



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών

Τομέας Φυσικής

*Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών ελαστικής
σκέδασης δευτερίων από άζωτο στα πλαίσια της
τεχνικής EBS.*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τσιντάρη Πελαγία

Επιβλέπων: Μ. Κόκκορης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2017



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών

Τομέας Φυσικής

*Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών ελαστικής
σκέδασης δευτερίων από άζωτο στα πλαίσια της
τεχνικής EBS.*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τσιντάρη Πελαγία

Τριμελής Επιτροπή

Μ. Κόκκορης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ρ. Βλαστού-Ζάννη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α. Λαγογιάννης, Ερευνητής Β', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

Αθήνα, Ιούνιος 2017

*If you have to wait for it to roar out of you,
then wait patiently.
If it never does roar out of you,
do something else.*

"So, you want to be a writer?" by Ch. Bukowski

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά την οικογένειά μου, τους γονείς μου και την αδερφή μου, που είναι δίπλα μου σε κάθε στάδιο της ζωής μου με την αγάπη τους, την εμπιστοσύνη τους αλλά και τις συμβουλές τους.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ, οφείλω στον άνθρωπο που ήταν η έμπνευση μου και ο μέντορας μου τα τελευταία δύο χρόνια και δεν είναι άλλος από την Αναπληρωτή Καθηγήτριά του Ε.Μ.Π. Δρα Κόκκορη Μιχάλη, που με πολύ υπομονή, επιμονή και πίστη, δεν έπαψε στιγμή να με βοηθάει και να με καθοδηγεί όποτε και αν χρειάστηκα τη συμβουλή του. Τον ευχαριστώ λοιπόν για την υπέροχη εμπειρία και ευκαιρία που μου έδωσε, να συνεργαστώ μαζί του, έστω και για μικρό χρονικό διάστημα και ελπίζω σε μια νέα μελλοντική συνεργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω βέβαια και τη Καθηγήτριά του Ε.Μ.Π. Δρα Ρόζα Βλαστού-Ζάννη για τις πολύτιμες συμβουλές της, καθώς και τον Ερευνητή Β' του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» Τάσο Λαγογιάννη για όλη τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια του πειράματος αλλά και της πρακτικής μου άσκησης στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που είναι οι μεγαλύτεροι υποστηρικτές μου σε ότι και αν επιλέγω να κάνω και είναι πάντα εκεί για να με ενθαρρύνουν και να με υποστηρίξουν με κάθε μέσο. Ένα μεγάλο ευχαριστώ λοιπόν στην Κατερίνα, στην Πόπη, στη Μυρτώ, στο Δημήτρη, στο Γιώργο, στη Μαρία, στο Μάνο, στην Ελένη, στην Άννα, στο Γιάννη και στο Γιώργο.

Να ευχαριστήσω τέλος όλα τα παιδιά του γκρουπ της Πυρηνικής Φυσικής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. για τις ωραίες στιγμές που μοιραστήκαμε τα τελευταία δύο χρόνια αλλά και για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχαν όποτε και αν τη χρειάστηκα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Βεατρίκη, στη Φρόσω, στο Σωτήρη, στο Φώτη, στον Κώστα, στην Ελένη, στην Κωνσταντίνα, στην Αντιγόνη, στη Φιλοθέη, στο Θάνο και στην Ελένη.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
<u>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγικά Στοιχεία.....</u>	4
1.1 Πυρηνικές Τεχνικές.....	4
1.1.1 Φασματοσκοπία Σκέδασης Rutherford (RBS).....	6
1.1.2 Φασματοσκοπία Ελαστικής Σκέδασης (EBS).....	8
1.2 Το στοιχείο άζωτο (^{nat}N – φυσικό άζωτο).....	8
1.3 Μελέτη της Ελαστικής Σκέδασης $^{nat}N(d,d)$	9
<u>Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης.....</u>	11
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργία Επιταχυντή.....	11
2.2 Πειραματική Διάταξη.....	15
2.2.1 Θάλαμος Σκέδασης.....	15
2.2.2 Προετοιμασία Στόχου.....	17
2.2.3 Ανιχνευτές Πυριτίου – Αρχές Λειτουργίας.....	18
2.2.4 Ανιχνευτική Διάταξη.....	18
2.2.5 Σύστημα Ηλεκτρονικών.....	20
2.3 Ενεργειακή Βαθμονόμηση Επιταχυντή.....	21
2.4 Ενεργειακή Βαθμονόμηση ADC /MCA (Αναλογικοψηφιακού Μετατροπέα/ Πολυδιαυλικού Αναλυτή).....	23

Κεφάλαιο 3 : Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων & Αποτελέσματα..... 29

3.1 Διαφορική Ενεργός Διατομή.....	29
3.1.1 Ολοκλήρωση Κορυφών.....	31
3.1.2 Υπολογισμός Ενεργού Διατομής Χρυσού.....	34
3.1.3 Υπολογισμός του λόγου $\left(\frac{N_{Au}}{N_N}\right)$	36
3.1.4 Υπολογισμός Ενέργειας στο Μέσο του Πάχους του Στόχου.....	40
3.2 Πειραματικά Αποτελέσματα & Σχολιασμός.....	42
3.3 Λόγος Διαφορικής Ενεργού Διατομής ως προς Rutherford.....	46

