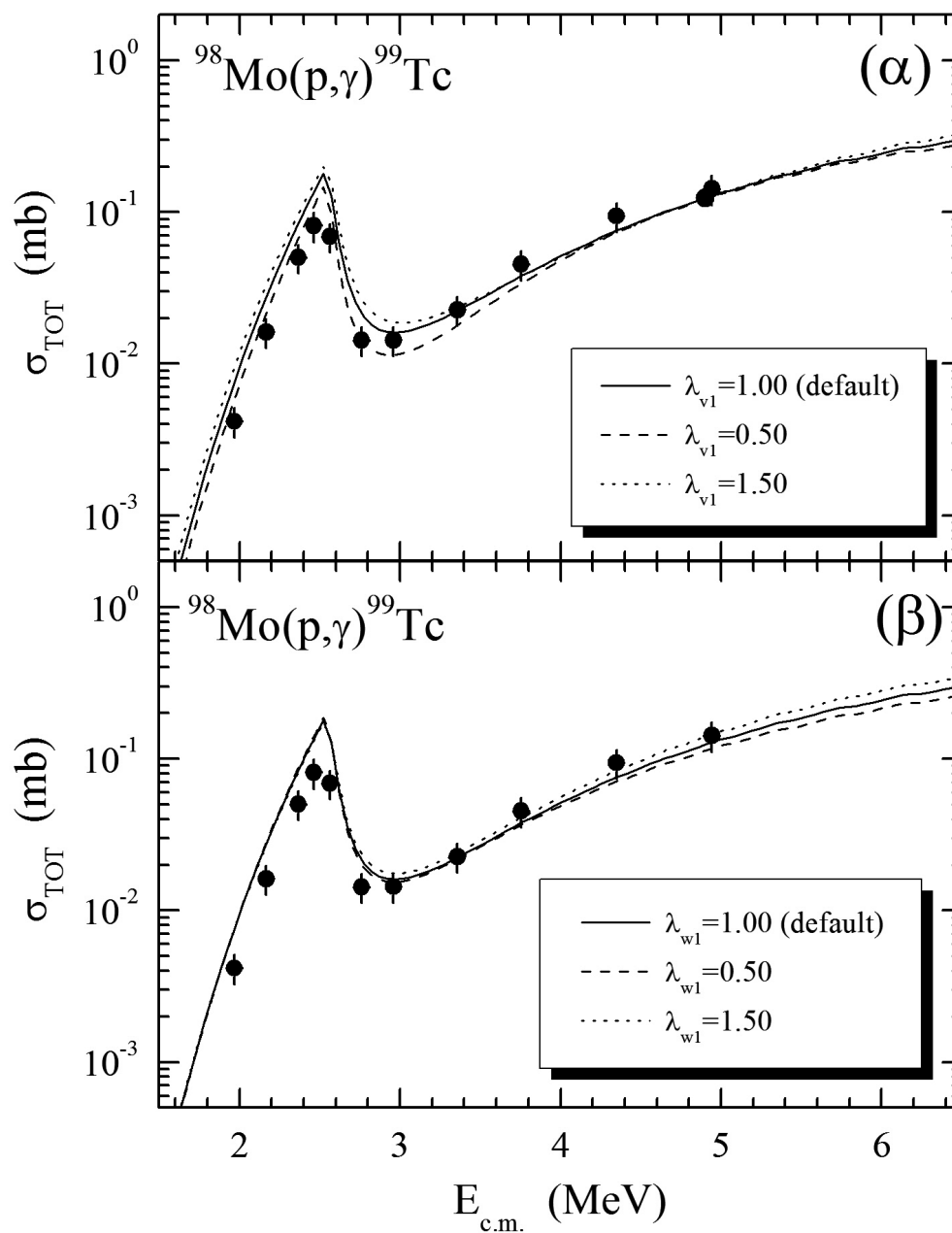
- Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ είναι ανεξάρτητη των παραμέτρων λ_{v1} και λ_{w1} για ενέργειες δέσμης μικρότερες από την ενέργεια κατωφλίου της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, n)^{80}\text{Br}$. Οι ενέργειες αυτές αγνοήθηκαν εξαιτίας της εξάρτησης της ενεργού διατομής από τις παραμέτρους των Πυκνοτήτων Πυρηνικών Καταστάσεων και των Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ στις περιοχές αυτές.
- Η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ βελτιώνεται αργά με την αύξηση της παραμέτρου λ_{v1} . Η βελτίωση αυτή δεν είναι εμφανής στις μεταβολές της παραμέτρου λ_{w1} , οι οποίες δεν επηρεάζουν την ενεργό διατομή της αντίδρασης αυτής.
- Η προσαρμογή των πειραματικών σημείων της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ με χρήση του (ημι)μικροσκοπικού οπτικού δυναμικού BDG βελτιώνεται με τη μείωση της παραμέτρου λ_{v1} . Η εξάρτηση της εν λόγω αντίδρασης από την παράμετρο λ_{v1} είναι ιδιαίτερα ασθενής, καθώς, μεγάλες μεταβολές της παραμέτρου αυτής επιφέρουν αμελητέες μεταβολές στις τιμές της ενεργού διατομής. Οι μεταβολές της παραμέτρου λ_{w1} δεν επηρεάζουν την ενεργό διατομή της παραπάνω αντίδρασης.



Σχήμα 5.23: Πειραματικές ενεργές διατομές (κύκλοι) της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p,\gamma)^{81}\text{Br}$ και αντίστοιχοι υπολογισμοί με τον κώδικα TALYS μεταβάλλοντας τις παραμέτρους λ_{v1} και λ_{w1} του Οπτικού Δυναμικού BDG κατά 50% κάτω (εσοιγμένη καμπύλη) και κατά 50% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (συνεχής καμπύλη).



Σχήμα 5.24: Πειραματικές ενεργές διατομές (κύκλοι) της αντίδρασης ${}^{96}\text{Mo}(p, \gamma){}^{97}\text{Tc}$ και αντίστοιχοι υπολογισμοί με τον κώδικα TALYS μεταβάλλοντας τις παραμέτρους λ_v και λ_w του Οπτικού Δυναμικού BDG κατά 50% κάτω (εσοιγμένη καμπύλη) και κατά 50% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (συνεχής καμπύλη).



Σχήμα 5.25: Πειραματικές ενεργές διατομές (κύκλοι) της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$ και αντίστοιχοι υπολογισμοί με τον κώδικα TALYS μεταβάλλοντας τις παραμέτρους λ_v και λ_w του Οπτικού Δυναμικού BDG κατά 50% κάτω (εσιγμένη καμπύλη) και κατά 50% πάνω (διακεκομμένη καμπύλη) από την προκαθορισμένη τιμή (συνεχής καμπύλη).

5.5 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν αντιδράσεις πρωτονικής σύλληψης σε ισότοπα του Σεληνίου και του Μολυβδαινίου σε ενέργειες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην αστρική πυρηνοσύνθεση. Αποτέλεσμα της παραπάνω μελέτης ήταν ο προσδιορισμός της ενεργού διατομής των αντιδράσεων:

- $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$, $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79,g}\text{Br}$ και $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79,m}\text{Br}$,
- $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81,m}\text{Br}$,
- $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93}\text{Tc}$, $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93,g}\text{Tc}$ και $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93,m}\text{Tc}$,
- $^{94}\text{Mo}(p, \gamma)^{95}\text{Tc}$,
- $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$,
- $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$,
- $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$
- $^{100}\text{Mo}(p, \gamma)^{101}\text{Tc}$

Σκοπός της εργασίας είναι α) ο εμπλουτισμός της παγκόσμιας βιβλιογραφίας με πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών σε περιοχές που, ως επί το πλείστον, δεν έχουν μελετηθεί στο παρελθόν για τις παραπάνω αντιδράσεις και β) ο έλεγχος των πυρηνικών μεγεθών που υπεισέρχονται στη θεωρία Hauser-Feshbach. Συγκεκριμένα, οι ενέργειες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της παρούσας διατριβής είναι κατάλληλες για τον έλεγχο και τη βελτίωση του Οπτικού Δυναμικού πρωτονίου-πυρήνα.

Οι μετρήσεις των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ πραγματοποιήθηκαν στο IfS του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης με τη μέθοδο των γωνιακών κατανομών της ακτινοβολίας γ που εκπέμπεται από τις εν λόγω αντιδράσεις ενώ οι αντίστοιχες μετρήσεις των ισότοπων του *Mo* έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του επιταχυντού Dynamitron Tandem του Πανεπιστημίου του Bochum εφαρμόζοντας τη μέθοδο των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων. Οι ισοτοπικά εμπλουτισμένοι στόχοι *Se* και *Mo* που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω πειράματα αναλύθηκαν στο Εργαστήριο Επιταχυντού Tandem του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” με τη βοήθεια των τεχνικών XRF και RBS, αντίστοιχα.

Οι ολικές ενεργές διατομές που μετρήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής με τη μέθοδο των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων κυμαίνονται από 5 έως 6520 μb με σχετικό σφάλμα από 14% έως 22%. Μοναδικές εξαιρέσεις αποτελούν το πρώτο σημείο της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p, \gamma)^{93.g}\text{Tc}$ ($\delta\sigma=39\%$) και το σύνολο των σημείων της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p, \gamma)^{98}\text{Tc}$ όπου το σφάλμα φτάνει μέχρι και το 60%. Για τις αντιδράσεις στις οποίες εφαρμόστηκε η μέθοδος των γωνιακών κατανομών, η ολική ενεργός διατομή προσδιορίστηκε στην περιοχή μεταξύ 10 και 5400 μb με σχετικό σφάλμα μικρότερο του 15%.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα παλαιότερων εργασιών [3, 4] καθώς και με υπολογισμούς της θεωρίας Hauser-Feshbach, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.1 έως 5.13. Οι τελευταίοι πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του κώδικα *TALYS* (έκδοση 1.4) [5]. Οι τρεις θεωρητικές καμπύλες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα αυτά, αντιστοιχούν στους συνδυασμούς Οπτικού Δυναμικού, Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ που δίνονται στον πίνακα 5.2. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των προτύπων των εν λόγω πυρηνικών μεγεθών (OMP, NLD και γSF) που χρησιμοποιεί ο κώδικας *TALYS* (πίνακας 5.1).

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συστηματική αυτή μελέτη συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Σε κάθε περίπτωση τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με τις προβλέψεις της θεωρίας Hauser-Feshbach.
2. Το φαινομενολογικό πρότυπο των Koning και Delaroche [7] για το Οπτικό Δυναμικό νουκλεονίου-πυρήνα σε συνδυασμό με τα φαινομενολογικά πρότυπα του Αερίου Fermi Σταθερής Θερμοκρασίας (Constant Temperature Fermi Gas) [5] και της Γενικευμένης Λορεντζιανής (Generalized Lorentzian) [8] για τις Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων και τις Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ , αντίστοιχα, αναπαράγουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα πειραματικά δεδομένα στις ενεργειακές περιοχές που το κανάλι (p, n) είναι “κλειστό”.
3. Ο (ημι)μικροσκοπικός συνδυασμός του Οπτικού Δυναμικού BDG με τις Πυκνότητες Πυρηνικών Καταστάσεων και τις Συναρτήσεις Ισχύος Ακτίνων γ που υπολογίστηκαν με βάση το πρότυπο Hartree-Fock-Bogolyubov [9] δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που το ανταγωνιστικό κανάλι (p, n) είναι “ανοιχτό”.

Τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων λ_v , λ_{v1} , λ_w και λ_{w1} του (ημι)μικροσκοπικού Οπτικού Δυναμικού των Bauge, Delaroche και Girod (BDG) [6]. Με τη βοήθεια του κώδικα *TALYS*, οι τιμές των παραμέτρων αυτών μεταβλήθηκαν με βήμα 2% σε ένα εύρος από 50% έως 150% της προκαθορισμένης τιμής που χρησιμοποιεί ο κώδικας με βάση τις σχέσεις (5.21) έως και (5.24). Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα των αντιδράσεων $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$, $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$. Σε κάθε αντίδραση λάβαμε υπόψη μόνο την ενεργειακή περιοχή που το κανάλι (p, n) είναι “κλειστό”. Παρατηρήθηκαν τα εξής:

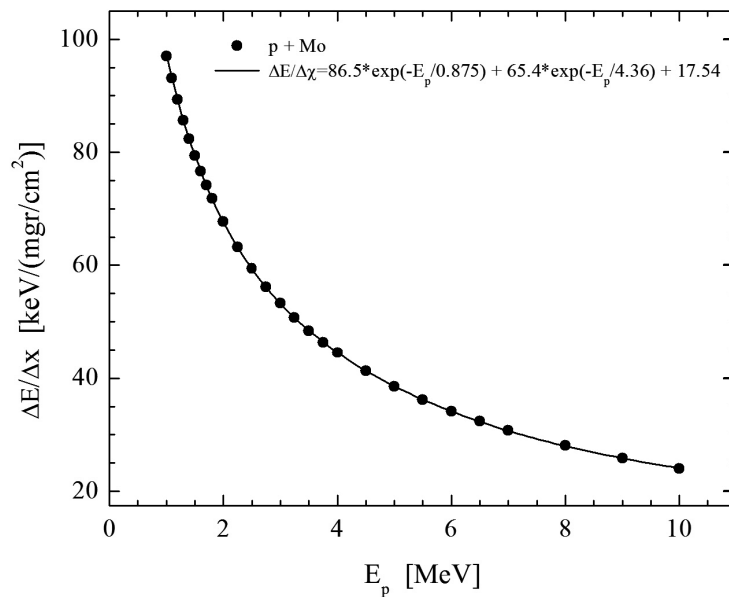
1. Μεταβάλλοντας την παράμετρο λ_v , κατά ένα παράγοντα της τάξης του 5%, οι θεωρητικές καμπύλες περιγράφουν τα πειραματικά σημεία των αντιδράσεων $^{96}\text{Mo}(p, \gamma)^{97}\text{Tc}$ και $^{98}\text{Mo}(p, \gamma)^{99}\text{Tc}$ με το βέλτιστο τρόπο (σχήματα 5.20 και 5.21).
2. Η εξάρτηση των παραπάνω αντιδράσεων από την παράμετρο λ_{v1} είναι πολύ μικρή ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ευαισθησία στις παραμέτρους λ_w και λ_{w1} .
3. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$ είναι ανεξάρτητη από όλες τις υπό εξέταση παραμέτρους.

Καθώς, όμως, η παραπάνω μελέτη περιορίστηκε στα πειραματικά δεδομένα τριών μόνο αντιδράσεων, για τις οποίες δεν παρατηρήθηκε κάποια συστηματική συμπεριφορά από την προσαρμογή των εν λόγω παραμέτρων, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή καθολικού συμπεράσματος. Κρίνεται, συνεπώς, αναγκαίο πως για τη βελτιστοποίησή τους θα πρέπει η προσαρμογή να γίνει στο σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων της βιβλιογραφίας. Οι υπόλοιπες αντιδράσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία εξαιρέθηκαν από τη διερεύνηση αυτή καθώς οι ανταγωνιστικές αντιδράσεις $^{78}\text{Se}(p, p')^{78}\text{Se}$, $^{92}\text{Mo}(p, p')^{92}\text{Mo}$, $^{94}\text{Mo}(p, p')^{94}\text{Mo}$, $^{97}\text{Mo}(p, n)^{97}\text{Tc}$ και $^{100}\text{Mo}(p, n)^{100}\text{Tc}$ είναι ισχυρές στις ενέργειες που έγιναν οι μετρήσεις με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί να εξαρτώνται από τα διάφορα πρότυπα Πυκνότητας Πυρηνικών Καταστάσεων και Συναρτήσεων Ισχύος Ακτίνων γ (σχήματα 5.14 και 5.15).

Παράρτημα Α΄

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Α΄.1 Απώλειες ενέργειας δέσμης πρωτονίων σε στόχο Se



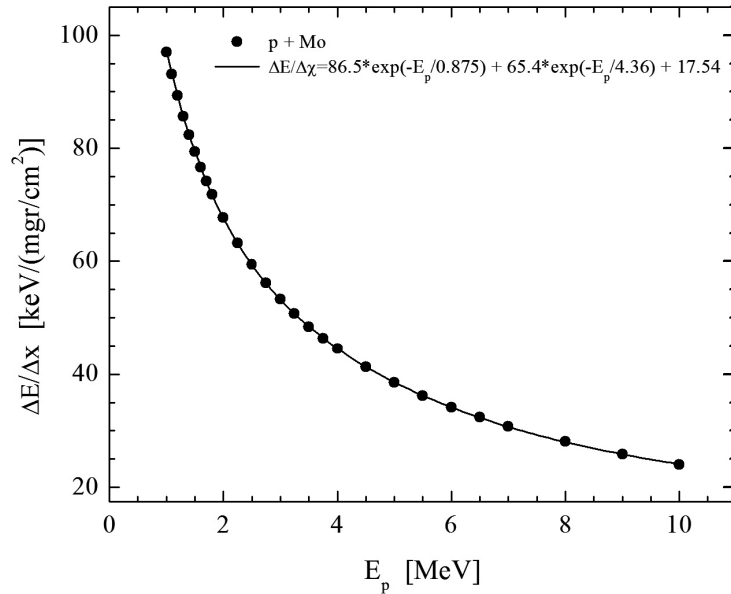
Σχήμα Α΄.1: Απώλεια ενέργειας της δέσμης ανά μονάδα πάχους του στόχου Se.

Η συνεχής γραμμή του σχήματος Α΄.1 αντιπροσωπεύει την προσαρμογή των σημείων της προσομοίωσης με εκθετική συνάρτηση δεύτερης τάξης:

$$\Delta E/\Delta x = 76.1 * \exp(-E_p/3.86) + 117.2 * \exp(-E_p/0.72)) + 19.5 \quad (\text{Α΄.1})$$

όπου ΔE η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα πάχους Δx και E_p η ενέργεια της δέσμης πρωτονίων.

Α'.2 Απώλειες ενέργειας δέσμης πρωτονίων σε στόχο Mo



Σχήμα Α'.2: Απώλεια ενέργειας της δέσμης ανά μονάδα πάχους του στόχου *Mo*.

Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή των σημείων αυτών με τη συνάρτηση :

$$\Delta E/\Delta x = 86.5 * \exp(-E_p/0.875) + 65.4 * \exp(-E_p/4.36) + 17.54 \quad (\text{Α'.2})$$

όπου ΔE η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα πάχους Δx και E_p η ενέργεια της δέσμης πρωτονίων.

Παράρτημα Β΄

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΑΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ενεργών διατομών των αντιδράσεων που μελετήθηκαν με τη μέθοδο των γωνιακά ολοκληρωμένων μετρήσεων (αντιδράσεις πρωτονικής σύλληψης στα ισότοπα του Mo). Τα σύμβολα που εμφανίζονται στα αρχεία αυτά εξηγούνται παρακάτω:

- E_p : Ενέργεια βλήματος.
- ΔE : Απώλεια ενέργειας της δέσμης στο στόχο.
- E_{eff} : $E_p - \Delta E / 2$.
- $E_{c.m.}$: Ενέργεια στο σύστημα του κέντρου μάζας.
- $E_{\gamma 0}$: Ενέργεια της αθροιστικής κορυφής.
- Flag: Θέση ανιχνευτή NaI.
- Filename: Όνομα του αρχείου φάσματος.
- B : Μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη ανάλυσης.
- Area: Εμβαδόν της αθροιστικής κορυφής.
- Dead Time: Νεκρός χρόνος (%).
- Scale: Κλίμακα στον ολοκληρωτή φορτίου.
- Pulses: Παλμοί στον ολοκληρωτή φορτίου.

- Q : Ολικό συλλεγόμενο φορτίο στο στόχο.
- σ : Ενεργός διατομή.
- $\sigma_{scr-corr.}$: Διορθωμένη ως προς τον συντελεστή Screening ενεργός διατομή.
- ξ : Πάχος στόχου.
- R : Ισοτοπικός εμπλουτισμός στόχου.

Ep	ΔE (keV)	δ(ΔE)	E _{eff}	δ(E _{eff})	Ec.m.	δ(Ec.m.)	Eγ0	Flag	Filename	B	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q	δQ
(keV)	(keV)	(keV)	(keV)	(keV)	(keV)	(keV)	(keV)		(Gauss)	(Gauss)	(In/Out)	error	<M>	error		(mC)	error
2000	76	15	1962	8	1941	8	6027	In	Mo92-001	3186.51	692	252	0.88	6E-11	700025	0.04200	3%
2400	68	14	2366	7	2340	7	6427	In	Mo92-008	3496.97	3183	165	1.19	2E-10	250019	0.05000	0.00150
2800	62	12	2769	6	2739	6	6825	In	Mo92-009	3777.67	4341	422	1.65	2E-10	100001	0.02000	0.00060
3800	52	10	3774	5	3733	5	7820	In	Mo92-015	4402.07	21071	273	2.10	2E-10	76518	0.01530	0.00046
4200	49	10	4176	5	4130	5	8217	In	Mo92-016	4628.48	24081	248	2.43	6E-11	150012	0.00900	0.00027
4600	46	9	4577	5	4527	5	8614	In	Mo92-018	4844.4	21750	230	2.09	2E-11	300024	0.00600	0.00018
5000	43	9	4978	4	4924	4	9011	In	Mo92-021	5051.16	21136	221	2.47	2E-11	201353	0.00403	0.00012
5400	41	8	5379	4	5321	4	9408	In	Mo92-022	5249.84	11798	167	2.76	2E-11	100002	0.00200	0.00006
5800	39	8	5780	4	5718	4	9804	In	Mo92-025	5441.43	9251	147	1.91	6E-12	200008	0.00120	0.00004
6200	37	7	6181	4	6114	4	10201	In	Mo92-026	5626.5	5838	124	2.28	6E-12	120002	0.00072	0.00002
Ep	Flag	Filename	B	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ	R	error	<M>	error		εabs	error
(keV)			(Gauss)	(barr)	(barr)	(barr)	(barr)				(In/Out)	error		error			
2000	Out	Mo92-030	3192.02	297	67	0.82	2E-10	400027	0.0800	0.0024	10.7340	0.6141	2.6132	0.0600	In/Out	0.2114	0.0260
2400	Out	Mo92-029	3497.11	326	297	0.91	2E-10	400008	0.0800	0.0024	10.7340	0.2465	2.6132	0.0600	In/Out	0.2057	0.0253
2800	Out	Mo92-028	3777.81	352	404	1.15	2E-10	400027	0.0800	0.0024	10.7340	0.2465	2.6132	0.0600	In/Out	0.2001	0.0246
3800	Out	Mo92-014	4402.06	4096	148	2.12	2E-10	200002	0.0400	0.0012	13.4435	0.7692	2.8610	0.0630	In/Out	0.1692	0.0237
4200	Out	Mo92-017	4628.5	5125	122	1.70	6E-11	300010	0.0180	0.0005	9.4645	0.4706	2.4746	0.0547	In/Out	0.1920	0.0217
4600	Out	Mo92-019	4844.39	1810	80	1.52	2E-11	300006	0.0060	0.0002	12.0833	0.7512	2.7435	0.0685	In/Out	0.1678	0.0222
5000	Out	Mo92-020	5051.16	3226	108	1.98	2E-11	300001	0.0060	0.0002	9.8085	0.5399	2.5139	0.0606	In/Out	0.1796	0.0208
5400	Out	Mo92-023	5249.85	2638	102	1.68	2E-11	230001	0.0046	0.0001	10.3954	0.6146	2.5779	0.0651	In/Out	0.1705	0.0205
5800	Out	Mo92-024	5441.43	1850	77	1.76	6E-12	400005	0.0024	0.0001	10.0155	0.6162	2.5369	0.0677	In/Out	0.1690	0.0199
6200	Out	Mo92-027	5626.52	1304	71	1.90	6E-12	300014	0.0018	0.0001	11.2346	0.8114	2.6633	0.0795	In/Out	0.1557	0.0197
Ep	Ec.m.	error	σ	δσ	Screen.	σ_scr-corr.	δσ										
(keV)	(MeV)	(MeV)	(barr)	(barr)	Factor	(barr)	(barr)										
2000	1941	8	1.85E-06	7.23E-07	1.1015	1.68E-06	6.57E-07										
2400	2340	7	7.35E-06	1.13E-06	1.0758	6.83E-06	1.05E-06										
2800	2739	6	2.59E-05	4.51E-06	1.0594	2.44E-05	4.26E-06										
3800	3733	5	1.95E-04	3.12E-05	1.0369	1.88E-04	3.01E-05										
4200	4130	5	3.35E-04	4.58E-05	1.0316	3.25E-04	4.44E-05										
4600	4527	5	5.18E-04	7.91E-05	1.0275	5.04E-04	7.70E-05										
5000	4924	4	7.03E-04	9.78E-05	1.0242	6.86E-04	9.55E-05										
5400	5321	4	8.35E-04	1.20E-04	1.0215	8.17E-04	1.17E-04										
5800	5718	4	1.09E-03	1.54E-04	1.0193	1.07E-03	1.51E-04										
6200	6114	4	1.25E-03	1.86E-04	1.0174	1.23E-03	1.83E-04										

$^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,g.s.}\text{Tc}$
 Q-value= 4.0865 MeV
 Στόχος:
 $\xi=1123\pm 79 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 R=92.8%

Σχήμα Β'.1: Ανάλυση της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,g.s.}\text{Tc}$.

Ep (keV)	ΔE (keV)	δ(ΔE)	E _{eff} (keV)	δ(E _{eff}) (keV)	Ec.m. (keV)	δ(Ec.m.) (keV)	E _{γ1} (keV)	Flag	B (Gauss)	File name	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ	R (In/Out)	error	<M>	error	εabs	error	δQ
2000	76	15	1962	8	1941	8	5635	In	3186.51	Mo92-001	1346	65	0.88	6E-11	700025	0.04200	3%						0.00126	
2400	68	14	2366	7	2340	7	6035	In	3496.97	Mo92-008	6893	287	1.19	2E-10	250019	0.05000							0.00150	
2800	62	12	2769	6	2739	6	6434	In	3777.67	Mo92-009	6069	115	1.65	2E-10	100001	0.02000							0.00060	
3800	52	10	3774	5	3733	5	7428	In	4402.07	Mo92-015	17400	764	2.10	2E-10	76518	0.01530							0.00046	
4200	49	10	4176	5	4130	5	7825	In	4628.48	Mo92-016	15336	524	2.43	6E-11	150012	0.00900							0.00027	
4600	46	9	4577	5	4527	5	8222	In	4844.40	Mo92-018	12615	349	2.09	2E-11	300024	0.00600							0.00018	
5000	43	9	4978	4	4924	4	8619	In	5051.16	Mo92-021	10499	347	2.47	2E-11	201353	0.00403							0.00012	
5400	41	8	5379	4	5321	4	9016	In	5249.84	Mo92-022	6808	270	2.76	2E-11	100002	0.00200							0.00006	
5800	39	8	5780	4	5718	4	9412	In	5441.43	Mo92-025	5715	368	1.91	6E-12	200008	0.00120							0.00004	
6200	37	7	6181	4	6114	4	9809	In	5626.50	Mo92-026	3345	229	2.28	6E-12	120002	0.00072							0.00002	
Ep (keV)																								
2000	Out		3192.02			0.82	2E-10	400027	0.08001	3%							0.00240						0.2172	0.0267
2400	Out		3497.11			0.91	2E-10	400008	0.08000	0.00240							0.00240					0.2113	0.0260	
2800	Out		3777.81			1.15	2E-10	400027	0.08001	0.00240							0.00240					0.2056	0.0253	
3800	Out		4402.06			2.12	2E-10	200002	0.04000	0.00120							0.00120					0.1921	0.0236	
4200	Out		4628.50			1.70	6E-11	300010	0.01800	0.00054							0.00054					0.1870	0.0230	
4600	Out		4844.39			1.52	2E-11	300006	0.00600	0.00018							0.00018					0.1820	0.0224	
5000	Out		5051.16			1.98	2E-11	300001	0.00600	0.00018							0.00018					0.1772	0.0218	
5400	Out		5249.85			1.68	2E-11	230001	0.00460	0.00014							0.00014					0.1725	0.0212	
5800	Out		5441.43			1.76	6E-12	400005	0.00240	0.00007							0.00007					0.1679	0.0206	
6200	Out		5626.52			1.90	6E-12	300014	0.00180	0.00005							0.00005					0.1635	0.0201	
Ep (keV)	Ec.m. (MeV)	error (MeV)	σ (barn)	δσ (barn)	Screen. Factor	σ _{scr-corr.} (barn)	δσ (barn)																	
2000	1941	8	3.49E-06	5.33E-07	1.1015	3.17E-06	4.84E-07																	
2400	2340	7	1.55E-05	2.33E-06	1.0758	1.44E-05	2.17E-06																	
2800	2739	6	3.52E-05	5.14E-06	1.0594	3.32E-05	4.85E-06																	
3800	3733	5	1.42E-04	2.14E-05	1.0369	1.37E-04	2.07E-05																	
4200	4130	5	2.19E-04	3.26E-05	1.0316	2.12E-04	3.16E-05																	
4600	4527	5	2.77E-04	4.08E-05	1.0275	2.69E-04	3.97E-05																	
5000	4924	4	3.54E-04	5.25E-05	1.0242	3.46E-04	5.13E-05																	
5400	5321	4	4.76E-04	7.14E-05	1.0215	4.66E-04	6.99E-05																	
5800	5718	4	6.78E-04	1.07E-04	1.0193	6.66E-04	1.05E-04																	
6200	6114	4	6.82E-04	1.09E-04	1.0174	6.71E-04	1.07E-04																	

$^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,m}\text{Tc}$
 Q-value= 4.0865 MeV
 Σρόγος:
 $\xi=1123\pm 79 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 R=92.8%

Σχήμα Β'.2: Ανάλυση της αντίδρασης $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)^{93,m}\text{Tc}$.

Ep (keV)	ΔE (keV)	δ(ΔE) (keV)	E _{eff} (keV)	δ(E _{eff}) (keV)	Ec.m. (keV)	δ(Ec.m.) (keV)	E _{γ0} (keV)	Flag	Filename	B (Gauss)	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ
3000	36	7	2982	4	2950	4	7847	In	Mo94-017	3910.55	5821	105	1.52	6E-11	100005	0.00600	3%
3400	33	7	3383	3	3348	3	8244	In	Mo94-016	4163.55	13372	179	2.31	2E-11	300067	0.00600	0.00018
3800	31	6	3785	3	3744	3	8640	In	Mo94-013	4402.17	13630	179	1.68	2E-11	150016	0.00300	0.00009
4200	29	6	4186	3	4141	3	9037	In	Mo94-012	4628.42	13702	175	2.28	6E-12	300040	0.00180	0.00005
4600	27	5	4586	3	4538	3	9434	In	Mo94-009	4844.43	14252	179	2.08	6E-12	200033	0.00120	0.00004
5000	26	5	4987	3	4934	3	9830	In	Mo94-008	5051.11	24833	243	2.37	6E-12	220022	0.00132	0.00004
5400	25	5	5388	2	5330	2	10227	In	Mo94-005	5249.84	7651	150	2.88	6E-12	150004	0.00090	0.00003
5800	23	5	5788	2	5727	2	10623	In	Mo94-004	5441.44	5438	134	3.4	6E-12	200001	0.00120	0.00004
6200	22	4	6189	2	6123	2	11019	In	Mo94-001	5626.51	4842	135	3.07	2E-12	800010	0.00160	0.00005
Ep (keV)	Flag	Filename	B (Gauss)	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ	R (In/Out)	error	<M>	error	εabs	error	
3000	Out	Mo94-018	3910.54	834	53	1.09	6E-11	300019	0.01800	0.00054	21.0282	1.6509	3.3535	0.0864	0.1470	0.0252	
3400	Out	Mo94-015	4163.57	869	48	1.46	2E-11	300021	0.00600	0.00018	15.5143	1.1003	3.0187	0.0781	0.1532	0.0232	
3800	Out	Mo94-014	4402.06	1126	56	1.22	2E-11	200018	0.00400	0.00012	16.2128	1.0810	3.0672	0.0734	0.1487	0.0226	
4200	Out	Mo94-011	4628.46	721	48	1.49	6E-12	300088	0.00180	0.00005	19.1552	1.5318	3.2508	0.0880	0.1355	0.0224	
4600	Out	Mo94-010	4844.42	862	56	1.36	6E-12	250008	0.00150	0.00005	20.8111	1.6358	3.3421	0.0865	0.1276	0.0218	
5000	Out	Mo94-007	5051.23	1394	70	1.63	6E-12	300006	0.00180	0.00005	24.4670	1.6261	3.5203	0.0732	0.1168	0.0212	
5400	Out	Mo94-006	5249.88	630	45	1.73	6E-12	250010	0.00150	0.00005	20.4698	1.7473	3.3239	0.0940	0.1198	0.0203	
5800	Out	Mo94-003	5441.5	591	57	2.67	6E-12	500011	0.00300	0.00009	23.1673	2.5069	3.4602	0.1191	0.1109	0.0197	
6200	Out	Mo94-002	5626.51	109	29	1.73	2E-12	400007	0.00080	0.00002	22.5037	6.0952	3.4282	0.2982	0.1083	0.0190	
Ep (keV)	Ec.m. (MeV)	error (MeV)	σ (barn)	δσ (barn)	Screen. Factor	σ _{scr-corr.} (barn)	δσ (barn)										
3000	2950	4	2.71E-04	5.11E-05	1.0529	2.58E-04	4.85E-05										
3400	3348	3	6.02E-04	1.02E-04	1.0436	5.77E-04	9.80E-05										
3800	3744	3	1.27E-03	2.20E-04	1.0367	1.23E-03	2.12E-04										
4200	4141	3	2.33E-03	4.24E-04	1.0315	2.25E-03	4.11E-04										
4600	4538	3	3.84E-03	7.20E-04	1.0274	3.74E-03	7.01E-04										
5000	4934	3	6.68E-03	1.31E-03	1.0241	6.52E-03	1.28E-03										
5400	5330	2	2.96E-03	5.52E-04	1.0215	2.89E-03	5.41E-04										
5800	5727	2	1.71E-03	3.33E-04	1.0193	1.68E-03	3.27E-04										
6200	6123	2	1.17E-03	2.26E-04	1.0174	1.15E-03	2.22E-04										

$^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$
 Q-value = 4.896 MeV
 Στόχος:
 $\xi = 671 \pm 47 \mu\text{g}/\text{cm}^2$
 $R = 92.0 \pm 0.5\%$

Σχήμα Β'.3: Ανάλυση της αντίδρασης $^{94}\text{Mo}(p,\gamma)^{95}\text{Tc}$.

