



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών



Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"
Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής
Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
"Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές"

Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης ${}^6\text{Li}(d, d_0)$ για αναλυτικούς σκοπούς

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
Ντέμου Ελένη

Επιβλέπων Καθηγητής: Κόκκορης Μιχαήλ
Επιβλέπων Ερευνητής: Λαγογιάννης Αναστάσιος

Αθήνα, Ιούνιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών



Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"
Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής
Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
"Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές"

Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης ${}^6\text{Li}(d, d_0)$ για αναλυτικούς σκοπούς

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
Ντέμου Ελένη

Τριμελής Επιτροπή

Κόκκορης Μιχαήλ
Αν. Καθηγητής

Λαγογιάννης Αναστάσιος
Ερευνητής Β'

Ζάννη-Βλαστού Ρόζα
Καθηγήτρια

.....

.....

.....

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα. Μιχαήλ Κόκκορη, αναπληρωτή καθηγητή του Ε.Μ.Π και τον Δρα. Αναστάσιο Λαγογιάννη, ερευνητή Β' του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "Δημόκριτος", επιβλέποντες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας για την συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχαν και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν σε όλα τα ζητήματα. Επίσης, ευχαριστώ την Δρα. Ρόζα Ζάννη - Βλαστού για τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Υ.Δ. Κωνσταντίνο Πρεκετέ - Σιγάλα για την εκπαίδευση που μου προσέφερε σε πειραματικό επίπεδο αλλά και σε όποιο ζήτημα προέκυπτε.

Ακόμη, ευχαριστώ πολύ το ερευνητικό προσωπικό του Ι.Π.Σ.Φ. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος" για την βοήθεια στην πειραματική διαδικασία και στα ζητήματα που δημιουργήθηκαν καθώς και την ομάδα πυρηνικής φυσικής του Ε.Μ.Π. για την συνεχή βοήθεια τους.

Επιπλέον, ευχαριστώ ολόψυχα τους γονείς μου, Βικτώρια και Σεραφείμ, καθώς και την αδερφή μου Βασιλεία, για τη συνεχή υποστήριξη, ενθάρρυνση και κυρίως αγάπη που μου προσφέρουν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ισότοπο λίθιο 6, ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$, για ενέργειες δέσμης $E_{d,lab} = 940\text{-}2000$ keV με βήμα 20 - 30 keV και για γωνίες ανίχνευσης $125^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή, 5.5 MV TN11 TANDEM, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος". Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα αποτελούταν από ένα στρώμα χρυσού, ένα στρώμα ισοτοπικά εμπλουτισμένου φθοριούχου λιθίου ${}^6\text{LiF}$ (97% σε ${}^6\text{Li}$) και ένα λεπτό υμένιο άνθρακα και κατασκευάστηκε στο ίδιο εργαστήριο μέσω θερμικής εξάχνωσης. Τα σκεδαζόμενα δευτέρια ανιχνεύονταν από πέντε ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (Silicon Surface Barrier - SSB). Ο κάθε ανιχνευτής ήταν συνδεδεμένος με έναν προενισχυτή, έναν ενισχυτή, έναν αναλογικοψηφιακό μετατροπέα και τέλος έναν πολυκαναλικό αναλυτή. Τα σήματα από τους πέντε ανιχνευτές καταγράφονταν ταυτόχρονα.

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής προσδιορίστηκαν σύμφωνα με την σχετική μέθοδο προσδιορισμού διαφορικών ενεργών διατομών με χρήση των τιμών της ενεργού διατομής του χρυσού οι οποίες ακολουθούν την σχέση του Rutherford. Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε και ο εμπλουτισμός, του οποίου η τιμή είχε δοθεί από την εταιρία αλλά επιλέχθηκε να επιβεβαιωθεί πειραματικά. Για τον προσδιορισμό της συγκεκριμένης τιμής χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα δευτερίων του εμπλουτισμένου στόχου και ενός φυσικού στόχου φθοριούχου λιθίου ${}^{nat}\text{LiF}$ κατασκευασμένου με τον ίδιο τρόπο. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν και κάποια φάσματα με δέσμη πρωτονίων σε ενέργειες $E_p = 1600$ keV και $E_p = 1700$ keV, σε πέντε γωνίες ανίχνευσης για τον εμπλουτισμένο και τον φυσικό στόχο.

Τέλος, παρουσιάζονται σε πίνακα και σε γραφήματα οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από λίθιο 6, ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$, και σχολιάζεται η μεγάλη απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές της ενεργού διατομής Rutherford και η γωνιακή κατανομή.

Abstract

In the present work differential cross-section values for deuteron elastic scattering from ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$, were determined in the energy range $E_{d,lab} = 940 - 2000$ keV in steps of 20 - 30 keV and for five backscattering angles 125° , 140° , 150° , 160° , 170° suitable for Elastic Backscattering Spectroscopy.

The experiment was carried out at the 5.5 MV Tandem Accelerator of the Institute of Nuclear and Particle Physics (INPP), National Centre of Scientific Research (NCSR) "Demokritos", Athens, Greece. The target used for the cross-section measurements was made at N.C.S.R. "Demokritos" using the evaporation technique. At first, a small quantity of high-purity, isotopically enriched ${}^6\text{LiF}$ powder (97% in ${}^6\text{Li}$) was evaporated on self-supporting carbon foils and an ultra-thin Au layer was subsequently evaporated on top for normalization purposes. The detection system consisted of five Si surface barrier detectors (SSB) which were mounted at the laboratory scattering angles of 125° , 140° , 150° , 160° , and 170° , along with the corresponding electronics. The spectra from all five detectors were simultaneously recorded for each deuteron beam energy.

The determination of the differential cross-section values for ${}^6\text{Li}$ was carried out using the relative measurement technique making use of the differential cross-section values of gold that follow the Rutherford formula. Moreover, the enrichment of the target had to be determined. For this purpose, proton EBS spectra from a similarly prepared thin ${}^{nat}\text{LiF}$ target were used at $E_{p,lab} = 1600$ keV and 1700 keV in five scattering angles (125° , 140° , 150° , 160° , 170°) along with the deuteron spectra.

Finally, the differential cross-section values of the present work for the elastic scattering process ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$ and for the five backscattering angles (125° , 140° , 150° , 160° , 170°) are presented both in tabulated and graphical form. The strong deviations from Rutherford formula and the angular distribution are both discussed.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
2	Πειραματικά στοιχεία	5
2.1	Ανιχνευτές ημιαγωγών	5
2.1.1	Τρόπος λειτουργίας	6
2.1.2	Ηλεκτρονικά	7
2.2	Γενικά χαρακτηριστικά επιταχυντή	7
2.3	Πειραματική Διάταξη	8
3	Ανάλυση πειραματικών δεδομένων	14
3.1	Ενεργειακή βαθμονόμηση	14
3.2	Προσδιορισμός τιμών διαφορικής ενεργού διατομής	16
3.2.1	Σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών . . .	16
3.2.2	Υπολογισμός ενεργού διατομής χρυσού κατά Rutherford	17
3.2.3	Εμβαδομέτρηση κορυφών	18
3.2.4	Υπολογισμός λόγου παχών - Ανάλυση των στόχων . . .	20
3.2.5	Υπολογισμός παράγοντα εμπλουτισμού f_{enrich}	26
4	Αποτελέσματα - Σχολιασμός	27
5	Συμπεράσματα - Προοπτικές	38

1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ισότοπο ${}^6\text{Li}$ του λιθίου, ${}^6\text{Li}(d, d_0){}^6\text{Li}$, στο ενεργειακό εύρος $E_{d,lab} = 940 - 2000 \text{ keV}$ και για γωνίες σκέδασης $125^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$.

Το φυσικό λίθιο αποτελείται από δύο ισότοπα, $\sim 92.5\%$ ${}^7\text{Li}$ και $\sim 7.5\%$ ${}^6\text{Li}$, τα οποία έχουν μεγάλη σχετική διαφορά μαζών οπότε η χωριστή μελέτη τους κρίνεται απαραίτητη. Συγκεκριμένα, το ${}^6\text{Li}$ έχει μεγάλη ενεργό διατομή νετρονίων (940 barns) και έτσι σχάζεται εύκολα σε τρίτιο και ήλιο (${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^2\text{H}$). Αποτελεί την κύρια πηγή τριτίου η οποία χρησιμοποιείται στην βιοχημική έρευνα, θερμοπυρηνικά όπλα και στους αντιδραστήρες παραγωγής ενέργειας μέσω ελεγχόμενης σχάσης. Επιπρόσθετα, το ${}^6\text{Li}$, σε συνδυασμό με νιτρική κυτταρίνη, χρησιμοποιείται σε ανιχνευτές νετρονίων λόγω της ικανότητάς του να πραγματοποιεί αντιδράσεις σύλληψης νετρονίων. Συνεπώς, λόγω της ευρείας χρήσης του στις εφαρμογές, η μελέτη του συγκεκριμένου ισοτόπου είναι σημαντική.

Μέσω αυτών των ενεργών διατομών θα καταστεί δυνατός ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός και η κατανομή σε βάθος της συγκέντρωσης του λιθίου σε ένα δείγμα. Η γνώση της συγκέντρωσης ενός στοιχείου σε βάθος είναι καθοριστική για τον χαρακτηρισμό πληθώρας παραγόμενων σύνθετων υλικών που στην περίπτωση του λιθίου ποικίλλουν από το γυαλί και τα κεραμικά μέχρι τα μεταλλικά κράματα και τα πολυμερή. Ωστόσο, η μελέτη της κατανομής σε βάθος των ατόμων ${}^6\text{Li}$ αποτελεί μια πρόκληση για όλες τις τεχνικές ανάλυσης αλλά και για τον κλάδο της εφαρμοσμένης Πυρηνικής Φυσικής που ονομάζεται IBA (Ion Beam Analysis - Ανάλυση με χρήση Ιοντικών Δεσμών) αφού το λίθιο αντιδρά πολύ εύκολα και, λόγω του χαμηλού ατομικού του αριθμού, συνήθως συνυπάρχει σε περίπλοκες μήτρες με μεσαίου και υψηλού ατομικού αριθμού στοιχεία. Οι ιοντικές τεχνικές οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατανομής κατά βάθος ενός στοιχείου/ισοτόπου είναι οι : Φασματοσκοπία σκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy - RBS)/Φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης (Elastic Backscattering Spectroscopy - EBS), Ανάλυση μέσω πυρηνικής αντίδρασης (Nuclear Reaction Analysis - NRA), Ανάλυση μέσω ανίχνευσης του ελαστικά ανακρουόμενου πυρήνα (Elastic Recoil Detection Analysis - ERDA) και Φασματοσκοπία ακτίνων-γ επαγόμενων από σωματίδια (Particle Induced Gamma-ray Emission - PIGE).

Η τεχνική ERDA χρησιμοποιεί δέσμη βαρέων ιόντων (π.χ. ${}^{12}\text{C}, {}^{35}\text{Cl}, {}^{127}\text{I}$) για την ανίχνευση πολύ ελαφρών στοιχείων, όπως το ${}^1\text{H}$ και ανιχνεύεται ο ανακρουόμενος πυρήνας και όχι το σκεδαζόμενο σωματίδιο της δέσμης. Αποτελεί κατάλληλη τεχνική για το ${}^6\text{Li}$ αλλά σε επιφανειακά στρώματα.

Η τεχνική PIGE βασίζεται στην φασματοσκοπία των ακτίνων - γάμμα που εκπέμπονται από τους διεγερμένους πυρήνες οι οποίοι δημιουργούνται από την ακτινοβόληση του στόχου με δέσμη ιόντων. Ωστόσο, δεν κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη τεχνική για την μελέτη του 6Li καθώς οι (p,γ) συντονισμοί είναι πολύ φαρδιοί και περιορίζουν την διακριτική ικανότητα (resolution) σε μερικές δεκάδες νανόμετρα στην καλύτερη περίπτωση.

Η τεχνική RBS είναι ιδανική σε περίπτωση βαρέων στοιχείων στόχου σε ελαφρά στοιχεία μήτρας και η ενεργός διατομή προσδιορίζεται από τον τύπο του Rutherford. Στην τεχνική αυτή ανιχνεύονται τα ελαστικά σκεδαζόμενα σωματίδια από τον στόχο και με την επίλυση της εξίσωσης του Rutherford μπορεί να γίνει και η ποσοτικοποίηση των στοιχείων του δείγματος. Ωστόσο, στην περίπτωση των ελαφρών στοιχείων στόχου ο τύπος του Rutherford δεν μπορεί να εφαρμοστεί (εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις, όπως θα φανεί και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας) και έτσι είναι απαραίτητα πειραματικά δεδομένα για τον προσδιορισμό των διαφορικών ενεργών διατομών.

Η τεχνική EBS αποτελεί μια γενίκευση της μεθόδου RBS για κάθε ελαστική σκέδαση φορτισμένου σωματιδίου από το υπό ανάλυση στοιχείο και χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα εξάγεται η κατανομή της συγκέντρωσης του αναλυόμενου στοιχείου σε βάθος. Η τεχνική αυτή κρίθηκε η καταλληλότερη στην προκειμένη περίπτωση του 6Li και εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