Κεφάλαιο 4 : Συμπεράσματα & Προοπτικές..... 51

4.1 Συμπεράσματα.....	51
4.2 Προοπτικές.....	52

Βιβλιογραφία..... 54

Παράρτημα Α..... 55

Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων.....	55
---	----

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μετρήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ελαφρύ στοιχείο άζωτο (^{nat}N) με χρήση της Φασματοσκοπίας Ελαστικής Οπισθοσκέδασης (d-EBS – Elastic Backscattering Spectroscopy). Το φυσικό άζωτο είναι το κατά σειρά έβδομο σε αφθονία στοιχείο που συναντάται στο ηλιακό μας σύστημα και σε ποσοστό περίπου 78% σε μοριακή μορφή στην ατμόσφαιρα της γης. Αποτελείται από μόλις δύο φυσικά ισότοπα, το ^{14}N σε ποσοστό 99.634% και το ^{15}N σε ποσοστό 0.366% του φυσικού αζώτου. Η μελέτη αζώτου είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς συναντάται σε διάφορες εφαρμογές της μεταλλουργίας αλλά και της τεχνολογίας υλικών. Το πείραμα της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» στον επιταχυντή 5.5 MV τύπου Tandem και σε διπλή γωνιακή τράπεζα υψηλής ακρίβειας. Η ελαστική σκέδαση δευτερίων μελετήθηκε για ενεργειακό εύρος $E_{d,lab}=1000-2200$ keV που αυξανόταν με σταθερό βήμα 10 keV και για γωνίες οπισθοσκέδασης 120° , 130° , 140° , 150° , 160° και 170° . Χρησιμοποιήθηκαν έξι ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου και ένας στόχος νιτριδίου του πυριτίου (Si_3N_4), με ονομαστικό πάχος 75 nm, που είχε στην μπροστά επιφάνειά του ένα λεπτό στρώμα ($\sim 2-3$ nm) εξαχνωμένου χρυσού, για λόγους κανονικοποίησης. Ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης έγινε με χρήση της σχετικής μεθόδου. Υπολογίστηκε η διαφορική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης δευτερίων από χρυσό μέσω της σχέσης Rutherford λαμβάνοντας υπ' όψιν το διορθωτικό παράγοντα της ηλεκτρονιακής θωράκισης (screening). Στη συνέχεια προσδιορίστηκε ο λόγος του συνολικού αριθμού ατόμων αζώτου ως προς αυτόν του χρυσού που περιέχονταν στο στόχο, μέσω χρήσης φασμάτων ελαστικής σκέδασης πρωτονίων που έγιναν ως συμπληρωματικές μετρήσεις κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Από την ανάλυση των πειραματικών φασμάτων και την επεξεργασία των δεδομένων υπολογίστηκαν οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης δευτερίων από άζωτο. Οι τιμές της ενεργού διατομής απείχαν από τις αντίστοιχες τιμές της ελαστικής σκέδασης δευτερίων κατά Rutherford, όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης δεν παρατηρείται κάποια απότομη αλλαγή στις τιμές της ενεργού διατομής, επομένως συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει κάποιος ισχυρός, λεπτός συντονισμός του σύνθετου πυρήνα $^{16}\text{O}^*$ για το ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε.

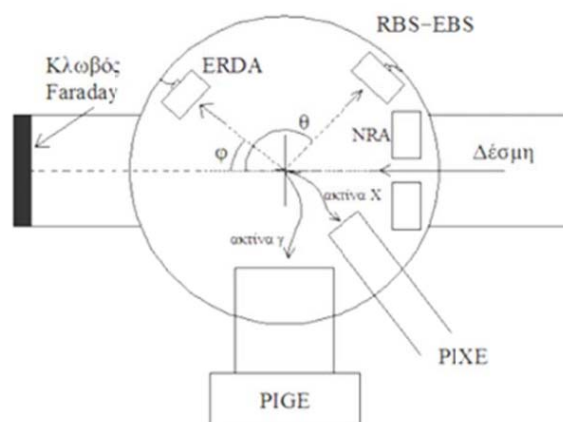
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγικά Στοιχεία

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μέτρηση της διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ελαφρύ στοιχείο άζωτο (^{nat}N) με χρήση της Φασματοσκοπίας Ελαστικής Οπισθοσκέδασης (d-EBS – Elastic Backscattering Spectroscopy).

1.1 Πυρηνικές Τεχνικές

Οι μη καταστροφικές πυρηνικές τεχνικές που χρησιμοποιούν δέσμη φορτισμένων σωματιδίων παραγόμενη από επιταχυντή (Ion Beam Analysis - IBA), βασίζονται στις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων της δέσμης με το προς μελέτη υλικό. Τα σωματίδια της δέσμης που διέρχονται στην ύλη αλληλεπιδρούν κατά κύριο λόγο με τα ηλεκτρόνια αυτής και σπανιότερα με τους πυρήνες των ατόμων που την αποτελούν. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας αλλά και την αλλαγή κατεύθυνσης των σωματιδίων της δέσμης, καθώς επίσης και την εκπομπή σωματιδίων ή και ακτινοβολίας. Το αποτέλεσμα κάθε πιθανής αλληλεπίδρασης της δέσμης με έναν πυρήνα του στόχου είναι αυτό που καθορίζει και το είδος της αλληλεπίδρασης που έλαβε χώρα. Οι τεχνικές IBA χωρίζονται με βάση τον τρόπο με τον οποίο αποκτούμε την πληροφορία για την αλληλεπίδραση που έγινε, με άλλα λόγια ο διαχωρισμός των τεχνικών γίνεται με βάση το προϊόν που ανιχνεύεται, όπως σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1.1.



Εικόνα 1.1.1: Σχηματική απεικόνιση των πυρηνικών τεχνικών και της πειραματικής διάταξης, ανάλογα με την αλληλεπίδραση και το προϊόν ανίχνευσης

Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford (*Rutherford Backscattering Spectrometry – RBS*) είναι η τεχνική κατά την οποία ανιχνεύονται σωματίδια που έχουν σκεδαστεί ελαστικά και ακολουθούν τη θεωρία Rutherford.

Φασματοσκοπία Ελαστικής Οπισθοσκέδασης (*Elastic Backscattering Spectroscopy – EBS*) είναι η τεχνική κατά την οποία ανιχνεύονται σωματίδια τα οποία έχουν προέλθει από ελαστική σκέδαση, που όμως δεν είναι κατά Rutherford. Η τεχνική είναι στη πράξη ίδια με αυτή της RBS με τη μόνη και ειδοποιό διαφορά ότι η ενεργός διατομή της σκέδασης δεν δύναται να υπολογιστεί αναλυτικά.

