



Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
στη Φυσική
Τμήμα Φυσικής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ (Μ.Δ.Ε)

Προσδιορισμός και έλεγχος αξιοπιστίας
των διαφορικών ενεργών διατομών των
αντιδράσεων $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ για
εφαρμογές NRA (Nuclear Reaction
Analysis)

ΒΑΣΙΛΗΣ ΣΤΕΦΑΝΙΔΗΣ ΤΟΥΛΚΕΡΙΔΗΣ

Αριθμός μητρώου: 888

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Φωτεινού Βαρβάρα

Ιωάννινα, Φεβρουάριος 2025

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρα. Βάρβαρα Φωτεινού, Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου των Ιωαννίνων για την συνεχή καθοδήγηση που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών αλλά και για τον ζήλο που έδειξε στο να με βοηθήσει να κατανοήσω διαφορά πράγματα πέρα από αυτά που αφορούσαν την παρούσα εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα. Νικόλα Πατρώνη, καθηγητή του Πανεπιστημίου των Ιωαννίνων για την υποστήριξη και τις συμβουλές που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της διαδρομής αυτής.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Ελένη και Νικόλαο, αλλά και στα αδέρφια μου, Χαράλαμπο και Παναγιώτη, που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια καθώς ήταν δίπλα μου σε κάθε στιγμή της ζωής μου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκαν οι διαφορικές ενεργές διατομές των πυρηνικών αντιδράσεων $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)^{18}\text{F}$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)^{15}\text{O}$ για πέντε γωνίες ανίχνευσης από 130° έως 170° , με βήμα 10° , και για περίπου 30 ενέργειες δέσμης (ανάλογα με την αντίδραση και τη γωνία ανίχνευσης) στο εύρος μεταξύ ~ 3500 keV και ~ 5000 keV. Επιπλέον, μέσω σύγκρισης με δεδομένα από ανεξάρτητο πείραμα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της αξιοπιστίας (benchmarking) τόσο των διαφορικών ενεργών διατομών που προέκυψαν στην παρούσα εργασία όσο και εκείνων που έχουν προσδιοριστεί για χαμηλότερες ενέργειες δέσμης σε προηγούμενες μελέτες [26], [27]. Πρέπει να σημειωθεί, ότι τα δεδομένα που προέκυψαν σε αυτήν την εργασία αποτελούν τα πρώτα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο ενεργειακό εύρος.

Όλα τα πειράματα έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του επιταχυντή Dynamitron Tandem των Κεντρικών Εγκαταστάσεων για Δέσμες Ιόντων και Ραδιο-νουκλίδια (RUBION) του Πανεπιστημίου Ruhr στο Bochum της Γερμανίας. Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των διαφορικών ενεργών διατομών αποτελούνταν από τρία στρώματα: ένα επιφανειακό στρώμα χρυσού (Au) πάχους περίπου 3 nm, ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) πάχους περίπου 300 nm και ένα παχύ υπόστρωμα πυριτίου (Si). Για τον ακριβή προσδιορισμό του πάχους του στρώματος Au και του στρώματος SiO_2 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από ανεξάρτητο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο ίδιο εργαστήριο με δέσμη δευτερίων. Για τις μετρήσεις benchmarking χρησιμοποιήθηκε ένας υψηλής καθαρότητας, παχύς στόχος οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO).

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής προσδιορίστηκαν σχετικά ως προς τις αντίστοιχες τιμές της ελαστικής σκέδασης στο χρυσό, οι οποίες περιγράφονται από τον τύπο του Rutherford. Η ανάλυση των φασμάτων που συλλέχθηκαν στις μετρήσεις των διαφορικών ενεργών διατομών πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος TV [25]. Για τον προσδιορισμό του πάχους του στρώματος Au και του στρώματος SiO_2 , έγινε, με χρήση του προγράμματος SIMNRA [2], προσομοίωση του φάσματος που συλλέχθηκε με δέσμη δευτερίων. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των διαφορικών ενεργών διατομών χρησιμοποιήθηκε και πάλι το πρόγραμμα SIMNRA και, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καθώς και των εργασιών [26] και [27], έγινε προσομοίωση των φασμάτων που συλλέχθηκαν με τον παχύ στόχο ZnO.

Abstract

In this study, the differential cross sections of the $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)^{18}\text{F}$ and $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)^{15}\text{O}$ reactions were determined for five detection angles ranging from 130° to 170° , in steps of 10° , and for approximately 30 beam energies (depending on the reaction and detection angle) within the energy range from 3500 keV to about 5000 keV. In addition, a benchmarking study was performed through comparison with data from an independent experiment, in order to ensure the reliability of the differential cross-section values obtained in the present work and in previous studies for lower beam energies [26, 27].

All experiments were carried out at the Dynamitron Tandem accelerator laboratory of the Central Unit for Ion Beams and Radionuclides (RUBION) at Ruhr University Bochum, Germany. The target used for the differential cross-section measurements consisted of three layers: a surface gold (Au) layer with a thickness of approximately 3 nm, a silicon dioxide (SiO_2) layer of about 300-nm thickness, and a thick silicon (Si) substrate. The precise determination of the Au and SiO_2 layer thicknesses was achieved using data from an independent experiment performed at the same laboratory with a deuteron beam. For the benchmarking measurements, a high-purity, thick zinc oxide (ZnO) target was employed.

The differential cross sections were determined relative to the corresponding elastic scattering cross sections on gold, which are described by the Rutherford formula. The analysis of the spectra collected in the differential cross-section measurements was carried out using the software package TV [25]. For the determination of the thicknesses of the Au and the SiO_2 layers, the spectrum collected using a deuteron beam was simulated with the SIMNRA program [2]. For the verification of the reliability of the differential cross sections, the SIMNRA code was again used, and taking into account the results of the present work as well as those reported in [26] and [27], simulations of the spectra collected with the thick ZnO target were performed.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	11
1.1	Σκοπός	11
1.2	Ενεργός Διατομή	12
1.3	Ιοντικές Τεχνικές Ανάλυσης	14
2	Πειραματική διάταξη	21
2.1	Επιταχυντής	21
2.2	Πειραματική Διάταξη	22
2.3	Σύστημα Ανίχνευσης και Ηλεκτρονικά	23
2.4	Χαρακτηριστικά στόχου	24
2.5	Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή	25
3	Ανάλυση Δεδομένων	27
3.1	Διαφορική ενεργός διατομή	27
3.2	Απώλεια ενέργειας στο στόχο	29
3.3	Εμβοδομέτρηση κορυφών	29
3.4	Προσδιορισμός πάχους στόχου	31
4	Αποτελέσματα ενεργών διατομών	33
5	Έλεγχος αξιοπιστίας αποτελεσμάτων	45
5.1	Εισαγωγή	45
5.2	Βασικά Χαρακτηριστικά Πειράματος	45
5.3	Αποτελέσματα Benchmarking	46
6	Συμπεράσματα	51

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Οι σύγχρονοι αντιδραστήρες σύντηξης απαρτίζονται από πολύπλοκες δομές, οι οποίες έχουν ως απώτερο σκοπό την διατήρηση του πλάσματος σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Μολονότι η συγκράτηση και ο έλεγχος του πλάσματος μπορούν να επιτευχθούν μέσω των αντίστοιχων συστημάτων περιορισμού, το πλάσμα εκπέμπει ενεργητικά σωματίδια και ακτινοβολία, τα οποία αλληλεπιδρούν με τα υλικά της διάταξης, μεταβάλλοντας τη χημική σύσταση και τη δομή τους. Η αλληλεπίδραση αυτή αφορά κυρίως τα υλικά των εσωτερικών τοιχωμάτων των αντιδραστήρων, τα λεγόμενα Plasma Facing Components (PFCs). Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, στα PFCs παρατηρούνται διάφορα φαινόμενα, όπως διάβρωση, επαναπόθεση και διείδυση στοιχείων, τα οποία μεταβάλλουν τη σύσταση και την εσωτερική δομή των υλικών και με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλονται και οι ιδιότητές τους, επηρεάζοντας την απόδοση του αντιδραστήρα. Η κατανόηση των αλλαγών που υφίστανται τα υλικά αυτά είναι, επομένως, κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των αντιδραστήρων σύντηξης.

Για να μελετηθούν οι μεταβολές που υπόκεινται τα PFCs πρέπει να προσδιοριστεί η σύσταση τους αλλά και η κατανομή σε βάθος των στοιχείων που τα συνθέτουν. Μεταξύ των πιο διαδεδομένων και σύγχρονων τεχνικών ανάλυσης υλικών είναι οι Ιοντικές Τεχνικές Ανάλυσης (Ion Beam Analysis - IBA), οι οποίες κρίνονται ιδιαίτερα κατάλληλες στην περίπτωση αυτή, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία ενώ ταυτόχρονα είναι ελάχιστα επεμβατικές. Για τη σε βάθος ποσοτική ανάλυση ελαφριών στοιχείων, η πιο κατάλληλη IBA τεχνική είναι η Nuclear Reaction Analysis (NRA), δηλαδή η ανάλυση μέσω πυρηνικών αντιδράσεων. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην μελέτη των σωματιδίων που εκπέμπονται από πυρηνικές αντιδράσεις και προσφέρει το πρόσθετο πλεονέκτημα της ισοτοπικής ανάλυσης.

Το οξυγόνο αποτελεί ανεπιθύμητη πρόσμιξη στα υλικά των PFC και η παρουσία του συνιστά σημαντικό ζήτημα στις εφαρμογές σύντηξης. Η αξιόπιστη ποσοτική ανάλυση του οξυγόνου σε βάθος είναι συνεπώς απαραίτητη για την βελτιστοποίηση των αντιδραστήρων.

Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ για ενέργειες δέσμης ^3He και γωνίες ανίχνευσης κατάλληλες για την εφαρμογή της τεχνικής NRA στην ανάλυση οξυγόνου σε βάθη της τάξης μερικών έως

και μερικών δεκάδων μικρομέτρων (ανάλογα με το υπό μελέτη υλικό). Συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη, οι διαφορικές ενεργές διατομές της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ προσδιορίστηκαν στο ενεργειακό εύρος $E_{lab}=3500-5000$ keV και για γωνίες $130^\circ-170^\circ$ με βήμα 10° , ενώ για την αντίδραση $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$, λόγω της πολυπλοκότητας των φασμάτων, ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών ήταν εφικτός για ενέργειες δέσμης από ~ 3500 keV έως περίπου 4800 keV.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε έλεγχος της αξιοπιστίας τόσο των διαφορικών ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία όσο και εκείνων που έχουν προσδιοριστεί για διαφορετικά ενεργειακά εύρη στα πλαίσια των εργασιών [26], [27].

Τα δεδομένα που προέκυψαν στην παρούσα εργασία θα αποτελέσουν τα πρώτα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία για αυτό το ενεργειακό εύρος και αναμένεται να συμβάλουν στην ανάπτυξη ακριβέστερων πρωτοκόλλων NRA για τη σε βάθος ανάλυση οξυγόνου με δέσμες ^3He .

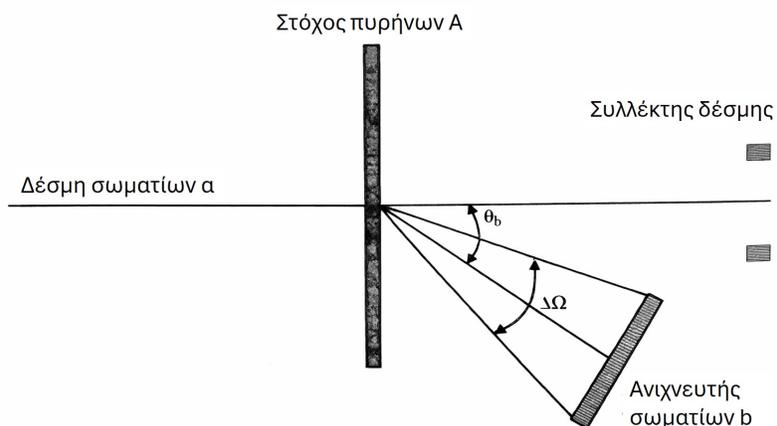
1.2 Ενεργός Διατομή

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος σε μία πυρηνική αντίδραση $A(\alpha,\beta)B$ είναι η πιθανότητα να συμβεί υπό ορισμένες πειραματικές συνθήκες. Έστω ότι η πειραματική διάταξη είναι αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα (1.1) [33]. Με βάση την εικόνα αυτή μια δέσμη σωματιδίων α ταχύτητας u και διατομής S προσκρούει σε έναν στόχο ο οποίος αποτελείται από πυρήνες A . Επίσης, αν γίνει η υπόθεση ότι οι πυρήνες A του στόχου έχουν ακτίνα R και ότι οι πυρήνες α της δέσμης έχουν σχεδόν αμελητέες διαστάσεις τότε κάθε πυρήνας A παρεμβάλει τη δέσμη μας με μια επιφάνεια που έχει εμβαδόν $\sigma = \pi R^2$ που μπορεί να ανακόψει την πορεία των σωματιδίων α της δέσμης.

Με βάση αυτά τα δεδομένα στην Εικόνα (1.2) [33] εάν ο στόχος, στην επιφάνεια S , περιέχει N_T πυρήνες και έχει πάχος t τέτοιων διαστάσεων ώστε οι πυρήνες A να μην αλληλοκαλύπτονται τότε η ολική επιφάνεια που μπορεί να ανακόψει τη δέσμη είναι ίση με $N_T S$. Επομένως η πιθανότητα ώστε ένα σωματίδιο α να προσκρούσει σε κάποιο πυρήνα A ισούται με $N_T \sigma / S$.

Τέλος, σε περίπτωση που η δέσμη μας αποτελείται από ένα πλήθος σωματιδίων n ανά μονάδα όγκου, τότε η ολική πιθανότητα ενός σωματιδίου της δέσμης να συγκρουστεί με έναν πυρήνα δίνεται από τον εξής τύπο:

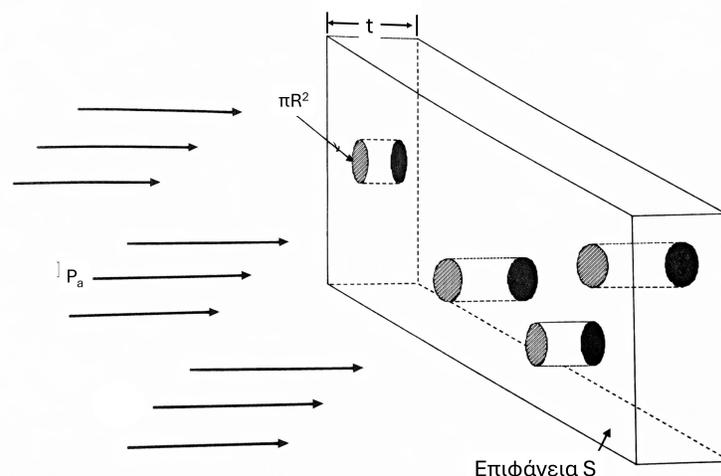
$$\sigma = \frac{\text{συγκρούσεις ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου}}{nNt}$$



Εικόνα 1.1: Τυπική διάταξη πειράματος με αντικείμενο τη μελέτη πυρηνικών αντιδράσεων.