Όσον αφορά την τεχνική NRA, είναι παρόμοια με την τεχνική RBS με την διαφορά ότι στην NRA μετρώνται οι πυρήνες που εκπέμπονται από τις αντιδράσεις των σωματιδίων της δέσμης με τους πυρήνες του στόχου. Οι εκπεμπόμενοι πυρήνες παρέχουν παρόμοιες πληροφορίες σχετικά με την σύνθεση του δείγματος όπως στην περίπτωση της RBS τεχνικής. Η τεχνική NRA εφαρμόζεται συνήθως σε εξώθερμες αντιδράσεις με υψηλή τιμή Q (Q -value) και τα ανιχνευόμενα σωματίδια έχουν μεγάλη ενέργεια (μεγαλύτερη από αυτήν των ελαστικά σκεδαζόμενων σωματιδίων της δέσμης) και εμφανίζονται στο φάσμα στην περιοχή υψηλών ενεργειών όπου δεν υπάρχει υπόβαθρο προκαλούμενο από την μήτρα του στόχου. Έτσι, η τεχνική NRA μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση των ελαφρών στοιχείων σε μήτρες στοιχείων με μεγάλο ατομικό αριθμό και επομένως και στην περίπτωση του 6Li . Ταυτόχρονα, η τεχνική αυτή με χρήση δέσμης δευτερίων παρέχει υψηλή επιλεκτικότητα στα ισότοπα και μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονη διέγερση των περισσότερων ελαφρών στοιχείων που συνυπάρχουν (είτε σε μεγάλες είτε σε μικρές συγκεντρώσεις) κοντά στα επιφανειακά στρώματα υλικών. Ωστόσο, αυτό μπορεί να αποτελέσει και πρόβλημα καθώς η ταυτόχρονη διέγερση πολλών στοιχείων μπορεί να προκαλέσει υψηλό υπόβαθρο λόγω των επικαλύψεων κορυφών και μεταξύ διεγερμένων καταστάσεων των αντιδράσεων της μορφής $A(d, p_{0,1,2,...})B$ και $\Gamma(d, a_{1,...})\Delta$ ή λόγω κινηματικής τριών σωμάτων.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του ${}^6\text{Li}$ οι πιο ελπιδοφόρες αντιδράσεις για την εφαρμογή της τεχνικής NRA φαίνεται να είναι οι ${}^6\text{Li}(p, {}^3\text{He})$ [1], ${}^6\text{Li}(d, p_0)$ [2] και ${}^6\text{Li}(d, a_0)$ [3]. Οι δύο τελευταίες είναι πολύ σημαντικές καθώς συγκεντρώνουν δύο από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής d-NRA, δηλαδή την υψηλή τιμή της τιμής Q , επομένως τις απομονωμένες κορυφές χωρίς καθόλου υπόβαθρο, και την ταυτόχρονη μελέτη όλων των ελαφρών στοιχείων που συνυπάρχουν στο υπό-μελέτη δείγμα. Η εφαρμογή της d-NRA μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά με την ταυτόχρονη ανάλυση και του προκύπτοντος EBS φάσματος, με χρήση της ίδιας πειραματικής διάταξης και των ίδιων συνθηκών. Στο πλαίσιο αυτό, τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων, η IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [4], η οποία περιέχει πυρηνικές ενεργές διατομές είτε μετρημένες πειραματικά μέσω των τεχνικών IBA είτε αξιολογημένες (evaluated) μέσω του προγράμματος SigmaCalc [5], το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον Δρ. A. Gurbich. Η αξιολόγηση των ενεργών διατομών είναι μια δυναμική διαδικασία, η οποία εξαρτάται ισχυρά από την ποιότητα και την διαθεσιμότητα των πειραματικών δεδομένων για μεγάλο εύρος ενεργειών και γωνιών. Επομένως η δημιουργία της IBANDL έχει συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη των EBS αξιολογημένων δεδομένων. Ωστόσο, για την περίπτωση του ${}^6\text{Li}$, όπως γίνεται φανερό στην IBANDL, υπάρχει παντελής έλλειψη δεδομένων διαφορικών ενεργών διατομών ελαστικής σκέδασης δευτερίων σε ${}^6\text{Li}$ για χαμηλές ενέργειες δέσμης ($E_{d,lab} \sim 2.2 \text{ MeV}$) κατάλληλες για τις τεχνικές IBA όπου το αναπόφευκτο υπόβαθρο από νετρόνια πρέπει να παραμένει χαμηλό.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη ενός δείγματος μέσω της πυρηνικής φυσικής χαμηλών ενεργειών εξαρτάται από μια πληθώρα μεταβλητών. Αρχικά, η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή αν στόχος είναι η μελέτη της κατανομής συγκεντρώσεων κατά βάθος των στοιχείων ενός δείγματος ή η ακριβής ποσοτικοποίηση κάποιου συγκεκριμένου στοιχείου ή ακόμα και η απλή ποιοτική ανάλυση αλλά και από τις δυνατότητες της κάθε τεχνικής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι κατάλληλες τεχνικές για ανάλυση κατά βάθος είναι οι RBS/EBS, NRA και ERDA και οι αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται κατά κόρον είναι οι (p, p_0) , (p, a_0) , $(d, p_{0,1,2})$, (d, a_0) . Για να συγκρίνουμε αυτές τις αντιδράσεις μεταξύ τους στην περίπτωση του λιθίου θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν κάποιες παραμέτρους. Αρχικά, πρέπει να εξετάσουμε την ισχύ ανασχεσης κατά την είσοδο και την έξοδο των σωματιδίων στον στόχο, δηλαδή την απώλεια ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων που οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις με την ύλη καθώς τα σωματίδια διασχίζουν τον στόχο. Η ισχύς ανασχεσης είναι διαφορετική για κάθε είδος σωματιδίου και έτσι η επιλογή της κατάλληλης αντίδρασης εξαρτάται από το είδος των σωματιδίων καθώς και την τιμή Q της κάθε αντίδρασης, η οποία

καθορίζει την κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων σωματιδίων αλλά και από την απόλυτη τιμή της ενεργού διατομής. Επομένως, η αντίδραση (d, a_0) με τιμή $Q=22372.8\text{keV}$ υπερτερεί όσον αφορά την τιμή Q έναντι της (p, a_0) με τιμή $Q=4019.72\text{keV}$ ενώ οι τιμές της ενεργού διατομής έχουν την ίδια τάξη μεγέθους και η διαφορά της ισχύος ανάσχεσης ανάμεσα στα πρωτόνια και τα δευτέρια για την διαδρομή εισόδου είναι μικρή (τα p είναι λίγο πιο διεισδυτικά) ενώ για την διαδρομή εξόδου δεν υπάρχει διαφορά στην ισχύ ανάσχεσης εφόσον πρόκειται για τον ίδιο σωματίδιο. Επιπλέον, η αντίδραση (d, p_0) έχει τιμή $Q=5026.5\text{keV}$, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από την (p, a_0) αλλά η ισχύς ανάσχεσης της διαδρομής εξόδου είναι αρκετά μεγαλύτερη στην (p, a_0) έναντι της (d, p_0) και επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν και τις ίδιες τάξης μεγέθους τιμές της ενεργού διατομής, με την (d, p_0) μπορεί να αναλυθεί κάποιο στοιχείο το οποίο βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο δείγμα. Ωστόσο, υπάρχει και η τεχνική PIGE, η οποία υστερεί σε ευαισθησία βάθους αλλά επιτρέπει την ποσοτικοποίηση ελαφρών στοιχείων ενός δείγματος. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση του λιθίου η αντίδραση που χρησιμοποιείται είναι η ${}^7\text{Li}(p, p\gamma){}^7\text{Li}$ [6] και η ακτίνα γάμμα που ανιχνεύεται έχει ενέργεια 441 keV. Η αντίδραση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για κατανομή βάθους μέχρι μερικά μικρόμετρα με σχεδόν μηδαμινό υπόβαθρο εξαιτίας της υψηλής ενέργειας των ακτίνων γάμμα και της χαμηλής ενέργειας δέσμης. Επίσης, η αντίδραση ${}^7\text{Li}(a, a\gamma){}^{11}\text{B}$ με ακτίνα γάμμα με ενέργεια 950 keV παρέχει υψηλότερη διακριτική ικανότητα (resolution) και έχει χρησιμοποιηθεί για εύρεση κατανομής λιθίου σε πυρίτιο [7]. Η διαδικασία επιλογής της κατάλληλης μεθόδου είναι ένα ζήτημα που απαιτεί μελέτη και προσοχή, καθώς υπάρχει και η περίπτωση, ένα πρόβλημα να μην επιλύεται με μια και μόνο μέθοδο αλλά να χρειάζεται συνδυασμό μεθόδων. Τέλος, καθίσταται αρκετά δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν κάποια όρια ευαισθησίας για κάθε μέθοδο καθώς κάθε περίπτωση είναι διαφορετική και εξαρτάται από την ενέργεια και το είδος της δέσμης, το στοιχείο προς ανίχνευση και πόσο βαθιά βρίσκεται στο δείγμα, το σωματίδιο που θα ανιχνευτεί, την μήτρα του δείγματος καθώς και την γωνία ανίχνευσης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών ελαστικής σκέδασης δευτερίων σε ${}^6\text{Li}$ (${}^6\text{Li}(d, d_0){}^6\text{Li}$) στο ενεργειακό εύρος $E_{d,lab} = 940 - 2000 \text{ keV}$ και για γωνίες σκέδασης 125° , 140° , 150° , 160° , 170° με σκοπό τον εμπλουτισμό της διεθνούς βιβλιογραφίας και την χρήση των αποτελεσμάτων από την διεθνή επιστημονική κοινότητα αλλά και στην βιομηχανία, σε περιβαλλοντικές μελέτες και στην μελέτη έργων πολιτιστικής κληρονομιάς.

2 Πειραματικά στοιχεία

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον 5.5MV επιταχυντή τύπου Tandem, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 1, στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".



Σχήμα 1 *Επιταχυντής Tandem του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".*

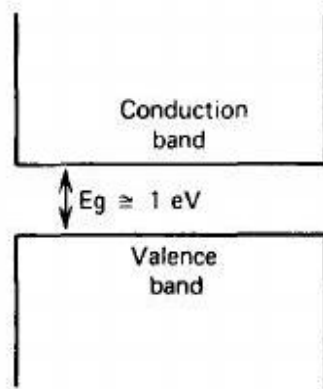
2.1 Ανιχνευτές ημιαγωγών

Οι ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου ανήκουν στην κατηγορία των ανιχνευτών ημιαγωγών (ή στερεάς κατάστασης) και βασίζονται στην δημιουργία και ανίχνευση ζευγών οπών - ηλεκτρονίων.

2.1.1 Τρόπος λειτουργίας

Το περιοδικό πλέγμα των κρυσταλλικών υλικών καθορίζει κάποιες ενεργειακές ζώνες για τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν μέσα στο στερεό. Η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μέσα στο υλικό πρέπει να ανήκει σε κάποια από αυτές τις ενεργειακές ζώνες οι οποίες χωρίζονται με κενά (gaps) ή με περιοχές απαγορευμένων ενεργειών. Μια απλοποιημένη αναπαράσταση των ζωνών αυτών για τους ημιαγωγούς φαίνεται στο Σχήμα 2. Η χαμηλότερη ζώνη ονομάζεται ζώνη σθένους (valence band) και παριστάνει τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας τα οποία είναι δεσμευμένα σε συγκεκριμένες θέσεις του πλέγματος μέσα στον κρύσταλλο ενώ η υψηλότερη ζώνη ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) και παριστάνει τα ηλεκτρόνια τα οποία είναι ελεύθερα να κυκλοφορούν μέσα στον κρύσταλλο. Οι δύο αυτές ζώνες χωρίζονται ενεργειακά με ένα εύρος περιοχής απογύμνωσης φορέων το μέγεθος του οποίου ποικίλει ανάλογα με το υλικό. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διασχίσει τον ημιαγωγό αλληλεπιδρά με κάποια ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους, τα οποία αποκτούν αρκετή ενέργεια, διασχίζουν την περιοχή απογύμνωσης και περνούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτή η διαδικασία διέγερσης δημιουργεί ένα κενό, το οποίο ονομάζεται οπή, στην ζώνη σθένους. Έτσι έχουμε την δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου - οπής. Επομένως, όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διασχίσει τον ημιαγωγό δημιουργεί μια πληθώρα ζευγών ηλεκτρονίου - οπής κατά μήκος και κοντά στην πορεία του μέσα στον ημιαγωγό. Ο αριθμός των ζευγών αυτών είναι ανάλογος της ενέργειας του φορτισμένου σωματιδίου [8].

Στη συνέχεια, καθώς ο ημιαγωγός βρίσκεται υπό τάση, και οι δύο φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια και οπές) θα ολισθήσουν σε αντίθετες κατευθύνσεις. Επομένως, η κίνηση και των ηλεκτρονίων και των οπών δημιουργεί ένα ρεύμα το οποίο θα παραμείνει έως ότου οι φορείς αυτοί συλληχθούν στα όρια του ενεργού όγκου. Έτσι, παράγεται από τον ανιχνευτή ένα σήμα ανάλογο της ενέργειας που αφήνει ένα σωματίδιο. Κατόπιν, με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά παίρνουμε το τελικό φάσμα [8].



Σχήμα 2 Δομή ζωνών ηλεκτρονίων για ημιαγωγούς [8].

2.1.2 Ηλεκτρονικά

Τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο πείραμα περιλάμβαναν έναν προενισχυτή συνδεδεμένο με κάθε έναν ανιχνευτή, ο οποίος δίνει μια μικρή ενίσχυση στο σήμα ώστε να αυξήσει το λόγο σήματος προς θόρυβο και ολοκληρώνει το φορτίο. Στη συνέχεια, ήταν τοποθετημένος ένας ενισχυτής, ο οποίος ενισχύει το σήμα μέχρι το επιθυμητό σημείο. Στον ενισχυτή ρυθμίζονται και κάποιες παράμετροι για τα σήματα, όπως είναι ο χρόνος διαμόρφωσης (shaping time) και η παράμετρος "pole zero", η οποία καθορίζει το σημείο μηδενισμού ενός παλμού. Το σήμα στη συνέχεια μετατρέπεται σε ψηφιακό, μέσω ενός αναλογικοψηφιακού μετατροπέα (analog to digital converter - ADC) και καταχωρείται σε ένα κανάλι ανάλογα με το ύψος του, μέσω του πολυκαναλικού αναλυτή (multi-channel analyzer - MCA).

2.2 Γενικά χαρακτηριστικά επιταχυντή

Η δέσμη δευτερίων παράγεται από μια πηγή (τύπου duoplasmatron), εστιάζεται μέσω φακών και τετραπόλων και στη συνέχεια επιταχύνεται μέσω μιας γεννήτριας Van de Graff. Ακολούθως πραγματοποιείται η επιλογή της επιθυμητής τιμής της ενέργειας μέσω ενός μαγνήτη ανάλυσης. Ο μαγνήτης ανάλυσης λειτουργεί ως φασματογράφος μάζας και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέρος του επιταχυντή καθώς εκεί επιλέγεται η τιμή του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου Gauss και στη συνέχεια ο μαγνήτης κατευθύνει τα ιόντα με συγκεκριμένο λόγο φορτίου προς μάζα (q/m) στην διεύθυνση των 90° . Με

τον τρόπο αυτό κατευθύνεται στον στόχο η δέσμη με την επιθυμητή τιμή της ενέργειας (κεντρική τιμή) αλλά και κάποιες ενεργειακά κοντινές τιμές. Για την καταπολέμηση αυτού του προβλήματος η δέσμη μετά τον μαγνήτη ανάλυσης διασχίζει σχισμές (slits) ώστε να αποκόπτονται όσο είναι εφικτό οι ενεργειακά κοντινές τιμές. Στο παρόν πείραμα οι σχισμές διατηρήθηκαν αρκετά κλειστές ώστε να μην υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην ενέργεια. Εν τέλει, η δέσμη διασχίζει τον μαγνήτη επιλογής, στον οποίο επιλέγεται η εκάστοτε επιθυμητή πειραματική γραμμή και καταλήγει στον κατάλληλα διαμορφωμένο θάλαμο.

Ωστόσο, η τιμή της ενέργειας της δέσμης που καταλήγει στον στόχο διαφέρει από εκείνη που επιλέγεται αρχικά στον επιταχυντή. Αυτό οφείλεται μερικώς στο πεδίο Fringe, το οποίο είναι ένα περιφερειακό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από τον πυρήνα του μαγνήτη ανάλυσης με αποτέλεσμα να επιλέγονται και τιμές ενέργειας διαφορετικές από την επιθυμητή. Για τον περιορισμό του εύρους αυτών των ενεργειών είναι τοποθετημένες οι σχισμές και οι κατευθυντήρες. Για την πολύ καλή γνώση της πραγματικής τιμής της ενέργειας (ενεργειακή βαθμονόμηση μαγνήτη) χρησιμοποιείται συνήθως μια αντίδραση συντονισμού ή μια αντίδραση κατωφλίου ή ακόμα και μέσω μεθόδου χρόνου πτήσης (time of flight - tof). Στην παρούσα περίπτωση, θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο πως πραγματοποιήθηκε η διαδικασία αυτή.