Ανάλυση Μέσω Πυρηνικής Αντίδρασης (*Nuclear Reaction Analysis – NRA*) είναι η τεχνική κατά την οποία τα ανιχνευόμενα σωματίδια προέρχονται από πυρηνική αντίδραση μεταξύ των σωματιδίων της δέσμης και του πυρήνα του στοιχείου που μελετάται. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η σχετικά μεγάλη ενέργεια των ανιχνευόμενων σωματιδίων που οφείλεται στο υψηλό Q-value των πυρηνικών αντιδράσεων.

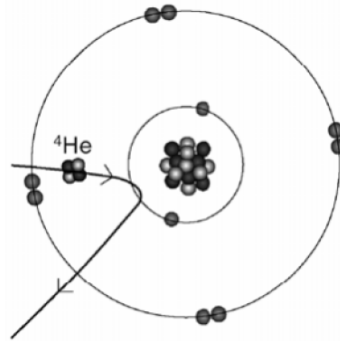
Ανάλυση Μέσω Ανίχνευσης Ανακρουόμενου Πυρήνα (*Elastic Recoil Detection Analysis – ERDA*): είναι η τεχνική κατά την οποία ανιχνεύονται ελαφρά στοιχεία, όπως το ^1H ή ^4He και χρησιμοποιείται δέσμη βαρέων ιόντων. Βασίζεται στην ελαστική σκέδαση, όμως μελετάται ο ανακρουόμενος πυρήνας και όχι το σκεδαζόμενο σωματίδιο.

Μέθοδος Ανίχνευσης Μέσω Ακτινοβολίας – γ (*Proton Induced Gamma-ray Emission – PIGE*): είναι η τεχνική κατά την οποία ανιχνεύεται ακτινοβολία – γ , προερχόμενη από την αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα. Η τεχνική βασίζεται στη ταυτοποίηση της ενέργειας της ακτινοβολίας με χρήση συνήθως ανιχνευτών γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe). Οι ενέργειες αντιστοιχούν σε μεταβάσεις ενεργειακών σταθμών και είναι χαρακτηριστικές κάθε πυρήνα.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται κάθε φορά καθορίζεται από το στόχο, το στοιχείο που είναι προς μελέτη, αλλά και το βάθος που αυτό βρίσκεται μέσα στο στόχο καθώς και από τα υπόλοιπα διαφορετικά στοιχεία που πιθανόν να περιέχονται σ' αυτόν. Συνοψίζοντας, η επιλογή του κατάλληλου είδους φορτισμένων σωματιδίων και της αντίστοιχης ενέργειάς τους σε συνδυασμό με το επιθυμητό προϊόν της αλληλεπίδρασης, αποτελούν τον συνδυασμό που ορίζει τη μέθοδο που χρησιμοποιείται κάθε φορά. [Pa12]

1.1.1 Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford (RBS)

Η σκέδαση Rutherford πραγματοποιείται όταν τα σωματίδια της προσπίπτουσας δέσμης έχουν πολύ χαμηλότερη ενέργεια από αυτή του φράγματος δυναμικού του συστήματος βλήματος – στόχου με αποτέλεσμα να σκεδάζονται λόγω του δυναμικού Coulomb των πυρήνων του στόχου (Εικόνα 1.1.2).



Εικόνα 1.1.2: Σχηματική απεικόνιση της σκέδασης Rutherford ενός σωματίου α

Συνεπώς η τεχνική RBS εφαρμόζεται κατά τις περιπτώσεις όπου πραγματοποιείται σκέδαση Rutherford, δηλαδή όταν η ενέργεια της δέσμης των φορτισμένων σωματιδίων, παραγόμενη από επιταχυντή είναι της τάξης των μερικών MeV και το προς μελέτη δείγμα αποτελείται από βαριά στοιχεία ($Z > 20$). Η τεχνική είναι κατάλληλη για την ανίχνευση βαρέων στοιχείων πάνω σε ελαφρά υποστρώματα.

Ως διαφορική ενεργός διατομή της σκέδασης κατά Rutherford ορίζεται η πιθανότητα να σκεδαστεί ένα σωματίδιο μάζας M_1 και ενέργειας E από έναν πυρήνα μάζας M_2 σε γωνία θ , ανά στερεά γωνία Ω και υπολογίζεται στο σύστημα του εργαστηρίου από τη σχέση:

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega}(E, \theta) = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right)^2 \cdot \frac{\left(\sqrt{M_2^2 - M_1^2 \cdot \sin^2 \theta} + M_2 \cos \theta\right)^2}{M_2 \sin^4 \theta \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \cdot \sin^2 \theta}} \quad \text{Σχέση 1.1}$$

Η διαφορική ενεργός διατομή όμως δίνεται επίσης και από τον ορισμό της ως:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E, \theta} = \frac{Y}{Q \cdot \Omega \cdot N_t} \quad \text{Σχέση 1.2}$$

όπου τα μεγέθη που εμφανίζονται είναι αντιστοίχως τα εξής:

Y : συνολικό άθροισμα γεγονότων της κορυφής του προς μελέτη στοιχείου που προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα

Q : αριθμός σωματιδίων που πέφτουν στο στόχο

Ω : στερεά γωνία ανιχνευτή [sr]

N_t : συνολικός αριθμός των ατόμων του στοιχείου στο στόχο [άτομα/cm²]

Μέσω πειράματος ελαστικής σκέδασης προσδιορίζονται τα μεγέθη Y , Q και Ω για κάποιο στοιχείο του στόχου. Επομένως, εφόσον το στοιχείο σκεδάζεται κατά Rutherford, χρησιμοποιώντας την τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής που προκύπτει από τη Σχέση 1.1 και μέσω της Σχέσης 1.2, παρατηρείται πως το μόνο άγνωστο μέγεθος που απομένει να υπολογιστεί είναι ο συνολικός αριθμός των ατόμων του στοιχείου στο στόχο (N_t). Το μέγεθος δηλαδή που θα καθορίσει τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός στοιχείου του στόχου.