Όπως ήδη παρατηρήθηκε η ενεργός διατομή μιας συγκεκριμένης πυρηνικής αντίδρασης $A(\alpha,\beta)B$ αναφέρεται στον ολικό αριθμό των σωματιδίων β που εκπέμπονται από τον στόχο μας προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Σε αντιδιαστολή παρατηρείται ότι η πειραματική διάταξη της Εικόνας (1.1) [33], όπου καταγράφονται μόνο σωματίδια που εκπέμπονται προς μια επιλεγμένη γωνία θ_β μέσα στα όρια της στερεής γωνίας $\Delta\Omega$ που ορίζει ο ανιχνευτής της διάταξης. Η αντίστοιχη ποσότητα ονομάζεται διαφορική ενεργός διατομή και συμβολίζεται ως $d\sigma/d\Omega(\theta)$. Η σχέση που συνδέει αυτό το μέγεθος με την ενεργό διατομή της αντίδρασης είναι η εξής [33]:

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$



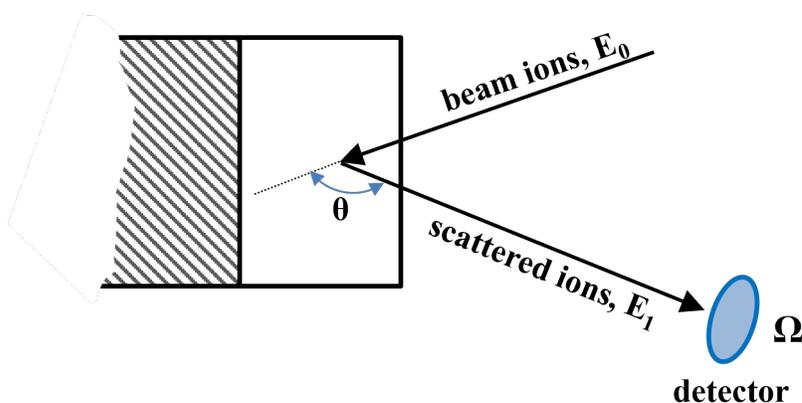
Εικόνα 1.2: Η γεωμετρική ενεργός διατομή που παρεμβάλλει στην δέσμη σωματιών λεπτός στόχος.

1.3 Ιοντικές Τεχνικές Ανάλυσης

Οι Ιοντικές Τεχνικές Ανάλυσης (Ion Beam Analysis - IBA) αποτελούν ένα σύνολο διαφορετικών τεχνικών, οι οποίες βασίζονται στη χρήση ιοντικών δεσμών ενέργειας μερικών MeV και αποσκοπούν στην ποιοτική και ποσοτική ανάλυση υλικών. Οι τεχνικές αυτές είναι ελάχιστα καταστροφικές και χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία. Ορισμένες μάλιστα επιτρέπουν τον προσδιορισμό της σε βάθος κατανομής των στοιχείων που συνθέτουν το υλικό, ενώ κάποιες προσφέρουν και ισοτοπική ανάλυση. Οι πιο γνωστές τεχνικές IBA είναι οι ακόλουθες:

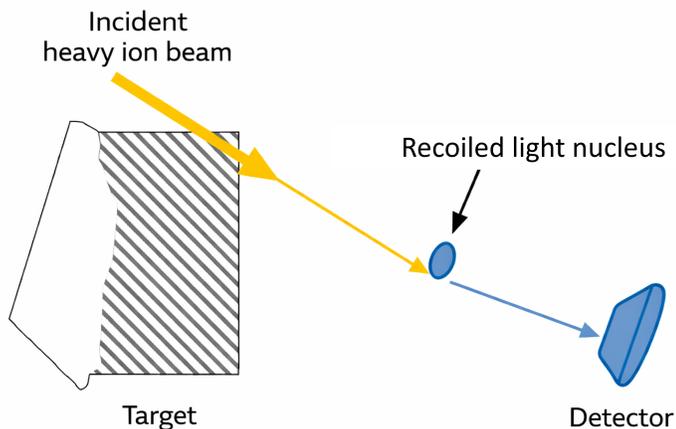
- **RBS/EBS (Rutherford/Elastic Backscattering Spectrometry):** Η Φασματομετρία Οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectrometry - RBS) χρησιμοποιείται για την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση ενός δείγματος αλλά και για τον προσδιορισμό της σε βάθος κατανομής των στοιχείων που τον συνθέτουν. Βασίζεται στην αντίστροφή των ελαστικά σκεδαζόμενων ιόντων της δέσμης και είναι ιδανική για τη μελέτη στοιχείων μεσαίου ή υψηλού Z (ανάλογα με τη μήτρα του υλικού). Η διαφορική ενεργός διατομή στην RBS υπολογίζεται αναλυτικά από

την αντίστοιχη σχέση της σκέδασης Rutherford. Στις περιπτώσεις όπου η ενέργεια της δέσμης είναι αρκετά υψηλή ώστε να υπερβεί το φράγμα Coulomb του πυρήνα-στόχου, η σχέση του Rutherford παύει να ισχύει με αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε πειραματικά δεδομένα για τη διαφορική ενεργό διατομή. Στις περιπτώσεις αυτές η τεχνική αναφέρεται ως Φασματομετρία Ελαστικής Οπισθοσκέδασης (**Elastic Backscattering Spectrometry - EBS**)



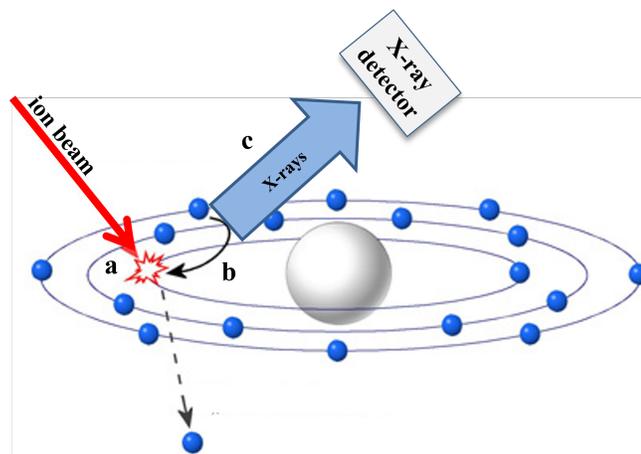
Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση της Φασματοσκοπίας Οπισθοσκέδασης Rutherford.

- **ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis):** Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση δεσμών ιόντων που είναι βαρύτερα από τους πυρήνες του υλικού στόχου. Η αλληλεπίδραση της δέσμης με τους πυρήνες του στόχου προκαλεί την ελαστική ανάκρουση ενός μέρους τους, και μέσω της ανίχνευσης των ανακρουσμένων πυρήνων καθίσταται δυνατή η ποσοτική ανάλυση του υλικού. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την ανάλυση πολύ ελαφρών στοιχείων, όπως το υδρογόνο και το ήλιο, και επιπλέον παρέχει πληροφορίες για τη σε βάθος κατανομή τους, εφαρμόζεται όμως σε πολύ μικρά βάθη (μέχρι $\sim 1 \mu\text{m}$, ανάλογα με τη δέσμη και το υπό ανάλυση υλικό).



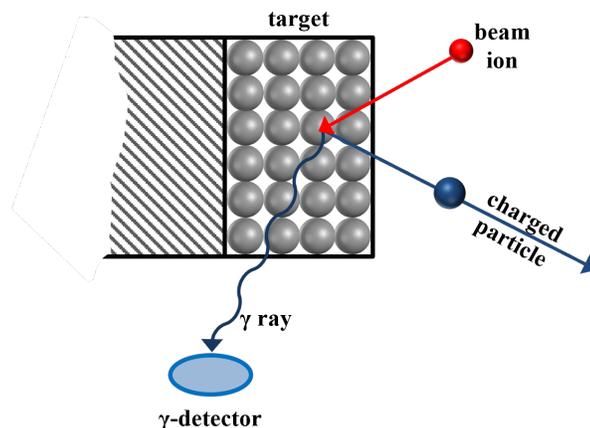
Εικόνα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση της Ανάλυσης Ελαστικής Ανάκρουσης.

- **PIXE (Particle Induced X-ray Emission):** Η συγκεκριμένη τεχνική είναι κατάλληλη για την ποσοτικοποίηση και την αναγνώριση των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το υπό ακτινοβολή υλικό. Βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρονιακή δομή του κάθε στοιχείου είναι διαφορετική. Η ακτινοβολή του στόχου προκαλεί τον ιονισμό των ατόμων του στόχου και τη δημιουργία οπών σε εσωτερικές στάθμες. Μετά από σύντομο χρονικό διάστημα, οι οπές αυτές συμπληρώνονται από ηλεκτρόνια που προέρχονται από στάθμες μεγαλύτερης ενέργειας και ταυτόχρονα εκπέμπονται ακτίνες X. Λόγω της χαρακτηριστικής ηλεκτρονιακής δομής του κάθε στοιχείου, οι ενέργειες των εκπεμπόμενων ακτίνων X είναι χαρακτηριστικές και μέσω της ανίχνευσής του επιτυγχάνεται η αναγνώριση του στοιχείου. Η ποσοτικοποίηση του στοιχείου βασίζεται στον αριθμό των ανιχνευόμενων ακτίνων X. Η τεχνική PIXE είναι κατάλληλη για την ανάλυση στοιχείων βαρύτερων του Na (εξαρτάται από τη διάταξη), αλλά δεν προσφέρει ούτε ισοτοπική ανάλυση ούτε πληροφορίες για τη σε βάθος κατανομή των στοιχείων.



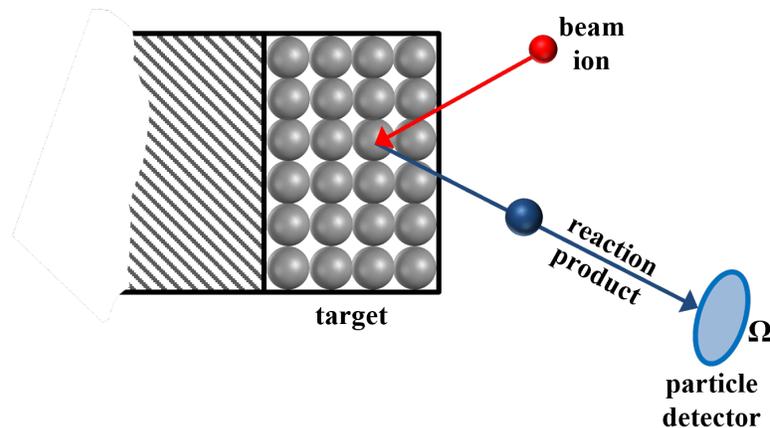
Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας χαρακτηριστικών ακτίνων- X στην τεχνική PIXE.

- PIGE (Particle Induced γ -ray Emission):** Η τεχνική PIGE βασίζεται στην ανίχνευση των χαρακτηριστικών ακτίνων γ που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση ενός πυρήνα. Κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης ιόντων με τους πυρήνες του στόχου υπάρχει η πιθανότητα είτε πυρήνες του στόχου να μεταβούν σε μία διεγερμένη πυρηνική κατάσταση είτε να πραγματοποιηθούν πυρηνικές αντιδράσεις και ένας ή περισσότεροι από τους παραγόμενους πυρήνες να βρίσκονται σε διεγερμένη πυρηνική κατάσταση. Στην PIGE ανιχνεύουμε τις ακτίνες γ που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση αυτών των πυρήνων, οι ενέργειες των οποίων είναι χαρακτηριστικές των ισοτόπων που υπάρχουν στον στόχο. Ως αποτέλεσμα, η τεχνική PIGE προσφέρει ισοτοπική ανάλυση. Είναι κατάλληλη για την ανάλυση ελαφρών ισοτόπων αλλά δεν παρέχει πληροφορίες για τη σε βάθος κατανομή τους.



Εικόνα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής PIGE.

- **NRA (Nuclear Reaction Analysis):** Στην εν λόγω τεχνική βασίζομαστε στην ανίχνευση ιόντων που παράγονται από πυρηνικές αντιδράσεις. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της NRA είναι, πρώτον, ότι οι ενέργειες των παραγόμενων από μία πυρηνική αντίδραση ιόντων εξαρτώνται από την τιμή Q της αντίδρασης, γεγονός που επιτρέπει την ανάλυση ελαφρών στοιχείων ακόμα και όταν βρίσκονται σε μήτρες βαρέων στοιχείων, και δεύτερον, ότι με μία μόνο μέτρηση είναι δυνατή η ταυτόχρονη ανάλυση πολλών διαφορετικών ελαφρών ισοτόπων. Για αυτόν τον λόγο, η NRA είναι η καταλληλότερη μέθοδος για την ποιοτική και ποσοτική σε βάθος ανάλυση ελαφρών στοιχείων, όπως το οξυγόνο. Επιπλέον, παρουσιάζει ισοτοπική επιλεκτικότητα, επιτρέποντας τον διαχωρισμό μεταξύ διαφορετικών ισοτόπων του ίδιου στοιχείου.



Εικόνα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση της NRA.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, καθεμία από τις τεχνικές IBA είναι καταλληλότερη από τις υπόλοιπες, ανάλογα με το υπό ανάλυση δείγμα και ανάλογα με τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε. Συχνά γίνεται συνδυασμός τεχνικών ώστε να ληφθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες. Όσον αφορά την ανάλυση ελαφρών στοιχείων, οι καταλληλότερες τεχνικές είναι συνήθως η NRA και η PIGE. Και οι δύο προσφέρουν ισοτοπική επιλεκτικότητα, υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία που μπορεί να φτάσει έως μερικά ppm. Ωστόσο, η NRA επιτρέπει, με μία και μόνο μέτρηση, τόσο τον προσδιορισμό της σε βάθος κατανομής όσο και την ταυτόχρονη ανάλυση πολλών διαφορετικών ελαφρών ισοτόπων.