2.3 Πειραματική Διάταξη

Τα δευτέρια για το συγκεκριμένο πείραμα επιταχύνονται σε ενέργειες $E_{d,lab} = 940 - 2000 \text{ keV}$ με βήμα $20 - 30 \text{ keV}$ και αφού διαπερνούν δύο κατευθυντήρες (έναν collimator και έναν antiscatterer) τοποθετημένους $\sim 1 \text{ m}$ πριν την βάση των στόχων καταλήγουν σε έναν κυλινδρικό θάλαμο με ακτίνα $R \sim 40 \text{ cm}$, στον οποίο είναι τοποθετημένη η γωνιομετρική τράπεζα. Το κενό μέσα στον θάλαμο διατηρείται καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος στα $\sim 10^{-6} \text{ mbar}$ μέσω δύο αντλιών, μιας περιστροφικής αντλίας λαδιού (rotary) για την επίτευξη προκενού και μιας στροβιλομοριακής για το υψηλό κενό (turbo). Στη μέση του γωνιομέτρου μέσα στον θάλαμο είναι τοποθετημένη η βάση των στόχων κάθετα στον άξονα της δέσμης.

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα κατασκευάστηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος" και συγκεκριμένα με χρήση θερμικής εξάχνωσης. Αρχικά, μια μικρή ποσότητα σκόνης ισοτοπικά εμπλουτισμένου φθοριούχου λιθίου ${}^6\text{LiF}$ (97% σε ${}^6\text{Li}$) και υψηλής καθαρότητας εξαχνώθηκε πάνω σε ένα λεπτό υμένιο άνθρακα και εν συνεχεία ένα πολύ λεπτό στρώμα χρυσού (Au) εξαχνώθηκε στην επιφάνεια του στόχου για λόγους κανονικοποίησης. Ο εξαχνωτήρας φαίνεται στο Σχήμα 3 ενώ μια σχηματική απεικόνιση του στόχου στο Σχήμα 4.



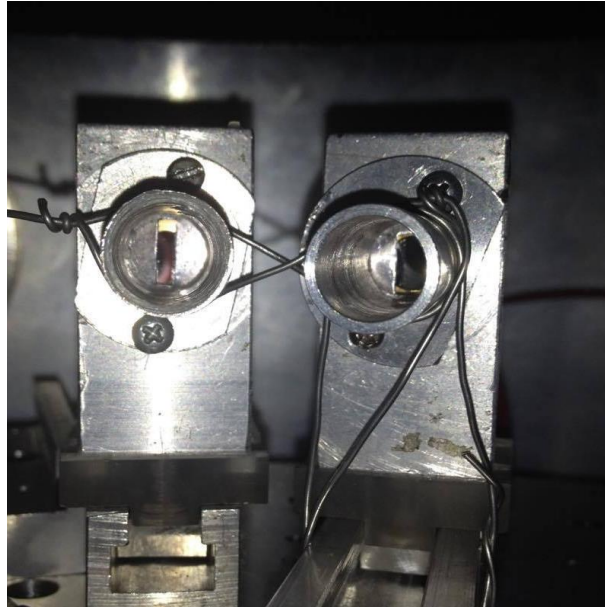
Σχήμα 3 Ο εξαχνωτήρας του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".



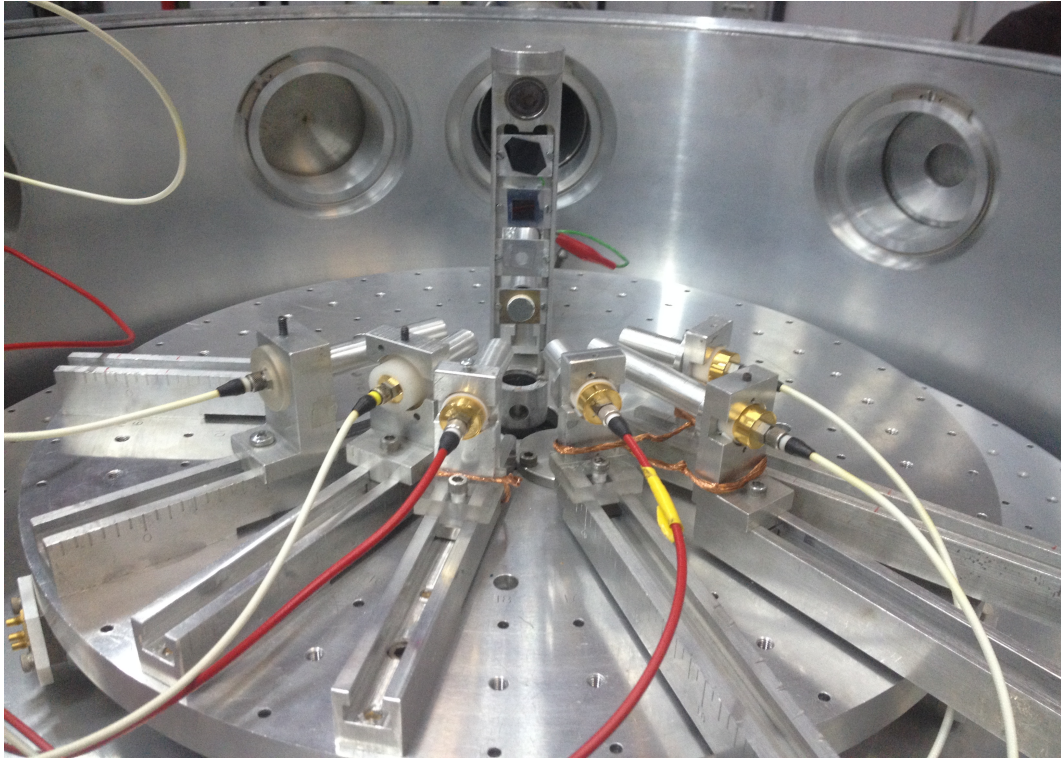
Σχήμα 4 Σχηματική απεικόνιση του στόχου.

Το ανιχνευτικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από πέντε ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (Silicon Surface Barrier - SSB). Το πάχος των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 500μm, οι οποίοι είναι ικανοί να σταματήσουν τα δευτέρια με ενέργειες μέσα στο συγκεκριμένο εύρος που χρησιμοποιήθηκε, και είχαν διακριτική ικανότητα (resolution) 13

keV (τιμή η οποία προσδιορίστηκε μέσω λείου στόχου πυριτίου και δέσμης πρωτονίων σε τρεις διαφορετικές τιμές ενέργειας και σε όλες τις γωνίες). Οι ανιχνευτές αυτοί τοποθετήθηκαν πάνω στην γωνιομετρική τράπεζα, με τη βοήθεια βάσεων, σε γωνίες 125° , 140° , 150° , 160° , 170° και σε απόσταση ~ 10 cm από την βάση του στόχου, ενώ καθένας ήταν συνδεδεμένος με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά. Τα φάσματα και από τους πέντε ανιχνευτές καταγράφονται ταυτόχρονα για κάθε ενέργεια δευτερίων. Ωστόσο η επιφάνεια των ανιχνευτών έχει διάμετρο ~ 1 cm, γεγονός το οποίο αυξάνει την γωνιακή αβεβαιότητα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπροστά από κάθε ανιχνευτή τοποθετήθηκαν ορθογώνιες κάθετες σχισμές (slits- πλάτους $4 \times 8 \text{ mm}^2$) ώστε να ελαχιστοποιείται η γωνιακή αβεβαιότητα ($\sim 1^\circ$) αλλά ταυτόχρονα να είναι στατιστικά επαρκή τα γεγονότα που καταγράφονται σε κάθε ανιχνευτή. Ταυτόχρονα, ελαστικά σκεδαζόμενα σωματίδια από τα τοιχώματα του θαλάμου εισέρχονται στους ανιχνευτές και συνεισφέρουν στο υπόβαθρο των κορυφών του ${}^6\text{Li}$. Για τον περιορισμό αυτού του φαινομένου τοποθετήθηκαν μικροί σωλήνες αλουμινίου, μήκους 2 – 5 cm και διαμέτρου ~ 1 cm μπροστά από κάθε ανιχνευτή. Οι σχισμές και οι μικροί σωλήνες αλουμινίου είναι ορατά στο Σχήμα 5. Η ανάγκη για μικρή αβεβαιότητα στην γωνία, $d\theta$, οδηγεί είτε στην χρήση ανιχνευτή μικρής επιφάνειας είτε στην απομάκρυνση ενός ανιχνευτή μεγάλης επιφάνειας από τον στόχο. Με την απομάκρυνση του ανιχνευτή ωστόσο δημιουργείται το πρόβλημα της έλλειψης επαρκούς στατιστικής σε εύλογο χρονικό διάστημα μέτρησης. Επομένως, δημιουργείται ανάγκη για έναν συμβιβασμό απόστασης που οδηγεί σε αβεβαιότητα μιας με δύο μοίρες. Για τον περιορισμό αυτής της αβεβαιότητας σε μια μοίρα χρησιμοποιήθηκαν οι σχισμές. Ο λόγος που είναι τοποθετημένες κάθετα είναι γιατί η υπό μελέτη αντίδραση - όπως και οι περισσότερες- διατηρεί αναλλοίωτη την γωνία φ . Στο Σχήμα 6 μπορούμε να δούμε το εσωτερικό του θαλάμου και τους ανιχνευτές με τους σωλήνες αλουμινίου και την βάση των στόχων.



Σχήμα 5 Οριζόντιες σχισμές και μικροί σωλήνες αλουμινίου των δύο εκ των πέντε ανιχνευτών. Στον αριστερό βλέπουμε την οριζόντια σχισμή ενώ στον δεξιό βλέπουμε τον σωλήνα αλουμινίου.



Σχήμα 6 Εσωτερικό θαλάμου. Στο κέντρο βρίσκεται η βάση των στόχων, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της δέσμης και πλαισιώνεται από τους ανιχνευτές προσαρμοσμένους πάνω στην γωνιομετρική τράπεζα υψηλής ακριβείας στις επιθυμητές γωνίες. Επίσης, ορατοί γίνονται και οι σωληνίτες αλουμινίου μπροστά από τον κάθε ανιχνευτή.

Για τον προσδιορισμό των τιμών της ενεργού διατομής είναι απαραίτητη η γνώση του πάχους του στόχου αλλά και του ποσοστού εμπλουτισμού. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν και κάποιες ενέργειες πρωτονίων (συγκεκριμένα 1600, 1700 keV). Επιπλέον, η τιμή του εμπλουτισμού είχε δοθεί από την εταιρία που προήλθε η εμπλουτισμένη σκόνη αλλά επιλέχθηκε να επιβεβαιωθεί πειραματικά. Το πρόγραμμα SPECTRW [9] χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεση του υποβάθρου και την ολοκλήρωση των κορυφών στα φάσματα ενώ το πρόγραμμα SIMNRA v. 6.94, σε πειραματική έκδοση [10] χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση συγκεκριμένων φασμάτων EBS τα οποία αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσης μελέτης. Τα φαινόμενα της πολλαπλής σκέδασης, το ενεργειακό άνοιγμα της δέσμης ripple, τα δεδομένα Ziegler, Biersack και Littmark (ZBL) [11] για την ισχύς ανάσχεσης, και το μοντέλο των Chu και Yang για τον διασκεδασμό (straggling) [12],[13] χρη-

σιμοποιήθηκαν όπως συμπεριλαμβάνονται στον κώδικα. Επιπρόσθετα, για τον προσδιορισμό του λόγου παχών ${}^6\text{Li}:\text{Au}$ χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μοντέλα για την ισχύς ανάσχεσης, όπως των Andersen και Ziegler ή το ZBL με κάποιες διορθώσεις, και οι διαφορές ήταν χαμηλότερες από 1%. Ωστόσο, όπως γίνεται φανερό στην ιστοσελίδα για τον υπολογισμό της εμβέλειας ιόντων στην ύλη (The Stopping and Range of Ions in Matter - SRIM), η μέση απόκλιση ανάμεσα στα μοντέλα του SRIM και στα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα για την ισχύς ανάσχεσης στο λίθιο είναι 2.7% ενώ για το φθόριο δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες (όπως φαίνεται στην ιστοσελίδα του SRIM, <https://www.srim.org>) [11].

3 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε από την συλλογή των πειραματικών δεδομένων μέχρι την εξαγωγή των τελικών τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών.

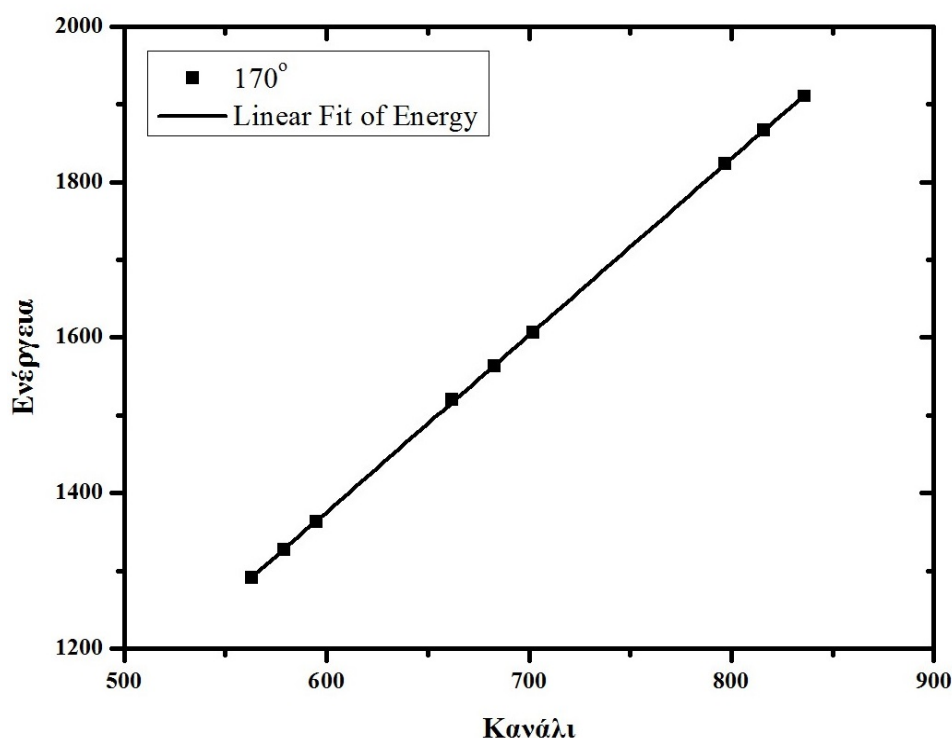
3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση

Για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής μια καίρια παράμετρος που είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί με ακρίβεια είναι η ενέργεια της δέσμης, δηλαδή η ενέργεια που είχαν τα δευτέρια που προσέκρουσαν στον στόχο σε κάθε μέτρηση. Η ενέργεια αυτή διαφέρει κατά μερικά keV, συνήθως, από την τιμή της ενέργειας που δίνεται από τον χειριστή του επιταχυντή. Επομένως, το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό της πραγματικής ενέργειας που είχαμε στον στόχο.