Ep (keV)	ΔE (keV)	δ(ΔE) (keV)	Eeff (keV)	δ(Eeff) (keV)	Ec.m. (keV)	δ(Ec.m.) (keV)	Eγ0 (keV)	Flag	Filename	B (Gauss)	δQ (mC)	R (ln/Out)	error	<M>	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ	error	
2200	45	9	2178	4	2155	4	7873	In	96Mo-011	3348.03	0.00234	23.8343	4.1349	3.4914	6E-11	300053	0.01800	3%	0.00054	
2600	41	8	2580	4	2553	4	8271	In	96Mo-010	3640.09	0.00054	21.2495	2.3995	3.3660	6E-11	300013	0.01800	3%	0.00054	
3000	37	7	2981	4	2950	4	8689	In	96Mo-007	3910.44	0.00030	18.6511	1.0860	3.2214	6E-11	200006	0.01200	3%	0.00036	
3400	35	7	3383	3	3348	3	9066	In	96Mo-017	4163.50	0.00030	19.8295	1.0598	3.2889	2E-10	50011	0.01000	3%	0.00030	
3700	33	7	3684	3	3645	3	9364	In	96Mo-006	4343.64	0.00018	19.1378	0.9940	3.2498	6E-11	100006	0.00600	3%	0.00018	
3800	32	6	3784	3	3745	3	9463	In	96Mo-003	4402.02	0.00018	20.9191	1.1513	3.3478	6E-11	100014	0.00600	3%	0.00018	
4000	31	6	3984	3	3943	3	9661	In	96Mo-020	4516.67	0.00018	21.1693	1.2784	3.3609	6E-11	50002	0.01000	3%	0.00030	
4400	29	6	4385	3	4340	3	10058	In	96Mo-024	4737.44	0.00018	18.7726	2.1042	3.2286	2E-11	300026	0.00600	3%	0.00018	
4800	28	6	4786	3	4736	3	10455	In	96Mo-027	4948.85	0.00018	20.1498	2.0150	3.3065	2E-11	300013	0.00600	3%	0.00018	
5200	26	5	5187	3	5133	3	10851	In	96Mo-028	5151.51	0.00018	20.1498	2.0150	3.3065	6E-12	300032	0.00180	3%	0.00005	
Ep (keV)																				
2200	Out	6Mo-012&1	0.33	226	37	0.97	6E-11	1300041	0.07800	0.00234	0.00018	23.8343	4.1349	3.4914	6E-11	In/Out	0.1420	3%	0.0255	
2600	Out	96Mo-009	0.36	415	43	1.15	6E-11	300058	0.01800	0.00054	0.00054	21.2495	2.3995	3.3660	6E-11	In/Out	0.1409	3%	0.0242	
3000	Out	96Mo-008	0.39	1977	77	1.36	6E-11	300006	0.01800	0.00054	0.00054	18.6511	1.0860	3.2214	6E-11	In/Out	0.1409	3%	0.0230	
3400	Out	96Mo-018	0.42	2938	94	2.83	2E-10	50009	0.01000	0.00030	0.00030	19.8295	1.0598	3.2889	2E-10	In/Out	0.1338	3%	0.0224	
3700	Out	96Mo-005	0.43	3381	97	2.8	6E-11	100015	0.00600	0.00018	0.00018	19.1378	0.9940	3.2498	6E-11	In/Out	0.1318	3%	0.0217	
3800	Out	96Mo-004	0.44	3641	126	3.1	6E-11	100007	0.00600	0.00018	0.00018	20.9191	1.1513	3.3478	6E-11	In/Out	0.1271	3%	0.0217	
4000	Out	96Mo-019	0.45	2543	107	4.34	2E-10	50011	0.01000	0.00030	0.00030	21.1693	1.2784	3.3609	6E-11	In/Out	0.1244	3%	0.0214	
4400	Out	96Mo-025	0.47	392	40	2.28	2E-11	300009	0.00600	0.00018	0.00018	18.7726	2.1042	3.2286	0.1234	In/Out	0.1250	3%	0.0205	
4800	Out	96Mo-026	0.49	145	29	3.63	2E-11	300008	0.00600	0.00018	0.00018	20.1498	2.0150	3.3065	0.3641	In/Out	0.1244	3%	0.0249	
5200	Out	96Mo-029	0.52	91	24	2.77	6E-12	300007	0.00180	0.00005	0.00005	20.1498	2.0150	3.3065	0.3641	In/Out	0.1244	3%	0.0249	
Ep (keV)	Ec.m. (MeV)	error (MeV)	σ (barn)	δσ (barn)	Screen. Factor	σ_scr-corr. (barn)	δσ (barn)													
2200	2155	4	1.87E-05	3.71E-06	1.0862	1.72E-05	3.42E-06													
2600	2553	4	1.34E-04	2.52E-05	1.0662	1.25E-04	2.36E-05													
3000	2950	4	5.60E-04	1.01E-04	1.0529	5.32E-04	9.60E-05													
3400	3348	3	1.70E-03	3.13E-04	1.0436	1.63E-03	3.00E-04													
3700	3645	3	3.20E-03	5.82E-04	1.0383	3.08E-03	5.60E-04													
3800	3745	3	3.91E-03	7.33E-04	1.0367	3.77E-03	7.07E-04													
4000	3943	3	1.72E-03	3.23E-04	1.0340	1.66E-03	3.12E-04													
4400	4340	3	3.81E-04	6.93E-05	1.0293	3.71E-04	6.73E-05													
4800	4736	3	3.00E-04	6.45E-05	1.0257	2.92E-04	6.29E-05													
5200	5133	3	3.64E-04	7.91E-05	1.0227	3.56E-04	7.73E-05													

$^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$
 Q-value= 5.719 MeV
 Στόχος:
 $\xi=700\pm 49 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 $R=95.9\pm 0.5\%$

Σχήμα Β'.4: Ανάλυση της αντίδρασης $^{96}\text{Mo}(p,\gamma)^{97}\text{Tc}$.

Ep (keV)	ΔE (keV)	δ(ΔE) (keV)	Eeff (keV)	δ(Eeff) (keV)	Ec.m. (keV)	δ(Ec.m.) (keV)	Eγ0 (keV)	Flag	Filename	B (Gauss)	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ (%)
3000	13	3	2993	1	2962	1	9139	In	Mo97-007	3910.53	390	120	1.88	2E-10	400008	0.08000	0.00240
3200	13	3	3194	1	3161	1	9337	In	Mo97-008	4039.04	526	72	2.38	2E-10	300026	0.06001	0.00180
3400	12	2	3394	1	3359	1	9535	In	Mo97-005	4163.41	482	124	2.04	6E-11	800051	0.04800	0.00144
3600	12	2	3594	1	3557	1	9733	In	Mo97-004	4284.28	349	103	2.01	6E-11	450010	0.02700	0.00081
3800	12	2	3794	1	3755	1	9931	In	Mo97-006	4402.07	279	104	2.42	6E-11	250033	0.01500	0.00045
4000	11	2	3994	1	3953	1	10129	In	Mo97-002	4516.76	330	120	1.36	2E-11	700009	0.01400	0.00042
4200	11	2	4195	1	4151	1	10328	In	Mo97-010	4628.48	205	88	1.43	2E-11	350018	0.00700	0.00021
4600	10	2	4595	1	4548	1	10724	In	Mo97-011	4844.38	206	116	2.09	2E-11	250010	0.00500	0.00015
5000	10	2	4995	1	4944	1	11120	In	Mo98-025	5051.16	370	100	2.43	2E-11	300004	0.00600	0.00018
Ep (keV)	εabs	error	Ec.m. (MeV)	error (MeV)	σ (barn)	δσ (barn)	Screen. Factor	σ_scr-corr. (barn)	δσ (barn)								
3000	Global	0.1078	0.0216	2962	1	5.08E-06	1.91E-06	1.0526	4.83E-06	1.81E-06							
3200	Global	0.1053	0.0211	3161	1	9.40E-06	2.39E-06	1.0476	8.97E-06	2.28E-06							
3400	Global	0.1030	0.0206	3359	1	1.10E-05	3.67E-06	1.0434	1.05E-05	3.52E-06							
3600	Global	0.1007	0.0201	3557	1	1.44E-05	5.26E-06	1.0397	1.39E-05	5.06E-06							
3800	Global	0.0986	0.0197	3755	1	2.13E-05	9.16E-06	1.0366	2.06E-05	8.84E-06							
4000	Global	0.0965	0.0193	3953	1	2.73E-05	1.15E-05	1.0338	2.64E-05	1.11E-05							
4200	Global	0.0945	0.0189	4151	1	3.47E-05	1.66E-05	1.0314	3.36E-05	1.61E-05							
4600	Global	0.0907	0.0181	4548	1	5.12E-05	3.08E-05	1.0273	4.98E-05	3.00E-05							
5000	Global	0.0872	0.0174	4944	1	7.99E-05	2.76E-05	1.0241	7.81E-05	2.69E-05							

$^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$
 Q-value= 6.176 MeV
 $\xi=252\pm 18 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 $R=92.9\pm 0.5\%$

Σχήμα Β'.5: Ανάλυση της αντίδρασης $^{97}\text{Mo}(p,\gamma)^{98}\text{Tc}$.

Ep (keV)	ΔE (keV)	δ(ΔE) (keV)	Eeff (keV)	δ(Eeff) (keV)	Ec.m. (keV)	δ(Ec.m.) (keV)	Eγ0 (keV)	Flag	Filename	B (Gauss)	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ 3%
2000	22	4	1989	2	1969	2	8469	In	Mo98-007	3191.96	807	45	1.03	2E-10	500059	0.10001	0.00300
2200	21	4	2189	2	2167	2	8667	In	Mo98-004	3347.98	1798	60	0.83	2E-10	300034	0.06001	0.00180
2400	20	4	2390	2	2366	2	8866	In	Mo98-003	3497.19	2666	72	0.95	2E-10	150002	0.03000	0.00090
2500	19	4	2490	2	2465	2	8965	In	Mo94-019	3569.40	848	39	0.78	2E-11	300076	0.00600	0.00018
2600	19	4	2590	2	2564	2	9064	In	Mo98-010	3640.09	4641	97	1.87	2E-10	200012	0.04000	0.00120
2800	18	4	2791	2	2762	2	9263	In	Mo98-011	3777.65	4601	121	2.47	2E-10	1000053	0.20001	0.00600
3000	17	3	2991	2	2961	2	9461	In	Mo98-014	3910.48	4460	115	2.35	2E-10	1000023	0.20000	0.00600
3400	16	3	3392	2	3357	2	9858	In	Mo98-015	4163.57	5280	134	2.39	2E-10	800010	0.16000	0.00480
3800	15	3	3792	2	3754	2	10254	In	Mo98-018	4402.08	1859	73	2.16	2E-10	150008	0.03000	0.00090
4400	14	3	4393	1	4348	1	10849	In	Mo98-021	4737.64	2818	86	2.57	6E-11	400002	0.02400	0.00072
5000	13	3	4994	1	4943	1	11443	In	Mo98-024	5051.15	1656	69	2.2	2E-11	500004	0.01000	0.00030
Ep (keV)	εabs	Ec.m. (MeV)	error	σ (barn)	δσ (barn)	σ_scr-corr. (barn)	δσ (barn)	Screen. Factor	σ_scr-corr. (barn)	δσ (barn)							
2000	Global	0.1448	0.0290	1969	2	4.58E-06	1.01E-06	1.0993	4.17E-06	9.22E-07							
2200	Global	0.1399	0.0280	2167	2	1.76E-05	3.81E-06	1.0854	1.62E-05	3.51E-06							
2400	Global	0.1354	0.0271	2366	2	5.39E-05	1.16E-05	1.0745	5.02E-05	1.08E-05							
2500	Global	0.1332	0.0266	2465	2	8.70E-05	1.91E-05	1.0699	8.13E-05	1.78E-05							
2600	Global	0.1311	0.0262	2564	2	7.34E-05	1.58E-05	1.0658	6.88E-05	1.48E-05							
2800	Global	0.1270	0.0254	2762	2	1.51E-05	3.26E-06	1.0586	1.43E-05	3.08E-06							
3000	Global	0.1231	0.0246	2961	2	1.51E-05	3.25E-06	1.0527	1.43E-05	3.09E-06							
3400	Global	0.1160	0.0232	3357	2	2.37E-05	5.11E-06	1.0434	2.27E-05	4.90E-06							
3800	Global	0.1097	0.0219	3754	2	4.70E-05	1.02E-05	1.0366	4.53E-05	9.86E-06							
4400	Global	0.1014	0.0203	4348	1	9.67E-05	2.09E-05	1.0293	9.39E-05	2.03E-05							
5000	Global	0.0944	0.0189	4943	1	1.46E-04	3.18E-05	1.0241	1.43E-04	3.11E-05							

$^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$
Q-value= 6.500 MeV
Στόχος:
ξ=328±23 μgr/cm²
R=97.6±0.8%

Σχήμα Β'.6: Ανάλυση της αντίδρασης $^{98}\text{Mo}(p,\gamma)^{99}\text{Tc}$.

Ep (keV)	ΔE (keV)	δ(ΔE) (keV)	Eeff (keV)	δ(Eeff) (keV)	Ec.m. (keV)	δ(Ec.m.) (keV)	Eγ0 (keV)	Flag	Filename	B (Gauss)	Area	error	Dead Time	Scale	Pulses	Q (mC)	δQ
4000	13	3	3993	1	3953	1	11394	In	100Mo-001	4516.59	730	50	3.54	2E-11	500015	0.01000	0.00030
4400	13	3	4394	1	4350	1	11790	In	100Mo-006	4737.62	1280	63	4.86	2E-11	500016	0.01000	0.00030
4800	12	2	4794	1	4746	1	12187	In	100Mo-007	4948.85	1327	71	5.8	2E-11	452136	0.00904	0.00027
5200	11	2	5194	1	5142	1	12583	In	100Mo-011	5151.47	952	60	3.91	2E-11	179540	0.00359	0.00011
Ep (keV)	ΔE (keV)	εabs	Eeff error	δ(Eeff) (MeV)	Ec.m. error (MeV)	σ (barn)	δσ (barn)	Screen. Factor	σ_scr-corr. (barn)	δσ (barn)							
4000	Global	0.0949	0.0190	3953	1	7.58E-05	1.70E-05	1.0338	7.33E-05	1.65E-05							
4400	Global	0.0908	0.0182	4350	1	1.41E-04	3.09E-05	1.0292	1.37E-04	3.00E-05							
4800	Global	0.0871	0.0174	4746	1	1.70E-04	3.74E-05	1.0256	1.66E-04	3.65E-05							
5200	Global	0.0838	0.0168	5142	1	3.13E-04	6.99E-05	1.0227	3.06E-04	6.83E-05							

$^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$
 Q-value= 7.441 MeV
 $\Sigma\text{ρόγος:}$
 $\xi=303\pm 21 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 $R=92.2\%$

Σχήμα Β'.7: Ανάλυση της αντίδρασης $^{100}\text{Mo}(p,\gamma)^{101}\text{Tc}$.

Παράρτημα Γ'

ΓΩΝΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται οι γωνιακές κατανομές όλων των μεταπτώσεων που μετρήθηκαν για τον προσδιορισμό των ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$ και $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$. Με $W(\theta)$ συμβολίζεται η κανονικοποιημένη στη μονάδα του φορτίου και διορθωμένη ως προς το νεκρό χρόνο και την ανιχνευτική ικανότητα του αντίστοιχου ανιχνευτή ένταση της κάθε φωτοκορυφής.

Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV	
θ	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	113210	53706	67389	226751	79268	427322	132142	6192689	188042	216537	741066	1028010	372595
35	-	-	209895	70265	384439	98702	459727	499503	205870	851559	257206	1146420	320856
50	-	-	310558	65677	304586	74979	343467	550908	161497	796927	178888	1009140	267310
65	158848	49543	228394	62766	350793	77575	565322	686043	169582	598625	181041	918785	312786
90	230724	64650	284921	81262	430839	98606	436658	154690	230391	758680	230012	1310530	408352
105	-	-	310011	83153	290923	103171	495362	161737	687348	226531	1043490	259648	337411
125	242518	44449	337949	43956	425974	56499	449902	80066	829730	116949	1207580	145146	1309600
140	213098	30566	331982	41608	378899	47126	583343	74569	726387	99092	952854	115794	1396900
Ep=3.0 MeV													
θ	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	1351940	318894	19776	10848	8083	87521	14143	130404	23495	165079	25903	272244	36221
35	1803300	416012	48960	16636	87443	29428	144968	35351	235329	48379	287689	55788	574682
50	1601340	327432	48747	15125	84800	28192	84800	28192	184951	46802	287820	48549	480466
65	1496400	279161	56147	26386	75437	36070	-	-	315005	74508	301884	59795	603544
90	1643610	358052	35720	23568	92656	42745	95318	36334	209198	58142	354988	81004	463669
105	1921740	458698	75921	14143	130404	23495	165079	25903	272244	36221	481329	49695	691528
125	1959310	238241	66501	12497	112011	18685	-	-	283884	36026	402007	39245	662245
140	1820580	186506	Ep=2.6 MeV	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
θ	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	40975	18072	42162	17139	15794	19778	-	-	220987	62902	421695	65289	516114
35	13900	8799	53021	24495	68784	29828	107391	41121	142790	52257	210670	62754	348914
50	19776	10848	48960	16636	87443	29428	144968	35351	235329	48379	287689	55788	574682
65	7706	8083	48747	15125	84800	28192	84800	28192	184951	46802	287820	48549	480466
90	-	-	56147	26386	75437	36070	-	-	315005	74508	301884	59795	603544
105	-	-	35720	23568	92656	42745	95318	36334	209198	58142	354988	81004	463669
125	18139	9506	75921	14143	130404	23495	165079	25903	272244	36221	481329	49695	691528
140	23796	11256	66501	12497	112011	18685	-	-	283884	36026	402007	39245	662245
Ep=2.5 MeV													
θ	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	595141	92061	1027100	160193	1703120	243013	1602670	253732	2268250	434419	3276220	410431	388548
35	473349	89785	829427	140430	1021010	183367	1621660	245487	2007930	327190	2594630	388548	355841
50	611749	80917	875910	127373	1402010	178008	1784320	223305	2295810	295248	2964160	310533	438156
65	611420	81375	875842	123212	1297450	173625	1641030	210474	2051020	329420	2723580	310533	3893330
90	737139	105704	1072350	169983	1693800	234937	1849130	260900	2679090	439088	3870070	475108	366696
105	708642	98314	1093660	156813	1337390	211593	1904500	250615	2226810	319845	3939330	4452470	298359
125	896888	77157	1250770	112828	1905010	165080	2211970	190377	3022160	259266	4452470	366696	298359
140	818652	70567	1134980	101757	1694040	149040	2071570	176934	2649560	250837	3700830	298359	298359

E_γ=207 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Στόχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