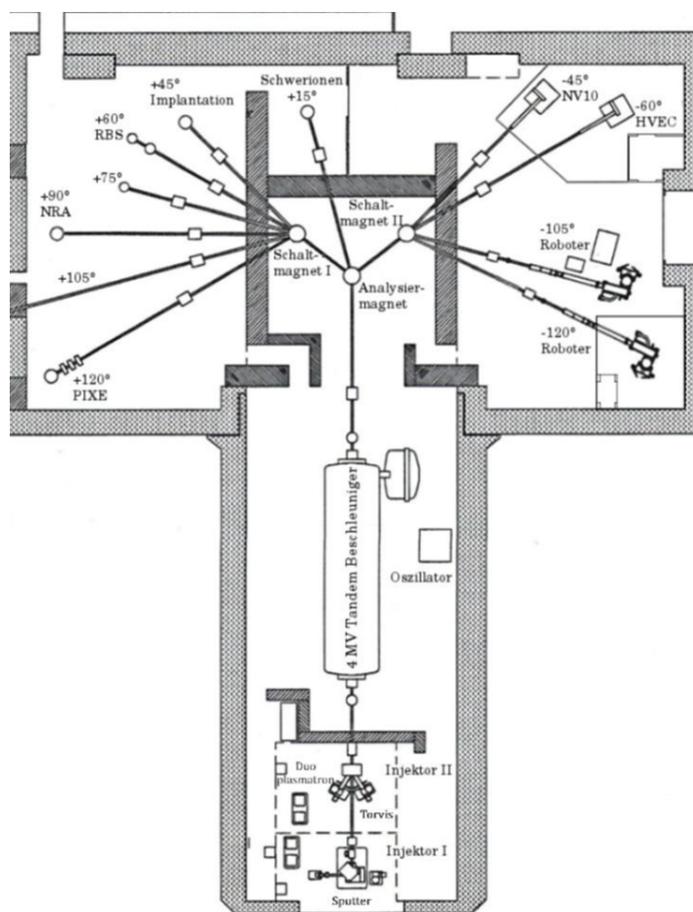
Παρόλα αυτά, η NRA, όπως και όλες οι τεχνικές IBA (με εξαίρεση την RBS), βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών και συχνά η εφαρμοσιμότητά τους περιορίζεται από την έλλειψη ή την αβεβαιότητα στα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία δεδομένα. Ιδιαίτερα για δέσμες ^3He , η βιβλιογραφία παρουσιάζει σημαντικά κενά σε διαφορικές ενεργές διατομές πυρηνικών αντιδράσεων και ελαστικής σκέδασης. Χαρακτηριστικά, για την περίπτωση του οξυγόνου, σε περιοχές ενδιαφέροντος της NRA, υπάρχουν πειραματικά δεδομένα μόνο για μία ενέργεια δέσμης ($E_{^3\text{He}}=2390$ keV) [24]. Ωστόσο, οι δέσμες ^3He είναι από τις πλέον κατάλληλες για την ανάλυση ποικίλων υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των PFCs [23], καθώς οι τιμές Q των πυρηνικών αντιδράσεων που προκαλούνται από δέσμες ^3He στα περισσότερα ελαφρά ισότοπα είναι ιδιαίτερα υψηλές. Επιπλέον, οι δέσμες ^3He είναι ιδανικές για τον προσδιορισμό της σε βάθος κατανομής του δευτερίου, ενός από τα σημαντικότερα ισότοπα στην τεχνολογία σύντηξης. Τέλος, οι δέσμες ^3He δεν εγείρουν ζητήματα ακτι-

νοπροστασίας, όπως οι δέσμες ^2H , που συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές NRA.

2 Πειραματική διάταξη

2.1 Επιταχυντής

Οι μετρήσεις που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του επιταχυντή Dynamitron Tandem στις Κεντρικές Εγκαταστάσεις για Δέσμες Ιόντων και Ραδιονουκλίδια (RUBION) του Πανεπιστημίου Ruhr στο Bochum της Γερμανίας.



Εικόνα 2.1: Επιταχυντική διάταξη και πειραματικές γραμμές στο RUBION

Οι επιταχυντές αυτού του τύπου (TANDEM) βασίζονται στην αρχή της διπλής επιτάχυνσης. Εφαρμόζοντας μια θετική τάση της τάξης μερικών MV

στο κέντρο της δεξαμενής, μέσα στην οποία εισέρχονται αρνητικά ιόντα, επιτυγχάνεται η πρώτη φάση επιτάχυνσής τους. Στη συνέχεια, τα ιόντα διέρχονται από μια διάταξη απογύμνωσης, η οποία μετατρέπει τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα) σε θετικά ιόντα (κατιόντα). Τα κατιόντα, λόγω του θετικού δυναμικού, απωθούνται και υφίστανται τη δεύτερη επιτάχυνση. Στους επιταχυντές τύπου Dynamitron, το υψηλό δυναμικό παράγεται μέσω ανορθωτών και ενός RF ταλαντώτη. Για τον συγκεκριμένο επιταχυντή, η γεννήτρια Dynamitron αποτελείται από 92 ανορθώτες και τροφοδοτείται από έναν RF ταλαντωτή 120 kHz, ενώ το μέγιστο παραγόμενο δυναμικό φτάνει τα 4 MV. Για την επιλογή της ενέργειας της δέσμης, χρησιμοποιείται ένας μαγνήτης (analyzer), το μαγνητικό πεδίο του οποίου προσδιορίζεται μέσω συστήματος πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR). Για την εστίαση και την ευθυγράμμιση της δέσμης, υπάρχει ένα σύνολο τετραπολικών μαγνητών, ηλεκτροστατικών καθοδηγητών και διπολικών φακών.

Το εργαστήριο του επιταχυντή Dynamitron Tandem στο RUBION διαθέτει 11 πειραματικές γραμμές, οι οποίες επιλέγονται μέσω ενός μαγνήτη μεταγωγής (switcher). Οι μετρήσεις που αφορούν το συγκεκριμένο πείραμα έλαβαν χώρα στην πειραματική γραμμή των $+75^\circ$, όπως φαίνεται στην Εικόνα (2.1). Ο κύριος σωλήνας του επιταχυντή και οι πειραματικές γραμμές διατηρούνται σε συνθήκες υψηλού κενού.

2.2 Πειραματική Διάταξη

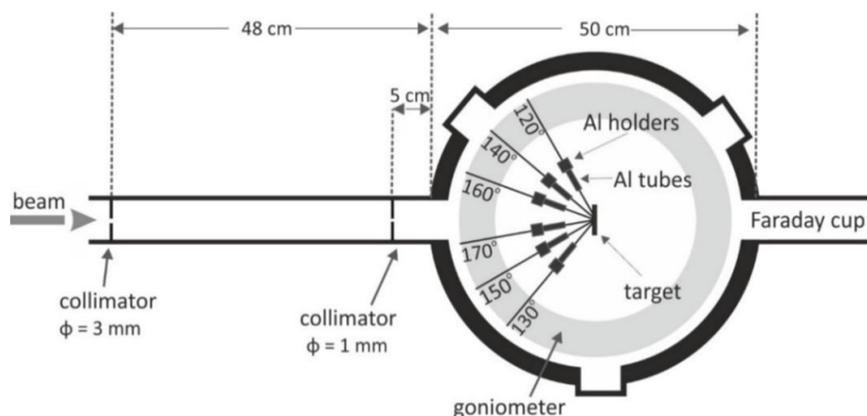
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όλα τα πειράματα που αφορούν την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν στην γραμμή $+75^\circ$ του εργαστηρίου RUBION. Αυτή η γραμμή καταλήγει σε έναν κυλινδρικό θάλαμο σκέδασης με εξωτερική διάμετρο 50 cm. Η δέσμη εισέρχεται στο θάλαμο περνώντας μέσα από δύο διαφράγματα, τα οποία είναι φτιαγμένα από ταντάλιο. Το πρώτο διάφραγμα έχει διάμετρο 3 mm και είναι τοποθετημένο 73 cm από το στόχο, ενώ το δεύτερο έχει διάμετρο 1 mm και βρίσκεται 30 cm από το στόχο. Με αυτόν το τρόπο, η δέσμη καταλήγει στο στόχο με διαστάσεις περίπου ίση με $3 \times 3 \text{ mm}^2$.

Στο κέντρο του θαλάμου υπάρχει μια μονωμένη βάση που μπορούμε να τοποθετήσουμε μέχρι πέντε δείγματα. Η βάση αυτή μπορεί να μετακινηθεί κατακόρυφα και να περιστραφεί από 0° έως 180° , εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο την ακριβή ευθυγράμμιση του δείγματος με τη δέσμη.

Επιπλέον, στον θάλαμο έχει τοποθετηθεί ένα γωνιόμετρο υψηλής ακρίβειας ($0,1^\circ$), που δίνει τη δυνατότητα να τοποθετηθούν ταυτόχρονα έξι ανιχνευτές σε γωνιακές θέσεις με διαφορά 10° . Όσον αφορά την σύνδεση των ανιχνευτών,

γίνεται μέσω BNC βυσμάτων διέλευσης κενού, τα οποία μεταφέρουν τόσο τα σήματα όσο και την τάση λειτουργίας των ανιχνευτών.

Τέλος, ο θάλαμος διατηρείται σε υψηλό κενό, περίπου 10^{-6} mbar, με τη χρήση συνδυασμού περιστροφικής και στροβιλομοριακής αντλίας.



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης στη γραμμή των $+75^\circ$

2.3 Σύστημα Ανίχνευσης και Ηλεκτρονικά

Στο θάλαμο σκέδασης τοποθετήθηκαν έξι ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού (SSB), οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι σε γωνίες από 120° έως 170° , με βήμα 10° , και σε απόσταση 7.5 cm από τον στόχο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, υπήρξε βλάβη στον ανιχνευτή που βρισκόταν στη γωνία των 120° , με αποτέλεσμα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον συγκεκριμένο ανιχνευτή να μην χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.

Οι ανιχνευτές μονώθηκαν ηλεκτρικά από τα αλουμινένια τους στηρίγματα, χρησιμοποιώντας περιβλήματα από τεφλόν. Επιπλέον, για να μειωθεί η αζιμουθιακή γωνιακή αβεβαιότητα σε λιγότερο από $\pm 1.5^\circ$, τοποθετήθηκαν μπροστά από τους ανιχνευτές ορθογώνιες μάσκες τανταλίου με διαστάσεις $4 \times 8 \text{ mm}^2$. Για να περιοριστεί το υπόβαθρο που προκαλείται από τη σκέδαση σωματιδίων της δέσμης μέσα στον θάλαμο, μπροστά από κάθε ανιχνευτή τοποθετήθηκαν κυλινδρικοί σωλήνες αλουμινίου με εσωτερική διάμετρο 1.1 cm και μήκος 3.4 cm. Στη θέση των 170° , χρησιμοποιήθηκε ένας πιο κοντός σωλήνας, ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή στην εισερχόμενη δέσμη. Όλοι οι σωλήνες γειώθηκαν στον θάλαμο σκέδασης.

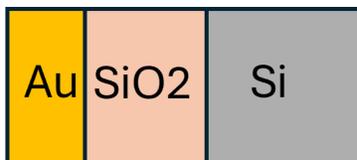


Εικόνα 2.3: Βάση στήριξης, μάσκα Ta και σωλήνας Al ανιχνευτών

Οι ανιχνευτές είχαν πάχος μεταξύ 1500 και 2000 μm , εξασφαλίζοντας έτσι την πλήρη απορρόφηση της ενέργειας ακόμα και των πιο ενεργητικών σωματιδίων. Το σύστημα συλλογής των δεδομένων βασίστηκε στη μονάδα MSI-8 της Mesytec, η οποία περιλαμβάνει οκτώ ξεχωριστά κανάλια, καθένα με δικό του προενισχυτή και διαμορφωτή. Κάθε κανάλι μπορούσε να ρυθμιστεί με ακρίβεια, προσφέροντας ξεχωριστή τάση πόλωσης στον αντίστοιχο ανιχνευτή μέσω μιας μονάδας τροφοδοσίας υψηλής τάσης. Η μετατροπή και ανάλυση των σημάτων γινόταν με ιδιαίτερη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας διπλή διάταξη ADC και πολυκαναλικού αναλυτή (MCA), παράγοντας με αυτό το τρόπο φάσματα υψηλής ανάλυσης με 2048 διακριτά κανάλια.

2.4 Χαρακτηριστικά στόχου

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις των διαφορικών ενεργών διατομών αγοράστηκε από την εταιρία ACS Material και αποτελούταν από 2 στρώματα, το πρώτο στρώμα αποτελούταν από διοξείδιο του πυριτίου (περίπου στα 300 nm) ενώ το δεύτερο από ένα παχύ υπόστρωμα καθαρού πυριτίου. Για λόγους κανονικοποίησης, που θα αναφερθούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο, εναποτέθηκε στην επιφάνεια του στόχου ένα λεπτό στρώμα χρυσού (~ 3 nm). Η εναπόθεση του στρώματος χρυσού έγινε μέσω sputtering στο RUBION.



Εικόνα 2.4: Σχήμα του στόχου της παρούσας μελέτης

2.5 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή

Σημαντικό κομμάτι που αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι ο προσδιορισμός της πραγματικής ενέργειας της δέσμης όταν αυτή χτυπάει το στόχο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ενέργεια της δέσμης καθορίζεται μέσω της ρύθμισης του μαγνητικού πεδίου του analyzer, το οποίο προσδιορίζεται μέσω συστήματος πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR). Παρόλα αυτά, αυτός ο μαγνήτης έχει κάποια παραμένουσα μαγνήτιση με αποτέλεσμα να πρέπει να λάβουμε υπόψη μια διόρθωση ώστε να προσδιορίσουμε την πραγματική ενέργεια της δέσμης. Επιπλέον, η ενέργεια της δέσμης δεν είναι μονοενεργειακή, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις γύρω από την κεντρική τιμή της, οι οποίες περιγράφονται από μια γκαουσιανή κατανομή και ονομάζεται ripple.

Ο τύπος που αφορά την διόρθωση στην ενέργεια της δέσμης είναι ο εξής:

$$E' = m(\sqrt{1 + (\frac{gB}{Km})^2} - 1)$$

Τα αντίστοιχα μεγέθη της παραπάνω σχέσης είναι:

m: Μάζα σωματιδίου δέσμης

q : Φορτίο της δέσμης

B : Μαγνητικό Πεδίο NMR

K : Σταθερά μαγνήτισης

Για την διόρθωση της ενέργειας της δέσμης το μόνο ζητούμενο είναι η μαγνητική σταθερά K. Η μαγνητική σταθερά K, καθώς και το ripple της δέσμης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία, έχουν προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια στο πλαίσιο μίας μεταπτυχιακής εργασίας [5] και έχουν επίσης επιβεβαιωθεί σε πιο πρόσφατες μελέτες [28].