Ο συνήθης τρόπος που πραγματοποιείται η επίλυση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση λεπτών συντονισμών ακτίνων - γάμμα. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ακτινοβολήθηκαν δυο ακόμα στόχοι με δέσμη πρωτονίων, ένας λείος στόχος από πυρίτιο (^{28}Si) και ένας λείος στόχος από άνθρακα (^{12}C), και χρησιμοποιήθηκαν οι συντονισμοί των ελαστικών σκεδάσεων των πρωτονίων των δυο αυτών ισotόπων $^{28}\text{Si}(p, p_0)$ και $^{12}\text{C}(p, p_0)$ σε ενέργειες 1.737 MeV ($\Gamma=47$ keV) και 2.08 MeV ($\Gamma=15.6$ keV) αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά εννέα ενέργειες πρωτονίων (με στόχο Si: 1750, 1800, 1850, 2100, 2150, 2200 keV και με στόχο C: 1800, 1850, 1900 keV) λίγο υψηλότερες από τους δυο αυτούς συντονισμούς έτσι ώστε να εμπεριέχεται όλος ο συντονισμός στο φάσμα καθώς η δέσμη χάνει ενέργεια ταξιδεύοντας μέσα στον στόχο. Επομένως, από την κινηματική της σκέδασης γνωρίζουμε την ενέργεια που θα έχει το πρωτόνιο όταν θα σκεδαστεί από επιφανειακό πυρίτιο και άνθρακα σε μια συγκεκριμένη γωνία και από τα φάσματα είναι διακριτό το κανάλι που αντιστοιχεί σε αυτήν την ενέργεια. Να σημειωθεί εδώ ότι το κανάλι αυτό είναι η μέση της ανόδου καθώς η άνοδος έχει μια μικρή κλίση που αποτελεί τη συμβολή της κάθετης ευθείας που θα είχαμε σε ιδανικές συνθήκες και της διακριτικής ικανότητας (resolution) του ανιχνευτή. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις εννέα τιμές της ενέργειας δέσμης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η γραφική παράσταση καναλιών και ενέργειας που περιείχε εννέα σημεία και προσαρμόστηκε (fit) με ευθεία. Προσδιορίστηκε η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στον λόγο ενέργειας προς κανάλι (δηλαδή το keV/channel) και ο σταθερός όρος β (δηλαδή το offset) της προσαρμογής, δηλαδή οι παράμετροι της βαθμονόμησης και εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης SIMNRA. Μέσω αυτού πραγ-

ματοποιήθηκε η σύγκριση του πειραματικού με το προσομοιωμένο φάσμα και διαπιστώθηκε η ίδια μορφή αλλά μετατόπιση προς την μια κατεύθυνση. Οπότε μεταβάλλοντας την ενέργεια της δέσμης και συγκρίνοντας κάθε φορά το πειραματικό με το φάσμα μέσω προσομοίωσης διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη συμφωνία πραγματοποιήθηκε για ενέργεια δέσμης αυξημένη κατά 3 keV για όλες τις τιμές. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η βέλτιστη τιμή της μεταβολής της ενέργειας αποκτήθηκε με χρήση όλων των φασμάτων δηλαδή όλων των ενεργειών πρωτονίων που ήταν διαθέσιμα. Για τις συγκρίσεις αυτές χρειάστηκε η επανάληψη των υπολογισμών για την κινηματική καθώς μεταβάλλεται η ενέργεια δέσμης. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η προσαρμογή (fit) με την ενέργεια της δέσμης αυξημένη κατά 3 keV και στον πίνακα βλέπουμε το $k^2 = 0.99995$. Επομένως, με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η βαθμονόμηση του κάθε ADC που συνδέεται με κάθε έναν ανιχνευτή. Με τον τρόπο αυτό βρέθηκαν απευθείας οι ενέργειες δέσμης και η βαθμονόμηση του κάθε ADC.

Εξίσωση	y=a+b*x		
k^2	0.99995		
		Τιμή	Τυπικό σφάλμα
	Σταθερός όρος	11.5300	3.98506
	Κλίση	2.27322	0.0057



Σχήμα 7 Πίνακας για την προσαρμογή και γραφική παράσταση ενεργειακής βαθμονόμησης του ADC που συνδέεται με τον ανιχνευτή των 170°.

3.2 Προσδιορισμός τιμών διαφορικής ενεργού διατομής

3.2.1 Σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών

Ο προσδιορισμός των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών μέσω απόλυτης μέτρησης δίνεται, εν γένει, από την Σχέση (1):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{E,\theta} = \frac{Y}{\epsilon * Q * \Omega * N} \quad (1)$$

όπου

- Y είναι ο αριθμός των γεγονότων στην κορυφή του υπό μελέτη ισότοπου/στοιχείου στο φάσμα,
- ϵ η απόδοση του ανιχνευτή, η οποία στην περίπτωση των ανιχνευτών πυριτίου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι μονάδα,

- Q είναι το φορτίο το οποίο προσπίπτει στον στόχο σε κάθε μέτρηση
- Ω είναι η στερεά γωνία του κάθε ανιχνευτή, και
- N εκφράζει το πάχος του στόχου σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας atoms/cm^2

Ωστόσο, για την αποφυγή του σφάλματος που προκύπτει από τον προσδιορισμό του γινομένου του φορτίου στο στόχο με την στερεά γωνία, στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε η σχετική μέθοδος προσδιορισμού των τιμών των ενεργών διατομών [14]. Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο οι ελαστικές διαφορικές ενεργές διατομές του λιθίου-6 προσδιορίζονται ως προς τις ελαστικές διαφορικές ενεργές διατομές του χρυσού, οι οποίες ακολουθούν την εξίσωση του Rutherford και επομένως προσδιορίζονται αναλυτικά και χωρίς σφάλμα (βλέπε ενότητα 3.1.2). Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η μέθοδος για τον προσδιορισμό του φορτίου σε μια απόλυτη μέτρηση περιλαμβάνει την μέτρηση του φορτίου στο στόχο και την άθροιση της με το φορτίο που συλλέγεται στο Faraday cup, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο πίσω από τον στόχο. Η άθροιση αυτή εξασφαλίζει την συλλογή του συνολικού φορτίου που προσπίπτει στο στόχο. Ωστόσο, ο ακριβής προσδιορισμός του, σε συνδυασμό με την στερεά γωνία εισάγει ένα σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματά μας και για αυτόν τον λόγο δεν επιλέγεται στην παρούσα μελέτη. Η σχετική μέθοδος προσδιορισμού των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών βασίζεται στις εξής δυο σχέσεις:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{E,\theta}^{6Li} = \frac{Y_{6Li}}{\epsilon * Q * \Omega * N_{6Li}} \quad (2)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{E,\theta}^{Au} = \frac{Y_{Au}}{\epsilon * Q * \Omega * N_{Au}} \quad (3)$$

και στην διαίρεσή τους κατά μέλη, που παράγει την τελική αξιοποιήσιμη σχέση:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{E,\theta}^{6Li} = \left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{E,\theta}^{Au} * \left(\frac{Y_{6Li}}{Y_{Au}}\right) * \left(\frac{N_{Au}}{N_{6Li}}\right) \quad (4)$$

Οπότε, ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών έγκειται στον προσδιορισμό αυτών των τριών λόγων.

3.2.2 Υπολογισμός ενεργού διατομής χρυσού κατά Rutherford

Ο υπολογισμός του όρου $\left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{E,\theta}^{Au}$ γίνεται αναλυτικά μέσω της σχέσης του Rutherford, η οποία στο σύστημα του εργαστηρίου είναι:

$$\left(\frac{d\sigma_R}{d\omega}\right)_{E,\theta} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right) * \left(\frac{2[(M_2^2 - M_1^2 \sin^2\theta)^{1/2} + M_2 \cos\theta]^2}{M_2 \sin^4\theta (M_2^2 - M_1^2 \sin^2\theta)^{1/2}}\right) \quad (5)$$

όπου το σωματίδιο M_1 με ενέργεια E σκεδάζεται από έναν πυρήνα Z_2 υπό γωνία θ . Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μας για τον προσδιορισμό των τιμών ενεργού διατομής του χρυσού για κάθε συνδυασμό ενέργειας και γωνίας λόγω του μεγάλου ατομικού αριθμού του χρυσού και της χαμηλής ενέργειας των δευτερίων. Ωστόσο, θα πρέπει να εισάγουμε έναν διορθωτικό παράγοντα στην σχέση αυτή λόγω του φαινομένου θωράκισης φορτίου (screening) από τα ατομικά ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο θωράκισης φορτίου συμβαίνει για κάθε συνδυασμό δέσμης - στόχου αλλά για ελαφρείς πυρήνες είναι αμελητέο. Αντίθετα, στους βαρείς πυρήνες η K - στοιβάδα ηλεκτρονίων βρίσκεται πιο κοντά στον πυρήνα και μειώνεται το ενεργό φορτίο (effective charge) σε σχέση με το πραγματικό. Επομένως, ο διορθωτικός παράγοντας [15] που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση του χρυσού (ο οποίος είναι βαρύν πυρήνας) είναι ο παράγοντας $L'Ecuyer$ και δίνεται από την σχέση:

$$F_{L'Ecuyer} = 1 - \frac{0.4873 * Z_1 * Z_2^{4/3}}{E_{cm}}$$

Επομένως, οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών του χρυσού για κάθε τιμή ενέργειας δέσμης και γωνίας που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από την σχέση:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\omega}\right)_{Au} = F_{L'Ecuyer} * \left(\frac{d\sigma_{Ruth}}{d\omega}\right)_{Au} \quad (6)$$

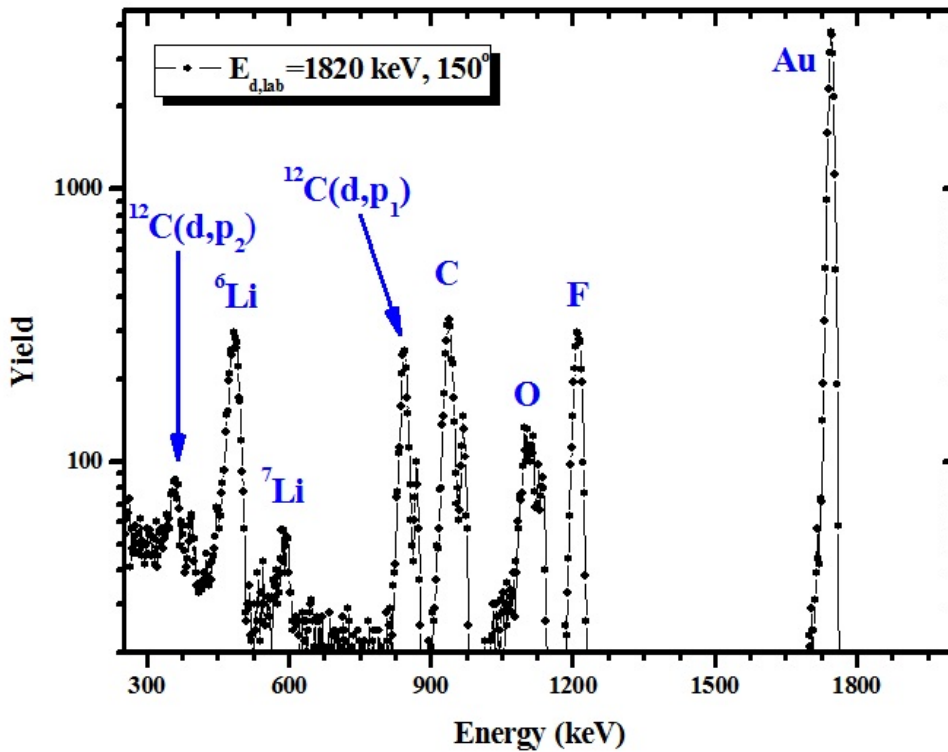
Οι τιμές αυτές, επειδή προκύπτουν από αναλυτική σχέση, δεν έχουν σφάλμα.

3.2.3 Εμβαδομέτρηση κορυφών

Η εύρεση των γεγονότων στις κορυφές του λιθίου και του χρυσού έγκειται στην ολοκλήρωση των αντίστοιχων κορυφών στο φάσμα. Προκειμένου να γίνει αυτό είναι αρχικά απαραίτητο να ταυτοποιήσουμε κάθε κορυφή του φάσματος με το υλικό του στόχου από το οποίο προέρχεται και εν συνεχεία να ολοκληρώσουμε τις αντίστοιχες κορυφές, αφού αφαιρέσουμε το υπόβαθρο (background), χρησιμοποιώντας κάποιο πρόγραμμα ολοκλήρωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SPECTRW.

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε δεν αποτελείται μόνο από λίθιο και χρυσό αλλά και από άνθρακα, φθόριο και οξυγόνο. Συνεπώς στο φάσμα είναι ορατές πέντε τουλάχιστον κορυφές από ελαστική σκέδαση και όσες κορυφές προέρχονται από κάποια αντίδραση και έχουν κατάλληλη ενέργεια ώστε να

συμπεριλαμβάνονται στο φάσμα. Το οξυγόνο δεν ήταν στα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του στόχου αλλά εισέρχεται στον στόχο κατά την διαδικασία της εξάχνωσης. Τα σωματίδια που εισέρχονται στους ανιχνευτές έχουν διαφορετική ενέργεια ανάλογα με τον πυρήνα από τον οποίο έχουν σκεδαστεί. Η ενέργεια αυτή προκύπτει από την κινηματική κάθε αντίδρασης (διατήρηση ενέργειας και ορμής) και βάσει αυτής της ενέργειας αναγνωρίζεται κάθε κορυφή στο φάσμα. Για τον προσδιορισμό της ενέργειας αυτής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα catkin [16]. Με αυτόν τον τρόπο αλλά και με μια πρώτη βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε με μια πηγή σωματιδίων - α ήταν εφικτή η αντιστοίχιση των καναλιών του φάσματος σε ενέργειες και η αναγνώριση των κορυφών. Η βαθμονόμηση με πηγή σωματιδίων - α περιλαμβάνει την τοποθέτηση μιας πηγής σωματιδίων - α στο κέντρο του γωνιομέτρου και την καταγραφή σήματος από τους ανιχνευτές. Επομένως, αφού η ενέργεια των εκπεμπόμενων από την πηγή και καταγραφόμενων από τους ανιχνευτές σωματιδίων είναι γνωστή και το αντίστοιχο κανάλι είναι ορατό στο φάσμα πραγματοποιήθηκε μια πρώτη αντιστοίχιση καναλιών με ενέργειες, δηλαδή μια πρώτη βαθμονόμηση των αναλογικοποιητικών μετατροπών (ADC). Ανάμεσα στις δύο υπό μελέτη κορυφές βρίσκονται οι ελαστικές σκεδάσεις από το φθόριο, το οξυγόνο και τον άνθρακα αντίστοιχα, από δεξιά προς τα αριστερά. Επομένως, στο Σχήμα 8 βλέπουμε ένα τυπικό φάσμα δευτερίων ενέργειας $E_d=1820$ keV και γωνία σκέδασης $\theta=150^\circ$ μαζί με την αναγνώριση κορυφών, όπως προέκυψε από την προαναφερθείσα διαδικασία. Όλα τα φάσματα που ελήφθησαν έχουν τις ίδιες σχετικές θέσεις κορυφών που βλέπουμε στο Σχήμα 8. Οι τιμές που προέκυψαν από τις ολοκληρώσεις των κορυφών είχαν σχετικό σφάλμα $\sim 1\%$.