E_γ=217 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Στόχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.1: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 207 keV και 217 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
20	25051	7232	69142	11727	130275	19648	-	-	288679	38187	436427	45418	614565	59152
35	11902	5192	45371	10132	107464	18652	141454	23089	196000	31042	311809	40916	433931	43189
50	35293	7442	70527	10681	104466	15537	152509	20567	262214	32252	377175	40997	644490	55091
65	25437	6025	64967	9261	84549	13269	-	-	228115	27463	342946	33847	550076	48511
90	22098	6357	64177	10441	92780	16268	-	-	303192	36697	401500	40587	60410	60410
105	20450	8265	75752	12372	123090	19016	131419	21194	278085	35114	406427	45352	610361	54827
125	25225	4855	79187	8508	122022	13540	188744	18329	319862	28714	454758	37909	670876	50826
140	30357	5015	67926	7540	114838	12039	-	-	261770	23866	424209	33674	655332	50091
			Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	777497	73953	1175960	118278	1574610	158318	1979850	205316	3013060	367605	4023280	362454		
35	701404	66740	1068930	107806	1258800	130191	1846940	184811	2093660	219927	3071690	285430		
50	744488	65705	1063370	101624	1521680	138598	1923790	181223	2456270	233080	3140290	278654		
65	718758	62955	944218	88215	1429790	129221	1619770	148253	2346340	248892	2937530	246231		
90	687062	64654	1179480	110555	1545200	145055	1999450	179170	2595590	270784	3595050	299704		
105	782605	70716	1111640	103201	1543910	141281	1923480	173820	2469090	223674	3545310	309646		
125	881474	67006	1231140	95994	1648730	127808	2152400	165226	2742870	211890	3801230	288031		
140	783247	59729	1183050	91608	1599530	123652	2015170	154093	2653670	216206	3550130	264841		
			Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	18015	4361	46128	7006	46050	8649	-	-	188058	22758	238651	25148	359496	33889
35	7404	2984	36049	6039	49556	9516	70152	11434	136503	18277	153913	20748	285437	26324
50	24502	3906	51186	5963	76260	9289	108064	11971	198031	19851	239318	23428	431447	34539
65	18796	3812	53896	5826	71051	8369	-	-	181624	17981	233047	20904	444985	39565
90	8636	2945	39709	6021	44381	7500	-	-	170413	19556	240736	23230	412049	35521
105	9787	3534	34040	5938	51370	8963	76906	11590	157509	19218	226354	25734	368572	30984
125	15096	2757	46384	4921	69274	7498	107457	10389	219786	18800	268575	22185	443260	33212
140	15877	2780	38567	4385	70658	7330	-	-	203985	17577	273946	21671	426366	32494
			Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	396698	38527	729128	71986	1041570	101371	1387100	142515	1675640	208653	2274250	207163		
35	373589	35603	630861	62223	877616	83448	1200080	117258	1390250	141009	1852540	174803		
50	467266	38568	656399	59145	1000450	85846	1318520	116399	1480660	134289	2001060	168560		
65	564878	49240	670183	57543	1013490	84801	1165880	99165	1468350	147330	2008890	160830		
90	451414	39212	716949	63957	999512	87230	1197860	102964	1507890	155033	2022340	167185		
105	428395	37217	614185	55999	964506	84287	1228530	105833	1390910	125553	2004590	171320		
125	566476	41950	801849	61781	1128880	86232	1495680	113424	1782510	136778	2442300	183891		
140	514701	39091	806705	62125	1060100	81656	1340650	102085	1695780	137837	2273980	169483		

$E_\gamma=261$ keV

$^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$

Q-val.= 6.331 MeV

Σ τώχος:

$\xi=87\pm 9$ $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$

R=97.8%

$E_\gamma=306$ keV

$^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$

Q-val.= 6.331 MeV

Σ τώχος:

$\xi=87\pm 9$ $\mu\text{gr}/\text{cm}^2$

R=97.8%

Σχήμα Γ.2: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 261 keV και 306 keV της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	26257	3493	70142	6845	131602	12718	-	-	367961	32867	518428	44046	808101	63012
35	21289	5016	63708	7054	121222	13563	167917	16366	279252	25284	430128	37601	626548	48165
50	23238	2748	70532	6584	120971	11373	194941	17201	310476	26789	474266	39788	802738	60528
65	31510	6117	65992	5899	119814	10768	-	-	313065	25609	448683	35284	734893	55022
90	16042	2799	58597	5742	106911	10256	-	-	316916	27265	478238	37942	752097	57026
105	12814	2968	58729	6149	106241	10877	174346	16406	324020	28391	483045	40169	693012	51897
125	32551	3970	83100	7032	142387	12023	216618	17380	364119	28217	484602	36518	796680	57617
140	32447	4008	76789	6521	141100	11848	-	-	347052	26710	476893	35254	761229	55306
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	938968	74963	1534510	130632	2066150	172757	2527870	227746	3384450	360862	4782650	388258	5825580	4782650
35	852524	66045	1304570	109763	1788400	144624	2454750	207572	2993390	255919	4308150	342603	5426030	4308150
50	900934	68691	1255230	103331	1826380	144864	2472960	206459	3017920	254560	4051600	316724	5167240	4051600
65	884570	66696	1273240	99713	1845580	141956	2167020	170937	2988680	269089	4001980	302121	5021210	4001980
90	955860	72474	1472930	115854	2027950	156769	2430670	188108	3409010	300314	4686190	353701	5637010	4686190
105	905905	68235	1318650	104211	1883730	144810	2472210	192878	3119180	244650	4612650	349042	5490420	4612650
125	981591	71138	1433770	105524	1994550	145505	2675350	196023	3268000	240103	4792290	347297	5472970	4792290
140	912703	68229	1418020	104080	1937300	141364	2369860	172656	3097980	236508	4455060	321419	5214190	4455060

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	13497	2209	39990	4291	57969	6457	-	-	144474	14748	198588	18184	334634	27455
35	10201	1953	34328	3845	53245	6263	65974	7448	116532	11801	168221	16448	261430	21129
50	14315	1858	35982	3704	59887	6260	75408	7436	147765	13615	189181	17298	335888	25970
65	15687	1953	32642	3220	49183	5028	-	-	133960	12288	175751	14824	306710	22737
90	13719	1981	35196	3468	53567	5481	-	-	143578	13022	192352	15996	311015	24293
105	13344	1847	33698	3473	61595	6220	76743	7642	137533	12754	182023	16086	303248	23344
125	12917	1514	38714	3394	60838	5417	79461	6970	150012	12315	198279	15755	327855	24172
140	13733	1644	36544	3291	62203	5455	-	-	144469	11919	195260	15047	328200	24423
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	380202	32120	610406	54835	805325	71665	944734	89801	1277360	143879	1651490	133850	2138500	1651490
35	324054	26834	505099	45104	665818	57670	944334	83826	1074070	97690	1563600	132015	2132015	1563600
50	352758	27936	509930	44045	723918	60571	950990	81858	1129860	99724	1458800	118548	2185480	1458800
65	364075	27210	502775	41357	737955	59577	801393	65801	1093510	104318	1441990	124475	2124475	1441990
90	357780	28223	587342	47790	803308	64307	894922	72252	1224070	113192	1635100	126992	2126992	1635100
105	351083	27451	508064	41775	735760	58905	941627	76076	1095100	89817	1644290	129046	2129046	1644290
125	392502	29136	544801	41417	789148	59295	1033120	77484	1185580	89777	1683710	125159	2125159	1683710
140	379276	28280	557263	42199	803522	60556	909182	68543	1172120	97262	1685510	120830	2120830	1685510

E_γ=381 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

E_γ=398 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.3: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 381 keV και 398 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	14268	1650	36056	3359	56262	5239	-	-	170888	15098	231773	19494	336416	26310
35	9774	1329	31126	2965	49401	4806	75819	6989	127633	11481	195819	16861	273377	21037
50	12011	1361	32625	2921	49408	4637	80741	7096	136117	11809	211795	17702	325838	24647
65	11762	1293	30828	2697	50475	4402	-	-	137088	11301	196882	15493	307777	23126
90	13516	1456	36101	3136	56077	4914	-	-	153022	12645	233209	17522	333612	25085
105	12133	1360	33901	3036	58521	5270	83702	7254	149726	12588	211435	17155	318312	23758
125	12668	1254	36193	2987	57258	4779	92304	7363	158291	12340	222849	16951	345222	25102
140	12868	1246	33262	2725	58861	4594	-	-	150039	11583	230642	17080	343458	25028
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	443496	35287	649983	55628	927016	77785	1109000	100191	1540500	164002	2255180	183268		
35	386663	30118	577570	48813	759282	61921	1152190	97384	1345690	115261	1964710	156795		
50	388743	29695	566389	46851	801585	64025	1106130	92451	1361050	114817	1823890	143122		
65	394055	29766	555161	43748	827529	64072	984033	77967	1316420	118992	1829050	138475		
90	427413	32163	678873	52974	912767	70064	1093820	84422	1525860	133700	2127700	159722		
105	411022	30780	605945	47519	859992	65845	1117890	87038	1392760	108994	2174090	159258		
125	440043	32061	605132	45024	924395	67935	1224860	90276	1517660	112215	2210570	160960		
140	424039	30887	639641	47183	909178	66708	1122310	82208	1491880	114592	2055360	148870		

$E_\gamma=523 \text{ keV}$
 $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 6.331 \text{ MeV}$
 $\Sigma\text{r}\acute{o}\lambda\omicron\varsigma:$
 $\xi = 87 \pm 9 \text{ }\mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 $R = 97.8\%$

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	11742	1388	29443	2756	48065	4512	-	-	120437	11019	176830	15084	266809	21050
35	9086	1167	27532	2625	43131	4235	55436	5260	90830	8938	140347	12462	211273	16428
50	8987	1025	28543	2522	41574	3863	56608	5141	104116	9148	142515	12188	247086	18810
65	11072	1162	28860	2462	43081	3724	-	-	104010	8734	152854	12125	238536	18027
90	9396	1151	28406	2577	41810	3906	-	-	110685	9549	154246	12428	245518	18750
105	9898	1182	25432	2466	42168	4098	55529	5257	103995	9229	146269	12340	221519	16842
125	10382	1054	30381	2549	47245	4033	67943	5598	109378	8800	162802	12615	258923	18956
140	9829	1008	30663	2508	46432	3842	-	-	110987	8752	165752	12432	259458	19052
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	302525	24473	473802	41037	641441	54888	774201	70810	1037310	112302	1381970	113930		
35	267509	21102	397963	34226	527180	43786	753421	64731	897857	78427	1233580	100019		
50	265108	20539	367712	30824	543445	43849	722758	60953	836576	71528	1131540	89995		
65	276860	21138	385244	30733	556901	43751	647483	51988	901181	82525	1119250	85735		
90	289211	22229	459474	36572	590091	47138	711622	56144	969707	87399	1327770	101229		
105	272457	20895	396070	31924	558668	43941	756327	59985	884037	70994	1247060	96403		
125	302054	22254	426709	32197	595647	44514	807402	60235	934015	70265	1350690	99711		
140	299006	21990	432998	32352	622622	46306	755577	56020	964277	75475	1306360	95459		

$E_\gamma=606 \text{ keV}$
 $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 6.331 \text{ MeV}$
 $\Sigma\text{r}\acute{o}\lambda\omicron\varsigma:$
 $\xi = 87 \pm 9 \text{ }\mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 $R = 97.8\%$

Σχήμα Γ.4: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 523 keV και 606 keV της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	2135	728	4339	958	7752	1637	-	-	26742	3725	36590	4200	51242	5355
35	628	473	3270	823	5564	1403	11758	2039	19507	3081	29450	4124	40722	4255
50	1125	469	3945	829	5181	1338	9101	1612	17925	2784	27764	3628	44226	4307
65	1257	463	3662	750	5503	1111	-	-	15858	2480	24079	2857	37241	3893
90	1021	486	4125	820	4855	1144	-	-	18258	2814	24372	3013	35747	3959
105	1438	513	3434	852	5854	1416	10195	1889	18609	2972	28622	3744	35367	3741
125	1679	424	3353	718	7291	1250	9381	1513	21791	2687	29980	3309	47691	4172
140	1833	466	3822	680	6934	1111	-	-	20699	2566	33456	3156	49980	4459
θ degrees	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ degrees	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)		
20	60634	6467	101351	11094	164404	17236	188952	20758	281236	36002	392874	36270		
35	60327	6192	84532	9503	118884	13092	193481	19772	235153	24846	360311	34378		
50	54417	5333	81855	8978	114548	12060	162631	16768	197902	20694	291258	27341		
65	50413	5122	74164	7872	108905	11245	124466	13118	192359	22796	275225	24457		
90	53261	5605	89440	9337	100668	11296	144412	14737	215872	25282	294587	26506		
105	56688	5680	78168	8488	99594	11023	149926	15196	199426	20031	292928	27778		
125	63067	5516	83884	7958	127064	11720	173399	15223	216766	19370	348849	29121		
140	63939	5561	98251	8808	136725	12411	195293	16654	245407	23279	346378	27764		

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	2847	646	8785	1258	16719	2244	-	-	41252	5029	55168	6044	88729	8746
35	3553	1006	8227	1343	12080	2497	19818	4321	31792	5129	53446	6813	76397	7308
50	3653	667	10494	1317	13537	4213	24729	3078	39193	4671	58308	7285	101124	8780
65	2596	583	8582	1509	15274	2127	-	-	41990	4279	62486	5990	90455	8211
90	3581	821	10698	1359	14406	1907	-	-	44634	5584	62784	5876	89611	8055
105	3880	665	9931	1263	11331	2974	21617	3300	39821	6150	54697	6990	87765	7739
125	3344	1005	10721	1176	15697	1877	25318	2751	41615	4121	66600	6107	98306	7733
140	3413	1325	10025	1241	15466	1842	-	-	35601	3638	60412	5196	91244	7425
θ degrees	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ degrees	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)		
20	111490	12024	161381	16879	237809	26787	266758	28349	384290	56774	502288	50755		
35	105452	10582	144413	15258	197459	19847	304938	34577	345022	37105	487564	47715		
50	113190	10139	167690	16006	235257	23709	314414	33259	384118	40616	496871	51993		
65	112277	10860	169965	15575	248525	21828	284802	27203	405575	50004	514907	47070		
90	134578	11349	199677	19678	249824	23794	307447	27407	447300	49665	617253	53987		
105	115762	10239	157468	15887	245131	23849	313863	30672	373650	37937	594412	52568		
125	129629	10177	174623	14415	242956	20415	330943	26826	417921	34600	584906	47655		
140	117023	9428	177376	14297	239082	19794	289514	24065	389613	34733	538499	41954		

E_γ=761 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

E_γ=793 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.5: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 761 keV και 793 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	6290	919	19904	1968	28230	3515	-	-	76502	7318	103418	9228	159779	13007
35	6446	998	17219	1784	28953	3016	37583	3819	60595	5938	82129	7792	128329	10235
50	6076	774	17082	1642	29987	2912	38203	3610	67667	6229	95068	8461	144767	11261
65	5728	735	16292	1508	24837	2327	-	-	66011	5744	89337	7356	141668	11021
90	7733	1079	17197	2216	29025	2964	-	-	74258	6827	97392	8166	150241	11816
105	6554	857	17441	1884	30675	3148	36789	3670	70592	12148	95274	8917	138907	10310
125	6649	799	18187	1692	30771	2842	41944	3746	78237	6562	99848	8136	152063	11420
140	6446	744	18150	1591	28666	2539	-	-	73537	6034	98071	7904	159173	11954
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)		
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC			
20	192128	15939	326593	28809	412619	36110	485803	45590	686655	74035	837009	70291		
35	172134	13925	260913	22943	354528	30147	488512	42843	553149	49711	820351	68467		
50	179950	14219	242475	20819	337520	27996	473563	40698	557377	48611	722403	58791		
65	173943	13596	250523	20447	358861	28930	415966	34146	540551	51134	707708	54900		
90	190438	15051	297247	24256	392391	31813	457272	37132	622673	58538	787204	61548		
105	183447	14371	261366	21708	387350	31420	493393	40209	714371	47641	822865	65354		
125	193244	14563	276031	21401	395529	30224	514340	39209	603107	46512	833154	62925		
140	193963	14548	292222	22314	399512	30446	488994	37049	615390	49894	797134	59111		

E_γ=832 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	22487	4446	37455	7522	49166	10059	67688	13654	131228	26727	120108	19080	18568	4150
35	27391	5246	29496	6611	38993	8855	63953	12377	83462	15363	148955	24538	10461	2616
50	16923	3463	21790	5339	33782	7328	56300	10632	76085	14817	89495	16161	17148	3220
65	19123	3704	26942	6058	32784	7438	54679	10439	71594	15930	96065	14424	14989	3157
90	19935	4306	32221	6889	41892	8989	41229	9344	91928	23415	100735	16222	9398	2535
105	17993	3766	25795	5803	36617	7965	42162	9259	64473	12761	98797	18077	13619	2808
125	19682	3178	28389	5493	41655	7845	57482	8631	64485	10970	136282	17852	16202	2569
140	24050	3661	29501	5399	43465	7413	55108	8681	76515	13285	103172	13271	15295	2911

E_γ=954 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.6: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 832 keV και 954 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	1227	499	2453	670	6082	1512	-	-	9993	2990	15497	2589	23623	4357
35	836	395	2465	695	3647	1319	5211	1702	6324	3206	14397	3481	21937	3050
50	780	691	2536	700	4799	1184	4316	1647	11835	3783	13661	2773	22898	3243
65	728	860	2358	673	3755	1334	-	-	7789	2299	11976	2342	18787	3011
90	1070	389	2221	672	6204	2705	-	-	10344	2461	16846	3734	23072	3483
105	890	396	2574	753	2633	1309	4239	9208	8573	4397	14279	4631	21081	3373
125	1259	395	2666	606	4226	1034	5005	1217	8621	1772	13922	2228	22441	2548
140	1169	379	2341	567	4313	1234	-	-	8793	1729	14190	1977	21900	2714
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)		
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC			
20	27404	4742	40352	7054	59490	9729	66838	12025	87446	25813	115190	16510		
35	26030	4077	34596	6367	47625	8576	71521	11098	74293	14890	106781	17216		
50	20713	3774	32743	6404	51841	8335	67102	12257	64596	14106	82652	14116		
65	23770	3961	37270	5891	44940	8125	55952	9769	66691	25677	102101	13740		
90	28625	4802	37812	6355	53178	8975	63924	18760	90365	20399	124759	17403		
105	23706	4857	34892	7097	52012	10076	49716	17876	80961	15836	102556	21828		
125	25727	3150	35227	4807	51952	6892	65789	8171	75308	10070	106884	13413		
140	26126	3109	36024	4839	46799	6661	60330	7870	70394	11926	110911	12943		