3 Ανάλυση Δεδομένων

3.1 Διαφορική ενεργός διατομή

Η διαφορική ενεργός διατομή μίας αντίδρασης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) = \frac{Y}{Q * N_t * \Delta\Omega} \quad (3.1.1)$$

Ο τύπος αποτελείται από τα αντίστοιχα μεγέθη:

Y : Αριθμός ανιχνευόμενων σωματιδίων

Q : Ολικό φορτίο δέσμης που προσέκρουσε στο στόχο

N_t : Πάχος στόχου σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας

$\Delta\Omega$: Στερεά γωνία ανίχνευσης

Για τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής μέσω της Σχέσης (3.1.1) απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός του φορτίου της δέσμης Q καθώς και της στερεάς γωνίας ανίχνευσης $\Delta\Omega$, μεγέθη των οποίων η μέτρηση συνήθως συνοδεύεται από αυξημένη αβεβαιότητα, κάτι που οδηγεί σε σχετικά μεγάλα σφάλματα στις τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής. Για να περιοριστούν οι αβεβαιότητες στις υπολογιζόμενες διαφορικές ενεργές διατομές, εναποτέθηκε στον στόχο ένα λεπτό στρώμα χρυσού. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή μιας σχετικής μεθόδου για τον προσδιορισμό της διαφορικής ενεργού διατομής της υπό εξέταση αντίδρασης, η οποία βασίζεται στην ελαστική σκέδαση στο χρυσό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διαίρεσης κατά μέλη της διαφορικής ενεργού διατομής της υπό μελέτη αντίδρασης με την διαφορική ενεργό διατομή της ελαστικής σκέδασης του χρυσού και προκύπτει η ακόλουθη Σχέση (3.1.2) :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) = \frac{d\sigma_{Au}}{d\Omega}(E, \theta) * \frac{Y_X * N_{Au}}{Y_{Au} * N_{^{16}\text{O}}} \quad (3.1.2)$$

Όπου Y_X και Y_{Au} είναι αντίστοιχα ο αριθμός των γεγονότων στις κορυφές της υπό μελέτη αντίδρασης και της ελαστικής σκέδασης στον χρυσό, ενώ N_{Au} και $N_{^{16}\text{O}}$ είναι οι επιφανειακές πυκνότητες του Au και του ^{16}O , αντίστοιχα. Το αντίστοιχο σφάλμα υπολογίστηκε μέσω του τύπου διάδοσης σφαλμάτων.

Η επιλογή του χρυσού έγινε με βάση το γεγονός ότι είναι ένα στοιχείο με μεγάλο ατομικό αριθμό και κατά συνέπεια η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης στο χρυσό, στις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν οι παρούσες μετρήσεις, ακολουθεί τον τύπο του Rutherford:

$$\frac{d\sigma_{Ruth}}{d\Omega}(E, \theta) = 5.18 \cdot 10^6 \left(\frac{Z_1 Z_2}{E(\text{keV})} \right)^2 \frac{[(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta) + M_2 \cos \theta]^2}{M_2 \sin^4 \theta (M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{0.5}} \quad (3.1.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, E είναι η ενέργεια της δέσμης, M_1 και Z_1 η μάζα και ο ατομικός αριθμός του σωματιδίου της δέσμης — στη περίπτωση μας το ^3He , M_2 και Z_2 η μάζα και ο ατομικός αριθμός του πυρήνα στόχου — στην περίπτωση μας το ^{197}Au — και θ η γωνία σκέδασης.

Επίσης, κάτι πολύ σημαντικό που αφορά την αλληλεπίδραση της δέσμης με το χρυσό είναι ότι για την ελαστική σκέδαση Rutherford [9] θα χρειαστεί να λάβουμε υπόψιν και έναν διορθωτικό παράγοντα, πιο συγκεκριμένα τον παράγοντα L' Ecuycer [22]. Αυτός ο παράγοντας προκύπτει από το γεγονός ότι η κλασική εξίσωση Rutherford βασίζεται στην υπόθεση ότι το προσπίπτον φορτισμένο σωματίο αλληλεπιδρά με το πλήρες πυρηνικό φορτίο. Στην πραγματικότητα, όμως, οι πυρήνες του στόχου περιβάλλονται από τα ατομικά ηλεκτρόνια, τα οποία θωρακίζουν το πυρηνικό φορτίο σε μεγάλες αποστάσεις, με αποτέλεσμα το προσπίπτον σωματίδιο να 'αισθάνεται' μειωμένο δυναμικό Coulomb από τον πυρήνα. Ο διορθωτικός παράγοντας L' Ecuycer δίνεται από τη σχέση:

$$F_{L'Ecuycer} = 1 - \frac{0.04873 * Z_1 * Z_2^{4/3}}{E_{CM}} \quad (3.1.4)$$

Όπου E_{CM} είναι η ενέργεια της δέσμης στο σύστημα κέντρου μάζας.

Τελικά, συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.1.3) και (3.1.4), η τελική σχέση για την πειραματική διαφορική ενεργό διατομή της ελαστικής σκέδασης στο χρυσό είναι:

$$\frac{d\sigma_{Au}}{d\Omega}(E, \theta) = F_{L'Ecuycer} * \frac{d\sigma_{Ruth}}{d\Omega}(E, \theta) \quad (3.1.5)$$

3.2 Απώλεια ενέργειας στο στόχο

Για λεπτούς στόχους, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στις παρούσες μετρήσεις, θεωρούμε ότι η αντίδραση πραγματοποιήθηκε στη μέση του στόχου. Συνεπώς, για τον υπολογισμό της ενέργειας της δέσμης πρέπει να συνυπολογίσουμε την απώλεια ενέργειας των σωματιδίων της δέσμης κατά τη διέλευσή τους μέσα από το στρώμα Au καθώς και από το μισό πάχος του στρώματος SiO_2 . Αυτή η απώλεια ενέργειας προκύπτει κυρίως από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων της δέσμης με τα ηλεκτρόνια του στόχου και περιγράφεται από την ισχύ ανάσχεσης. Το κάθε στρώμα του στόχου ανάλογα με το πάχος του και τα στοιχεία που το συνθέτουν προκαλεί και μια διαφορετική απώλεια ενέργειας στη δέσμη. Για την συγκεκριμένη μελέτη, η ενέργεια που χάνεται από αυτά τα στρώματα είναι της τάξεως των keV ($\sim 3\text{keV}$ για το στρώμα Au και $\sim 20\text{-}30\text{keV}$ για το μισό στρώμα SiO_2). Για τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας έγινε χρήση του κώδικα SRIM2013 [20].

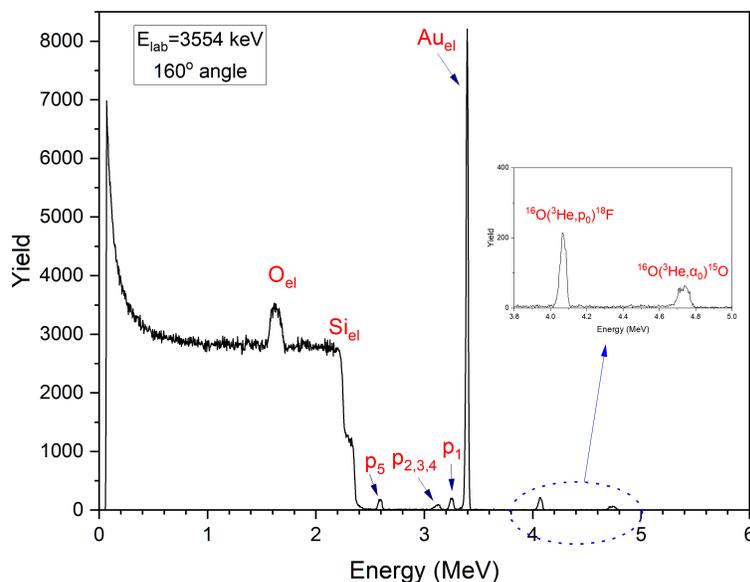
Τέλος, για την ακρίβεια στην ενέργεια της δέσμης, εκτός από το ripple, που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ενεργειακή διασπορά (straggling) της δέσμης, δηλαδή η κατανομή της απώλειας ενέργειας, καθώς η ενέργεια που χάνει κάθε σωματίδιο κατά τη διέλευσή του από το ίδιο πάχος υλικού δεν είναι σταθερή. Αυτός ο παράγοντας υπολογίστηκε με το πρόγραμμα SIMNRA [2] και με βάση το μοντέλο των Chu και Yang [21].

3.3 Εμβαδομέτρηση κορυφών

Σημαντικό κομμάτι της ανάλυσης των δεδομένων είναι ο προσδιορισμός του αριθμού των γεγονότων στις κορυφές των υπό μελέτη αντιδράσεων Y_X και της ελαστικής σκέδασης στον χρυσό Y_{Au} .

Η συγκεκριμένη ανάλυση έγινε μέσω του προγράμματος TV [25]. Σε κάθε φάσμα, αφαιρέθηκε αρχικά το υπόβαθρο, το οποίο θεωρήθηκε σε κάθε περίπτωση γραμμικό, και στη συνέχεια έγινε ολοκλήρωση των κορυφών που αντιστοιχούν στις αντιδράσεις $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ καθώς και στην ελαστική σκέδαση στο χρυσό.

Τα φάσματα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος παρουσιάζουν τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Παρατηρώντας το φάσμα προσεχτικά είναι διακριτό το γεγονός ότι αποτελείται από μια πληθώρα κορυφών. Οι κορυφές αυτές προέρχονται από δύο διαφορετικούς τύπους αλληλεπιδράσεων: στην πρώτη περίπτωση από ελαστική σκέδαση και στη δεύτερη από πυρηνικές αντιδράσεις.



Εικόνα 3.1: Φάσμα στην γωνία 160° με ενέργεια δέσμης $E_{lab} = 3600 \text{ keV}$.

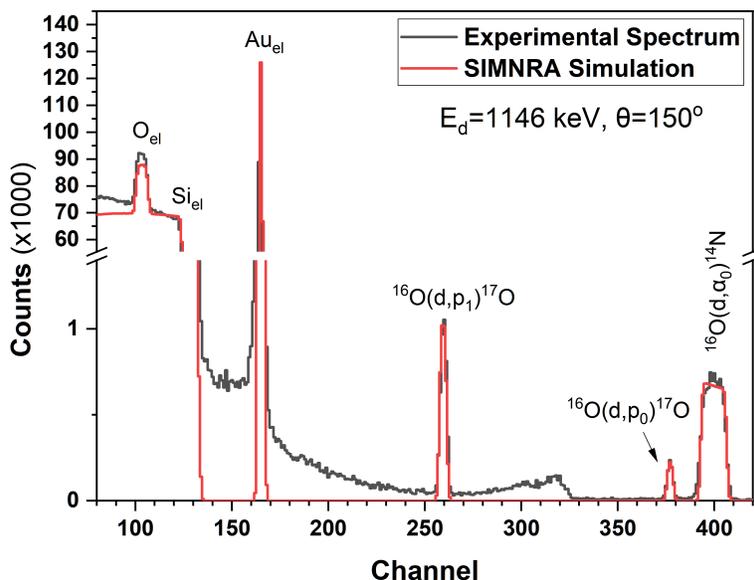
Οι κορυφές που αντιστοιχούν σε ελαστική σκέδαση έχουν ενέργειες που εξαρτώνται από τον μαζικό αριθμό του πυρήνα στόχου που πραγματοποιήθηκε η σκέδαση. Αυτό προκύπτει καθώς είναι αποτέλεσμα της κινηματικής μεταξύ 2 σωμάτων. Για την περίπτωση που έχουμε πυρηνικές αντιδράσεις, οι κορυφές παρατηρούνται σε ενέργειες που καθορίζονται από την τιμή Q της κάθε αντίδρασης, η οποία είναι χαρακτηριστική της αντίδρασης. Με βάση τα παραπάνω, οι κορυφές που αντιστοιχούν σε αντιδράσεις μπορεί να εμφανίζονται απομονωμένες και σε περιοχές υψηλής ενέργειας του φάσματος, ακόμη και όταν προέρχονται από αντιδράσεις με ελαφρά στοιχεία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κορυφές των αντιδράσεων $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$, οι οποίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα (3.1), βρίσκονται απομονωμένες στο δεξιό τμήμα του φάσματος, όπου το υπόβαθρο είναι ιδιαίτερα χαμηλό.

Πριν από την εμβαδομέτρηση των κορυφών στα φάσματα, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση ενέργειας, ώστε να καταστεί δυνατή η αναγνώριση των παρατηρούμενων κορυφών. Η βαθμονόμηση βασίστηκε στις κορυφές της ελαστικής σκέδασης στον χρυσό και το οξυγόνο, των οποίων η ενέργεια υπολογίστηκε μέσω κινηματικής και πιο συγκεκριμένα με το πρόγραμμα catkin [4]. Η μετατροπή καναλιών σε ενέργεια έγινε με τη χρήση του προγράμματος TV [25], μέσω γραμμικής σχέσης.

3.4 Προσδιορισμός πάχους στόχου

Το τελευταίο μέγεθος που πρέπει να υπολογιστεί βάσει της Σχέσης (3.1.2) είναι ο λόγος του πάχους του χρυσού προς το πάχος του οξυγόνου $N_{\text{Au}}/N_{^{16}\text{O}}$. Για τον προσδιορισμό του συγκεκριμένου παράγοντα πραγματοποιήθηκε ένα επιπλέον πείραμα όπου ο στόχος μας ακτινοβολήθηκε με δέσμη δευτερίων ενέργειας $E_d=1150 \text{ keV}$ (όπου με βάση την διόρθωση του αναλυτή (2.5) αντιστοιχεί σε ενέργεια των 1146 keV). Η επιλογή της συγκεκριμένης δέσμης προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχουν αξιολογημένα δεδομένα [12, 13] για την ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(d, p_1)$, τα οποία, για γωνία ανίχνευσης $\theta=150^\circ$ και ενέργεια δέσμης 1146 keV, παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα [36] [37] [38] [39].

Στοχός μας είναι η δημιουργία ενός προσομοιωμένου φάσματος, το οποίο θα προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό το αντίστοιχο πειραματικό φάσμα του προαναφερόμενου πειράματος. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του προγράμματος SIMNRA [2], το οποίο παρέχει τη δυνατότητα διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών τόσο του στόχου (όπως τη διαστρωμάτωση, το πάχος και τη στοιχειακή περιεκτικότητα κάθε στρώματος) όσο και της πειραματικής διάταξης (όπως το φορτίο της δέσμης, τη στερεά γωνία του ανιχνευτή και την ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή).



Εικόνα 3.2: Πειραματικό (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένο (κόκκινη γραμμή) φάσμα για τον προσδιορισμό του πάχους του στόχου

Στην Εικόνα (3.2) παρατηρείται το πειραματικό φάσμα (μαύρη γραμμή) και το αντίστοιχο προσομοιωμένο φάσμα (κόκκινη γραμμή). Είναι άξιο αναφοράς ότι στο πειραματικό φάσμα που συλλέχθηκε, εκτός από τις διάφορες κορυφές που προέρχονταν από την αλληλεπίδραση της δέσμης δευτερίων με το οξυγόνο, τον χρυσό και το πυρίτιο, παρατηρήθηκαν και κορυφές που προέρχονταν από την αλληλεπίδραση της δέσμης με άνθρακα, ο οποίος, όπως διαπιστώθηκε από την παρούσα ανάλυση, αποτελούσε πρόσμιξη στον στόχο μας.