Σχήμα 8 Τυπικό φάσμα δευτερίων ενέργειας $E_d=1820$ keV και γωνία σκέδασης $\theta=150^\circ$ μαζί με την αντίστοιχη αναγνώριση κορυφών.

3.2.4 Υπολογισμός λόγου παχών - Ανάλυση των στόχων

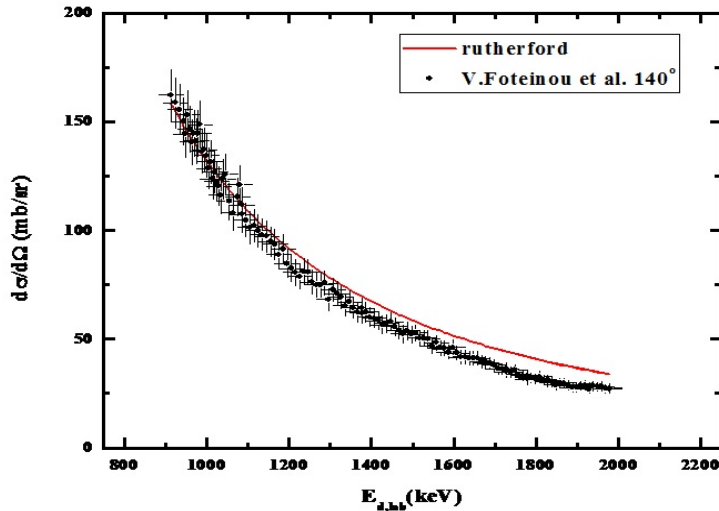
Όπως είδαμε στην ενότητα 3.2.1, για τον υπολογισμό των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών του λιθίου 6 είναι απαραίτητη η γνώση του λόγου των παχών του χρυσού προς το λίθιο 6 ($N_{Au} : N_{6Li}$). Ωστόσο είναι απαραίτητη και η γνώση του εμπλουτισμού του στόχου σε λίθιο 6 γιατί ο παρανομαστής του λόγου αναφέρεται στο συγκεκριμένο ισότοπο και όχι στο πάχος του στοιχείου λιθίου. Επομένως, ο άγνωστος λόγος πλέον παίρνει την μορφή : $\frac{N_{Au}}{N_{6Li}} = \frac{N_{Au}}{N_{Li} \cdot f_{enrich}}$, όπου f_{enrich} ονομάσαμε τον παράγοντα εμπλουτισμού του στόχου, ο οποίος είναι άγνωστος. Άρα πλέον το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό του λόγου $N_{Au} : N_{Li}$ και του παράγοντα εμπλουτισμού f_{enrich} .

Για την εύρεση του λόγου $N_{Au} : N_{Li}$ χρησιμοποιήσαμε την παραδοχή ότι το φθοριούχο λίθιο διατηρεί την στοιχειομετρία του και επομένως ο λόγος πάχους χρυσού προς λίθιο είναι ίσος με τον λόγο πάχους χρυσού προς φθόριο, δηλαδή ισχύει η ισότητα : $N_{Au}/N_{Li} = N_{Au}/N_F$. Επομένως πλέον είναι

απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση του στόχου, διαδικασία η οποία βασίζεται στη χρήση του προγράμματος SIMNRA και των πειραματικών φασμάτων.

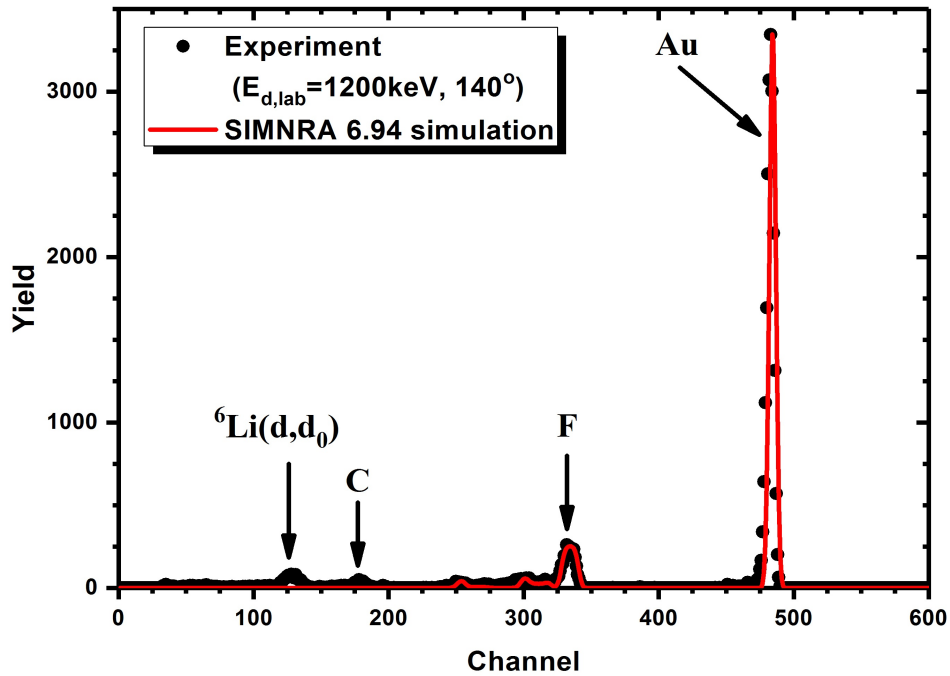
Προσομοιώθηκε ο στόχος στο πρόγραμμα SIMNRA ξεκινώντας από το στρώμα του χρυσού, το οποίο είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε η δέσμη να χάνει μόλις 1-2 keV όταν διασχίζει το στρώμα αυτό, και στη συνέχεια τα στρώματα του φθοριούχου λιθίου και του χρυσού. Για την εμφάνιση του φάσματος το πρόγραμμα SIMNRA απαιτεί, εκτός από τον στόχο, και την εισαγωγή παραμέτρων όπως είναι το είδος και η ενέργεια της δέσμης, η γωνία σκέδασης, το φορτίο που προσπίπτει στον στόχο, η βαθμονόμηση (keV/channel και offset), η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή (detector resolution) και η επιλογή γνωστών τιμών διαφορικών ενεργών διατομών από την βιβλιογραφία για όλες τις σκεδάσεις και αντιδράσεις που εμφανίζονται στα πειραματικά φάσματα, εκτός προφανώς από την ελαστική σκέδαση του λιθίου 6 που είναι και η υπό μελέτη αντίδραση.

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης από τον χρυσό που επιλέχθηκαν ακολουθούν την εξίσωση Rutherford, όπως αιτιολογείται στην ενότητα 3.2.2. Επιπρόσθετα, οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης του άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολύ καλά μετρημένες και αξιολογημένες (evaluated) από το SigmaCalc [5], ενώ οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{12}\text{C}(d,p_1)$ που χρησιμοποιήθηκαν είναι γνωστές στην βιβλιογραφία και στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των M. Kokkoris et al. [17]. Τέλος, οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής για το φθόριο που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθούν επίσης την εξίσωση του Rutherford για συγκεκριμένες τιμές της ενέργειας και ανάλογα με την γωνία όπως αναφέρεται στην δημοσίευση των Foteinou et al. [18] και βλέπουμε στο Σχήμα 9 για την περίπτωση των 140° .



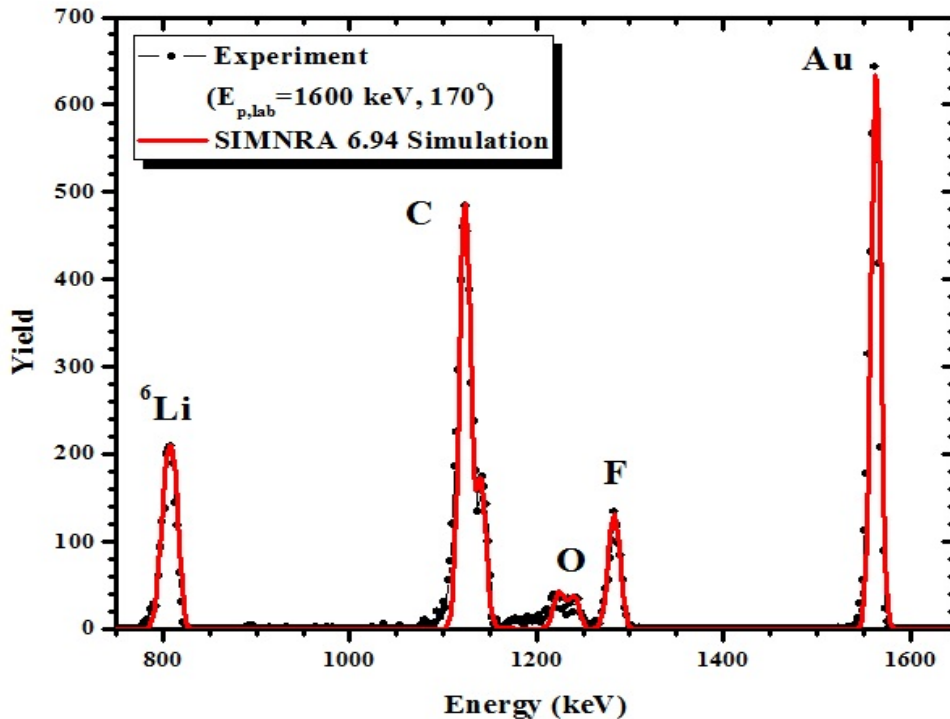
Σχήμα 9 Διαφορική ενεργός διατομή για γωνία σκέδασης $\theta=140^\circ$ μαζί με τις τιμές διαφορικής ενεργού διατομής κατά Rutherford για την ίδια γωνία σκέδασης. Παρατηρούμε ότι μέχρι τα 1200 keV οι ενεργές διατομές ακολουθούν την εξίσωση του Rutherford με απόκλιση κάτω από 2%.

Επομένως πλέον, οι μόνοι άγνωστοι παράμετροι ήταν ο ζητούμενος λόγος των παχών χρυσού προς φθόριο και το φορτίο που προσπίπτει στον στόχο. Για την εύρεση του λόγου διατηρήθηκε σταθερή η ποσότητα του χρυσού στον στόχο και μεταβαλλόταν κάθε φορά η ποσότητα του φθορίου και το φορτίο μέχρι το προσομοιωμένο φάσμα να βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με το πειραματικό. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για τις πέντε γωνίες και για τέσσερις ενέργειες σε κάθε γωνία και η τελική τιμή αντιστοιχεί στον μέσο όρο αυτών των είκοσι τιμών και ισούται με : $\frac{N_{Au}}{N_{Li}} = \frac{N_{Au}}{N_F} = (0.09067 \pm 0.00370)$, δηλαδή το σχετικό σφάλμα είναι $\sim 4\%$. Στο Σχήμα 10 μπορούμε να δούμε την συμφωνία ενός πειραματικού φάσματος δευτερίων ενέργειας $E_d=1200$ keV και σε γωνία σκέδασης $\theta=140^\circ$ με το αντίστοιχο προσομοιωμένο. Να σημειωθεί εδώ ότι η σημασία του φάσματος αυτού είναι η συμφωνία στις κορυφές του φθορίου και του χρυσού για τον προσδιορισμό του λόγου των παχών τους.



Σχήμα 10 Πειραματικό και προσομοιωμένο φάσμα, με χρήση του προγράμματος SIMNRA, με δέσμη δευτερίων ενέργειας $E_d = 1200 \text{ keV}$ και στις 140° , μαζί με την αναγνώριση κορυφών.

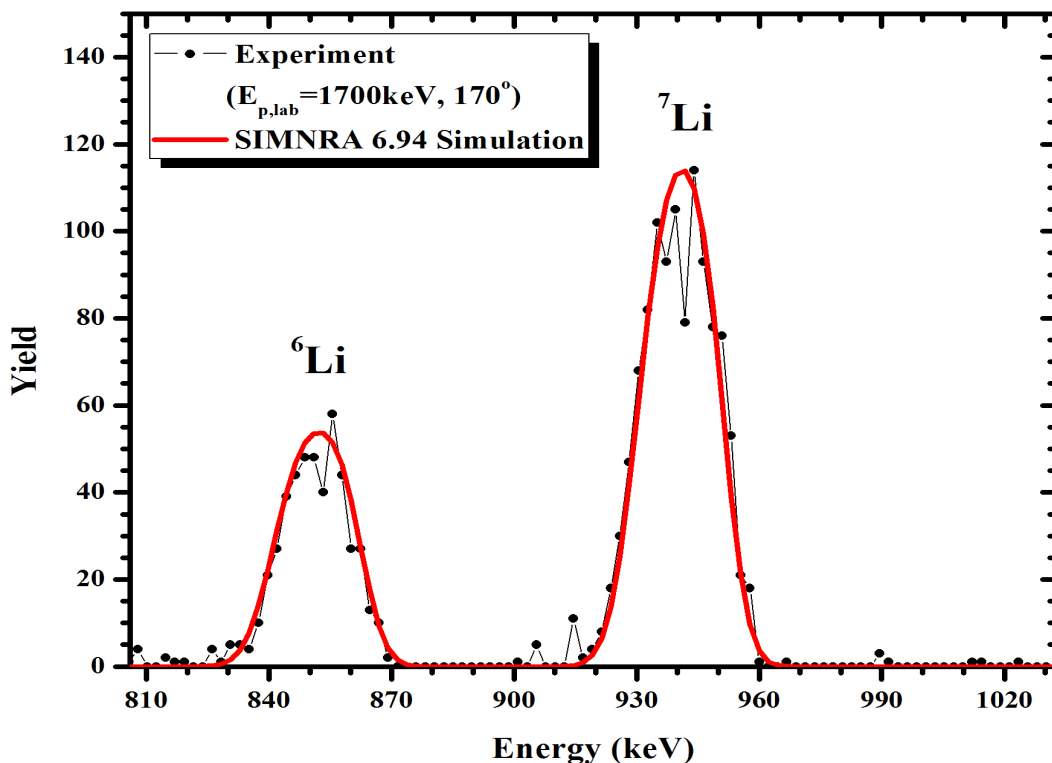
Επιπρόσθετα, ο λόγος παχών προσδιορίστηκε και από την προσομοίωση των φασμάτων με την δέσμη πρωτονίων, ως ένας εναλλακτικός τρόπος προκειμένου να ελεγχθεί η τιμή που αποκτήθηκε μέσω των δευτερίων. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 11, για ενέργεια πρωτονίων $E_p = 1600 \text{ keV}$ και γωνία σκέδασης $\theta = 170^\circ$, η προσομοίωση είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το πειραματικό φάσμα.



Σχήμα 11 Πειραματικό και προσομοιωμένο φάσμα, με χρήση του προγράμματος SIMNRA, με δέσμη πρωτονίων ενέργειας $E_d = 1600$ keV και στις 170° , μαζί με την αναγνώριση κορυφών, με χρήση των δεδομένων των Fasoli et al. για την ελαστική σκέδαση των πρωτονίων από το λίθιο 6.