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC	
20	2362	544	5887	898	7893	1390	-	-	-	-	35099	3773	53667	5151
35	1784	491	3840	784	7717	1407	10679	1749	18190	2676	30643	3755	42062	4010
50	2008	469	4564	770	8607	1368	13117	1788	19227	2628	33571	3817	48345	4409
65	1939	434	3461	610	8282	1222	-	-	19899	2544	31896	3167	49848	4514
90	1146	410	5079	822	7372	1242	-	-	22063	2881	34304	3511	44951	4374
105	1849	491	4061	818	7683	1400	10853	1705	21490	2909	32250	3750	45874	4216
125	1563	396	4757	741	7113	1213	11590	1618	24082	2784	33266	3555	50199	4272
140	1949	427	4362	654	8726	1207	-	-	22837	2571	31910	2996	51284	4437
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)		
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC			
20	65362	6322	102765	10543	142786	14558	172792	18470	248493	31615	359665	32673		
35	59565	5671	82576	8928	117487	12286	173999	17803	215824	22510	281213	27140		
50	52340	5080	75625	8028	116824	11548	171132	16631	194201	19560	280245	25644		
65	60211	5467	89606	8515	123099	11781	151133	14304	210293	23158	275792	23660		
90	58797	5606	99727	9681	140438	13530	169463	15922	222695	24992	315488	27238		
105	61688	5692	88031	8732	120040	11861	175011	16283	181997	18157	318890	28494		
125	64797	5570	87800	8264	134593	12171	172840	15188	216688	19110	302781	25856		
140	64893	5539	92097	8215	135265	12210	164103	14311	216995	20946	314050	25294		

E_γ=1113 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Στόχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

E_γ=1123 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Στόχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.7: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 1113 keV και 1123 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
20	3995	668	10335	1209	15080	1880	15489	2070	36296	4082	51052	4956	83321	7282
35	3280	613	7392	1038	12243	1721	17953	2126	28805	3439	41986	4572	64904	5591
50	3818	616	7959	997	13048	1677	17953	2126	32232	3545	42807	4442	76393	6321
65	3966	579	7371	872	11884	1463	17953	2126	32981	3429	43123	3950	75320	6262
90	3354	598	8662	1074	11971	1570	17953	2126	35554	3831	47280	4420	73415	6322
105	3550	627	8368	1104	12356	1723	17118	2170	29277	3468	44684	4636	73516	6126
125	3508	550	8462	984	13522	1637	17099	1992	35928	3587	47038	4434	78408	6206
140	4281	597	8307	925	12982	1509	17099	1992	34729	3375	48215	4107	78004	6263
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	97919	8677	143809	13733	198619	18806	245885	24512	311633	37681	448519	39501	578004	50000
35	91140	7881	122091	11826	176270	16412	233785	22214	273036	26729	354950	32411	478004	41000
50	83851	7198	120295	11283	173315	15603	225928	20844	253129	24094	369231	32128	500004	43000
65	86951	7308	125302	11059	174028	15331	204311	18169	288332	29506	372061	30514	500004	43000
90	86388	7504	135363	12220	186296	16739	225275	19874	295481	30738	402227	33339	500004	43000
105	87559	7470	119093	10961	163461	14880	223222	19755	261010	23788	395707	33892	500004	43000
125	94563	7604	131655	11571	179173	15115	248201	20137	277480	23304	397178	32257	500004	43000
140	94775	7683	134269	11116	189359	15920	233379	19061	281547	25497	409318	31945	500004	43000
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	813	325	2311	925	5283	1486	5089	1899	13279	2788	17851	3047	28957	4054
35	1122	449	3739	1072	4104	1623	6707	1791	9048	2640	15068	3158	24964	3330
50	1727	691	2446	993	4880	1511	6707	1791	11927	2632	17678	3084	27195	3556
65	1468	587	2729	921	4438	1334	6707	1791	12513	2441	15212	2472	28397	3519
90	-	-	2492	997	5292	1564	-	-	14312	2713	26383	3492	33465	4087
105	1676	670	2114	846	3702	1481	4379	1752	10953	2856	18860	3220	28554	3408
125	981	393	3091	1103	6774	1644	6977	1902	14862	2715	19912	3104	28573	3232
140	1427	571	1798	719	5997	1275	-	-	12675	2281	17996	2494	30020	3561
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	39152	4947	51744	7898	75267	10764	91517	12792	126095	22803	183089	20966	250004	22546
35	34270	4531	46385	6737	62274	9231	107711	13604	127802	17036	190423	22546	250004	22546
50	33895	4120	48350	6709	82455	10047	99152	12160	113743	14744	150601	18331	250004	22546
65	33111	4108	54738	6919	86574	10085	75353	9820	136728	19284	160376	16846	250004	22546
90	25542	3626	62068	7582	100419	11933	48577	8026	37690	9242	174061	18753	250004	22546
105	41567	4658	53314	6861	76939	9781	102791	11942	132143	15336	17440	17440	250004	22546
125	38212	4287	52479	6509	69861	8699	102432	11389	133102	14761	162147	17571	250004	22546
140	35335	3982	53163	6380	69246	8425	92783	10256	120393	16103	183452	17317	250004	22546

$E_{\gamma}=1131 \text{ keV}$

$^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$

Q-val.= 6.331 MeV

$\Sigma\tau\acute{o}\lambda\omicron\varsigma:$

$\xi=87\pm9 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$

R=97.8%

$E_{\gamma}=1175 \text{ keV}$

$^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$

Q-val.= 6.331 MeV

$\Sigma\tau\acute{o}\lambda\omicron\varsigma:$

$\xi=87\pm9 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$

R=97.8%

Σχήμα Γ.8: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 1131 keV και 1175 keV της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
20	687	238	669	333	1907	566	-	-	4274	1135	4476	1105	5257	1372
35	143	190	855	303	1350	508	887	602	3329	939	4384	1162	3111	1021
50	449	204	1159	319	691	503	780	611	2210	946	2722	1091	6150	1151
65	362	201	676	294	999	451	-	-	3061	936	2341	885	3666	1145
90	539	188	1348	295	1601	443	-	-	1952	854	3589	893	4392	1085
105	--	--	404	247	1548	440	1730	530	1540	761	3953	952	4158	873
125	468	194	1210	310	652	455	1423	590	3096	905	6445	1185	4912	1010
140	324	172	278	242	1121	417	-	-	2189	784	3135	793	4803	1036
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	counts/mC	counts/mC
20	9251	1730	13790	2837	10441	3804	18727	4614	29359	7938	36228	6948		
35	4822	1440	7262	2206	12941	3219	20890	4061	13320	4795	35868	6871		
50	7759	1457	8883	2289	14997	3338	21097	4123	21662	5127	24987	5993		
65	5802	1434	9822	2290	9362	3212	11867	3577	20362	6145	34154	5612		
90	5252	1347	8765	2253	20698	3441	10434	3394	27037	6376	28318	5372		
105	4078	1151	7483	1931	11351	2694	13081	3202	12041	3990	28383	5449		
125	6861	1363	13033	2356	18335	3186	22975	3765	18283	4513	28458	5982		
140	7148	1286	12474	2088	11942	2798	17264	3424	22317	5253	20901	4610		

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
20	253	175	-	-	1511	504	-	-	2022	977	2228	1050	2555	1350
35	-	-	-	-	-	-	313	380	480	902	-60	1815	2889	1074
50	169	165	-	-	352	550	1353	912	3129	1092	1261	1626	3951	1372
65	493	189	-	-	1219	700	-	-	2422	1931	403	1285	2610	1929
90	343	174	-	-	-	-	-	-	1198	3073	2106	1655	3700	1096
105	-	-	-	-	547	718	231	1184	697	1055	2058	1581	3388	1152
125	12	214	-	-	1086	492	259	636	574	1198	4084	1153	3258	988
140	-	-	-	-	318	310	-	-	2086	689	2223	1194	4151	1154
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	counts/mC	counts/mC
20	5898	1942	3884	2753	16613	3998	6558	6894	17593	7762	16514	7940		
35	3900	1562	923	3000	8899	3489	9530	4307	22392	5755	9281	8286		
50	5775	1867	8393	2822	6663	5528	15739	9513	14080	7284	20885	7852		
65	4328	1766	5438	2434	6865	4096	14935	4702	20526	7668	20744	6403		
90	3860	1383	6706	2453	9498	3396	6804	3255	6042	6275	21387	15634		
105	3323	2649	762	3673	5365	2903	8537	6847	19059	6136	17602	9530		
125	2841	1510	8755	2247	7930	3285	9153	3565	5190	5315	12796	5605		
140	5175	1316	6689	2156	3645	3466	8420	3319	18635	7983	18352	5080		

E_γ=1256 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Στόχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

E_γ=1313 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Στόχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.9: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 1256 keV και 1313 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
20	1415	566	3535	1052	6828	1639	-	-	16513	2972	23079	3267	27315	3862
35	2223	824	3103	1010	3131	1252	6395	1798	11290	2566	19457	3580	26666	3401
50	1506	602	4138	1003	4293	1449	6817	1723	12379	2567	17405	3189	35223	3874
65	1650	660	3334	922	6861	1438	-	-	15437	2711	18655	2685	30266	3633
90	--	--	3489	1006	6383	1437	6537	1878	14315	2720	17110	2728	31760	3949
105	1669	668	3639	1027	5851	1646	5059	1954	11707	2776	21563	3405	24649	3230
125	--	--	4269	1068	5318	1475	7307	1712	15979	2723	19846	2940	30136	3313
140	1379	552	3768	914	5283	1316	-	-	15157	2491	21635	2655	28866	3330
			Ep=2.5 MeV	Ep=2.6 MeV	Ep=2.7 MeV	Ep=2.8 MeV	Ep=2.9 MeV	Ep=3.0 MeV						
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	38460	4939	56365	7895	81841	10972	92717	12992	151936	24814	187215	21540	171448	20562
35	31961	4313	51421	7085	71870	9898	103993	13358	116956	16170	171448	20562	157116	18765
50	37296	4451	55114	7249	82337	10033	106427	12903	119697	15729	157116	18765	165180	17566
65	36655	4413	52260	6815	75074	9435	83826	10587	122681	18707	165180	17566	188719	19841
90	40292	4791	55927	7516	74751	9976	98589	11941	119568	19407	188719	19841	176165	20191
105	38426	4471	60746	7469	68945	9029	90721	11449	107375	14354	176165	20191	165351	18030
125	34941	3957	56140	6577	78176	9059	94600	10574	116820	13839	165351	18030	146436	15237
140	39209	4187	51457	6438	77005	8951	87247	9961	126134	16482	146436	15237		

$E_{\gamma} = 1332 \text{ keV}$
 $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 6.331 \text{ MeV}$
 $\Sigma \text{ ρ} \chi \text{ ος.}$
 $\xi = 87 \pm 9 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $R = 97.8\%$

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
20	869	474	2499	810	4638	1442	-	-	8294	2680	15082	2808	19809	3646
35	1698	1872	1529	687	2613	998	4145	1501	6883	2573	12192	2808	17204	2790
50	876	372	2034	703	3403	1224	5197	1429	7944	2167	10936	2897	18518	2933
65	502	332	2137	681	3165	1023	-	-	4462	1827	9356	1987	18227	3008
90	1159	667	2979	787	2512	875	-	-	5596	2077	7545	2029	18701	3151
105	338	221	2178	685	3625	1299	5928	1738	5270	1874	10180	2557	18472	2672
125	544	308	2170	692	2317	1008	3390	1246	7112	2016	12133	2486	19076	2640
140	1226	414	1806	538	3140	918	-	-	6502	1810	11986	2068	16515	2635
			Ep=2.5 MeV	Ep=2.6 MeV	Ep=2.7 MeV	Ep=2.8 MeV	Ep=2.9 MeV	Ep=3.0 MeV						
θ	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)	W(θ)	ΔW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	21886	3762	42706	7133	53264	10015	49341	10367	65323	17287	100184	16694	102478	17843
35	20520	3673	25059	5181	38304	7623	57929	10734	47764	11418	102478	17843	95808	16739
50	20515	3653	33388	5911	37732	7400	59786	10686	64095	12988	95808	16739	83306	13160
65	20249	3450	29368	5477	41094	8042	41628	8485	55562	13898	83306	13160	86755	13684
90	26032	3985	34971	6180	54776	9236	42107	8327	46010	13739	86755	13684	91724	15166
105	24158	3659	35456	5813	41528	8001	52981	9197	60548	12468	91724	15166	95944	13847
125	22985	3441	30735	5193	43002	7221	46461	7738	83129	12468	95944	13847	76428	11766
140	23423	3318	29268	4477	40523	6873	54754	8624	45703	11492	76428	11766		

$E_{\gamma} = 1513 \text{ keV}$
 $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 6.331 \text{ MeV}$
 $\Sigma \text{ ρ} \chi \text{ ος.}$
 $\xi = 87 \pm 9 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $R = 97.8\%$

Σχήμα Γ.10: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 1332 keV και 1513 keV της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p, \gamma)^{79}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	2075	542	3349	755	4811	1337	-	-	15142	2856	19951	3156	29606	3749
35	911	397	2492	730	4251	1073	6022	1504	11888	2369	16079	3055	26967	3356
50	1545	487	3647	764	4730	1325	8090	1595	16030	2685	16088	2948	30094	3472
65	1629	446	3893	785	5484	1185	-	-	15552	2526	17863	2575	26139	3281
90	1728	543	2968	744	4606	1203	-	-	16038	2734	16098	2531	30669	3766
105	1524	445	3052	761	4611	1181	7148	1602	15088	2767	15078	2713	26885	3181
125	1172	395	3729	732	4114	960	7191	1491	13503	2283	18708	2826	28863	3064
140	1367	395	2911	648	5419	1066	-	-	11703	2342	15716	2147	32257	3466
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)		
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC			
20	36102	4758	62009	8299	65714	9649	97484	13274	120531	21789	154529	19383		
35	29503	4021	43443	6377	65541	9342	86839	11876	114243	16248	146879	19563		
50	31182	4141	48629	6738	65116	9270	94836	12116	108121	15249	129685	17307		
65	35839	4334	47374	6445	58366	8507	81871	10641	126213	19309	136645	15915		
90	35602	4375	52749	6836	67516	9415	89208	11476	93793	16163	132881	16261		
105	30675	3877	47649	6588	71452	9469	92564	11416	119405	16265	144460	18092		
125	35866	4002	51406	6266	70051	8506	93654	10650	109839	13112	145668	16692		
140	34629	3873	53340	6157	73495	8775	82144	9777	99076	14487	144232	15067		

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	736	391	2008	717	3570	1136	-	-	6655	3887	13691	3895	23255	4917
35	668	571	2080	816	4368	2778	2985	2325	5285	1727	11104	2505	22036	3935
50	625	527	1653	567	2840	1298	6283	2027	11022	4392	17377	5385	22048	3428
65	882	504	2756	1335	2868	1676	-	-	10008	3481	15632	3295	19407	3711
90	1435	1143	1754	649	3600	1043	-	-	7069	2531	12861	3758	19937	3687
105	233	489	2042	1031	2065	1187	2801	1370	8691	3065	8438	3283	14371	2636
125	905	875	2646	943	3324	1374	5694	2096	8128	2160	12781	2775	19114	2637
140	1229	776	2368	875	3071	1033	-	-	9268	2575	16478	3128	20808	2926
	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)		
degrees	counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC		counts/mC			
20	19965	3758	32469	7212	41887	8621	53393	12969	96389	23024	68319	15035		
35	23982	4554	29947	6719	34400	7425	53801	10644	65537	16064	77594	16485		
50	25853	5602	36012	8846	48532	10831	82404	16696	68613	13744	74767	15131		
65	32563	6762	29075	7357	41961	7310	63146	14031	114203	27930	104764	18186		
90	30196	5848	35814	8287	57985	11719	69213	15285	98934	24857	111003	19256		
105	17835	3486	22743	4733	34020	7545	45936	10232	61267	13400	56894	15712		
125	26277	3784	43986	9907	47568	8128	67070	11376	100206	18130	94532	14116		
140	22375	3290	30695	4941	43406	7841	58353	10918	72662	13090	87097	11908		

E_γ=1575 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

E_γ=1613 keV
⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br
 Q-val.= 6.331 MeV
 Σρώχος:
 ξ=87±9 μgr/cm²
 R=97.8%

Σχήμα Γ.11: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 1575 keV και 1613 keV της αντίδρασης ⁷⁸Se(p,γ)⁷⁹Br.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
20	2359	615	5388	1011	9007	1540	-	-	32527	4271	29494	3712	54656	5717
35	2191	553	6340	1164	8317	1669	11183	1959	24752	3529	27015	4058	47942	4865
50	3293	679	5649	1043	8727	1594	13910	2286	27096	3628	30874	4204	55169	5291
65	2324	534	5055	894	8814	1452	-	-	25017	3303	32221	3581	55740	5422
90	1917	503	5588	904	8861	1430	-	-	27281	3637	29689	3604	57319	5671
105	2163	556	5590	955	7956	1514	13362	2011	27058	3451	28867	3994	51141	4910
125	1678	442	5065	839	8662	1408	11886	1815	26232	3185	35206	3892	54457	4784
140	1885	482	5647	891	8908	1419	-	-	28684	3412	31366	3373	51282	4806
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	67516	7014	86766	10052	147711	16755	168961	19611	234680	32877	299694	30602		
35	60928	6425	85620	9763	140355	14876	170710	18449	235632	25679	294505	30927		
50	66898	6886	92198	10300	148960	15339	190966	19801	206657	22802	285178	28048		
65	60042	5986	85869	9214	135934	14174	162125	16609	225294	27258	269053	25388		
90	71627	6971	94842	10146	137263	14680	166856	17050	232486	28167	303645	28388		
105	68768	6664	93349	10085	137234	14090	172810	17199	214593	22278	288171	27782		
125	69839	6193	90716	8746	145048	13481	171496	15801	221572	20632	305723	27230		
140	66537	6091	93157	9130	139889	13661	167403	15925	210870	23008	300703	26457		
θ	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)	W(θ)	δW(θ)
degrees	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC	counts/mC
20	5129	1567	6343	2599	13922	3904	20250	4666	37903	8500	66623	8397		
35	2835	1411	10562	2400	10990	3335	21148	4337	36972	6024	55689	8055		
50	7648	1565	5567	2417	8729	3360	18797	4277	33153	5831	51436	7610		
65	4498	1480	2226	2265	16281	3614	22337	4147	41463	7460	54427	6772		
90	6862	1380	5825	2163	13536	3261	16930	3581	32516	6641	40204	5986		
105	5670	1283	8804	2054	10423	2873	21335	3634	39186	5354	58437	7312		
125	1747	1258	8047	2158	12821	3045	18577	3650	30305	5019	53327	7010		
140	7338	1373	8390	2134	11814	3057	21912	3827	46970	6793	57235	6508		