Η προσομοίωση βασίστηκε στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση της κορυφής της αντίδρασης $^{16}\text{O}(d, p_1)$, η οποία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι η καταλληλότερη λόγω της καλής συμφωνίας μεταξύ αξιολογημένων και πειραματικών δεδομένων [36] [37] [38] [39]. Διαπιστώθηκε ότι το εμβαδόν της πειραματικής κορυφής αποκλίνει λιγότερο από 1.5% σε σχέση με το αντίστοιχο του προσομοιωμένου φάσματος, γεγονός που υποδεικνύει ιδιαίτερα καλή συμφωνία.

Τελικά, με βάση τη συγκεκριμένη προσομοίωση, ο λόγος των παχών προσδιορίστηκε ίσος με $N_{\text{Au}}/N_{^{16}\text{O}} = 0.02356 \pm 0.00025$. Το παραπάνω σφάλμα περιλαμβάνει τα στατιστικά σφάλματα στην ολοκλήρωση των κορυφών της ελαστικής σκέδασης στο χρυσό και της αντίδρασης $^{16}\text{O}(d, p_1)$. Για τις διαφορικές ενεργές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση δεν θεωρήθηκε σφάλμα, καθώς για την ελαστική σκέδαση στο χρυσό χρησιμοποιήθηκαν οι διαφορικές ενεργές διατομές που υπολογίζονται αναλυτικά από τη σχέση σκέδασης του Rutherford, ενώ για την αντίδραση $^{16}\text{O}(d, p_1)$ χρησιμοποιήθηκαν οι διαφορικές ενεργές διατομές από την αξιολόγηση SigmaCalc [12]. Επιπλέον, η στερεά γωνία του ανιχνευτή και το φορτίο της δέσμης δεν υπεισέρχονται στον λόγο των παχών και, συνεπώς, δεν συμβάλλουν στο συνολικό σφάλμα.

4 Αποτελέσματα ενεργών διατομών

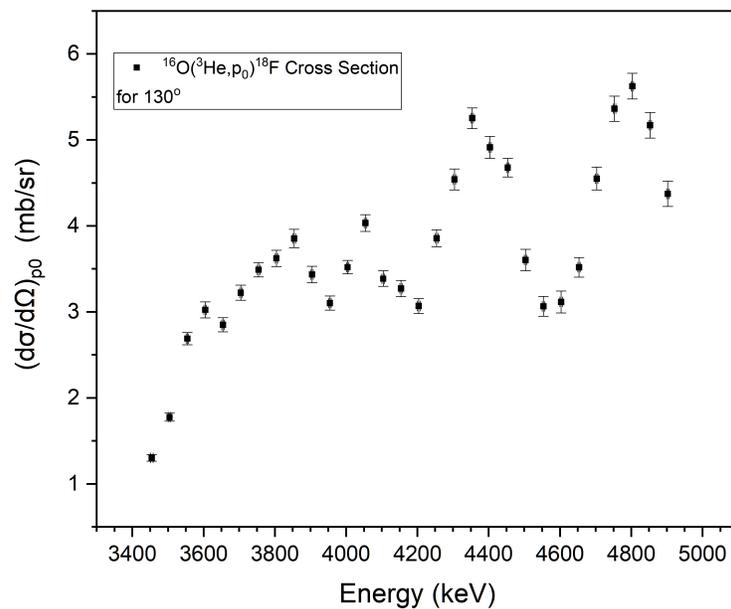
Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα για τις διαφορικές ενεργές διατομές των αντιδράσεων $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$. Οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων παρατίθενται στα Σχήματα 4.1 – 4.10, ενώ οι αντίστοιχες τιμές δίνονται σε πίνακες στο τέλος του κεφαλαίου.

Οι διαφορικές ενεργές διατομές της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)^{18}\text{F}$ προσδιορίστηκαν για 31 ενέργειες δέσμης μεταξύ ~ 3500 keV και ~ 5000 keV, με βήμα 50 keV, σε 5 γωνίες αντίχενυσης από 130° έως 170° , με βήμα 10° . Εξαιρέση αποτελεί η γωνία των 130° , στα ~ 5000 keV που δεν ήταν εφικτή η ανάλυση. Για την αντίδραση $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)^{15}\text{O}$ μετρήθηκαν τιμές διαφορικών ενεργών διατομών στις ίδιες γωνίες αντίχενυσης με το ίδιο βήμα. Οι ενέργειες που μελετήθηκαν διαφέρουν με βάση την γωνία αντίχενυσης καθώς δεν ήταν δυνατή η ανάλυση των φασμάτων.

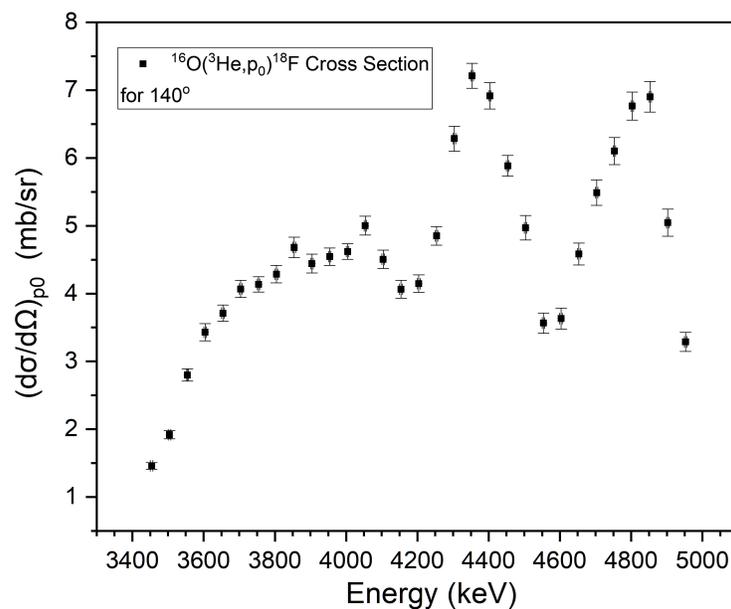
Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα (3.1), για τον υπολογισμό των διαφορικών ενεργών διατομών χρησιμοποιήθηκε η Σχέση (3.1.2), ενώ για τις τιμές της ενέργειας εφαρμόστηκαν οι απαραίτητες διορθώσεις, που περιγράφονται στις ενότητες (2.5) και (3.2).

Η απώλεια ενέργειας των σωματιδίων της δέσμης εντός του στόχου υπολογίστηκε μέσω του κώδικα SRIM2013 [20] και βρέθηκε να κυμαίνεται από 23 έως 29 keV (2 – 3 keV στο στρώμα Au και 21 – 26 keV στο μισό πάχος του στρώματος SiO_2). Η αβεβαιότητα στην ενέργεια λόγω της ενεργειακής διασποράς (energy straggling) των σωματιδίων της δέσμης εντός του στόχου εκτιμήθηκε με βάση το μοντέλο των Chu και Yang [21] και βρέθηκε περίπου ίση με 4 keV. Αντίστοιχα, οι διορθώσεις στην ενέργεια που σχετίζονται με τον αναλυτή του επιταχυντή κυμάνθηκαν μεταξύ 18–25 keV, ενώ η αντίστοιχη ενεργειακή αβεβαιότητα που οφείλεται στο ripple είναι μικρή (~ 0.4 keV) και σχεδόν αμελητέα σε σύγκριση με το straggling της δέσμης. Με βάση τα παραπάνω, το συνολικό σφάλμα στην ενέργεια της δέσμης καθορίζεται τελικά από ενεργειακή διασπορά της δέσμης μέσα στον στόχο.

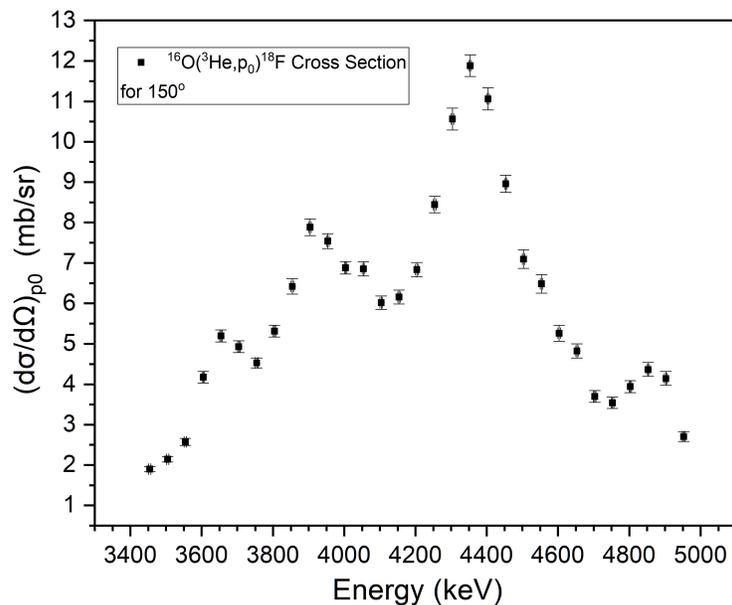
Το ολικό σφάλμα της διαφορικής ενεργού διατομής υπολογίστηκε με βάση τον τύπο διάδοσης σφαλμάτων και βρέθηκε μικρότερο από περίπου 3.8 % για την αντίδραση $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ και μικρότερο από περίπου 3.9 % για την αντίδραση $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$. Το συνολικό σφάλμα περιλαμβάνει το στατιστικό σφάλμα που προκύπτει από την ολοκλήρωση των κορυφών και κυμαίνεται μεταξύ 1% και 2.8%, καθώς και την αβεβαιότητα στον λόγο των παχών του χρυσού προς το οξυγόνο, η οποία, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα (3.4), ισούται με περίπου 1.1%.



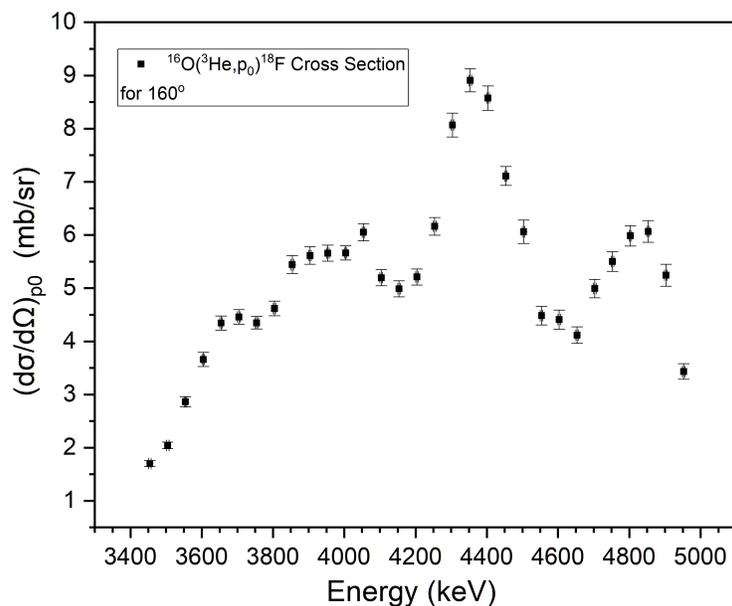
Σχήμα 4.1: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ σε γωνία 130° .



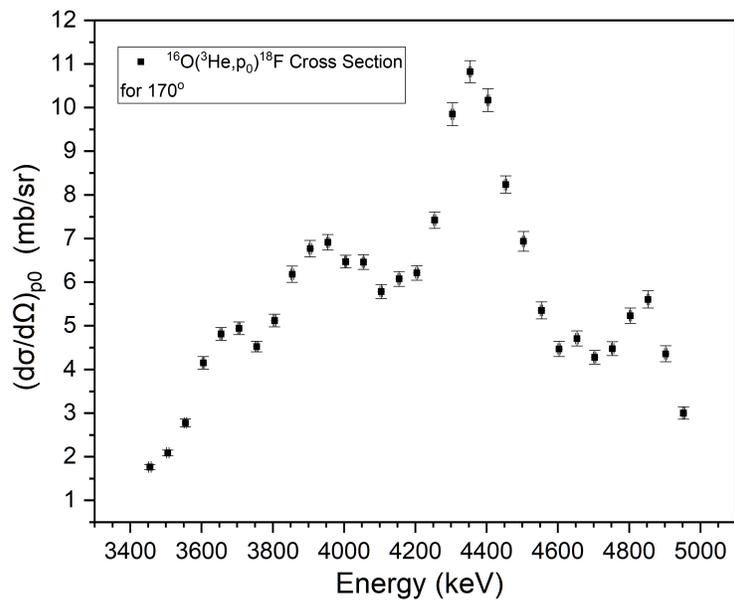
Σχήμα 4.2: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ σε γωνία 140° .



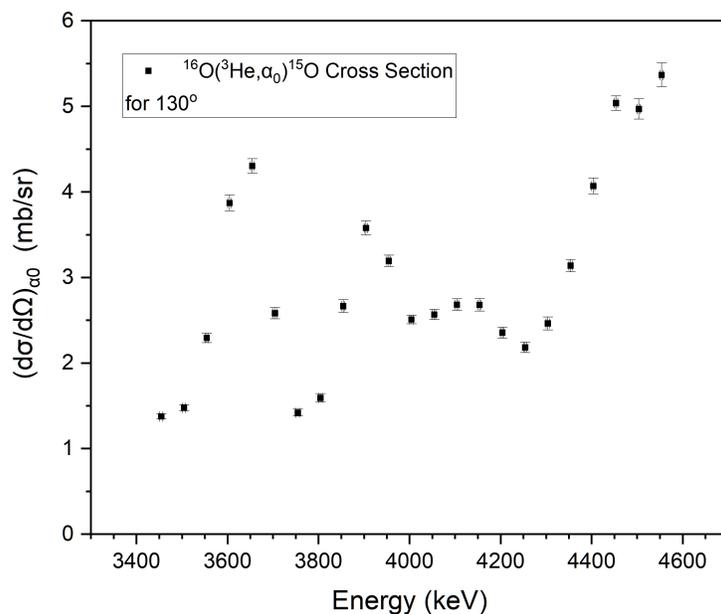
Σχήμα 4.3: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ σε γωνία 150° .