Ωστόσο, η τιμή για τον λόγο των παχών $N_{Au} : N_{Li}$ που αποκτήθηκε με τον τρόπο αυτό διέφερε από αυτήν που αποκτήθηκε με τα πρωτόνια περισσότερο από 10%. Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων από λίθιο 6 που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από την βιβλιογραφία και συγκεκριμένα των Fasoli et al. [19] για γωνία σκέδασης $\theta = 166.4^\circ$. Να σημειωθεί εδώ ότι η μικρή αυτή διαφορά στην γωνία των 170° που μετρούσαμε εμείς και στις 166.4° που είναι μετρημένες οι τιμές της βιβλιογραφίας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα καθώς ελέγχοντας για διάφορες γωνίες την συγκεκριμένη σκέδαση μπορεί κάποιος να διαπιστώσει ότι δεν υπάρχει ισχυρή γωνιακή κατανομή στην συγκεκριμένη σκέδαση και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα δεδομένα όσον αφορά την γωνία σκέδασης. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των Fasoli et al. για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων από λίθιο 6 αλλά και λίθιο 7 [20] σε έναν λεπτό στόχο φυσικού λιθίου (^{nat}LiF), ο οποίος κατασκευάστηκε με τον ίδιο τρόπο με τον

εμπλουτισμένο στόχο (${}^6\text{LiF}$), διαπιστώνουμε υπερεκτίμηση στο ολοκλήρωμα του λιθίου 6 κατά 11%, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. Δεν είναι ξεκάθαρο αν το πρόβλημα οφείλεται στα δεδομένα για το λίθιο 6 ή το λίθιο 7 αλλά η κατάσταση αυτή συναντάται συνήθως σε μη αξιολογημένα και ελεγμένα (non-evaluated και not benchmarked) πειραματικά δεδομένα ενεργού διατομής για ελαστική σκέδαση. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δεδομένα που υπάρχουν στην βάση δεδομένων IBANDL και για τα δύο ισότοπα και η κατάσταση ήταν ακόμα χειρότερη. Δυστυχώς, ακόμα και αυτή η σχετικά μικρή συστηματική διαφορά της τάξης του $\sim 11\%$ δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και επομένως η μέτρηση με τα δευτέρια που βασίζεται στην ενεργό διατομή Rutherford του φθορίου καθίσταται πιο αξιόπιστη. Επομένως, αυτή ήταν η τιμή του λόγου $N_{Au} : N_{Li}$ που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων των τιμών της ενεργού διατομής.



Σχήμα 12 Πειραματικό και προσομοιωμένο φάσμα, με χρήση του προγράμματος SIMNRA, με δέσμη πρωτονίων ενέργειας $E_p = 1700$ keV και στις 170° από έναν λεπτό στόχο ${}^{nat}\text{LiF}$, μαζί με την αναγνώριση κορυφών, με χρήση των δεδομένων των Fasoli et al. για την ελαστική σκέδαση των πρωτονίων από

το ${}^6\text{Li}$ [19] και το ${}^7\text{Li}$ [20]. Διαφορά τάξης μεγαλιότερης του $\sim 10\%$ είναι φανερή.

3.2.5 Υπολογισμός παράγοντα εμπλουτισμού f_{enrich}

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα εμπλουτισμού, f_{enrich} , ο οποίος, όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα, αποτελεί απαραίτητη παράμετρο για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα με δέσμη πρωτονίων σε ενέργειες $E_p = 1600$ keV και $E_p = 1700$ keV και για πέντε γωνίες σκέδασης (125° , 140° , 150° , 160° , 170°). Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα φάσματα του εμπλουτισμένου και του φυσικού στόχου προσδιορίστηκε ο λόγος των γεγονότων του φθορίου στους δύο στόχους και ο λόγος των γεγονότων του λιθίου 6 στους δύο στόχους. Κανονικοποιήθηκαν αυτοί οι λόγοι ως προς το φορτίο (καθώς ήταν διαφορετικές μετρήσεις άρα διαφορετικό φορτίο συλλέχθηκε σε κάθε στόχο) και ως προς το πάχος του στόχου (καθώς οι δύο στόχοι είχαν διαφορετικό πάχος). Στην συνέχεια, εφόσον είναι γνωστά τα γεγονότα του λιθίου 6 στον φυσικό στόχο (απλή ολοκλήρωση), είναι γνωστή η συγκέντρωση του λιθίου 6 στο φυσικό λίθιο (7.5%) και βρέθηκαν και τα γεγονότα του λιθίου 6 στον εμπλουτισμένο στόχο, κανονικοποιημένα στο πάχος του στόχου και στο φορτίο, μέσω απλής μεθόδου των τριών καταλήξαμε στην τιμή του εμπλουτισμού να είναι 97% με στατιστικό σφάλμα 2%. Η τιμή αυτή αποτελεί τον μέσο όρο εννέα τιμών καθώς η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για τις πέντε γωνίες και για δύο τιμές ενέργειας σε κάθε γωνία (εκτός από τις 125°). Βρίσκεται σε τέλεια συμφωνία με αυτήν που δόθηκε από τους κατασκευαστές και επομένως υιοθετήθηκε για τον προσδιορισμό των τελικών τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης του λιθίου 6.

Επομένως, όλοι οι όροι στην σχέση (4) είναι πλέον γνωστοί και με απλή αντικατάσταση πραγματοποιείται ο υπολογισμός των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής για την ελαστική σκέδαση δευτερίων από λίθιο 6 για κάθε ενέργεια δέσμης και γωνία σκέδασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρακάτω ενότητα.

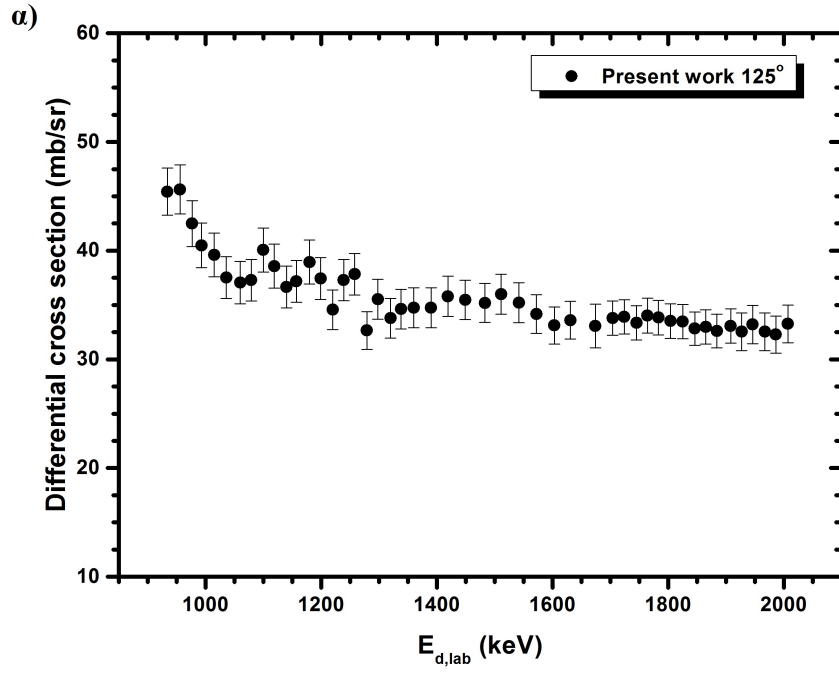
4 Αποτελέσματα - Σχολιασμός

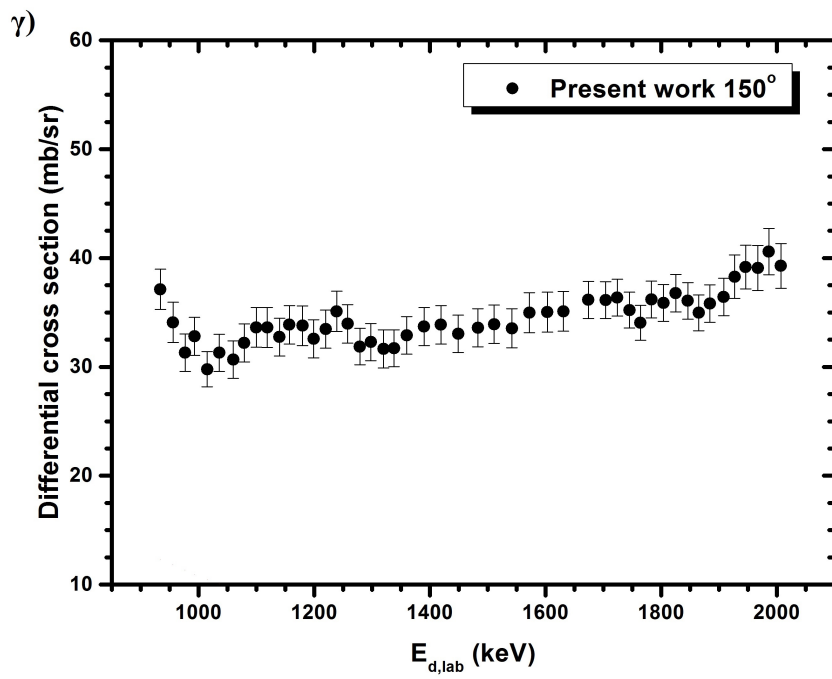
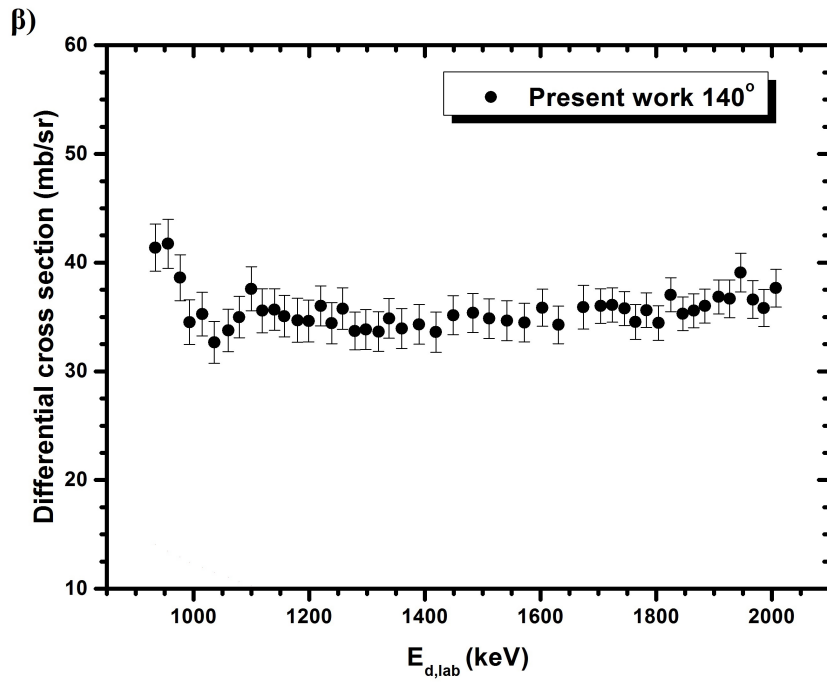
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από λίθιο 6 που προσδιορίστηκαν με τον τρόπο που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Η σκέδαση μελετήθηκε στο ενεργειακό εύρος 940 - 2000 keV με βήμα 20 - 30 keV, για γωνίες σκέδασης 125°, 140°, 150°, 160°, 170°. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και παριστάνονται γραφικά στα γραφήματα στο Σχήμα 13α-ε. Η αβεβαιότητα στην ενέργεια της δέσμης ισούται με 3 keV, το οποίο προκύπτει από το ripple της μηχανής. Ωστόσο, η αβεβαιότητα αυτή δεν είναι ορατή στον οριζόντιο άξονα των γραφημάτων λόγω της επιλεγόμενης κλίμακας. Το στατιστικό σφάλμα των τιμών της ενεργού διατομής το οποίο αναγράφεται στον Πίνακα 1 και αναπαριστάται στα γραφήματα προκύπτει από τον τύπο διάδοσης σφαλμάτων και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά το 5.5%. Η τιμή αυτή οφείλεται κυρίως στην αβεβαιότητα που προέκυψε από τον προσδιορισμό του λόγου παχών. Το συστηματικό σφάλμα, το οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται στις αναγραφόμενες τιμές λόγω σύμβασης, προκύπτει από την προσέγγιση που υιοθετήθηκε για τον προσδιορισμό του λόγου παχών και είναι της τάξης του 10%. Να σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές της ενέργειας (που αναγράφονται στον Πίνακα 1) αναφέρονται στη μέση του πάχους του στόχου και υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τον κώδικα SIMNRA.

Τα τελικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την πιθανή επίδραση αλληλοεπικαλυπτόμενων συντονισμών που αντιστοιχούν στις ενεργειακές καταστάσεις του σύνθετου πυρήνα ^8Be οι οποίες ανήκουν στην περιοχή διέγερσης. Στην περιοχή χαμηλών ενεργειών (930 - 980 keV) και για γωνίες σκέδασης 125°, 140°, 150°, 160° παρατηρείται η ουρά ενός συντονισμού. Η δομή αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα ^8Be με ενέργεια $E_x^* = 22.240$ keV και εύρος $\Gamma = 800$ keV η οποία δεν ανήκει στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία αλλά επηρεάζει τις τιμές της ενεργού διατομής λόγω του μεγάλου εύρους της. Η συνολική συμπεριφορά των τιμών της ενεργού διατομής μπορεί να αποδοθεί στις ευρέως επικαλυπτόμενες ενεργειακές καταστάσεις του πυρήνα ^8Be με ενέργειες $E_x^* = 22.240$ keV $E_x^* = 22.980$ keV $E_x^* = 24.000$ keV και εύρη $\Gamma = 800$ keV, 230 keV, 7000 keV, αντίστοιχα, οι οποίες δεν ανήκουν στο ενεργειακό εύρος που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η ύπαρξη ευρέως επικαλυπτόμενων ενεργειακών καταστάσεων θα μπορούσε να εξηγήσει την σχετικά μικρή διακύμανση των τιμών των ενεργών διατομών στο σχετικά μεγάλο εύρος ενεργειών (>1MeV) που καλύφθηκε στην παρούσα μελέτη. Παρόλα ταύτα, πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση όλων των υπολοίπων πιθανών μηχανισμών αντίδρασης, διότι ο άμεσος μηχανισμός ενδέχεται να έχει σημαντική συνεισφορά στις αντιδράσεις δευτερίων, έστω και σε πολύ χαμηλές ενέργειες δέσμης.