Η ενέργεια του σκεδαζόμενου σωματιδίου μετά την ελαστική σκέδαση από τον πυρήνα μπορεί να προσδιορισθεί επίσης αναλυτικά μέσω του κινηματικού παράγοντα (K), όπως φαίνεται στη Σχέση 1.3. Η σχέση αυτή προκύπτει από την κινηματική των αντιδράσεων, δηλαδή την αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Οπότε τα σκεδαζόμενα σωματίδια έχουν ενέργεια ίση με E_1 :

$$E_1 = K \cdot E \quad \text{με} \quad K = \left(\frac{\sqrt{M_1 \cos \theta + (M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)}}{M_1 + M_2} \right)^2 \quad \text{Σχέση 1.3}$$

Μέσω της ενέργειας του σκεδαζόμενου σωματιδίου είναι εφικτός ο υπολογισμός του βάθους στο οποίο βρίσκεται το στοιχείο που μελετάται, δηλαδή το βαρύ στοιχείο που σκεδάζει ελαστικά τα σωματίδια κατά Rutherford. Οπότε εάν η σκέδαση δεν γίνει στην επιφάνεια του στόχου αλλά σε κάποιο βάθος αυτού, τότε η ενέργεια του σωματιδίου που θα σκεδαστεί θα είναι μειωμένη και η απώλεια ενέργειάς του θα είναι ανάλογη της απόστασης που έχει διανύσει μέσα στο στόχο. Η απώλεια ενέργειας λόγω ανελαστικών σκεδάσεων Coulomb με τα ηλεκτρόνια του στόχου ανά μονάδα μήκους περιγράφεται από το φυσικό μέγεθος που ονομάζεται «ισχύς ανάσχεσης» (stopping power) και υπολογίζεται από κατάλληλες βάσεις δεσμομένων/βιβλιοθήκες, οι οποίες χρησιμοποιούνται και στα προγράμματα ανάλυσης/εξομοίωσης των πειραματικών φασμάτων RBS. Οι σκεδάσεις αυτές έχουν στατιστικό χαρακτήρα με αποτέλεσμα μια δέσμη φορτισμένων σωματιδίων μετά από ένα ικανό βάθος διείσδυσης σε ένα υλικό να έχει πλέον ενεργειακή και χωρική κατανομή (διασπορά) που περιγράφονται από μια κατανομή τύπου Gauss γύρω από μία κεντρική τιμή. Το φαινόμενο αυτό, που ονομάζεται ενεργειακός και χωρικός

διασκεδασμός αντίστοιχα (energy/lateral straggling), περιορίζει τη διακριτική ικανότητα βάθους των φορτισμένων σωματιδίων, κυρίως όσον αφορά στην ανάλυση βαθέων στρωμάτων. Στην πράξη συνεπώς, η τεχνική RBS μπορεί να δώσει αποτελέσματα υψηλής ακριβείας για βάθος διείσδυσης μόνο μερικών μm (ανάλογα και με τη σύσταση του προς ανάλυση στόχου).

1.1.2 Φασματοσκοπία Ελαστικής Σκέδασης (EBS)

Η Φασματοσκοπία Ελαστικής Σκέδασης (EBS) μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια γενίκευση της RBS. Ουσιαστικά η EBS πραγματοποιείται όταν η ελαστική σκέδαση των σωματιδίων του πυρήνα δεν είναι Rutherford. Η διαφορά μεταξύ της ελαστικής σκέδασης και της σκέδασης κατά Rutherford έγκειται στο γεγονός ότι κατά την ελαστική σκέδαση τα προσπίπτοντα σωματίδια ξεπερνούν το φράγμα δυναμικού Coulomb, είτε μέσω επαρκούς ενέργειας δέσμης, είτε μέσω φαινομένου σήραγγας. Συνεπώς για τη τεχνική EBS η σκέδαση δεν περιγράφεται μέσω της σχέσης Rutherford (Σχέση 1.1) οπότε και οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής προσδιορίζονται πειραματικά.

Η τεχνική EBS χρησιμοποιείται συχνά μαζί με την RBS, επιτυγχάνοντας την ταυτόχρονη μελέτη πληθώρας στοιχείων. Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη μέτρηση όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο για τον προσδιορισμό της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από άζωτο αλλά και από χρυσό. Σκοπός αυτού του συνδυασμού είναι η εξάλειψη του γινομένου ($Qx\Omega$) που εμφανίζεται στη σχέση της διαφορικής ενεργού διατομής (Σχέση 1.2), καθώς απαλλάσσει τα αποτελέσματα από ένα σημαντικό παράγοντα αβεβαιότητας.

1.2 Το στοιχείο άζωτο (^{nat}N – φυσικό άζωτο)

Το άζωτο είναι το κατά σειρά έβδομο σε αφθονία στοιχείο που συναντάται στο ηλιακό μας σύστημα, καθώς επίσης περιέχεται και σε ποσοστό περίπου 78% σε μοριακή μορφή στην ατμόσφαιρα της γης. Μόλις δύο είναι τα φυσικά ισότοπα που απαρτίζουν το άζωτο, το ^{14}N που απαντάται σε ποσοστό 99.634% και το ^{15}N σε ποσοστό 0.366% του φυσικού αζώτου. Στην πράξη συνεπώς, παρά τη σχετική απουσία ισοτοπικής ευαισθησίας στην ελαστική σκέδαση δευτερίων, η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αφορούσε κυρίως το ισότοπο ^{14}N . Η μελέτη του ελαφρού αυτού στοιχείου είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς το άζωτο συναντάται σε διάφορες εφαρμογές της μεταλλουργίας αλλά και της τεχνολογίας υλικών όπως για παράδειγμα στην ανάπτυξη ημιαγωγών και μονωτών.

Ειδικότερα, όσον αφορά στις εφαρμογές στη μεταλλουργία, το άζωτο συχνά χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των ιδιοτήτων εργαλείων κοπής, εφόσον η εμφύτευση αζώτου σε μέταλλα όπως το ασάλι, το τιτάνιο ή η τιτανική αλόη ενισχύει τη σκληρότητα και την ανθεκτικότητά τους. Ωστόσο η διάχυση αζώτου σε διάφορα μέταλλα υπό πίεση είναι ακόμη ένα ανοιχτό προς μελέτη πρόβλημα.