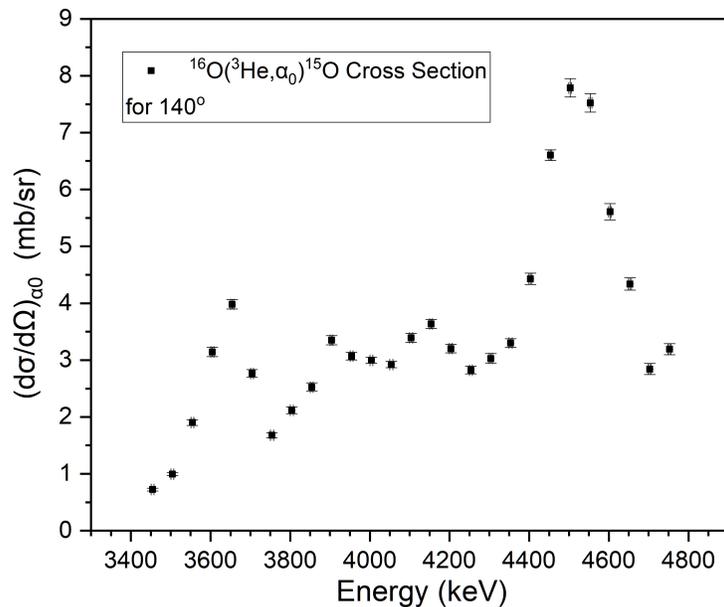
Σχήμα 4.4: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ σε γωνία 160° .



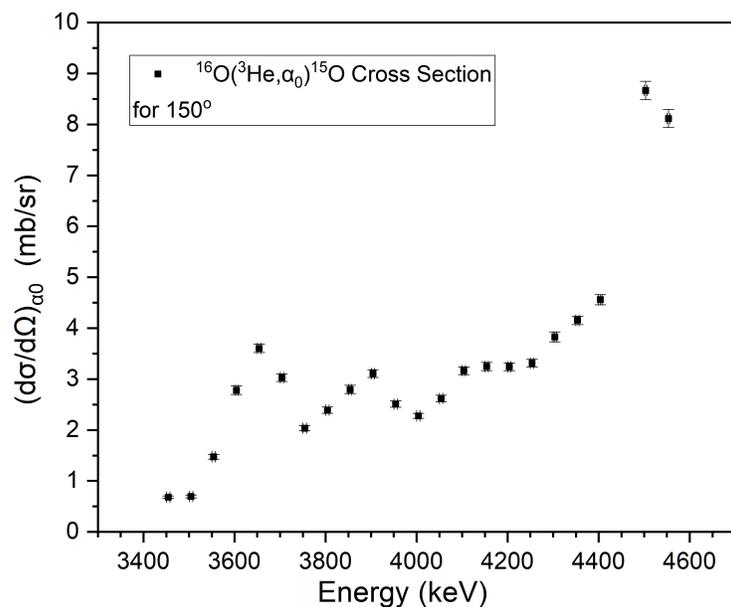
Σχήμα 4.5: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ σε γωνία 170° .



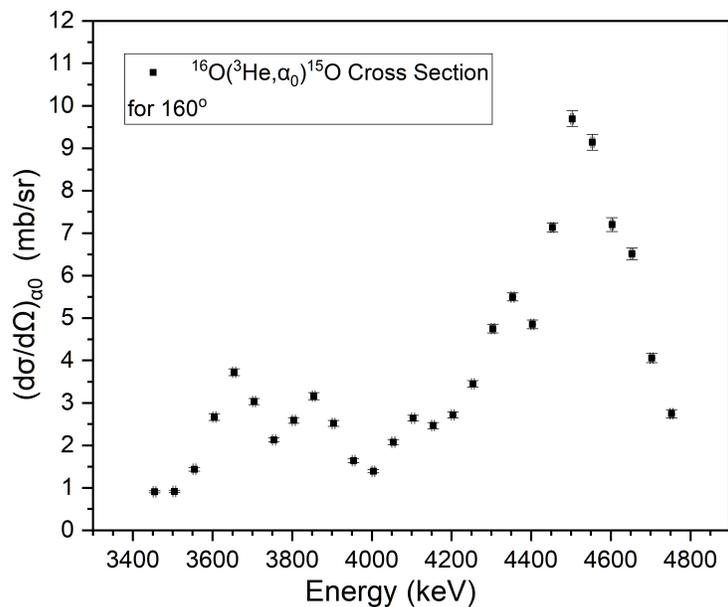
Σχήμα 4.6: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ σε γωνία 130° .



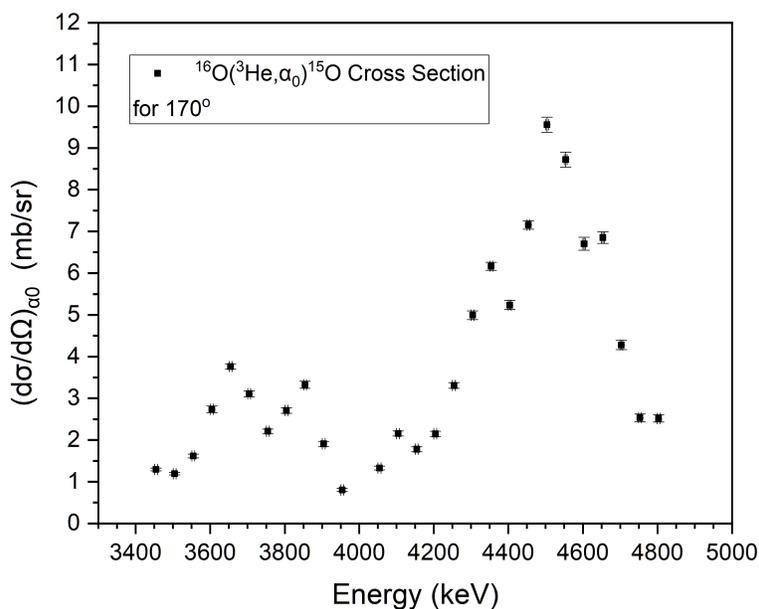
Σχήμα 4.7: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ σε γωνία 140° .



Σχήμα 4.8: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ σε γωνία 150° .



Σχήμα 4.9: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ σε γωνία 160° .



Σχήμα 4.10: Διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ σε γωνία 170° .

Τα τελικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1 έως 4.10 καταδεικνύουν την παρουσία συντονισμών στις διαφορικές ενεργές διατομές των δύο υπό μελέτη αντιδράσεων. Οι συντονισμοί αυτοί ενδεχομένως οφείλονται στη διέγερση συγκεκριμένων ενεργειακών καταστάσεων του σύνθετου πυρήνα ^{19}Ne . Για τον προσδιορισμό των ενεργειακών επιπέδων του σύνθετου πυρήνα χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων NuDat 3 [6].

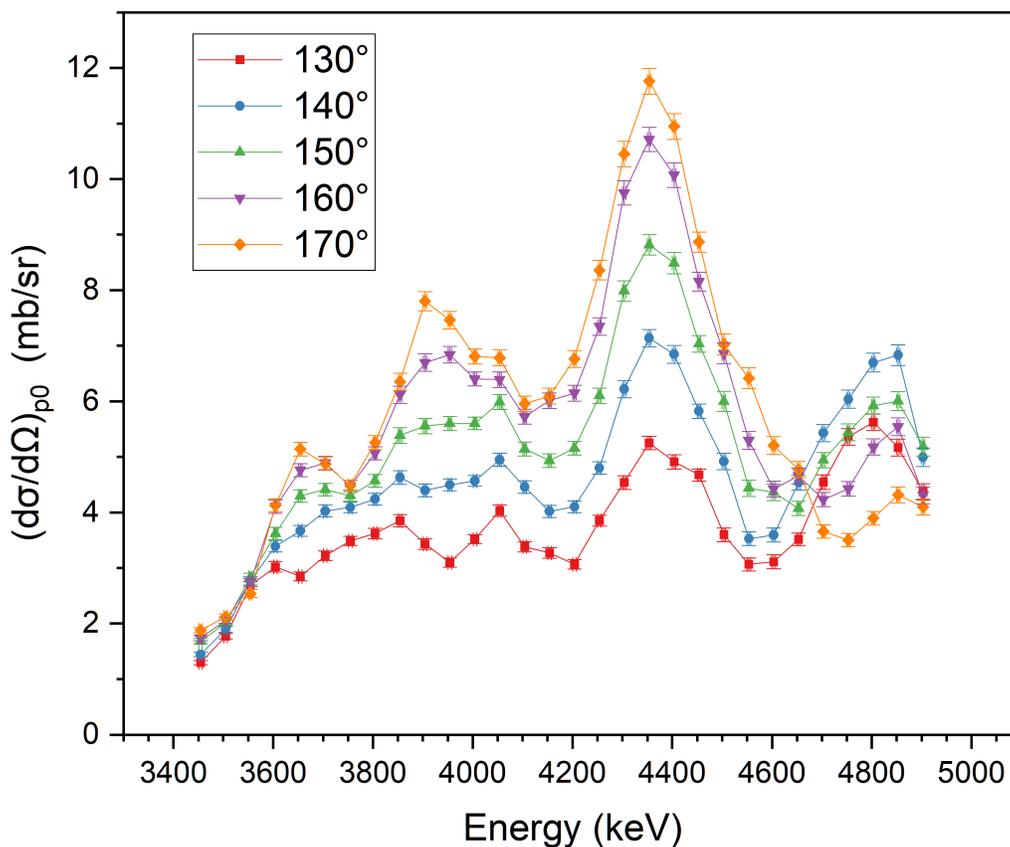
Αρχικά μελετήθηκαν οι συντονισμοί που αφορούν την αντίδραση $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$. Η Q-value της συγκεκριμένης αντίδρασης ισούται με 2032 keV. Ο πρώτος διακριτός συντονισμός που παρατηρείται στα Σχήματα 4.1-4.5 αντιστοιχεί σε ενέργεια δέσμης ίση με περίπου ~ 3650 keV και με βάση την βιβλιογραφία αντιστοιχεί σε ένα ενεργειακό επίπεδο του σύνθετου πυρήνα με ενέργεια 5092 keV και αποτελεί το 16° επίπεδο. Έπειτα, στην ενέργεια των ~ 4350 keV υπάρχει ένας συντονισμός που αντιστοιχεί στο 57° ενεργειακό επίπεδο του σύνθετου πυρήνα με ενέργεια 12230 keV. Τέλος, ο συντονισμός στα ~ 4850 keV αντιστοιχεί στην 59° στάθμη ενέργειας 12560 keV.

Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη ανάλυση για την αντίδραση $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$. Με την μόνη διαφορά να είναι η τιμή Q που στην συγκεκριμένη αντίδραση ισούται με 4914 keV. Ο πρώτος διακριτός συντονισμός παρατηρείται στην ενέργεια των ~ 3650 keV όπου αντιστοιχεί στο 37° ενεργειακό επίπεδο του σύνθετου πυρήνα ^{19}Ne με ενέργεια 7991 keV. Για ενέργεια δέσμης ~ 4350 keV, όπου παρατηρείται ένας δεύτερος συντονισμός, αυτός αντιστοιχεί στο 41° επίπεδο του σύνθετου πυρήνα ^{19}Ne με ενέργεια 8523 keV. Τέλος, ο συντονισμός που παρατηρείται γύρω στα ~ 4500 keV αντιστοιχεί στην 42° διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση του σύνθετου πυρήνα.

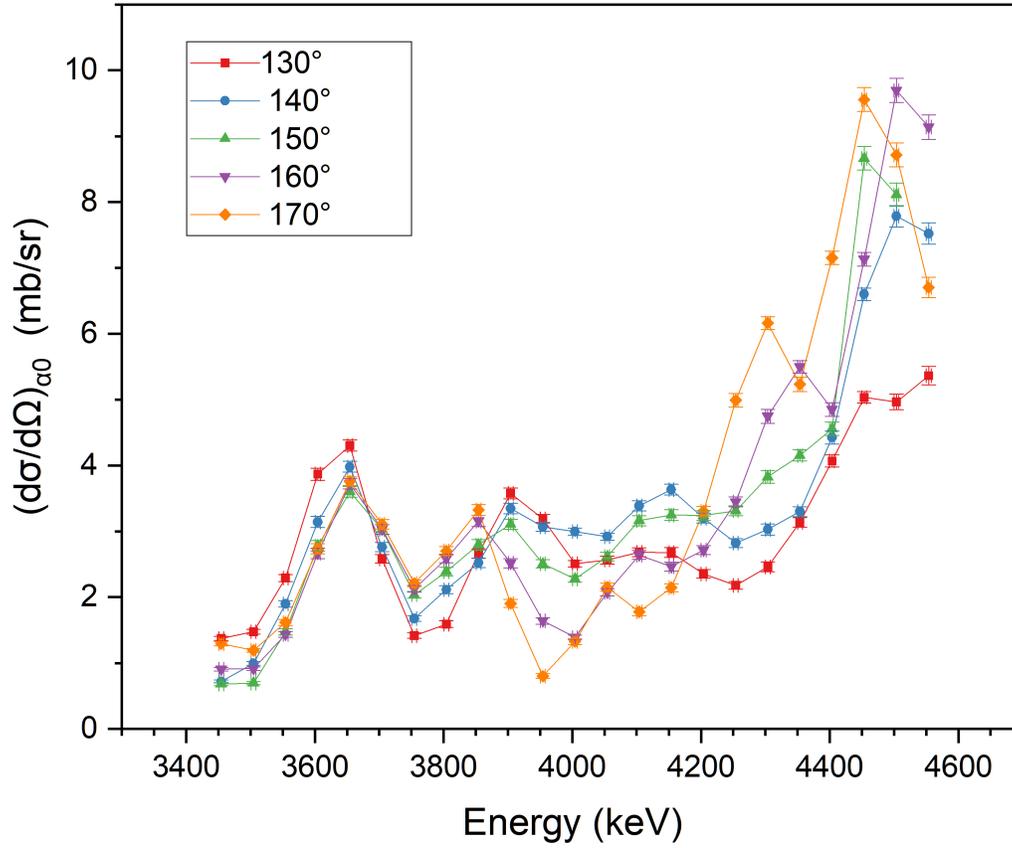
Στα Σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται οι γωνιακές κατανομές των διαφορικών ενεργών διατομών των αντιδράσεων $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$, αντίστοιχα. Με βάση το Σχήμα 4.11, μεταξύ των ενεργειών ~ 3450 keV και ~ 3600 keV υπάρχει πολύ μικρή γωνιακή εξάρτηση. Αντίθετα, στο ενεργειακό εύρος μεταξύ των 3600 keV και 4600 keV παρατηρείται μια έντονη γωνιακή εξάρτηση όπου οι διαφορικές ενεργές διατομές αυξάνονται καθώς αυξάνεται η γωνία. Εξαιρέση αποτελεί το ενεργειακό εύρος ~ 4650 – 4950 keV, στο οποίο η παραπάνω τάση δεν ισχύει, καθώς οι μεγαλύτερες γωνίες δεν παρουσιάζουν απαραίτητα μεγαλύτερες ενεργές διατομές. Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί ότι, με εξαίρεση το εύρος 4650–4950 keV, οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών για τις γωνίες των 170° και 160° είναι αρκετά κοντά σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες. Επίσης, στην ενέργεια των ~ 3955 keV η τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής στη γωνία των 170° είναι σχεδόν 2.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις 130° και αντιστοιχεί στη μέγιστη παρατηρούμενη διαφορά μεταξύ

των τιμών στο Σχήμα 4.11.