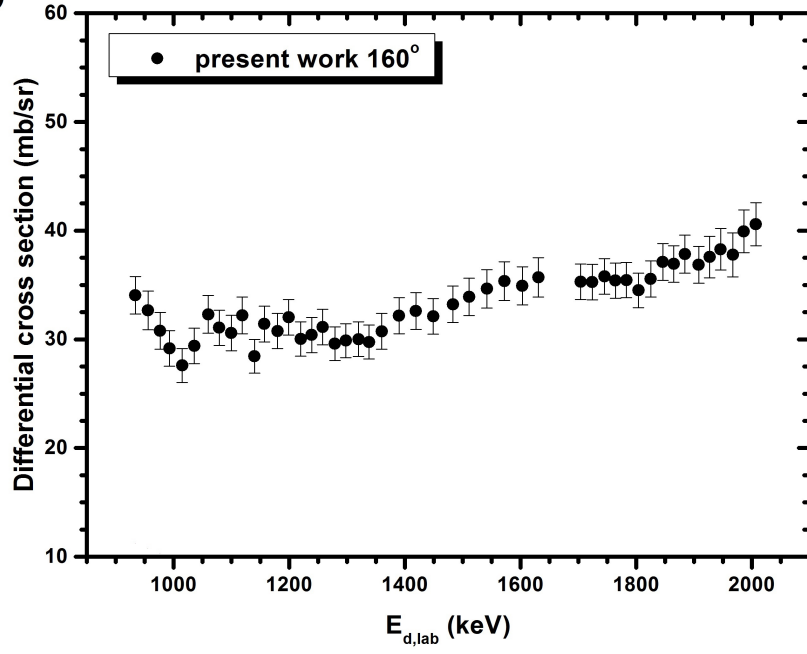
Πίνακας 1:

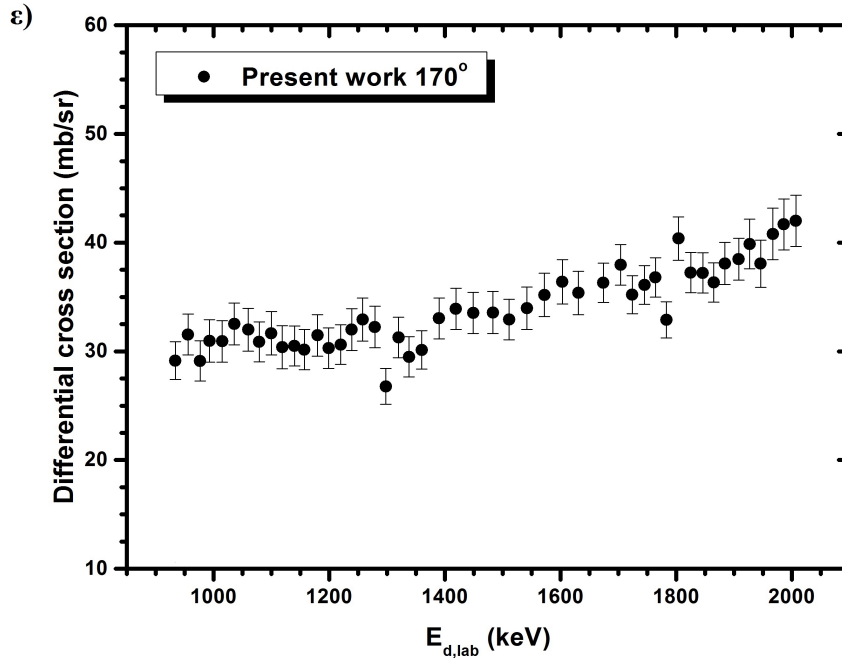
$E_d(keV)$	$\delta E_d(keV)$	$(\sigma+\delta\sigma) (mb/sr)$									
		125°		140°		150°		160°		170°	
930	3	45.4	2.2	41.4	2.2	37.1	1.8	34	1.7	29.1	1.7
950	3	45.6	2.3	41.7	2.3	34.1	1.8	32.7	1.8	31.5	1.9
970	3	42.5	2.1	38.6	2.2	31.3	1.7	30.8	1.7	29.1	1.9
990	3	40.5	2	34.5	2	32.8	1.7	29.2	1.6	31	2
1010	3	39.6	2	35.3	2	29.8	1.6	27.6	1.6	30.9	1.9
1031	3	37.5	1.9	32.7	2	31.3	1.7	29.4	1.6	32.5	1.9
1051	3	37.1	2	33.8	2	30.7	1.7	32.3	1.7	32	2
1071	3	37.3	1.9	35	2.1	32.2	1.8	31.1	1.6	30.9	1.8
1091	3	40.1	2	37.6	2.2	33.6	1.8	30.6	1.6	31.7	2
1111	3	38.6	2	35.6	2.1	33.6	1.8	32.2	1.7	30.4	2
1131	3	36.7	1.9	35.7	2.1	32.7	1.7	28.4	1.6	30.5	1.8
1151	3	37.2	1.9	35.1	2	33.9	1.8	31.4	1.6	30.2	1.8
1171	3	39	2	34.7	2	33.8	1.8	30.8	1.6	31.5	1.9
1192	3	37.4	1.9	34.6	2	32.6	1.8	32	1.6	30.3	1.9
1212	3	34.6	1.8	36	2.1	33.5	1.7	30	1.6	30.6	1.8
1232	3	37.3	1.9	34.4	2.1	35.1	1.8	30.4	1.6	32	1.9
1252	3	37.8	1.9	35.8	2.1	34	1.8	31.1	1.6	32.9	2
1272	3	32.7	1.7	33.7	2	31.9	1.7	29.6	1.5	32.2	1.9
1292	3	35.5	1.8	33.8	2	32.3	1.7	29.9	1.6	26.8	1.6
1312	3	33.8	1.8	33.7	1.9	31.6	1.7	30	1.6	31.3	1.9
1332	3	34.6	1.8	34.9	2	31.7	1.7	29.8	1.6	29.5	1.8
1352	3	34.7	1.8	33.9	1.9	32.9	1.7	30.7	1.6	30.1	1.8
1383	3	34.7	1.8	34.3	2	33.7	1.7	32.2	1.7	33	1.9
1413	3	35.8	1.9	33.6	1.9	33.9	1.8	32.6	1.7	33.9	1.9
1443	3	35.5	1.8	35.2	2	33	1.7	32.1	1.6	33.5	1.9
1473	3	35.2	1.8	35.4	2	33.6	1.8	33.2	1.7	33.6	1.9
1503	3	36	1.8	34.9	2	33.9	1.8	33.9	1.7	32.9	1.9
1533	3	35.2	1.8	34.7	1.9	33.5	1.8	34.7	1.8	34	2
1563	3	34.2	1.8	34.5	2	35	1.8	35.3	1.8	35.2	2
1593	3	33.1	1.7	35.9	2	35	1.8	34.9	1.8	36.4	2
1623	3	33.6	1.7	34.3	2	35.1	1.8	35.7	1.8	35.4	2
1664	3	33.1	2	35.9	1.8	36.2	1.7	-	-	36.3	1.8
1694	3	33.8	1.6	36	1.8	36.1	1.7	35.3	1.6	37.9	1.9
1714	3	33.9	1.6	36.1	1.8	36.4	1.7	35.3	1.6	35.2	1.7
1734	3	33.4	1.6	35.8	1.8	35.2	1.7	35.8	1.6	36.1	1.8
1754	3	34	1.6	34.6	1.7	34.1	1.6	35.4	1.6	36.8	1.8
1774	3	33.8	1.6	35.6	1.8	36.2	1.7	35.4	1.6	32.9	1.7
1794	3	33.5	1.6	34.5	1.7	35.9	1.7	34.5	1.6	40.4	2
1814	3	33.5	1.6	37	1.8	36.8	1.7	35.6	1.7	37.2	1.9
1834	3	32.8	1.5	35.3	1.8	36.1	1.7	37.1	1.7	37.2	1.9
1854	3	33	1.6	35.6	1.8	35	1.7	36.9	1.7	36.3	1.8
1874	3	32.6	1.6	36	1.8	35.8	1.7	37.8	1.8	38.1	1.9
1894	3	33.1	1.6	36.8	1.8	36.4	1.7	36.8	1.7	38.5	1.9
1914	3	32.5	1.7	36.7	2.1	38.3	2	37.6	1.9	39.9	2.3
1934	3	33.2	1.8	39.1	2.2	39.2	2	38.3	1.9	38.1	2.2





δ)

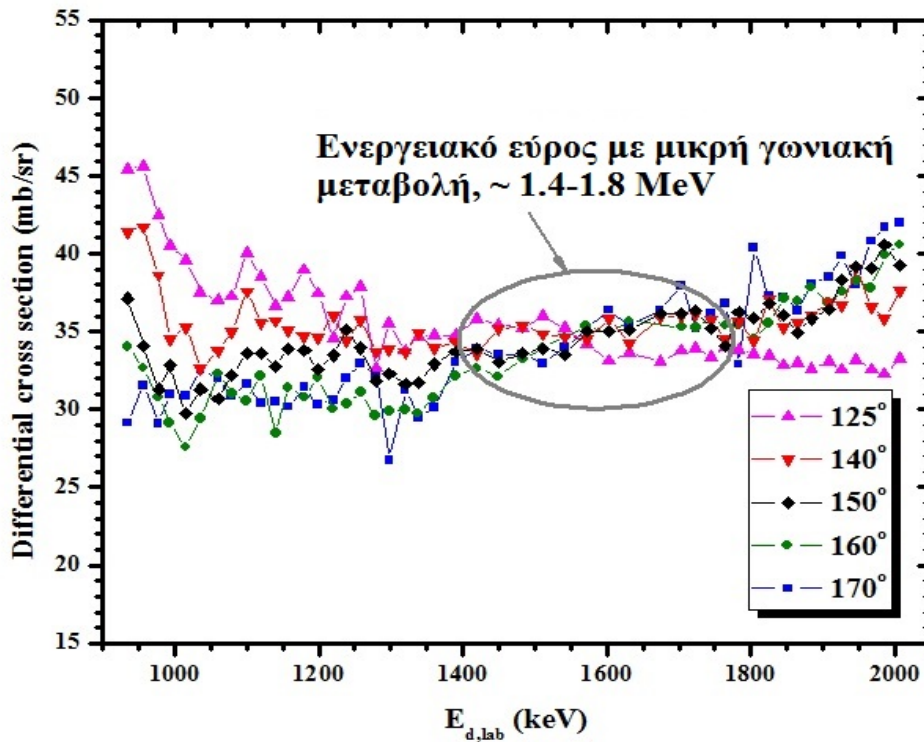




Σχήμα 13(α-ε) Τιμές της διαφορικού ενεργού διατομής (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από λίθιο 6, μετρημένες για ενέργειες δέσμης $E_{d,lab} = 940\{2000$ keV και για πέντε γωνίες σκέδασης $125^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$, με βήμα 20-30 keV. Τα συνολητικά σφάλματα των τιμών (εξαιρώντας το συστηματικό σφάλμα που εισάγει η επιλογή της μεθόδου προσδιορισμού του λόγου παχών ${}^6\text{Li:Au}$) συμπεριλαμβάνονται στα γραφήματα. Στον οριζόντιο άξονα τα σφάλματα δεν είναι ορατά εξαιτίας της επιλεγμένης κλίμακας.

Αναφορικά με την γωνιακή κατανομή της ελαστικής σκέδασης των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής του λιθίου 6, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 14, υπάρχει ένα πλατό στο ενεργειακό εύρος 1400 - 1800 keV στο οποίο η ενεργειακή και η γωνιακή μεταβολή είναι πράγματι μικρές. Η ύπαρξη αυτού του πλατό θα διευκόλυνε τις μετρήσεις κατανομής βάθους του λιθίου 6 σε περιπτώσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται μη μεταβλητές γεωμετρίες ανιχνευτών ή η τιμή της ενέργειας του επιταχυντή δεν είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, για ενέργειες χαμηλότερες των 1400 keV και υψηλότερες των 1800 keV η μεταβολή των τιμών της ενεργού διατομής ακολουθεί μια εμφανώς αντίστροφη τάση ως προς την γωνία σκέδασης. Η τάση αυτή μπορεί να οφείλεται στις διαφορετικές συμπεριφορές που εμφανίζουν οι συντονισμοί

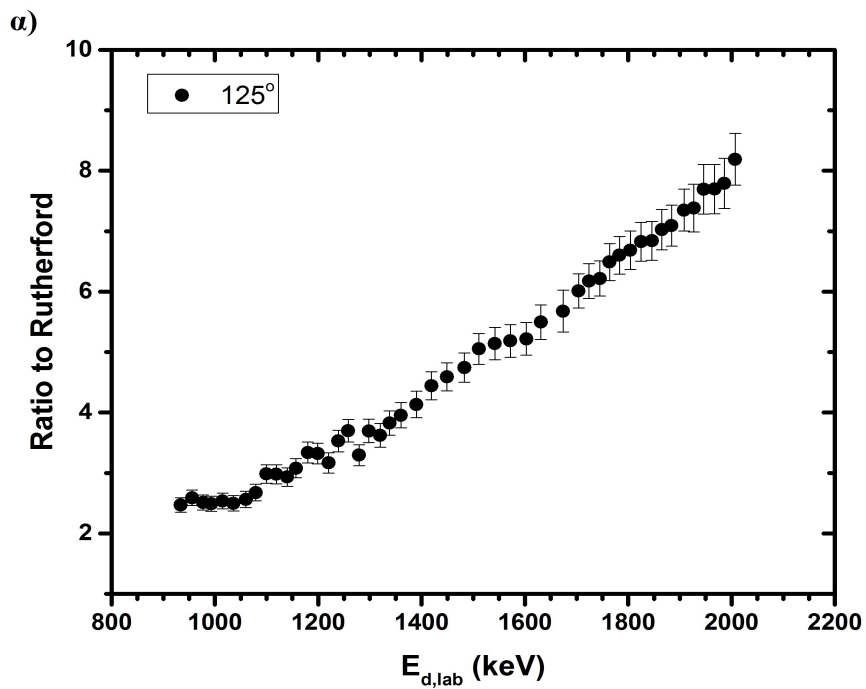
σε χαμηλές και υψηλές ενέργειες διέγερσης του σύνθετου πυρήνα ${}^8\text{Be}$.