Όσον αφορά στην τεχνολογία υλικών, το άζωτο αποτελεί κοινό στοιχείο πρόσμειξης (dopant) για τη δημιουργία ημιαγωγών τύπου n. Επίσης χρησιμοποιείται ως πρόσθετο σε ατμόσφαιρα αργού κατά τη δημιουργία κρυστάλλων, ενώ ένα στρώμα που περιέχει άζωτο εμποδίζει την αύξηση και διάδοση των ατελειών κατά τη διαδικασία της κρυσταλλικής ανόπτησης (annealing). Ακόμη, το άζωτο είναι ένα από τα κύρια συστατικά των κεραμικών υλικών (όπως είναι το BN), των βιομηχανικών γυαλιών, των πολυμερών αλλά και κάποιων βιοϋλικών.

Είναι συνεπώς προφανές ότι η δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού αλλά και η σε βάθος ανάλυση διαφόρων στόχων που περιέχουν άζωτο, είναι μείζονος σημασίας για διάφορους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Ταυτόχρονα όμως η μελέτη του αζώτου αποτελεί μεγάλη πρόκληση για όλες τις μη καταστροφικές πυρηνικές τεχνικές φορτισμένων σωματιδίων (Ion Beam Analysis – IBA), γεγονός που το καθιστά εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα τόσο παλαιότερων όσο και νεότερων εργασιών [Ba05], [Be92].

1.3 Μελέτη της Ελαστικής Σκέδασης $^{nat}N(d,d)$

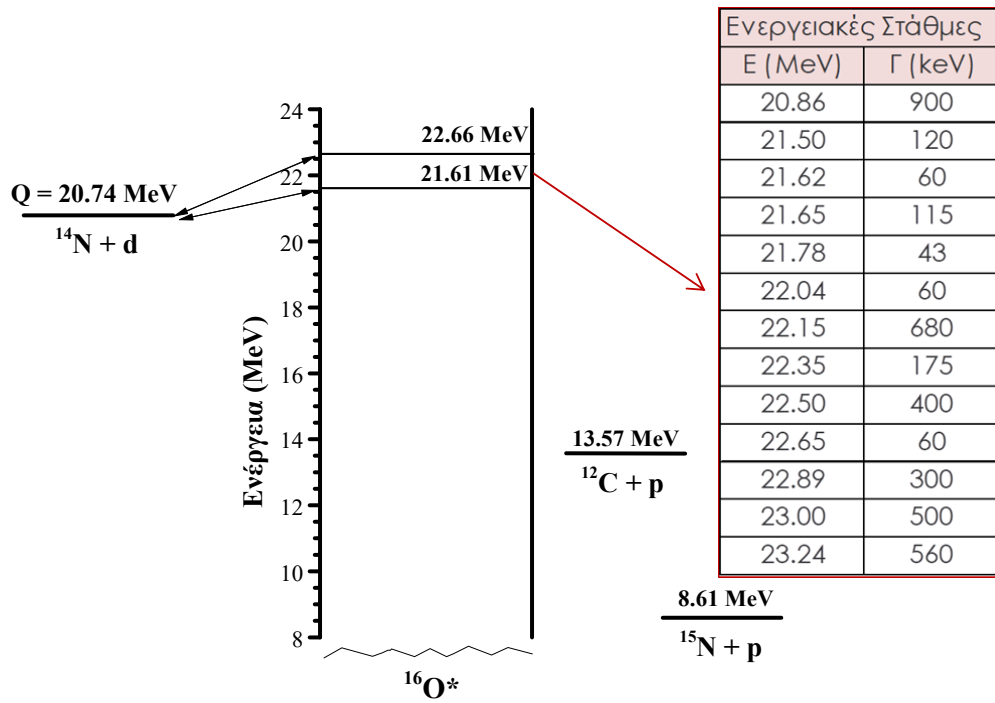
Για την ανάλυση βάθους διαφόρων στόχων που περιέχουν άζωτο, η καταλληλότερη τεχνική είναι αυτή της Ανάλυσης μέσω Πυρηνικών Αντιδράσεων (NRA). Μέσω της NRA είναι εφικτή η ταυτόχρονη μελέτη τριών κύριων αντιδράσεων, των $^{14}N(d,\alpha_0)$, $^{14}N(d,p_0)$ και $^{14}N(d,\alpha_1)$, οι οποίες μάλιστα δίνουν απομονωμένες και υψηλής ενέργειας κορυφές πρωτονίων και σωματιδίων α αντίστοιχα, λόγω των υψηλών τους Q-value και της αμελητέας συνεισφοράς του υποβάθρου, οπότε ευνοείται και η μελέτη στόχων με εμφυτευμένο άζωτο σε μεγάλο βάθος. Το ενεργειακό διάγραμμα του συστήματος $d+^{14}N$ με όλα τα πιθανά κανάλια εξόδου φαίνεται στην Εικόνα 1.3.1.

Ωστόσο παρατηρείται σημαντική έλλειψη πειραματικών δεδομένων για την ελαστική σκέδαση δευτερίων στο άζωτο. Τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα είναι παλαιότερων πειραμάτων, που δεν στόχευαν στην εξυπηρέτηση των σκοπών των τεχνικών IBA. Επομένως η προσθήκη πειραματικών δεδομένων ελαστικής σκέδασης είναι πολύ σημαντική καθώς συχνά η τεχνική EBS πραγματοποιείται για αναλυτικούς σκοπούς μαζί με την NRA. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο αυτές τεχνικές πραγματοποιούνται συνήθως στην ίδια πειραματική διάταξη με απλή αλλαγή της