Η γωνιακή κατανομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12, όπου παρατηρείται ένα ενεργειακό εύρος μεταξύ των ~ 3450 keV και ~ 3750 keV, στο οποίο η γωνιακή εξάρτηση είναι αρκετά ασθενής. Πέρα από το εύρος αυτό, παρατηρείται σχετικά έντονη γωνιακή εξάρτηση, η οποία δεν παρουσιάζει κάποια σταθερή τάση ως προς τη μεταβολή των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών με τη γωνία. Επιπλέον, στην ενέργεια των ~ 3955 keV η τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής της γωνίας των 170° είναι σχεδόν τετραπλάσια από την αντίστοιχη στις 130° και αντιστοιχεί στη μέγιστη παρατηρούμενη διαφορά μεταξύ των τιμών στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.11: Γωνιακή κατανομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$.



Σχήμα 4.12: Γωνιακή κατανομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$.

$d\sigma/d\Omega_{c0}$ (mb/sr)												
Energy	Energy Error	130°		140°		150°		160°		170°		
		C.S+Error										
3454	4	1.38	0.04	0.72	0.03	0.68	0.02	0.91	0.03	1.29	0.034	
3504	4	1.48	0.04	1.00	0.03	0.70	0.03	0.92	0.030	1.19	0.034	
3554	4	2.30	0.06	1.90	0.05	1.48	0.05	1.44	0.05	1.62	0.05	
3604	4	3.87	0.101	3.14	0.092	2.78	0.09	2.67	0.09	2.74	0.08	
3654	4	4.31	0.09	3.98	0.092	3.60	0.091	3.72	0.090	3.76	0.08	
3704	4	2.58	0.07	2.76	0.08	3.03	0.080	3.03	0.080	3.11	0.080	
3754	4	1.42	0.04	1.68	0.05	2.04	0.06	2.13	0.06	2.21	0.06	
3804	4	1.59	0.05	2.12	0.063	2.39	0.07	2.59	0.071	2.71	0.072	
3854	4	2.67	0.08	2.52	0.08	2.80	0.09	3.16	0.091	3.33	0.092	
3904	4	3.58	0.09	3.35	0.09	3.11	0.084	2.52	0.08	1.91	0.062	
3954	4	3.20	0.07	3.07	0.074	2.51	0.07	1.64	0.052	0.80	0.04	
4004	4	2.51	0.06	3.00	0.061	2.28	0.053	1.39	0.041			
4054	4	2.57	0.07	2.92	0.062	2.62	0.070	2.08	0.062	1.33	0.05	
4104	4	2.68	0.07	3.39	0.084	3.16	0.083	2.64	0.073	2.16	0.064	
4154	4	2.68	0.08	3.64	0.090	3.25	0.09	2.47	0.074	1.78	0.061	
4204	4	2.36	0.07	3.20	0.082	3.24	0.084	2.72	0.08	2.15	0.07	
4254	4	2.18	0.06	2.82	0.073	3.31	0.082	3.45	0.083	3.31	0.08	
4304	4	2.46	0.08	3.03	0.09	3.83	0.11	4.75	0.12	4.99	0.12	
4353	4	3.14	0.08	3.30	0.081	4.15	0.09	5.50	0.111	6.17	0.12	
4403	4	4.07	0.102	4.43	0.11	4.56	0.112	4.85	0.12	5.23	0.121	
4453	4	5.04	0.101	6.60	0.12			7.13	0.13	7.16	0.13	
4503	4	4.97	0.130	7.79	0.180	8.67	0.202	9.69	0.211	9.56	0.21	
4554	4	5.37	0.150	7.52	0.180	8.12	0.20	9.14	0.210	8.72	0.204	
4603	4			5.61	0.15			7.20	0.181	6.70	0.171	
4653	4			4.34	0.12			6.51	0.153	6.85	0.16	
4703	4			2.84	0.102			4.05	0.11	4.28	0.121	
4753	4			3.19	0.103			2.74	0.100	2.54	0.094	
4803	4									2.52	0.090	

dσ/dΩ _{p0} (mb/sr)												
Energy	Energy Error	130°		140°		150°		160°		170°		
		C.S+Error										
3454	4	1.30	0.034	1.44	0.04	1.69	0.041	1.74	0.042	1.88	0.043	
3504	4	1.78	0.042	1.90	0.044	2.02	0.05	2.06	0.05	2.12	0.05	
3554	4	2.69	0.06	2.77	0.07	2.83	0.070	2.74	0.07	2.55	0.064	
3604	4	3.02	0.09	3.40	0.10	3.62	0.101	4.11	0.11	4.13	0.11	
3654	4	2.85	0.07	3.67	0.09	4.30	0.10	4.76	0.10	5.14	0.11	
3704	4	3.22	0.080	4.03	0.094	4.41	0.101	4.89	0.11	4.88	0.11	
3754	4	3.49	0.072	4.09	0.081	4.30	0.08	4.48	0.09	4.48	0.09	
3804	4	3.62	0.084	4.24	0.094	4.57	0.100	5.07	0.11	5.26	0.11	
3854	4	3.85	0.10	4.63	0.112	5.39	0.12	6.12	0.134	6.36	0.14	
3904	4	3.44	0.09	4.40	0.101	5.56	0.120	6.70	0.14	7.81	0.15	
3954	4	3.10	0.074	4.50	0.093	5.60	0.11	6.84	0.12	7.46	0.131	
4004	4	3.52	0.07	4.57	0.082	5.61	0.094	6.41	0.103	6.81	0.11	
4054	4	4.03	0.09	4.95	0.10	5.99	0.12	6.39	0.12	6.79	0.124	
4104	4	3.39	0.082	4.46	0.10	5.14	0.110	5.73	0.12	5.96	0.12	
4154	4	3.27	0.09	4.02	0.10	4.94	0.111	6.01	0.124	6.10	0.124	
4204	4	3.07	0.08	4.11	0.094	5.16	0.11	6.15	0.121	6.76	0.13	
4254	4	3.86	0.09	4.80	0.10	6.10	0.12	7.35	0.134	8.36	0.15	
4304	4	4.54	0.110	6.22	0.134	7.99	0.161	9.75	0.184	10.45	0.193	
4353	4	5.25	0.10	7.14	0.13	8.82	0.153	10.72	0.18	11.76	0.19	
4403	4	4.91	0.113	6.85	0.140	8.49	0.164	10.07	0.19	10.95	0.20	
4453	4	4.68	0.094	5.83	0.11	7.04	0.13	8.16	0.14	8.87	0.15	
4503	4	3.60	0.12	4.92	0.14	6.00	0.17	6.87	0.17	7.03	0.170	
4554	4	3.07	0.110	3.53	0.12	4.44	0.14	5.30	0.15	6.42	0.171	
4603	4	3.12	0.121	3.60	0.121	4.37	0.140	4.42	0.13	5.21	0.150	
4653	4	3.52	0.11	4.54	0.122	4.08	0.12	4.66	0.130	4.78	0.134	
4703	4	4.55	0.122	5.43	0.141	4.94	0.13	4.24	0.12	3.66	0.111	
4753	4	5.36	0.132	6.04	0.15	5.45	0.14	4.43	0.121	3.51	0.11	
4803	4	5.63	0.134	6.70	0.150	5.92	0.140	5.18	0.132	3.90	0.113	
4853	4	5.17	0.14	6.83	0.17	6.01	0.153	5.55	0.15	4.32	0.133	
4903	4	4.37	0.14	5.00	0.154	5.19	0.16	4.31	0.143	4.10	0.13	
4952	4			3.25	0.111	3.40	0.114	2.97	0.114	2.68	0.10	

5 Έλεγχος αξιοπιστίας αποτελεσμάτων

5.1 Εισαγωγή

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα πειραματικών δεδομένων διαφορικών ενεργών διατομών πυρηνικών αντιδράσεων. Ωστόσο, σε πολλά από τα σετ δεδομένων που περιλαμβάνονται στις υπάρχουσες βιβλιοθήκες δεν έχει πραγματοποιηθεί συστηματικός έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking). Ο έλεγχος της αξιοπιστίας είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς αποτελεί τον βασικό τρόπο επαλήθευσης των προσδιοριζόμενων διαφορικών ενεργών διατομών με βάση ανεξάρτητα πειραματικά δεδομένα ή καθιερωμένες αναφορές.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο ίδιο εργαστήριο ένα ανεξάρτητο πείραμα με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν. Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας υψηλής καθαρότητας και 'απίρου' πάχους κρύσταλλος ZnO , ο οποίος ακτινοβολήθηκε με δέσμη ^3He ενέργειας 4600 keV (όπου με βάση την διόρθωση του αναλυτή (2.5) αντιστοιχεί σε ενέργεια των 4606 keV). Χρησιμοποιήθηκε η ίδια ανιχνευτική διάταξη με αυτήν που περιγράφεται στην ενότητα (2.3) και συλλέχθηκαν φάσματα για γωνίες ανίχνευσης 130° , 140° , 150° , 160° και 170° . Για κάθε φάσμα που συλλέχθηκε εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία με αυτήν που περιγράφεται στην ενότητα (3.4), δηλαδή επιχειρήθηκε η δημιουργία ενός προσομοιωμένου φάσματος που προσεγγίζει το πειραματικό. Η ουσιώδης διαφορά είναι ότι, στην παρούσα περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν οι διαφορικές ενεργές διατομές που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και οι τιμές που έχουν προσδιοριστεί στις εργασίες [26] και [27] για χαμηλότερες ενέργειες δέσμης (2200-3500 keV). Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SIMNRA (version 7.03) [2].

5.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Πειράματος

Για την κατάλληλη εφαρμογή της μεθόδου benchmarking είναι απαραίτητο να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις:

1. Η ακτινοβόληση του στόχου πρέπει να πραγματοποιείται σε ενέργειες δέσμης που καλύπτουν το εύρος των προς έλεγχο τιμών. Στην προκειμένη περίπτωση, οι μετρήσεις benchmarking πραγματοποιήθηκαν στα ~ 4600 keV, ενέργεια κατάλληλη για τον έλεγχο του συνόλου των τιμών που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία, αλλά και στις εργασίες [26] και [27], για τις

διαφορικές ενεργές διατομές τόσο της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ όσο και της $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$.

2. Οι ανιχνευτές πρέπει να τοποθετούνται στις ίδιες γωνίες με αυτές των μετρήσεων των διαφορικών ενεργών διατομών.
3. Ο στόχος που χρησιμοποιείται πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα, ενώ η στοιχειομετρία και το πάχος του πρέπει να είναι γνωστά με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, πρέπει να μην παρουσιάζει μεταβολή της σύστασής του κατά την ακτινοβολήση.
4. Ίδανικά, ο στόχος πρέπει, εκτός από το υπό μελέτη στοιχείο, να περιέχει και ένα στοιχείο μεσαίου ή υψηλού ατομικού αριθμού, ώστε να είναι δυνατή η κανονικοποίηση του φορτίου της δέσμης και της στερεάς γωνίας του ανιχνευτή μέσω της ελαστικής σκέδασης Rutherford. Στις παρούσες μετρήσεις benchmarking χρησιμοποιήθηκε στόχος ZnO, με σκοπό την κανονικοποίηση στην ελαστική σκέδαση στο Zn. Μετά από δοκιμές, επιλέχθηκε στοιχείο μεσαίου Z , καθώς η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης Rutherford αυξάνεται με τον ατομικό αριθμό, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλο αριθμό γεγονότων. Όπως έδειξαν οι δοκιμές, η χρήση στοιχείων υψηλού Z προκαλεί έντονο pile-up στις περιοχές ενδιαφέροντος για τις αντιδράσεις $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)$ και $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)$.

5.3 Αποτελέσματα Benchmarking

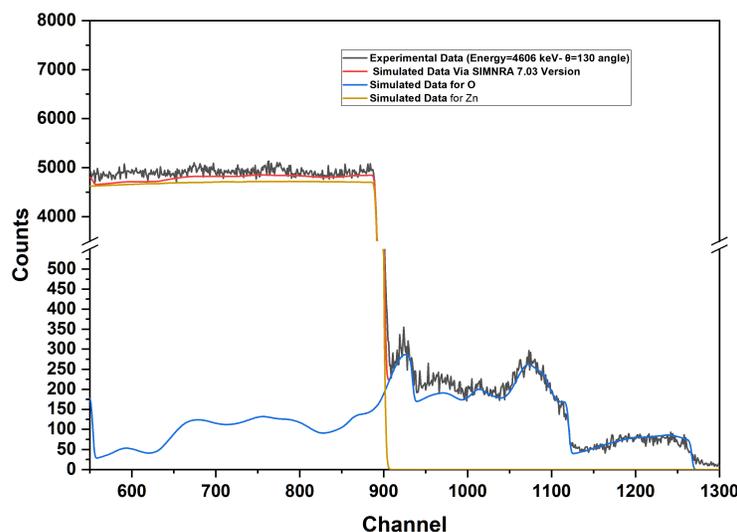
Για την προσομοίωση, έπρεπε στο πρόγραμμα SIMNRA να καθοριστούν:

- Τα χαρακτηριστικά του στόχου, όπως η σύστασή του, η οποία ήταν γνωστή με ακρίβεια από τον κατασκευαστή, και το πάχος του. Το πάχος του στόχου ήταν επαρκώς μεγάλο ώστε να σταματά πλήρως τη δέσμη, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση μιας αυθαίρετα μεγάλης τιμής στην προσομοίωση.
- Οι πειραματικές λεπτομέρειες, όπως το φορτίο της δέσμης και η στερεά γωνία που καλύπτει ο κάθε ανιχνευτής, τα οποία, όπως ήδη αναφέρθηκε, υπολογίστηκαν με βάση την ελαστική σκέδαση στο Zn, καθώς και η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του κάθε ανιχνευτή, η οποία καθορίστηκε από την κλίση του συνεχούς που αντιστοιχεί στην ελαστική σκέδαση στο Zn.