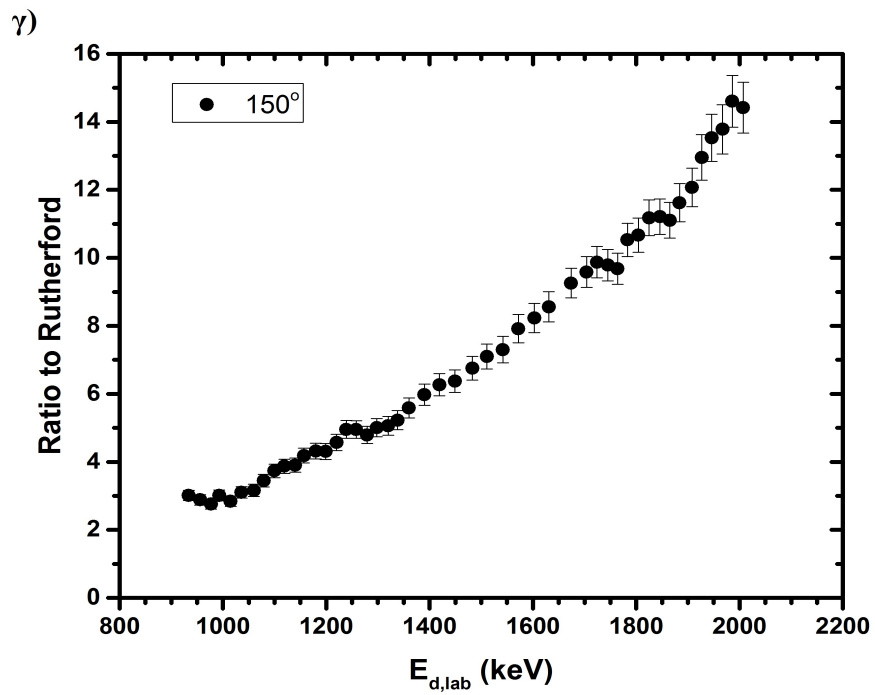
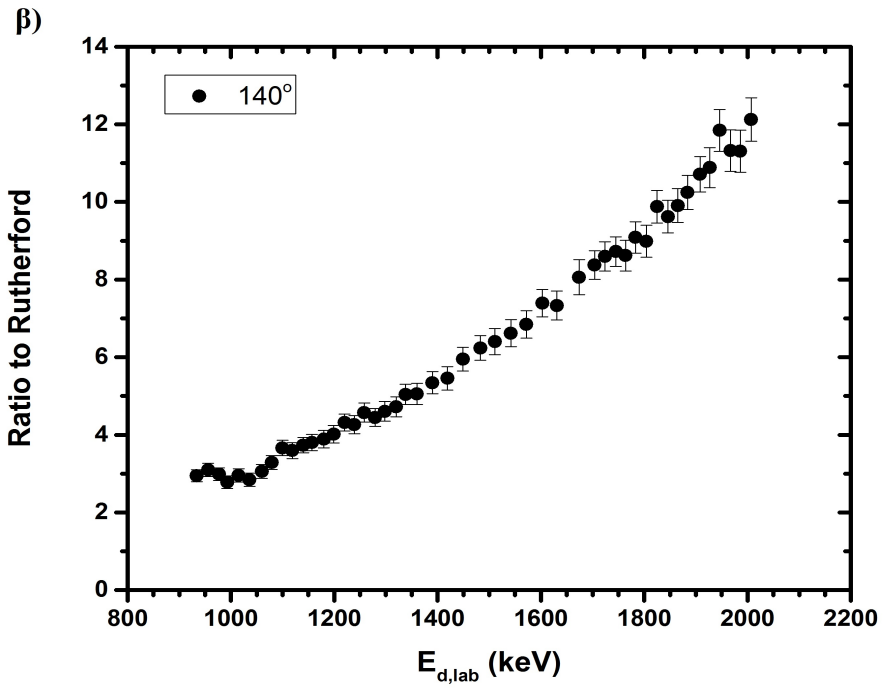


Σχήμα 14 Γωνιακή κατανομή των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$, η οποία μετρήθηκε για ενέργειες δέσμης $E_{d,lab} = 940\text{-}2000$ keV και για γωνίες σκέδασης 125° , 140° , 150° , 160° , 170° . Σημειώνεται το ενεργειακό εύρος με την μικρότερη γωνιακή μεταβολή μεταξύ 1.4-1.8 MeV. Τα σφάλματα δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα γραφική παράσταση για λόγους ευκρίνειας ενώ οι γραμμές που ενώνουν τα σημεία έχουν προστεθεί για καθοδήγηση.

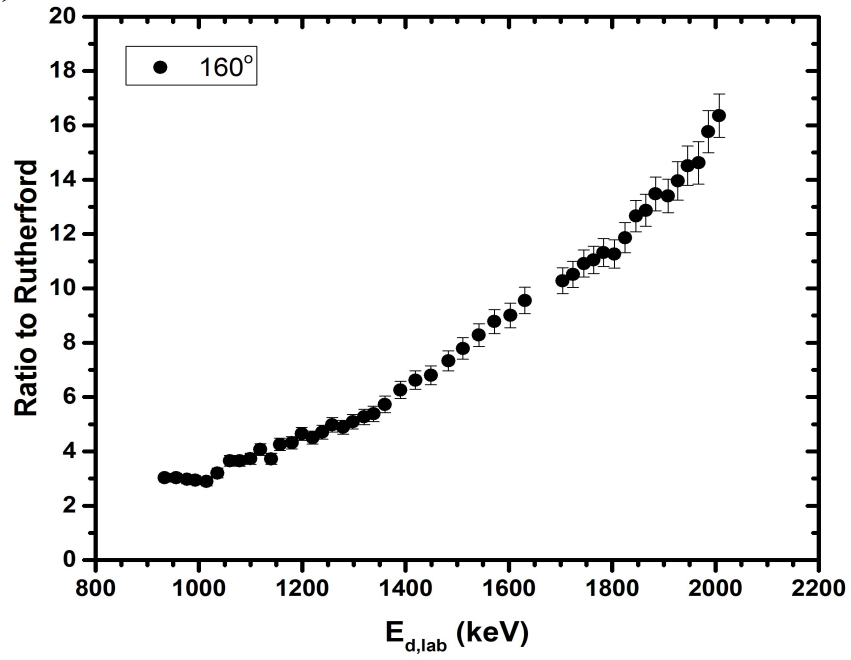
Ακόμη, όπως παρατηρούμε στο Στο Σχήμα 15α-ε στο οποίο παρουσιάζονται οι λόγοι των τιμών της ενεργού διατομής ως προς την ενεργό διατομή Rutherford, υπάρχουν ισχυρές αποκλίσεις από την ενεργό διατομή Rutherford. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής είναι μέχρι και 15 φορές υψηλότερες από εκείνες της Rutherford. Στην περίπτωση της ${}^6\text{Li}(p,p_0)$ και για το ίδιο ενεργειακό εύρος, οι αποκλίσεις

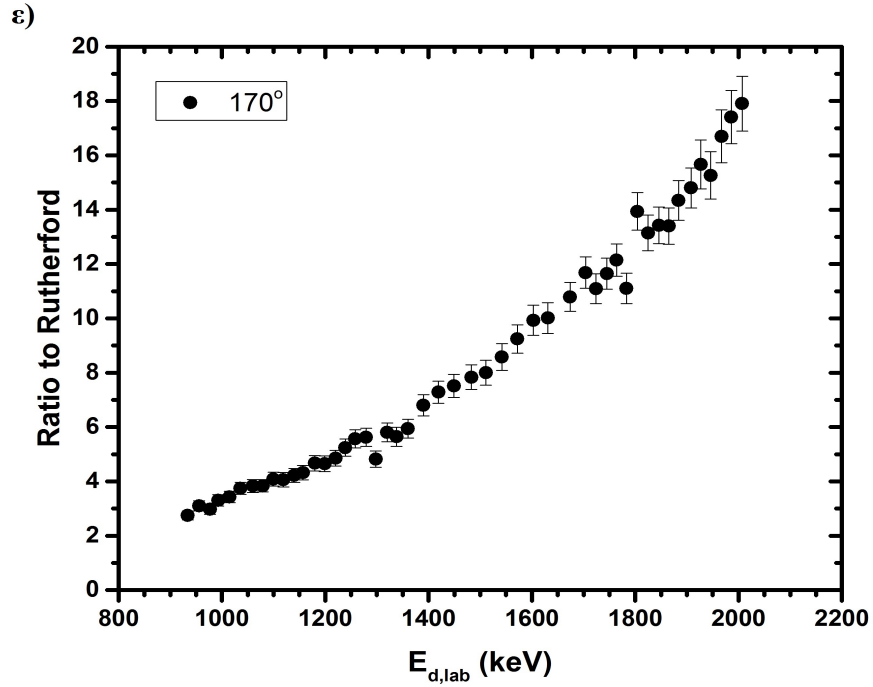
φτάνουν μέχρι έναν παράγοντα του 40, ανάλογα με τη γωνία σκέδασης, συνεπώς δεν πρόκειται για ασυνήθιστο φαινόμενο σε πολύ ελαφρείς πυρήνες. Είναι πολύ σημαντικό δε το γεγονός ότι η ελαστική σκέδαση, ακόμα και σε πολύ χαμηλές ενέργειες δέσμης πρωτονίων ή δευτερίων είναι ισχυρά μη Rutherford, καθιστώντας απαραίτητη την πειραματική μελέτη των σχετικών διαφορικών ενεργών διατομών.





δ)





Σχήμα 15α-ε Λόγος των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$ ως προς τις αντίστοιχες τιμές υπολογιζόμενες από την εξίσωση του Rutherford. Οι αποκλίσεις, σε ορισμένες περιπτώσεις, προσεγγίζουν έναν παράγοντα του 15.

5 Συμπεράσματα - Προοπτικές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ισότοπο λίθιο 6, ${}^6\text{Li}(d,d_0){}^6\text{Li}$, για ενέργειες δέσμης $E_{d,lab} = 940\text{-}2000$ keV και για γωνίες ανίχνευσης 125° , 140° , 150° , 160° , 170° . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή, 5.5 MV TN11 TANDEM, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

Οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών που μετρήθηκαν υποδεικνύουν την πιθανή επίδραση αλληλοεπικαλυπτόμενων συντονισμών που αντιστοιχούν στις ενεργειακές καταστάσεις του σύνθετου πυρήνα ${}^8\text{Be}$ που ανήκουν στην περιοχή διέγερσης. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε σχετικά μικρή διακύμανση των τιμών των ενεργών διατομών στο σχετικά μεγάλο εύρος ενεργειών που μελετήθηκε. Όσον αφορά τη γωνιακή κατανομή, υπάρχει ένα πλατό στο ενεργειακό εύρος 1400 - 1800 keV το οποίο ενδείκνυται για μετρήσεις κατανομής βάθους λιθίου σε περιπτώσεις με μη μεταβλητές γεωμετρικές ανιχνευτών και για περιπτώσεις με όχι πολύ ακριβή γνώση της ενέργειας του επιταχυντή. Τέλος, παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές της Rutherford διαφορικής ενεργού διατομής, γεγονός που μας υποδεικνύει την σημασία της πειραματικής μελέτης σχετικών διαφορικών ενεργών διατομών.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι αρκετά σημαντικά και μάλιστα θα είχε πολύ ενδιαφέρον η επέκταση στο κύριο ισότοπο του λιθίου, το λίθιο 7. Ωστόσο, στην ελαστική σκέδαση δευτερίων από λίθιο 7, ${}^7\text{Li}(d,d_0){}^7\text{Li}$, παρουσιάζεται το πρόβλημα της μερικής επικάλυψης κορυφών. Συγκεκριμένα, η ελαστική κορυφή από το λίθιο 7 επικαλύπτεται για ορισμένες τιμές της ενέργειας και της γωνίας με την κορυφή από την ενδόθερμη αντίδραση ${}^7\text{Li}(d,p_0){}^7\text{Li}$, η οποία έχει τιμή $Q = -191.95$ keV και κατώφλι στα 247.05 keV, επομένως εμφανίζεται σε όλο το εύρος ενεργειών που μελετήθηκε η ελαστική σκέδαση δευτερίων από λίθιο 6.

Ακόμη, η παρούσα μελέτη της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από λίθιο μπορεί να αποτελέσει εφαλτήριο για τη συστηματική μελέτη της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από όλα τα κύρια σταθερά ισότοπα μέχρι το ${}^{40}\text{Ca}$. Η μελέτη αυτών των συστημάτων σε πειραματικό επίπεδο αποτελεί ανεξερεύνητη περιοχή της πυρηνικής φυσικής χαμηλών ενεργειών και θα οδηγήσει στην προσπάθεια αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων μέσω θεωρίας R-matrix και στην μελέτη της συνεισφοράς του άμεσου μηχανισμού αντίδρασης (Distorted Wave Born Approximation - DWBA).

Τέλος, μια σημαντική μελλοντική εργασία είναι η πραγματοποίηση ελέγχου αξιοπιστίας (benchmarking) των ελαστικών σκεδάσεων δευτερίων από ελαφρά στοιχεία. Ο έλεγχος αξιοπιστίας αποτελεί πολύ σημαντική διαδικασία καθώς θα υποδείξει την ορθότητα των διαφορικών ενεργών διατομών αλλά και

θα οδηγήσει στην εξαγωγή σωστής θεωρίας. Ωστόσο, πρόβλημα αποτελεί η ύπαρξη των αντιδράσεων (d,p), (d,a) και των διεγερμένων καταστάσεων τους, οι οποίες είναι παρούσες στα πειραματικά φάσματα ελαστικής σκέδασης δευτερίων από στόχο άπειρου πάχους.

Αναφορές

- [1] Chia-Shou, Lin, Wan-Shou, Hou, Min, Wen, Jen-Chang, Chou. "Cross-section measurements for the ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ reaction in the proton energy range 1.0 - 2.6 MeV". Nuclear Physics A 275 (1977) 93-99.
- [2] P. Paul, K.P. Lieb. "The excited state at 25 MeV in ${}^8\text{Be}$ ". Nuclear Physics 53 (1964) 465-476
- [3] V. Foteinou, A. Lagoyannis, M. Kokkoris, G. Provatas, T. Konstantinopoulos, P. Misaelides, S. Harissopoulos. "Cross section measurements of the ${}^6\text{Li}(d, \alpha_0){}^4\text{He}$ reaction". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B269, (2011), 2990-2993
- [4] Ion Beam Analysis Nuclear Data Library, <https://www-nds.iaea.org/ibandl>
- [5] <http://www-nds.iaea.org/sigmacalc/>
- [6] R. R. Perry, B. Mainsbridge, J. Rickards. " ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}$ excitation curve from 1.5 MeV to 11 MeV". Nuclear Physics 45 (1963) 580-592.
- [7] A.F. Gurbich, "Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis", in: Y. Wang, M. Nastasi (eds), second edition, MRS, Warrendale, Pennsylvania, 2010.
- [8] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", third edition, 1999.
- [9] C. Kalfas, M. Axiotis, C. Tsabaris, "SPECTRW: A software package for nuclear and atomic spectroscopy", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A830 (2016) 265{274.
- [10] M. Mayer, "SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA". AIP Conference Proceedings, 475(1), 1999.
- [11] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, "SRIM - The stopping and range of ions in matter" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B268 (2010) 1818{ 1823.
- [12] W.K. Chu, J.F. Ziegler, "Ion Beam Handbook for Material Analysis".
- [13] Q. Yang, D.J.O'Connor, "Empirical formulae for energy loss straggling of ions in matter", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B61 (1991) 149-155.

- [14] N.Patronis, X.Aslanoglou, M.Axiotis, A.Georgiadou, M.Kokkoris, A.Lagoyannis, P.Misaelides, V.Paneta, "*Study of Mg(d,d₀) reaction at detector angles between 90° and 170°, for the energy range E_{d,lab}=1660 - 1990 keV*", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B337 (2014) 97-101.
- [15] J. L'Ecuyer, J.A. Davies, N. Matsunami, "*How accurate are absolute Rutherford backscattering yields*", Nuclear Instruments and Methods 160 (1979) 337-346.
- [16] W.N. Catford, 2005.
- [17] M. Kokkoris, P. Misaelides, A. Kontos, A. Lagoyannis, S. Harissopoulos, R. Vlastou, C.T. Papadopoulos, "*Differential cross section measurements of the ¹²C(d,p_{1,2,3})¹³C reactions in the energy range E_{d,lab} = 900 - 2000 keV for nuclear reaction analysis*", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B254 (2007) 10-16.
- [18] V. Foteinou, G. Provatas, X. Aslanoglou, M. Axiotis, S. Harissopoulos, M. Kokkoris, A. Lagoyannis, P. Misaelides, E. Ntemou, N. Patronis, K. Preketes-Sigalas, "*Differential cross section measurements of the ¹⁹F(d,d₀) elastic scattering for Ion Beam Analysis purposes*", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B396 (2017) 1-4.
- [19] U. Fasoli, E. A. Silverstein, D. Toniolo, G. Zago, "*The elastic scattering of protons by ⁶Li in the energy range (1.3 - 5.6) MeV*", Il Nuovo Cimento 34 (1964) 1832-1836.
- [20] U. Fasoli, D. Toniolo, G. Zago, "*Elastic and inelastic scattering of protons by ⁷Li in the energy interval (3-5.5) MeV*", Il Nuovo Cimento 34 (1964) 542-551.