ηλεκτρονικής ενίσχυσης. Και ενώ η NRA εμφανίζει υψηλή ισοτοπική ευαισθησία, ενώ επιπλέον, με τη χρήση της d-NRA μπορεί κανείς πρακτικά να αναλύσει σχεδόν όλα τα κύρια σταθερά ελαφρά ισότοπα που υπάρχουν σε μία σύνθετη μήτρα, η ανάλυση των φασμάτων EBS/RBS είναι εξίσου σημαντική, διότι παρέχει τη δυνατότητα πλήρους περιγραφής της κατανομής κατά βάθος και των στοιχείων μέσου και υψηλού-Z από τα οποία αποτελείται ένας στόχος. Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη η ύπαρξη αξιόπιστων δεδομένων d-EBS για όλα τα κύρια ελαφρά στοιχεία όπως το άζωτο και σε αυτό στοχεύει η παρούσα εργασία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μια σημαντική προσθήκη πειραματικών δεδομένων d-NRA στην διαδικτυακή βιβλιοθήκη IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data) που υποστηρίζεται από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (IAEA) και περιέχει πειραματικά αποτελέσματα διαφορικών ενεργών διατομών κατάλληλα για τεχνικές IBA. Επιπλέον υπάρχουν πλέον και αξιολογημένα (evaluated) δεδομένα για d-NRA, μέσω χρήσης κατάλληλων θεωρητικών προτύπων (R-matrix και DWBA – Distorted Wave Born Approximation) Συνεπώς εξίσου σημαντική είναι και η περαιτέρω ανάπτυξη της d-EBS, η οποία επί του παρόντος είναι αρκετά φτωχή βιβλιογραφικά, καθώς τα αποτελέσματά της είναι απαραίτητα όπως προαναφέρθηκε για την πλήρη περιγραφή των φασμάτων ελαστικής σκέδασης σύνθετων στόχων, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταυτόχρονη, συσχετισμένη ανάλυση φασμάτων d-NRA και d-EBS μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία και την ακρίβεια στον προσδιορισμό του προφίλ συγκέντρωσης όλων των ελαφρών στοιχείων.

Ως εκ τούτου, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υπολογίστηκαν οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο για ενέργειες δέσμης και γωνίες οπισθοσκέδασης κατάλληλες για την τεχνική EBS. Οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο επιταχυντή του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».



Εικόνα 1.3.1: Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $d+^{14}\text{N}$.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα βασικά στοιχεία του εργαστηρίου στο οποίο έλαβε χώρα το πείραμα της παρούσας εργασίας καθώς και ό,τι θεωρείται απαραίτητο για την κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας.

Το πείραμα της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» στον 5.5 MV επιταχυντή τύπου Tandem.

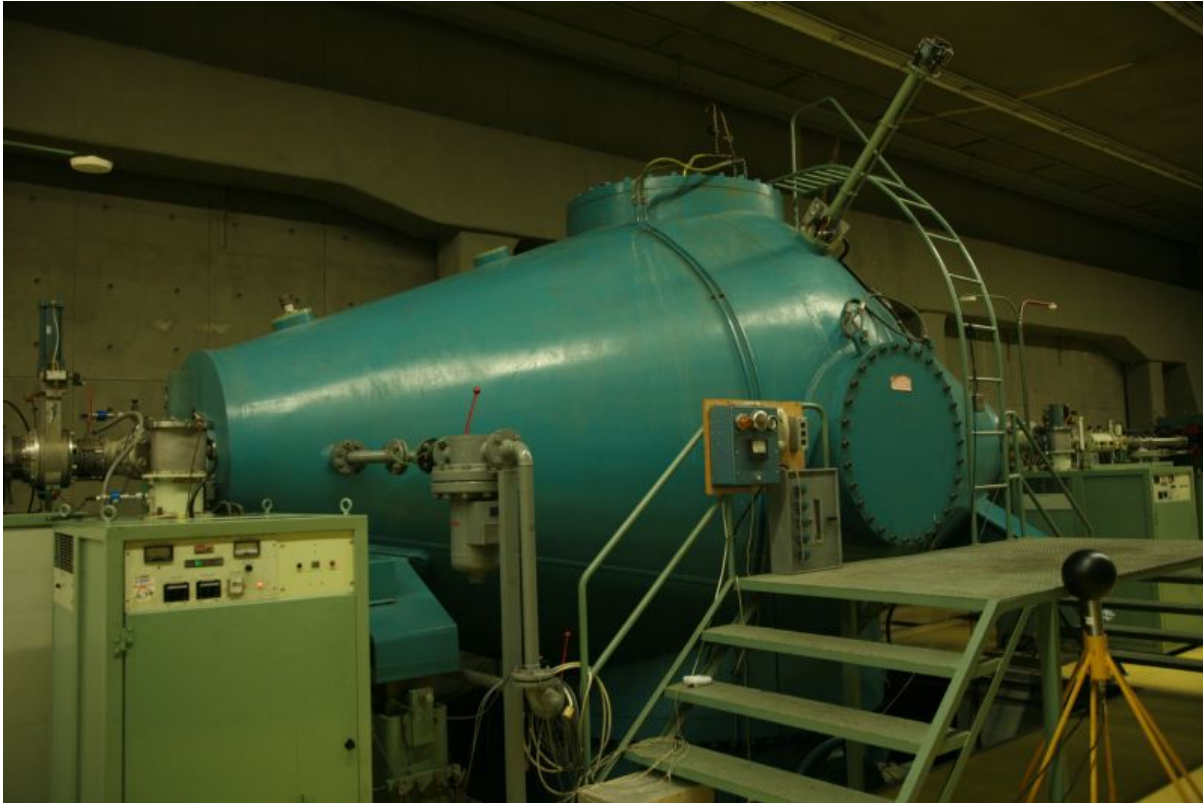
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργία Επιταχυντή

Η απαιτούμενη δέσμη για τη μελέτη των πυρηνικών αντιδράσεων παράγεται σε επιταχυντή, μέσω του οποίου επιταχύνονται σωματίδια έως ότου αυτά αποκτήσουν μία επιθυμητή κινητική ενέργεια και στη συνέχεια κατευθύνονται προς το στόχο. Σε κάθε μορφή επιταχυντή η δημιουργία ενεργητικών σωματίων επιτυγχάνεται μέσω της εκμετάλλευσης του ηλεκτρικού φορτίου του πυρήνα. Επομένως η λειτουργία ενός επιταχυντή βασίζεται σε μία πηγή ιόντων, που δημιουργεί ιόντα μέσω αφαίρεσης ή πρόσθεσης ηλεκτρονίων στο αντίστοιχο ουδέτερο άτομο, και στη διοχέτευση των φορτισμένων αυτών σωματιδίων σε ένα χώρο με ηλεκτρικό (E) και ενδεχομένως και μαγνητικό πεδίο (B), όπου τα σωματίδια δέχονται μια δύναμη Lorentz:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q(\vec{u} \times \vec{B}) \quad \text{Σχέση 2.1}$$

Ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται ο διαχωρισμός των επιταχυντών στις εξής τρεις κατηγορίες, ηλεκτροστατικοί, γραμμικοί και κυκλοτρόνια.