$E_{\gamma}=1691 \text{ keV}$

$^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$

Q-val.= 6.331 MeV

$\Sigma\tau\acute{o}\lambda\omicron\varsigma:$

$\xi=87\pm 9 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$

R=97.8%

$E_{\gamma}=1779 \text{ keV}$

$^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$

Q-val.= 6.331 MeV

$\Sigma\tau\acute{o}\lambda\omicron\varsigma:$

$\xi=87\pm 9 \mu\text{gr}/\text{cm}^2$

R=97.8%

Σχήμα Γ.12: Γωνιακή κατανομή των κορυφών των 1691 keV και 1779 keV της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.7 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV		Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV	
	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC
20	3490	501	8055	880	11580	1311	-	-	26007	2882	46863	4285	58760	5068
35	2401	381	6191	741	8973	1085	11612	1360	21003	2283	34224	3367	42295	3565
50	3202	461	8660	937	11473	1364	14904	1670	25484	2747	46407	4386	57367	4748
65	4219	523	8425	856	9686	1108	-	-	24636	2444	40827	3539	53156	4390
90	2648	491	8703	1066	10324	1401	-	-	26532	3212	42209	4079	51265	4703
105	3154	558	9530	1166	9612	1450	13610	1868	25682	3142	38560	4207	53411	4720
125	2347	381	8112	906	9104	1156	14896	1666	21794	2396	36935	3474	48136	3943
140	2279	367	7645	822	8860	1083	-	-	25579	2538	36958	3220	51683	4277
θ degrees	Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV		Ep=2.9 MeV		Ep=3.0 MeV			
	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$ counts/mC		
20	7559	6546	78180	7618	147978	13881	127920	13232	281904	32794	232200	21129		
35	65304	5487	66536	6391	129394	11577	108976	10547	213990	19979	207848	18833		
50	80210	6640	73780	7171	149282	13386	139590	13360	257217	24045	250957	22316		
65	73187	5981	75110	6783	141779	12314	96149	9136	232767	23534	219939	18498		
90	72872	6529	81799	8287	134862	13318	123430	12388	300660	31884	250239	22701		
105	73430	6538	67894	7219	139146	13232	137562	13413	255309	23754	225358	22128		
125	67973	5571	69419	6324	125509	10930	121778	10771	240503	20415	220503	19188		
140	66191	5439	69420	6203	131288	11395	108629	9857	232220	21245	196377	16323		

γ_0
 $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$
 Q-val. = 6.331 MeV
 Στόχος:
 $\xi = 87 \pm 9 \text{ } \mu\text{gr}/\text{cm}^2$
 R = 97.8%

Σχήμα Γ.13: Γωνιακή κατανομή της πρωτογενούς μετάπτωσης γ_0 της αντίδρασης $^{78}\text{Se}(p,\gamma)^{79}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	-	-	130327	29039	206534	25063	378386	47929	711959	68059	1157220	119439	1716630	159881
30	-	-	117897	32118	179500	22057	356305	46789	582180	57338	961978	100036	1414960	133640
45	26981	10838	137492	25162	193133	20157	384968	43159	542462	51119	1219280	114611	1406200	127943
55	38440	15356	124451	23719	216699	22674	423477	45579	487647	46082	1155200	111307	1288840	118032
90	49562	10011	145591	19467	248594	23853	493885	47846	721311	64482	1412440	128398	1806690	159575
100	31931	5963	116733	14705	187033	17495	365899	35308	587985	52450	1156480	103957	1430720	126443
120	35274	7223	143031	18250	233626	21645	475676	45031	667770	59181	1340170	120044	1654630	145849
130	30794	6402	122004	14737	190344	17677	388867	36792	535569	47495	1092290	98678	1322170	116753
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
20	2406940	227450	2821020	251957	4871000	437703	4852910	441341	7890540	699062	5532880	490484	3548570	331686
30	2077620	199167	2584720	231113	3964710	358446	4299370	390923	6534470	580069	5043470	446662	2982070	283741
45	2887030	259677	2911890	256281	5477270	483537	4908160	434063	7021470	615819	5629260	493125	3453390	309868
55	2809290	253379	2715940	239604	5609440	494896	4904790	435467	6650220	584952	4780710	420047	3494450	314403
90	3198420	283084	3736630	325830	6458830	564683	6665710	583479	8997530	786616	6862260	597667	4540730	400087
100	2598020	229403	2940850	256419	5094150	445216	5326720	465400	6979950	608112	5492930	478143	3441330	302772
120	3154820	277734	3512140	305877	5949980	519596	6084630	531539	7807330	679913	6188000	538427	4100540	360194
130	2505770	220942	2818090	245543	4979830	434885	4948280	432304	6391690	557358	4834980	420943	3316710	291684
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
20	3099530	286379	1535770	158435	1272480	153274	1808910	237435						
30	2584450	238758	1382590	142409	1165790	158420	1539890	313266						
45	3080050	274645	1728950	163698	1418120	165920	1715070	231177						
55	3075620	275672	1664140	159861	1388590	140478	1792960	234201						
90	4138610	363300	2289260	204435	1843550	168880	2003340	189810						
100	3197170	280145	1449700	132679	1529210	144428	1773130	178648						
120	3674530	321660	1887520	168866	1683170	162453	1968270	188634						
130	3074770	269371	1622760	145323	1458460	132449	1737610	162688						

$E_\gamma = 275 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.14: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 275 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	11892	4426	29821	6964	44095	5028	78214	10100	142969	13581	224182	23647	330948	30831
30	5479	4302	28936	7006	35624	4276	66550	9112	122459	11856	184596	19533	281368	26363
45	6222	2693	31381	5716	37678	3941	81949	11261	116800	10852	230838	21954	277289	25144
55	5065	2785	30245	5152	39447	4110	83158	9071	104897	9711	228458	21945	261894	23874
90	7569	2381	29881	4346	49738	4830	96698	9808	140147	12729	263898	24877	345554	30951
100	5150	1440	30521	4074	43083	4725	78254	8001	127619	11543	240094	22190	297106	26591
120	5808	1894	29556	4237	47393	4486	92535	9267	134171	12087	250317	23028	311197	27755
130	4495	1591	27200	3563	41589	3925	78584	7822	117546	10547	222917	20671	272296	24293
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	486292	46277	537502	48442	964607	87416	902122	82791	1460380	130066	791027	71789	494916	48282
30	428714	41186	489654	44007	775746	71119	785050	71970	1167080	104127	727139	65428	414179	41446
45	537434	48737	534033	47087	994306	88210	874027	77870	1267370	111455	797505	70384	468812	43136
55	520611	47144	507535	44855	1029200	90946	857379	76420	1250410	110030	707133	62548	463160	42700
90	586268	52714	636974	56042	1131880	99863	1123120	99350	1546500	135676	935714	82233	596057	54068
100	514799	46284	565647	49676	972896	85967	940967	83214	1313580	115158	799538	70291	539103	51739
120	573369	51230	588388	51591	1036670	91390	972945	85877	1315210	115258	811176	71275	522077	47022
130	493456	44109	519494	45591	933308	82135	861771	76106	1187870	104109	710308	62367	468866	42264
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	444614	42014	264400	28861	185317	23829	218242	40219						
30	378390	35838	221497	24041	163125	30147	212183	40723						
45	420575	38002	248289	24454	181965	22687	208685	34483						
55	434396	39190	268443	26215	181320	19127	167095	26998						
90	534063	47768	331248	31111	256406	25736	261631	24703						
100	471649	42050	202027	20152	210491	32190	257480	28463						
120	473645	42169	269475	25347	196916	21768	200814	28155						
130	424652	37850	249349	23478	172079	16930	156598	23985						

E_γ=538 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.15: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 538 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC
20	4497	3315	15495	4796	19500	3360	34910	7303	68934	7979	120349	16043	149372	16241
30	4585	2738	11096	4717	16938	3249	30138	6658	56135	6938	92075	12819	133113	14619
45	4048	2638	16235	4780	17080	2431	36351	5761	49979	5507	104924	11843	121161	12143
55	3870	2394	12987	4185	16963	2405	32636	5234	44239	4839	102304	12000	120253	12172
90	4256	2759	14109	3858	23576	2843	41259	5499	64394	6369	113950	12551	159924	15246
100	3412	1069	11211	2817	18690	2271	36876	4612	59470	5949	100705	10475	132335	12817
120	2961	1751	13705	3189	20658	2372	44162	5396	56469	5609	113610	11659	129294	12389
130	2295	1454	13925	2644	18217	2076	36524	4504	51370	4962	99805	10545	121697	11545
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC
20	241207	26536	266065	27445	473767	46819	436542	44703	665360	63229	440447	42072	289557	32846
30	212563	24873	236886	23449	366408	37413	378032	39024	556724	53167	401798	38917	235141	33949
45	247176	24403	249928	22928	443448	41307	411853	38809	578781	52560	398613	36533	258551	25938
55	251940	24720	222751	20829	464466	42930	376541	36137	556559	50854	351072	31921	248395	25641
90	243949	23909	305893	27739	474557	43501	500594	46002	712508	63896	470339	42360	323392	31563
100	232970	22263	260907	23666	424054	39122	445226	40936	597937	53700	431283	38781	272680	26227
120	253784	24172	268422	24136	463965	42378	453679	41549	608804	54592	416368	37510	265241	25616
130	227324	21625	251346	22653	425451	38775	412382	37807	555108	49858	377956	33932	248676	23983
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC						
20	238480	25752	146881	21618	179388	86647	447725	306941						
30	187662	22349	117564	18676	154295	50572	335237	85121						
45	217722	21388	115586	14182	113804	70498	286630	77751						
55	215662	21285	123505	15260	154853	27961	308032	71680						
90	303376	28048	195884	19838	161588	36937	357950	55209						
100	247879	23076	174697	19117	129161	23623	261592	90361						
120	232242	21772	137688	14986	117160	27631	277731	57702						
130	216250	20311	127593	14652	179891	18198	224616	49858						

E_γ=566 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.16: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 566 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	8017	4286	26266	5927	36843	4321	71703	9254	122280	11707	203323	21480	284819	26682
30	4298	2722	29844	6729	33458	3963	59331	8240	100485	9956	170968	18060	235475	22305
45	5861	2767	25328	5160	38119	3934	68826	7844	98924	9268	184458	17811	234077	21357
55	4833	2342	22420	3955	36494	3671	73078	7836	95235	8792	191629	18509	218626	19936
90	7199	2241	25842	4026	43823	4316	75053	8037	122512	11198	220037	20995	281185	25495
100	3760	1171	24764	3606	42603	4049	76158	7771	119448	10819	204649	19090	284188	25447
120	6695	2047	25773	4127	40759	3925	78148	7973	108439	9866	214733	19922	258871	23214
130	4346	1584	20814	2982	36320	3473	73891	7366	98636	8908	194120	18140	229684	20595
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	403285	38896	451495	40895	784279	71573	709449	65915	1214310	108501	681175	61394	438068	42735
30	358519	34878	405681	36662	659279	60849	657147	60752	1023600	91590	651871	58708	376935	38173
45	438539	40032	443648	39232	828934	73759	713524	63821	1090160	95943	683666	60418	405921	37431
55	420238	38342	419419	37150	832933	73853	698805	62535	1066910	93996	596566	52806	386823	35752
90	472103	42856	365341	32961	925943	81984	735913	66432	1309700	115221	695410	61655	460570	42729
100	440374	39801	491246	43235	811243	71930	868973	76942	1217130	106734	800063	70267	539739	48503
120	464850	41817	481567	42332	849486	75164	779171	69094	1088330	95575	688018	60569	448063	40522
130	411203	36994	435786	38342	764516	67507	707006	62694	1010740	88768	600100	52821	402762	36490
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	371730	35459	244313	26257	164565	25406	274563	162569						
30	319752	30466	221755	23613	169260	24024	320040	97366						
45	348491	31613	229390	22228	177769	20009	243992	66893						
55	348660	31663	221097	21473	182045	18044	229929	69603						
90	374410	36498	283459	27602	173417	18508	177781	97817						
100	439254	39917	341420	31702	165178	17946	255425	60952						
120	389386	34813	242658	22778	161818	40525	183944	37611						
130	365922	32726	222411	20918	166762	16029	177551	33038						

E_γ=649 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.17: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 649 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	2894	1736	8654	2824	13689	2247	25395	4874	40509	4858	79587	11244	110160	12300
30	2747	1317	8637	3285	11706	1906	22680	4419	36580	4475	67869	9171	100910	10981
45	2398	924	7546	1897	12362	1526	25403	3582	36434	3814	76004	8321	91651	9055
55	2349	961	5864	1667	11165	1493	24733	3530	33696	3541	71129	8255	84007	8497
90	1933	1406	8289	2261	12188	1686	27297	3796	37740	4014	78047	9292	93988	9614
100	2204	845	7274	1885	12717	1583	24686	3572	36105	3783	76058	8383	84114	8539
120	2265	806	9305	1920	13069	1529	30232	3821	37931	3826	81429	8524	98129	9499
130	2341	928	8019	1645	12650	1481	24010	3112	33993	3405	66641	7397	89972	8671
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	174297	19455	200809	19711	356799	35733	316713	33175	492932	57418	396721	37412	233612	26011
30	145341	16808	181666	17577	293321	29870	317374	32127	455344	43156	362663	33998	219474	25936
45	182844	18049	206126	18906	349924	32537	325539	30526	461821	41885	337645	30581	221580	21530
55	178684	17679	176187	16290	356293	32954	304014	28849	421334	38665	317416	28772	213805	20944
90	170718	17354	194714	18096	353557	33026	331196	31594	461027	42312	329544	30117	231157	22802
100	167206	16725	179767	16526	326851	30573	309662	29159	422604	38485	330420	29911	207393	20245
120	168311	16540	198809	18034	336925	31183	326184	30332	448550	40601	336101	30333	216656	20840
130	162836	15848	187232	16970	328275	30069	320058	29541	417881	37798	319615	28662	203846	19505
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	214962	22483	128141	17429	122477	15613	144750	23186						
30	195714	19837	126575	15584	104521	16253	129843	22658						
45	184109	17417	115158	12452	111333	13434	127173	19622						
55	186908	17783	115653	12608	104550	11170	114768	16148						
90	190531	18383	122081	13175	108400	11685	110037	15886						
100	186901	17566	110447	11968	100191	12174	-	-						
120	199835	18649	116562	12337	109517	13402	103862	18552						
130	195719	18146	111358	11735	106215	11116	97211	14451						

E_γ=747 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.18: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 747 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC
20	4644	1690	21170	3961	31103	3499	58636	7294	103820	9916	168164	17893	250263	23454
30	4174	1803	17591	3462	25953	2906	53997	6759	89368	8648	159098	16257	212903	20045
45	3807	941	18011	2690	27908	2747	56804	6024	84085	7739	174610	16437	207017	18755
55	4846	1131	17955	2688	28086	2813	59926	6257	81967	7539	165528	15919	187382	17093
90	5612	1283	21970	3197	37147	3628	66995	7061	107077	9771	196556	18817	257574	23282
100	3708	884	18056	2703	30423	2969	53909	5814	94390	8632	170282	16102	231842	20889
120	4049	932	19200	2678	30993	2972	61029	6255	90561	8252	174168	16240	216700	19507
130	4879	998	19070	2523	28053	2724	58244	5905	81338	7388	167193	15737	201900	18161
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC
20	401890	38173	441578	39737	764645	69385	784444	71552	1149840	102568	806781	71770	515085	48264
30	328274	31586	403930	36240	635500	58280	677454	61886	980521	87529	762403	67804	448459	42687
45	418929	37877	438244	38572	778344	69019	739966	65704	1013220	89082	761938	66877	479203	43078
55	393724	35715	399027	35251	783770	69370	709762	63195	982392	86533	688610	60528	446136	40366
90	425943	38693	532320	46863	842469	74711	920594	81629	1243660	109322	912417	80001	575642	51692
100	406428	36793	456601	40167	749275	66533	800406	70927	1094360	96071	836421	73307	527514	47241
120	424452	38189	456328	40081	778516	68896	778881	68931	1000690	87893	764142	67005	487454	43696
130	373791	33686	410739	36118	732417	64651	706454	62577	939886	82597	679126	59541	466189	41723
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC	W(θ) counts/mC	δW(θ) counts/mC						
20	443532	40804	258672	26473	195475	20784	147721	72240						
30	383472	35237	220769	22688	166244	20715	222812	61942						
45	398533	35487	220153	20707	170076	17624	108046	72216						
55	409301	36509	217602	20554	175968	16757	196797	50541						
90	514144	45669	302029	28076	230277	21436	232323	71212						
100	467425	41382	252889	23545	201049	19840	199947	46877						
120	439821	38966	233265	21686	181795	18540	133855	77931						
130	396663	35207	212058	19814	172626	16282	148971	58731						