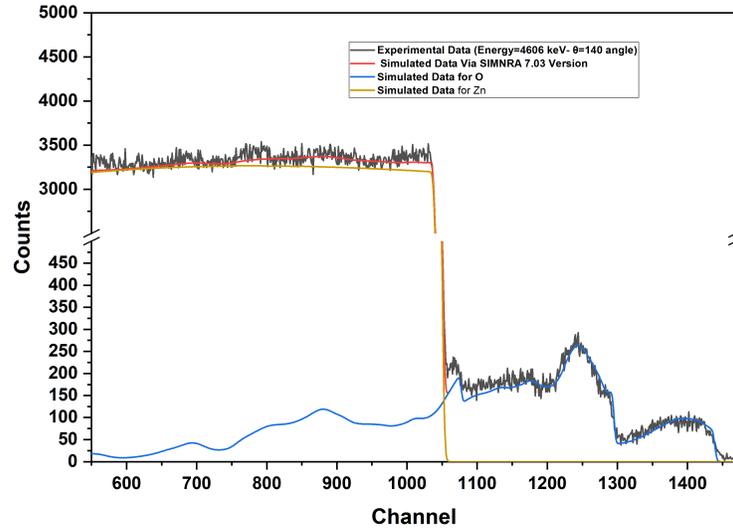
Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, για την προσομοίωση, το πρόγραμμα SIMNRA παρέχει τη δυνατότητα να επιλέξουμε διάφορα μοντέλα για την ισχύ ανάλυσης (stopping power) και την ενεργειακή διασπορά (energy straggling) της δέσμης. Στην συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο SRIM2013

για το stopping power [20] και το μοντέλο των Chu και Yang για το energy-straggling [21]. Επίσης, έγινε περαιτέρω μελέτη λαμβάνοντας υπόψη όλα τα μοντέλα που διαθέτει το SIMNRA, τόσο για το stopping power (Andersen-Ziegler [29], Ziegler-Biersack [30], ZB+KKK [31]) όσο και για το energy straggling (Chu [34], Bohr [35]) και παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές που προκαλούν στο προσομοιωμένο φάσμα δεν ξεπερνούν το 3%.

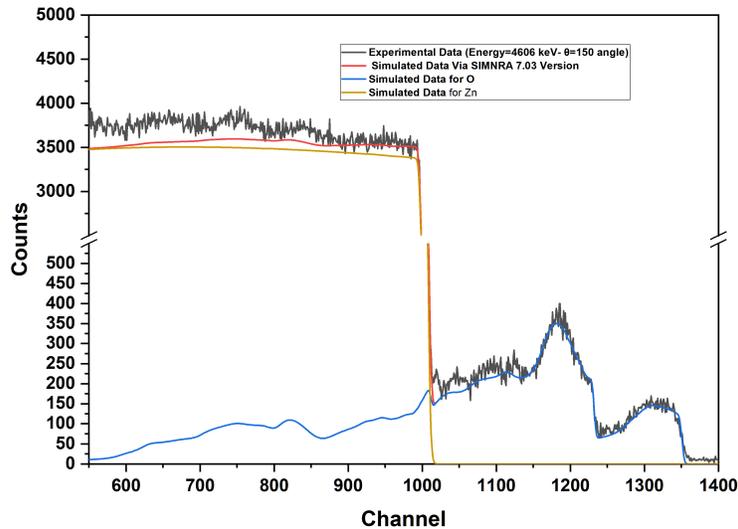
Τα αποτελέσματα του benchmarking παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.1-5.5. Με μαύρη γραμμή απεικονίζονται τα πειραματικά φάσματα, ενώ με κόκκινη γραμμή το συνολικό προσομοιωμένο φάσμα. Οι μπλε και κίτρινες γραμμές αντιστοιχούν στις δύο επιμέρους συνιστώσες της προσομοίωσης, που προέρχονται από τα προσομοιωμένα φάσματα του O και του Zn, αντίστοιχα.. Όπως παρατηρείται, σε όλες τις γωνίες ανίχνευσης, τα προσομοιωμένα φάσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά, γεγονός που επαληθεύει την εγκυρότητα των διαφορικών ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς και εκείνων των εργασιών [26] και [27]. Επισημαίνεται ότι, λόγω της σταδιακής απώλειας ενέργειας της δέσμης κατά τη διέλευσή της στον στόχο, ο έλεγχος αυτός καλύπτει ολόκληρο το ενεργειακό εύρος στο οποίο έχουν προσδιοριστεί τιμές διαφορικών ενεργών διατομών.



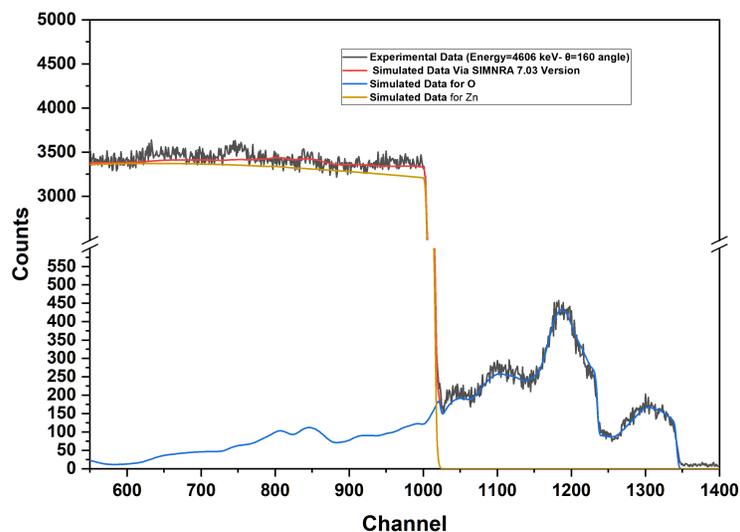
Σχήμα 5.1: Πειραματικό φάσμα (με μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένο φάσμα (με κόκκινη γραμμή) στην γωνία 130° .



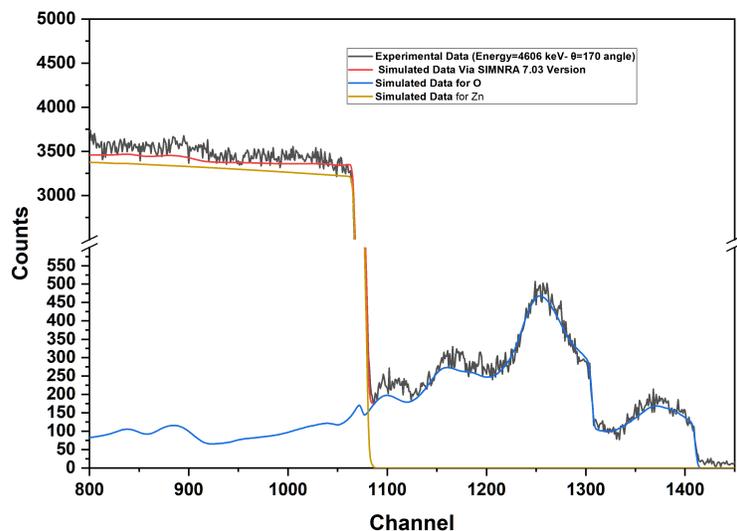
Σχήμα 5.2: Πειραματικό φάσμα (με μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένο φάσμα (με κόκκινη γραμμή) στην γωνία 140°.



Σχήμα 5.3: Πειραματικό φάσμα (με μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένο φάσμα (με κόκκινη γραμμή) στην γωνία 150°.



Σχήμα 5.4: Πειραματικό φάσμα (με μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένο φάσμα (με κόκκινη γραμμή) στην γωνία 160° .



Σχήμα 5.5: Πειραματικό φάσμα (με μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένο φάσμα (με κόκκινη γραμμή) στην γωνία 170° .

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκε η διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)^{18}\text{F}$, στο ενεργειακό εύρος ~ 3500 μέχρι ~ 5000 keV και για γωνίες ανίχνευσης μεταξύ 130° και 170° , με βήμα 10° , καθώς και της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)^{15}\text{O}$ στις ίδιες γωνίες ανίχνευσης και σε διαφορετικά ενεργειακά εύρη, ανάλογα με την υπό μελέτη γωνία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του επιταχυντή Dynamitron Tandem στις Κεντρικές Εγκαταστάσεις για Δέσμες Ιόντων και Ραδιονουκλίδια (RUBION) του Πανεπιστημίου Ruhr στο Bochum της Γερμανίας.

Οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν χαρακτηρίζονται από την παρουσία συντονισμών και από σχετικά ισχυρή γωνιακή εξάρτηση στο μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού εύρους που εξετάστηκε.

Επιπλέον, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας ελέγχθηκε μέσω ενός ανεξάρτητου πειράματος που πραγματοποιήθηκε επίσης στο RUBION. Τα αποτελέσματα της εν λόγω μελέτης παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.1-5.5, από τα οποία προκύπτει σαφώς ότι τα προσομοιωμένα φάσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά, γεγονός που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα των διαφορικών ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν τόσο στην εργασία αυτή όσο και στις εργασίες [26] και [27] για ενέργειες δέσμης μικρότερες των 3500 keV.

Οι διαφορικές ενεργές διατομές των υπό μελέτη αντιδράσεων μετρήθηκαν για πρώτη φορά στα συγκεκριμένα ενεργειακά και γωνιακά εύρη, καλύπτοντας έτσι ένα σημαντικό κενό στη βιβλιογραφία. Για τον λόγο αυτόν, αναμένεται να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο για την ποσοτική ανάλυση και τον προσδιορισμό της σε βάθος κατανομής του οξυγόνου, κάτι που είναι σημαντικό τόσο για τη βασική έρευνα όσο και για τεχνολογικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η ποσοτικοποίηση του οξυγόνου και ο προσδιορισμός της κατανομής του σε βάθος σε υλικά όπως τα Plasma Facing Components σε αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης είναι κρίσιμα για την πρόβλεψη της διάβρωσης και την βελτιστοποίηση της ασφάλειας και της απόδοσης των αντιδραστήρων.

Αναφορές

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development of a Reference Database for Ion Beam Analysis , IAEA-TECDOC-1780, IAEA, Vienna (2015)
- [2] M. Mayer, “SIMNRA User’s Guide”, Germany (2020)
- [3] F. Maragkos “Measurement and theoretical investigation of the differential cross sections of ^3He -induced reactions in light nuclei for applications in Ion Beam Analysis”, NTUA, (2025)
- [4] W.N. Catford, 2005
- [5] D. Gockel, “Kalibration der Ionenstrahlenergie des 4MV-Tandembeschleunigers am RUBION,” 2021.
- [6] National Nuclear Data Center (NNDC), <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>
- [7] National Nuclear Data Center (NNDC), <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc>
- [8] M. Nastasi, J. Mayer, W. Yongqiang, “Ion Beam Analysis, Fundamentals and Applications”, CRC Press, (2015)
- [9] Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) M. Mayer Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Garching, Germany May (2003)
- [10] Paetz gen. Schieck, H. (2014). Nuclear reactions: An introduction (Vol. 882). Springer.
- [11] Y. Wang and M. Nastasi, “Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis”, Materials Research Society, 2009.
- [12] SigmaCalc: <http://sigmacalc.iate.obninsk.ru>, www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm
- [13] Ion Beam Analysis Nuclear Data Library (IBANDL) – Experimental nuclear cross-section data for ion beam analysis, <https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>

- [14] SigmaCalc recent development and present status of the evaluated cross-sections for IBA Author links open overlay panel, A.F. Gurbich, March 2016
- [15] INDC(NDS)-0634, Accuracy of Experimental and Theoretical Nuclear Cross-Section Data for Ion Beam Analysis and Benchmarking, Summary Report of the Consultants' Meeting, 2013.
- [16] W.K. Chu, J.F. Ziegler, "Ion Beam Handbook for Material Analysis".
- [17] 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)
- [18] K. S. Krane, "Introductory Nuclear Physics", John Wiley Sons, 1988.
- [19] Y. Wang and M. Nastasi, "Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis", Materials Research Society, 2009.
- [20] The Stopping and Ranges of Ions in Solids, edited by J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark (Pergamon, Oxford, 1985), Vol. 1.
- [21] Q. Yang, D. J. O'Connor, and Z. Wang, "Empirical formulae for energy loss straggling of ions in matter," Nucl Instrum Methods Phys Res B, vol. 61, no. 2, pp. 149–155, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(91\)95454-L](https://doi.org/10.1016/0168-583X(91)95454-L).
- [22] J. L'Ecuyer, J. A. Davies, and N. Matsunami, "How accurate are absolute rutherford backscattering yields," Nuclear Instruments and Methods, vol. 160, no. 2, pp. 337–346, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90612-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90612-8).
- [23] M.Mayer, "Ion beam analysis of fusion plasma-facing materials and components: facilities and research challenges": <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/ab5817/meta>
- [24] Lennard, W. N. and Tong, S. Y. and Mitchell, I. V. and Massoumi, G. R. "An Alternative Technique for Oxygen Surface Coverage Measurements," Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.B [http://dx.doi.org/10.1016/0168-583X\(89\)90036-0](http://dx.doi.org/10.1016/0168-583X(89)90036-0)

- [25] Theuerkauf J. et al., “Program Tv,” 2007, Institute for Nuclear Physics, Cologne
- [26] Θεόδωρος Τσιάκος, “Μελέτη της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, \alpha_0)^{15}\text{O}$ ”
- [27] Νεφέλη Θεωδορίδου, “Μελέτη της αντίδρασης $^{16}\text{O}(^3\text{He}, p_0)^{15}\text{O}$ ”
- [28] V. Foteinou et al., *Differential cross-section measurements for the $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^3\text{He}_0)^9\text{Be}$ elastic scattering and the $^9\text{Be}(^3\text{He}, p_x)^{11}\text{B}$ reactions*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **542** (2023) 158–175.
- [29] *H.H. Andersen and J.F. Ziegler. Hydrogen - Stopping Powers and Ranges in All Elements. Vol. 3. The Stopping and Ranges of Ions in Matter. New York: Pergamon Press, 1977 (cit. on pp. 30, 33, 94, 97, 121).*
- [30] *J.F. Ziegler, J.P. Biersack, and U. Littmark. The Stopping and Range of Ions in Solids. Vol. 1. The Stopping and Ranges of Ions in Matter. New York: Pergamon Press, 1985 (cit. on pp. 30–32, 84, 95–97, 103, 121).*
- [31] *G. Konac, Ch. Klatt, and S. Kalbitzer. “Universal fit formula for electronic stopping of all ions in carbon and silicon”. In: Nucl. Instr. Meth. B 146 (1998), p. 106. doi: 10.1016/S0168-583X(98)00453-4 (cit. on pp. 30, 97).*
- [32] *A. Gurbich, Cross-section data for the reaction $^{16}\text{O}(d, p_1)^{17}\text{O}$*
- [33] Π.Α. Ασημακόπουλος, “Εισαγωγή στην πυρηνική φυσική”
- [34] *W.K. Chu. In: Phys. Rev. 13 (1976), p. 2057 (cit. on pp. 104, 122, 168).*
- [35] *N. Bohr. “The Penetration of Atomic Particles through Matter”. In: Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 18.8 (1948) (cit. on pp. 103, 104, 122, 168).*
- [36] *A. Gurbich, S. Molodtsov, Nucl. Instr. Meth. B 226 (2004) 637*
- [37] *S. Cavallaro et al. Il Nuovo Cimento, 14A (1973) 692*
- [38] *W.N. Lennard et al. Nucl. Instr. and Meth. B61 (1991) 1*

- [39] *H.Rafi-Kheiri+(2016), Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.B, Vol.371, p.46*