E_γ=767 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.19: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 767 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	2882	1631	13987	3281	27975	3298	59029	7481	101512	9782	160302	17424	238982	22599
30	2621	1949	18450	3612	24056	2754	50224	6360	86233	8370	152500	15684	207294	19540
45	4016	954	17197	2570	26760	2638	56565	5952	79715	7361	172395	16213	205556	18613
55	4444	1030	15726	2449	27912	2787	57172	6010	76971	7104	168758	16164	192602	17515
90	4766	1121	21901	3100	32420	3230	65443	6894	104461	9544	200010	19076	246913	22360
100	3411	842	18378	2708	28295	2776	57482	6059	89667	8226	185741	17365	226471	20427
120	4024	878	16938	2495	29938	2881	61466	6277	89067	8118	187667	17403	217649	19559
130	4766	971	17474	2377	27176	2645	56739	5768	84573	7660	166137	15615	194671	17546
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	381120	36729	441719	39839	772355	70305	771080	70656	1184720	105789	796164	70999	497210	47116
30	320142	30835	412279	36934	637816	58390	686196	62584	1006400	89665	764442	67936	445514	42491
45	401529	36341	437543	38499	801247	70950	743316	65961	1034180	90855	788718	69165	446904	40273
55	407507	36843	422428	37245	815168	72062	746997	66310	1035950	91095	728743	63962	459013	41382
90	453987	41147	525872	46322	920121	81351	958874	84869	1292650	113508	963500	84393	589732	52866
100	409238	37020	457197	40214	811038	71821	816003	72232	1094800	96101	854594	74867	506078	45345
120	425657	38258	472302	41446	831605	73451	821110	72513	1041590	91423	815971	71463	514653	45990
130	371001	33427	424456	37301	735462	64912	729647	64515	950533	83477	711009	62291	451260	40423
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	435412	40259	252771	26245	199701	21018	174765	30720						
30	360376	33294	236447	23687	167184	20439	182394	25511						
45	403630	35894	228426	21249	174435	17881	174077	19670						
55	417965	37203	223750	20955	180153	16984	189356	20690						
90	520571	46188	289620	26803	227936	21158	215301	22522						
100	454140	40222	184984	17622	195009	19191	201463	21593						
120	450331	39840	236433	21855	193077	19368	202751	22621						
130	400091	35491	227507	21030	180151	16859	171486	19278						

E_γ=789 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.20: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 789 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	7191	2113	24875	4312	38079	4048	69160	8039	105278	10009	192538	20158	257773	24111
30	4233	1275	16542	3677	31563	3325	58932	7118	90522	8789	169069	17138	224640	21101
45	4385	908	21132	2863	36711	3475	62302	6690	86000	7976	185976	17656	222719	20128
55	5900	1143	19775	3146	36647	3522	68721	7995	82655	7582	191934	20512	206013	18707
90	6779	1417	24935	3481	42851	4105	72301	7497	112593	10277	208785	19882	263046	23938
100	4751	973	21905	2964	39298	3708	68317	6966	98112	8964	188768	17648	240757	21663
120	4865	909	22981	2945	37411	3509	71009	7093	94902	8614	196795	18221	225312	20224
130	5655	1064	20728	2664	35540	3350	64803	6466	86880	7860	172342	16188	208775	18738
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	39998	37975	446163	40154	779030	70802	720596	66293	1098680	98305	682949	61636	448583	43160
30	353975	33676	416440	37289	636426	58222	659830	60427	976332	87118	656479	59012	399178	39024
45	423353	38279	433928	38225	769436	68281	693757	61763	1017980	89803	668913	58854	410663	38393
55	413854	37420	413289	36472	797508	70696	701920	62493	989751	87152	599234	52888	395641	36023
90	445651	40463	526244	46427	853371	75625	838641	74655	1186840	104518	768811	68001	492891	44980
100	408491	37083	462329	40661	744859	66406	778979	69119	1069330	94193	717160	63309	439547	39774
120	448806	40097	455961	40045	777142	68844	738068	65417	1003640	88147	654186	57537	438320	39524
130	386174	34788	422280	37124	711014	63050	689477	61213	929376	81795	584790	51441	383849	34769
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	350652	35256	258988	29076	191895	19604	218543	25582						
30	339392	31403	243287	24209	5	23458	216705	61468						
45	371745	33193	222218	27388	186421	22985	187692	21955						
55	363803	32650	233501	22025	185408	19787	186129	23102						
90	435253	39706	287551	27126	230955	21379	256376	26047						
100	400499	35663	296599	27876	203347	25738	238453	24338						
120	383624	34088	226443	20953	194200	19429	201073	22993						
130	347725	31475	217820	21344	174402	16675	196672	27946						

E_γ=828 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.21: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 828 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	2519	1414	8579	3153	10462	1865	20961	5144	37143	4354	73849	11753	98607	11940
30	1958	1154	6526	2671	9961	2240	21825	4868	33795	3907	65837	9438	97082	12110
45	1974	663	7143	1654	10754	1518	25480	3684	35485	3901	72291	8411	91975	9696
55	2822	899	8531	2014	10932	1603	23906	3256	32292	3617	70287	8348	88205	8974
90	3765	1216	10475	2144	12274	1574	21593	3304	38797	3978	76840	8789	97098	9644
100	2274	883	8686	1879	11590	1415	22229	3104	34122	3645	78414	8792	95008	9535
120	1799	526	9038	1848	12095	1387	21285	2999	36448	3812	71796	7641	91727	9188
130	2251	725	9212	1691	11144	1321	20085	2718	36017	3685	73750	8473	85680	8546
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	151652	17834	201097	20418	337533	35399	383160	39345	495043	46783	444922	42579	279613	29281
30	158322	18800	209388	20078	298883	30979	346144	35517	484471	46219	436833	42189	271354	35211
45	173278	18190	209044	19068	345241	33293	380874	35727	490769	46253	434038	38905	301040	29676
55	166603	16347	202639	18576	353500	33558	369283	34621	478219	43808	404997	36307	279873	26742
90	168482	16867	219624	19981	379327	45254	413246	38109	539553	48689	459127	40964	323504	30200
100	160157	15830	206431	18924	352146	33452	385291	36003	485724	44422	444271	39814	278384	26496
120	174254	16796	213651	19183	358636	32825	394723	35898	497642	44933	453124	40190	297453	27478
130	167544	17012	206413	18799	363905	34234	389743	36132	494553	45364	432423	38534	277021	25599
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	258327	27148	169097	23209	123125	14850	125333	18785						
30	264821	26059	137077	18134	127680	18089	116914	20267						
45	253243	23100	145645	18122	128581	18058	112473	15873						
55	273033	25458	157975	16955	128781	16990	120378	15697						
90	307737	27991	164379	18731	127808	12930	131787	16420						
100	269660	24729	167717	16919	125622	13982	116673	16397						
120	274104	24753	150830	15694	108476	13085	123755	16691						
130	268573	24916	138103	15338	107377	11841	120120	20884						

E_γ=836 keV
⁸⁰Se(p,γ)⁸¹Br
 Q-val.= 7.504 MeV
 Στόχοι:
 ξ= 106±11 μgr/cm²
 ξ=132±13 μgr/cm²

Σχήμα Γ.22: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 836 keV της αντίδρασης ⁸⁰Se(p, γ)⁸¹Br.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	---	---	12115	2988	24977	2991	35870	5525	67620	6927	125352	15371	162260	16124
30	3248	1372	12853	3100	19681	2408	36860	5298	61014	6369	115441	12797	151480	15022
45	2761	786	14419	2251	22224	2255	44352	4913	58221	5528	116080	11407	147233	13625
55	2846	910	14173	2292	22651	2325	40147	4567	55372	5260	115022	11616	134076	12506
90	3845	1150	13751	2521	26017	2812	49293	5653	68890	6572	133396	13652	169043	15796
100	3483	881	12513	2242	22788	2341	43041	4957	58448	5628	123806	12244	151072	14042
120	2815	933	13019	2156	24018	2389	43222	4820	58953	5580	122402	11912	146971	13573
130	3518	861	13444	2092	22189	2240	41701	4560	56008	5259	117558	11616	137238	12664
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	262784	26789	286287	26602	534679	49977	492118	46968	675579	70553	430922	41972	314716	33808
30	240647	24476	264013	24383	444744	42371	427152	42891	602822	57748	403812	42242	304786	52830
45	268292	24938	278940	24827	508155	45763	467829	42294	657008	58382	418019	39150	275465	25686
55	269865	25088	268449	23985	524270	47314	461703	43286	659536	58667	401101	35747	278035	26124
90	285413	26942	305621	27413	561209	50688	531503	48374	717878	69962	453350	43925	284554	34042
100	258233	24267	274375	24535	498738	45162	482106	43717	661481	58924	436725	39026	302231	28266
120	276505	25611	283747	25240	506166	45579	458786	41499	628239	55886	409449	36505	276570	27754
130	248274	23051	266714	23740	471826	42356	438401	39613	596244	53086	377046	33579	262426	26409
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	271630	36076	225340	24056	213214	21851	230172	28139						
30	245587	33476	189597	20492	159281	19507	210859	26881						
45	229328	21921	158193	15485	112591	12821	120324	18344						
55	241173	22058	152858	15431	127248	12883	122578	16280						
90	251053	27438	178257	18709	153784	16039	165207	20081						
100	254173	26853	164608	18359	160030	32095	179656	42697						
120	233444	23667	154321	18724	130943	22392	160924	23264						
130	226235	20527	148621	18957	118506	12069	117743	18018						

$E_{\gamma} = 1105 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.23: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1105 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	-	-	2133	1220	4908	2633	6274	2908	10129	7155	10843	4741		
30	-	-	2009	1175	3589	2861	6483	2560	14359	7135	9061	4219		
45	-	-	2128	743	5377	1714	5221	1411	11736	3353	12696	3038		
55	-	-	2381	813	5059	1765	5588	1755	11445	3557	13993	4649		
90	-	-	2039	1177	4817	2505	5880	2609	10074	4520	11603	5028		
100	-	-	2037	785	4554	2444	4573	1710	11449	4288	12001	6382		
120	-	-	2610	846	3511	1696	4604	1382	10453	5927	11532	4092		
130	-	-	1858	789	4497	2314	3978	1411	12263	3612	9649	2471		
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	24478	15212	56306	10688	65428	20109	57656	22227	75470	26020	75338	14173	83796	22794
30	30838	12506	46752	17501	61757	14341	54357	19009	80587	16592	54878	16672	97372	20498
45	34513	12294	55040	8947	70137	15211	61162	14636	80378	11295	67540	14392	97429	28579
55	36729	6891	46294	8078	73235	15944	63532	11566	77500	11682	63823	10033	87587	35761
90	27807	8475	49492	14200	79113	14279	54699	12505	77000	27555	63143	18672	91188	18900
100	31731	12138	41208	15190	62711	12749	60947	29223	69377	23158	59968	12013	103622	13736
120	31628	7757	37598	9139	58981	11927	50451	10161	66211	11732	65499	17036	88593	15437
130	32121	11652	44411	13785	66066	24066	48744	10165	67967	13169	70675	18828	96813	32136
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	80816	14268	121902	32336	155450	49918	139080	45438						
30	72950	14381	116964	15159	175691	21250	125967	24540						
45	69058	11519	123161	12371	161462	34181	160084	17263						
55	73475	19570	121528	13096	149527	19096	129397	17777						
90	68755	13023	116004	18102	141611	14217	118838	17602						
100	76738	9804	103583	10224	153627	16233	138000	25339						
120	73809	14741	112272	12689	166934	28297	147975	19198						
130	62536	19349	101398	16101	151025	24014	127268	21966						

$E_{\gamma} = 1236 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.24: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1236 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	1364	1036	1821	1612	1731	1411	3798	3018	4373	2165	9353	6147	13342	4949
30	794	380	1643	834	2211	1188	5399	2993	3367	2388	8026	5235	11977	5638
45	575	382	1372	1444	1645	701	4049	2807	3339	1454	8703	3711	9617	2686
55	610	451	1119	914	1141	746	2572	1784	1953	1307	10976	5362	13040	3006
90	733	676	1458	1129	1378	1114	4277	2002	2526	1446	11310	5036	10178	3530
100	-	-	1361	1323	1139	736	2979	2624	2582	1412	8410	4955	10544	3100
120	-	-	1111	924	1659	664	4309	1611	2647	1198	10850	5579	11585	3647
130	-	-	686	967	1490	710	4110	1695	3743	1617	10583	3867	9808	2570
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	16705	8055	16404	7419	38750	11211	46807	11804	61392	14530	55089	10670	37658	13109
30	17530	7258	21626	5478	35846	10897	48928	12502	50008	16820	50840	9713	38896	14085
45	14681	4411	19169	3542	44881	11178	46538	8232	61782	9379	46109	9963	32834	9814
55	16745	5329	17562	6264	38299	7504	38858	8450	48618	12398	49611	12378	31091	6564
90	18171	5944	19961	4988	42985	8962	48117	10030	59520	15269	41740	7712	29105	7959
100	21155	7489	18469	4266	37556	9425	48014	11866	45503	9080	40582	6957	24258	7190
120	18093	6073	20355	3637	32893	8685	42274	8377	47993	12496	39228	6251	27066	6373
130	19507	5539	20947	3929	43233	7786	43814	9763	57759	13924	45883	9726	30901	8370
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	32305	8560	19964	10552	11137	6042	31917	13839						
30	22291	8372	9435	14124	12406	5873	28708	17622						
45	27033	7321	11846	7758	7121	5396	-	-						
55	27717	5389	12101	4842	9615	6003	15270	13335						
90	30749	6902	15961	6089	6498	4378	19727	11340						
100	23796	5558	-	-	7354	6076	12275	8036						
120	26998	7445	14158	5557	4072	8395	-	-						
130	32046	10706	15858	5255	4301	3144	7884	6551						

$E_{\gamma} = 1323 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.25: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1323 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	1267	870	3060	1136	4884	1464	9865	3216	20214	3354	25372	6927	44411	7022
30	763	451	3252	1925	4246	1173	10318	3364	14619	2803	24338	6028	39484	6429
45	644	431	4453	1454	4400	846	11363	2466	12065	1760	26302	4416	36284	4510
55	728	417	3463	1232	4407	841	11067	2109	13244	1930	24613	4292	35066	4538
90	981	615	2836	1598	4597	1057	10756	2567	16245	2388	30033	5795	39731	5490
100	1106	534	3041	1344	4499	890	10947	2529	13962	2084	27749	4928	33948	4580
120	1057	762	2606	1304	4689	904	11587	2254	14508	2050	29138	4712	33996	4217
130	1125	531	3409	1141	4475	897	11150	2325	14480	2022	23019	4298	32729	4199
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	61612	11723	68101	9297	115933	16633	102237	16683	160857	21107	112537	15177	73334	15049
30	56939	10929	60949	8262	104495	15069	101297	16168	148596	19242	107359	15827	58408	15983
45	58312	7782	66197	6994	112300	12781	114559	13122	157017	16250	97906	10623	58514	8297
55	63229	7984	58992	6530	131510	13927	100699	11688	151469	15617	89476	9831	57821	7942
90	60429	8834	66184	7801	123903	14252	118008	14607	144495	20320	97950	11342	69324	10412
100	60771	8531	66491	7370	107481	13208	107314	12650	138208	14908	91578	10532	59717	8763
120	60021	8070	63999	7020	102811	12156	102543	12258	144382	15439	85718	10002	56550	8415
130	56781	7419	61196	6714	106381	12047	109263	12648	134479	14115	85065	9414	62796	8929
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	62185	10602	21740	11629	26909	8806	35808	15347						
30	63390	10893	31919	12250	25688	11650	20052	13945						
45	61531	7395	28668	8211	24919	6143	26222	9291						
55	53046	6973	40334	7231	28276	4728	34848	8489						
90	55376	7829	21796	10695	28624	6188	29377	15007						
100	58551	7510	29645	4378	23089	6272	24495	12982						
120	51858	6736	25031	6257	22969	8178	21226	8602						
130	56074	7505	30342	6718	28446	4845	25027	10007						

$E_\gamma = 1536 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.26: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1536 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	1431	907	4088	2243	4987	1425	9735	3204	15985	2966	28598	7459	40114	6656
30	1669	906	3966	2252	4928	1231	8455	3058	14396	2865	29183	6340	42202	6663
45	968	472	4427	1281	4613	806	9246	2108	14764	1993	30766	4669	33175	4230
55	1395	525	3867	1259	5133	1148	11273	2127	13842	1925	29775	4693	31707	4205
90	1122	564	4123	1806	5181	1177	10789	2663	15838	2270	32948	5741	38885	5341
100	1386	660	3826	1417	4970	920	10806	2537	15735	2234	31080	4903	35187	4642
120	814	463	4725	1366	5143	869	10754	2268	15942	2039	30639	4621	31253	3980
130	1057	517	3608	1163	4845	860	8744	2108	14016	1908	26060	4313	33365	4208
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	61162	11320	67160	8989	101603	15285	110705	17142	149107	20325	90394	13580	65342	14232
30	55507	10521	61923	8326	104287	16009	102065	15611	163477	20385	84754	12578	69064	17994
45	68051	8523	66222	6961	107840	12375	107441	12398	158095	16289	96938	10562	61697	8526
55	59918	7698	62319	6838	124733	13641	112556	12590	164063	16630	90057	9878	58377	7952
90	62565	9035	60967	7053	120352	14163	111385	14286	155571	17178	88621	10293	60827	9617
100	61256	8540	66995	7223	119578	13931	112332	13032	142561	15230	88533	10222	50923	8056
120	62329	7900	59338	6303	115120	13107	101300	12101	146049	15567	85291	9911	58788	8397
130	54456	7320	59870	6582	111972	12728	107953	12747	133480	14001	83279	9302	61738	8556
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	56396	10010	36601	12297	34035	9098	26797	15018						
30	54272	9473	42756	12734	39523	12917	34191	15328						
45	53124	6724	36344	8172	34570	7176	25131	9063						
55	54051	7008	44119	7514	27010	4598	34237	8338						
90	55598	7443	40557	8213	28620	5983	33456	8850						
100	60698	7620	39473	8071	28508	6789	34133	10269						
120	55864	6946	35931	7072	26928	6494	38033	9788						
130	53540	7375	43381	7494	27819	4745	31356	8176						

$E_{\gamma} = 1543 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.27: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1543 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	1661	1042	3879	1926	2834	1391	8708	3264	12098	2843	25415	7981	24986	6415
30	2364	1026	3702	1799	2826	1195	7895	3360	10979	2763	22682	6438	27042	5629
45	1459	536	3753	1373	2909	755	8818	2134	10378	1823	21063	3835	23755	3671
55	2259	690	3090	1464	2455	764	7985	2113	9863	1747	19160	4320	24313	3671
90	1693	769	3744	2030	2639	899	7092	2261	11082	2139	22302	5129	27439	4608
100	1286	726	4451	1859	2342	972	7382	2657	11251	2012	15016	3765	24690	4140
120	1468	581	3628	1356	2778	721	5903	1689	10838	1785	18311	3767	22232	3664
130	2432	774	4919	1584	3433	779	7936	2258	8099	1441	17533	3819	26671	3727
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	41762	10751	46421	7880	90343	17031	76115	15579	123178	18590	67228	11507	53906	14125
30	42627	10798	45439	7462	79149	14569	87882	16541	101325	15907	69316	11730	48592	14603
45	40682	6630	40768	4977	88188	11125	81031	10415	116419	14241	75376	8924	42548	7249
55	37648	6357	48602	5715	87798	10878	87001	11315	116965	13323	77392	8822	46972	7909
90	40917	11544	48362	6363	94665	12333	72502	11467	122846	15327	88703	10788	50815	9483
100	45184	7663	48907	6023	88963	12204	85875	12084	119688	14633	80025	9705	42304	8426
120	46812	7468	46013	5508	83584	11019	76406	10607	102842	12472	70000	8591	42549	7612
130	41463	6556	47280	5667	78889	10137	76063	10016	109283	12832	57918	7149	45139	7585
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	40502	10129	19328	10095	20376	10660	14232	10828						
30	37934	8481	21211	11366	14880	12843	9874	5539						
45	44492	6394	26986	6436	13330	5853	9669	7001						
55	43751	6467	26290	6657	14015	4350	11445	6392						
90	50611	8222	26798	8936	12273	5745	13913	9308						
100	44938	6787	33101	4878	11928	4335	13448	7913						
120	39781	5944	22741	6667	12928	4523	10844	5378						
130	35675	5587	30125	6968	16137	4690	11221	5846						

$E_{\gamma} = 1587 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.28: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1587 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	-	-	4672	2676	9212	1800	17855	4558	23268	3663	44873	8968	53240	7670
30	-	-	6673	2699	7104	1382	15155	4629	23698	3490	42239	7607	54876	7453
45	1364	497	4885	1424	8298	1099	17090	2654	20514	2418	42679	5480	47737	5322
55	1520	688	4779	1478	8364	1142	13400	2382	19866	2358	46602	6151	48353	5517
90	1513	924	6054	1911	9228	1383	15324	3196	24685	2991	50929	7257	55131	6468
100	1567	750	5556	2025	8358	1204	15104	2801	20233	2562	44195	6101	51980	6031
120	1737	635	6427	1539	7360	1042	14472	2509	19377	2352	41823	5405	53419	5868
130	1788	651	4780	1395	7720	1079	13325	2266	19697	2289	39721	5419	44796	5073
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	84456	12794	112477	12606	185027	22530	181042	22576	279463	30180	173098	19316	117734	17217
30	87450	13347	98422	10982	163188	20684	167760	20951	242571	26289	160708	17759	106757	19650
45	86933	10013	102730	9878	178686	18075	169058	17145	237107	22713	164704	15738	108436	11703
55	96676	10825	96540	9484	168101	17077	162771	16800	235392	22711	155454	15048	101170	11287
90	98379	11845	108648	10935	194991	21590	179015	19300	245058	24581	168681	16782	97005	12354
100	83558	10203	100522	9943	178714	18826	167601	17773	224660	22162	155969	15418	98878	11609
120	101074	11177	98841	9584	167297	17280	167199	17229	225580	21918	147770	14461	92952	10885
130	82548	9605	93279	9117	159306	16320	168135	17183	212908	20809	146294	14211	82301	9737
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	107923	14032	51904	12106	33745	9086	46456	21538						
30	91361	12103	52584	11231	-	-	39580	18687						
45	88168	9096	50640	6962	39710	7531	43164	8710						
55	94118	9850	57838	7962	41698	5607	50039	9564						
90	93112	10479	57087	8765	46218	6754	52914	11227						
100	86358	9452	-	-	39336	7714	46203	11126						
120	90282	9474	52127	7042	40640	7035	29977	8387						
130	80290	8590	49541	7144	43034	6054	33568	7827						

$E_{\gamma} = 1670 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στόχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.29: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 1670 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$
20	-	-	-	-	12221	6414	-	-	35104	12666	92342	24679	99643	28096
30	-	-	-	-	-	-	-	-	35959	12652	58825	22235	107851	66586
45	-	-	9442	5110	9308	4153	27893	9451	37584	10998	64405	18576	84023	13168
55	-	-	-	-	12169	5161	-	-	38551	14290	88080	25518	98174	21137
90	-	-	-	-	12412	2944	37355	9252	49275	8779	143931	50823	121740	27108
100	-	-	9036	3802	12080	3140	33418	6155	34059	4443	93962	34537	104528	40344
120	-	-	5966	4983	7807	3973	29779	16500	37977	9253	81959	20626	110173	18480
130	-	-	11462	3100	9695	1891	29513	5809	41857	8442	64116	13886	95570	11433
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$
20	139281	31706	140689	40674	433485	225625	349666	76515	--	--	413504	73199	267908	47141
30	183213	55383	120900	21344	476055	86163	355578	79284	471783	101156	380921	89999	330685	132247
45	143032	44466	131191	19822	424352	65976	383836	72401	526267	72282	483388	91401	287907	51639
55	184132	35047	161835	25927	318068	101564	434282	89410	457849	57428	406239	68370	262294	51877
90	166359	28066	211587	31399	462792	85552	585777	128431	657124	115650	631493	99857	427506	62834
100	186411	24826	134597	29631	461806	193433	421164	93692	521880	86290	493228	76260	238895	112125
120	133590	28454	143304	17007	391694	62031	425161	89850	537469	92924	509196	53977	322730	59694
130	145352	20175	174852	19926	403905	190452	343815	47289	467569	63053	464044	81759	256822	94758
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$	W(θ) counts/mC	$\delta W(\theta)$						
20	403478	209335	99835	44778	-	-	-	-						
30	226075	56866	-	-	148495	86955	-	-						
45	368036	210000	160251	78250	-	-	-	-						
55	294692	63519	189838	41897	-	-	-	-						
90	341156	50425	198946	36821	128007	21464	-	-						
100	310971	76946	205284	23171	88874	26381	-	-						
120	322681	36439	136487	21441	152377	31393	-	-						
130	304313	117573	107065	22405	-	-	-	-						

$E_\gamma = 260 \text{ keV (meta)}$

$^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$

Q-val.: = 7.504 MeV

Στόχοι:

$\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr}/\text{cm}^2$

$\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr}/\text{cm}^2$

Σχήμα Γ.30: Γωνιακή κατανομή της κορυφής των 260 keV της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

θ degrees	Ep=1.5 MeV		Ep=1.7 MeV		Ep=1.8 MeV		Ep=1.9 MeV		Ep=2.0 MeV		Ep=2.1 MeV		Ep=2.2 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	-	-	5607	2661	8888	2401	15777	5693	26334	4921	69410	14639	53485	10149
30	-	-	6781	3575	9597	2296	11841	4897	25112	4666	55322	11575	39853	8566
45	-	-	7342	2602	10905	1797	16423	3962	23470	3481	50962	8455	47826	6777
55	-	-	7200	2716	10198	1878	12450	3557	25180	3663	60229	10503	48953	7151
90	-	-	10058	3920	14745	2756	13307	4511	30089	4865	71750	13122	66999	10318
100	-	-	6743	3117	11989	2156	15166	4567	26729	4275	56473	10202	54700	8318
120	-	-	8156	2988	12158	2003	13686	3826	28661	4154	64202	10238	51158	7458
130	-	-	5463	2301	9610	1728	10900	3157	23159	3348	54178	9525	45691	6807
θ degrees	Ep=2.3 MeV		Ep=2.4 MeV		Ep=2.5 MeV		Ep=2.6 MeV		Ep=2.65 MeV		Ep=2.7 MeV		Ep=2.8 MeV	
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)
20	98246	18658	80912	11948	134589	22804	129032	22500	217377	30085	99922	15120	71661	20068
30	105008	19336	76636	11034	149929	24219	116231	20782	181501	25520	112158	16065	79750	15866
45	88017	13201	87926	9999	137673	17700	111236	15283	202236	22949	117281	13669	67551	10468
55	99372	14357	86851	10161	174561	21562	115874	16414	210006	24465	132579	15239	68973	14298
90	120154	19103	99770	12450	167448	23135	130880	20639	237731	29175	140748	17257	91853	20230
100	93686	15233	98866	11735	148969	21341	112222	17462	207827	25191	132003	15973	74374	12713
120	96522	14132	89551	10290	150308	19621	120390	16931	202217	23409	114788	13644	69665	11489
130	84879	12751	79038	9229	131830	17113	109381	15086	187340	21954	97167	11669	62880	13368
θ degrees	Ep=2.9 MeV		Ep=3.1 MeV		Ep=3.3 MeV		Ep=3.5 MeV							
	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)	W(θ) counts/mC	δW(θ)						
20	70541	12402	43549	9655	26046	6656	23827	9110						
30	59436	10354	38174	8826	23934	8243	31701	11802						
45	64206	8637	38203	6496	30309	6762	32656	8100						
55	76779	10344	46973	7688	34822	6031	30225	7758						
90	85490	12542	52969	9614	40443	7635	36104	10531						
100	74837	10804	40460	7840	32927	8169	38192	10677						
120	76315	9962	43656	7370	32413	7598	29999	8683						
130	69584	9334	36771	6335	22745	4504	25907	6254						

$E_{\gamma} = \gamma 0 \text{ keV}$
 $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$
 $Q\text{-val.} = 7.504 \text{ MeV}$
 Στρούχοι:
 $\xi = 106 \pm 11 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$
 $\xi = 132 \pm 13 \text{ } \mu\text{gr/cm}^2$

Σχήμα Γ.31: Γωνιακή κατανομή της πρωτογενούς μεταπτώσης γ_0 της αντίδρασης $^{80}\text{Se}(p, \gamma)^{81}\text{Br}$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. ARNOULD and S. GORIELY, *Physics Reports* **384**, 1 (2003).
- [2] W. HAUSER and H. FESHBACH, *Phys. Rev.* **87**, 366 (1952).
- [3] T. SAUTER and F. KÄPPELER, *Phys. Rev. C* **55**, 3127 (1997).
- [4] L.J. ARIFOV, p. 328, 1980, 30.Conf.Nucl.Spectr.and Nucl.Struct.,Leningrad 1980.
- [5] A. KONING, S. HILAIRE, and M. DUIJVESTIJN, TALYS-1.0, in *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Nice, France*, edited by E. R. O.BERSILLON, F.GUNSING and S.LERAY, pp. 211-214, EDP Sciences, 2008, 2007.
- [6] E. BAUGE, J. P. DELAROCHE, and M. GIROD, *Phys. Rev. C* **63**, 024607 (2001).
- [7] A. KONING and J. DELAROCHE, *Nuclear Physics A* **713**, 231 (2003).
- [8] J. KOPECKY and M. UHL, *Phys. Rev. C* **42**, 1941 (1990).
- [9] S. GORIELY, S. HILAIRE, and A. J. KONING, *Phys. Rev. C* **78**, 064307 (2008).
- [10] S. GALANOPOULOS ET AL., *Phys. Rev. C* **67**, 015801 (2003).
- [11] A. SPYROU ET AL., *Phys. Rev. C* **76**, 015802 (2007).
- [12] N. PIEL, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **118**, 186 (1996).
- [13] S. HARISSOPULOS, Cross section measurements of proton captures relevant to the p-process nucleosynthesis, p. 349, 2002, Proceedings, 3rd International Balkan School on Nuclear Physics, Thessaloniki.

- [14] G. SATCHLER, *Intoduction to nuclear reactions*, Oxford University Press, USA, 1990.
- [15] K. KRANE, *Introductory Nuclear Physics*, "John Wiley and Sons", 1988.
- [16] Ε. ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΣ, *Μετρήσεις ενεργών διατομών πυρηνικών αντιδράσεων πρωτονικής σύλληψης των ισοτόπων Στροντίου με σημασία στην πυρηνοσύνθεση*, PhD thesis, School of Applied Physics and Mathematics, National Technical University of Athens, 2004.
- [17] N. BOHR, *Nature* **137**, 344 (1936).
- [18] C. E. ROLFS and W. S. RODNEY, *Cauldrons in the Cosmos*, The University of Chicago Press, 1988.
- [19] Α. ΣΠΥΡΟΥ, *Μελέτη πυρηνικών αντιδράσεων σύλληψης με σημασία στην πυρηνοσύνθεση μεσοβαρών πυρήνων*, PhD thesis, School of Applied Physics and Mathematics, National Technical University of Athens, 2007.
- [20] K. U. KETTNER, H. W. BECKER, F. STRIEDER, and C. ROLFS, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **32**, 489 (2006).
- [21] F. RAIOLA, P. MIGLIARDI, L. GANG, C. BONOMO, G. GY'ORKY, R. BONETTI, C. BROGGINI, N. CHRISTENSEN, P. CORVISIERO, J. CRUZ, A. D'ONOFRIO, Z. F'OLFP, G. GERVINO, L. GIALANELLA, A. JESUS, M. JUNKER, K. LANGANKE, P. PRATI, V. ROCA, C. ROLFS, M. ROMANO, E. SOMORJAI, F. STRIEDER, A. SVANE, F. TERRASI, and J. WINTER, *Physics Letters B* **547**, 193 (2002).
- [22] . M. BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, W. A. FOWLER, and F. HOYLE, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547 (1957).
- [23] A. G. W. CAMERON, *Atomic Energy of Canada, Ltd* **CRL-41** (1957).
- [24] F. HOYLE and R. TAYLOR, *Nature* **203**, 1108 (1964).
- [25] C. ILIADIS, *Nuclear Physics of Stars*, Wiley, 2008.
- [26] S. WOOSLEY and W. HOWARD, *ApJS* **36**, 285 (1978).
- [27] W. M. HOWARD, B. S. MEYER, and F. KÄPPELER, *Inst. of Physics Publishing, Bistol* , 575 (1993).

- [28] K. BRAND, *Materials Science and Engineering: B* **2**, 237 (1989).
- [29] A. MARKOWICZ and R. VAN GRIEKEN, *Handbook on X-Ray Spectrometry*, Marcel Dekker, New York, 1993.
- [30] W. D. EHMANN and D. E. VANCE, *Ραδιοχημεία και Πυρηνικές Μέθοδοι Αναλύσεως*, Μακεδονικές Εκδόσεις, 1998.
- [31] J. ZIEGLER, J. BIRSACK, and U. LITTMARK, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, 1985.
- [32] M. MAYER, SIMNRA, Version 6.05, in *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Germany*, 2005.
- [33] L. BARTHA and I. UZONYI, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **161-163**, 339 (2000).
- [34] Γ. ΠΡΟΒΑΤΑΣ, *Πειραματική μελέτη πυρηνικών ανυδράσεων με σημασία στην πυρηνική αστροφυσική*, PhD thesis, School of Applied Physics and Mathematics, National Technical University of Athens, 2013.
- [35] S. HARISSOPOULOS, A. SPYROU, A. LAGOYANNIS, M. AXIOTIS, P. DEMETRIOU, J. W. HAMMER, R. KUNZ, and H.-W. BECKER, *Phys. Rev. C* **87**, 025806 (2013).
- [36] M. MEHRHOFF, M. ALIOTTA, I. BAUMVOL, H.-W. BECKER, M. BERHEIDE, L. BORUCKI, J. DOMKE, F. GORRIS, S. KUBSKY, N. PIEL, G. ROTERS, C. ROLFS, and W. SCHULTE, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **132**, 671 (1997).
- [37] A. SPYROU, H.-W. BECKER, A. LAGOYANNIS, S. HARISSOPOULOS, and C. ROLFS, *Physical Review C* **76**, 015802 (2007).
- [38] J. THEUERKAUF, S. ESSER, S. KRINK, M. LUIG, N. NICOLAY, O. STUCH, and H. WOLTERS, *TV Analysis Code*, University of Cologne.
- [39] S. AGOSTINELLI, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **506**, 250 (2003).
- [40] NuDAT2.6, www.nndc.bnl.gov/nudat2/.

- [41] R. B. FIRESTONE, V. S. SHIRLEY, C. M. BAGLIN, J. ZIPKIN, AND S. Y. F. CHU, *Table of Isotopes*, Wiley-Interscience, New York, 8th ed. edition, 1996.
- [42] P. DEMETRIOU and S. GORIELY, *Nuclear Physics A* **695**, 95 (2001).
- [43] A. IGNATYUK, K. ISTEKOV, and G. SMIRENKIN, *Sov. J. Nucl. Phys.* **29**, 450 (1979).
- [44] A. IGNATYUK, J. WEIL, S. RAMAN, and S. KAHANE, *Phys. Rev. C* **47**, 1504 (1993).
- [45] P. DEMETRIOU AND S. GORIELY, *Nucl. Phys. A* **695**, 95 (2001).
- [46] D. BRINK, *Nucl. Phys.* **4**, 215 (1957).
- [47] P. AXEL, *Phys. Rev.* **126**, 671 (1962).
- [48] S. GORIELY, F. TONDEUR, and J. PEARSON, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **77**, 311 (2001).
- [49] S. GORIELY, *Physics Letters B* **436**, 10 (1998).
- [50] J.-P. JEUKENNE, A. LEJEUNE, and C. MAHAUX, *Phys. Rev. C* **16**, 80 (1977).
- [51] R. V. REID, *Ann. Phys.* **50**, 525 (1972).