Οι διάφοροι τύποι ηλεκτροστατικών επιταχυντών διαφέρουν ως προς τον τρόπο ανάπτυξης του δυναμικού (V) που εφαρμόζεται στα άκρα του επιταχυντικού σωλήνα. Το πείραμα της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στον ηλεκτροστατικό επιταχυντή τύπου Tandem Van de Graaff του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» (Εικόνα 2.1.1) ο οποίος έχει δυνατότητα μέγιστου δυναμικού 5.5 MV.

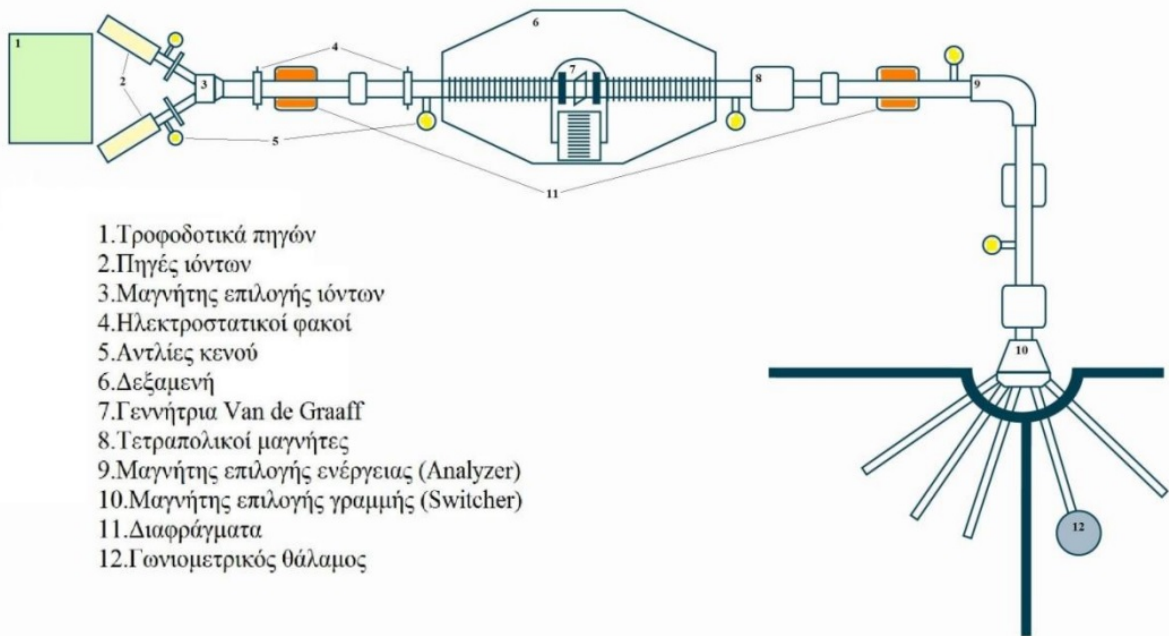


Εικόνα 2.1.1: Κεντρική «δεξαμενή» επιταχυντή τύπου Tandem Van de Graaff.

Ο επιταχυντής αποτελείται από 3 κύρια τμήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.2:

- Τις πηγές ιόντων στην αρχή της γραμμής.
- Την ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff, η οποία βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή του επιταχυντή.
- Τις 6 πειραματικές γραμμές στο τέλος της επιταχυντικής διάταξης.

Ο επιταχυντής Tandem (tandem = σε αλληλουχία) που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα της παρούσας εργασίας συγκροτείται από δύο απλούς ηλεκτροστατικούς επιταχυντές σε σειρά. Τα δύο άκρα του επιταχυντικού συστήματος είναι γειωμένα και στο κέντρο της διάταξης, όπου συναντώνται οι δύο επιταχυντικοί σωλήνες, εφαρμόζεται υψηλή θετική τάση. Η πηγή ιόντων βρίσκεται έξω από τον κυρίως επιταχυντή στο δυναμικό της γης.

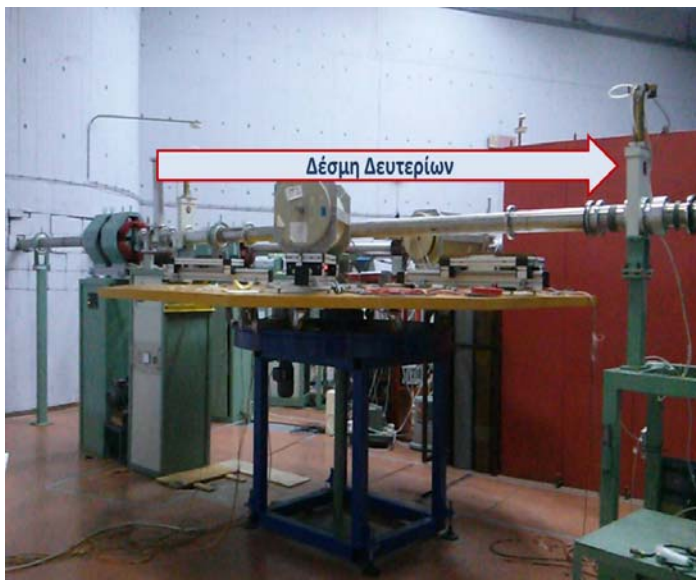


Εικόνα 2.1.2: Τα τμήματα του επιταχυντή.

Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής, τα αρνητικά ιόντα που παράγονται από την πηγή πλάσματος (duoplasmatron source) με έγχυση αερίου υδρογόνου διοχετεύονται στον προ-επιταχυντικό σωλήνα από μία διαφορά δυναμικού της τάξης των 60 kV έως ότου εισέλθουν στον κύριο επιταχυντικό σωλήνα, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται εγκατεστημένη μια διπλή γεννήτρια σε τάση 5.5 MV. Πρόκειται ουσιαστικά για μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα που φορτίζεται θετικά μέσω της γεννήτριας Van de Graaff. Στη περιοχή αυτή της υψηλής τάσης (στο κέντρο πρακτικά της δεξαμενής) τα ιόντα αναγκάζονται να διέλθουν μέσα από ένα λεπτό υμένιο άνθρακα (απογυμνωτής – Carbon Stripper), με αποτέλεσμα να αποβάλλουν το περίσσιο ηλεκτρόνιο που τα καθιστούσε αρνητικά και να απογυμνώνονται και από επιπλέον ηλεκτρόνια. Οπότε πλέον ως θετικά ιόντα (στη παρούσα εργασία δευτέρια), απωθούνται από την ίδια θετική τάση, η οποία δρα αθροιστικά στην ήδη υπάρχουσα ενέργεια που είχαν αποκτήσει ως αρνητικά ιόντα, προσδίδοντάς τους επιπλέον επιτάχυνση. Στη συνέχεια η δέσμη κατευθύνεται μέσω μαγνητικών τετραπόλων σε ένα μαγνήτη επιλογής ενέργειας (analyzer) ο οποίος κάνει στροφή της κατεύθυνσης της δέσμης κατά 90°, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή μονοενεργητικότητα αυτής. Έπειτα, μέσω ενός μαγνήτη επιλογής γραμμής (switcher), η δέσμη οδηγείται στην κατάλληλη πειραματική γραμμή (Εικόνα 2.1.3) όπου πραγματοποιείται το πείραμα. Να σημειωθεί ότι το επιταχυντικό σύστημα βρίσκεται υπό υψηλό κενό της τάξης των 10^{-6} mbar.

Τέλος, η δέσμη καταλήγει σε ειδικό διαμορφωμένο θάλαμο ανάλογα και με τις ανάγκες του εκάστοτε πειράματος. Στο παρόν πείραμα η δέσμη οδηγείται σε ένα γωνιομετρικό θάλαμο υψηλού κενού (Εικόνα 2.1.4), όπου περιέχεται ο στόχος και 6 ανιχνευτές πυριτίου (Si) επιφανειακού φραγμού, τοποθετημένοι σε διπλή γωνιομετρική τράπεζα υψηλής ακρίβειας.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η δέσμη που προκύπτει μετά τον μαγνήτη ανάλυσης (analyzer) δεν είναι εντελώς μονοενεργειακή, επομένως για τον επιπλέον περιορισμό της ενέργειας της δέσμης τοποθετούνται σχισμές (slits) κατά το μήκος της γραμμής στην οποία γίνεται το πείραμα. Ωστόσο, η τιμή της ενέργειας της δέσμης που καταλήγει στο στόχο διαφέρει από εκείνη που επιλέγεται αρχικά στον επιταχυντή. Αυτό οφείλεται μερικώς στο περιφερειακό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από τον πυρήνα του μαγνήτη ανάλυσης (πεδίο Fringe) με αποτέλεσμα να επιλέγονται από αυτόν και τιμές διαφορετικής ενέργειας από την επιθυμητή. Να σημειωθεί όμως ότι ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας στις τιμές της ενέργειας της δέσμης είναι εφικτός μέσω διάφορων μεθόδων βαθμονόμησης του επιταχυντή. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα αναλύεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.



Εικόνα 2.1.3: Πειραματική γραμμή.



Εικόνα 2.1.4: Γωνιομετρικός Θάλαμος

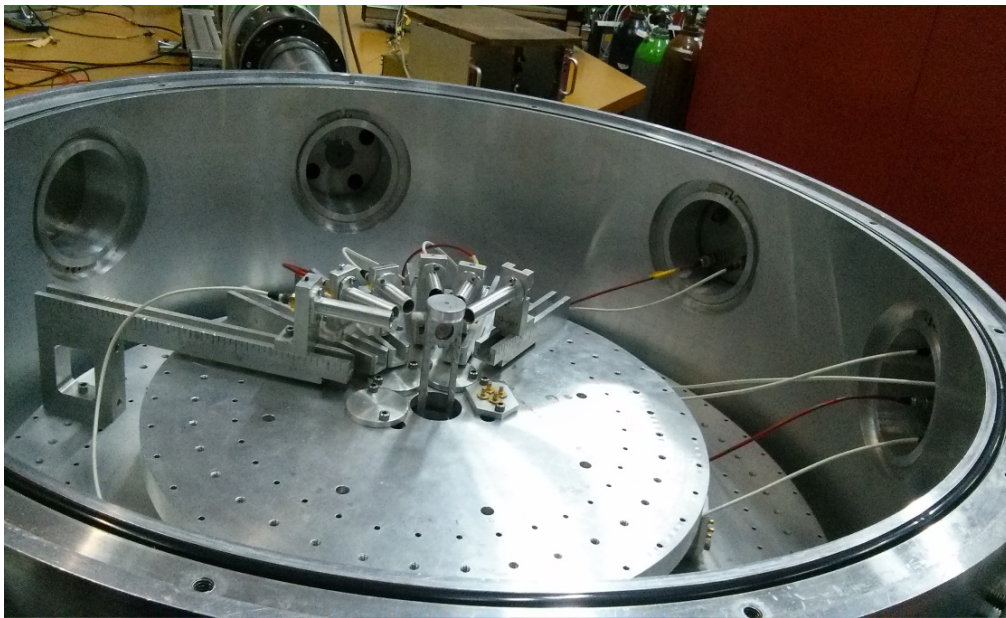
2.2 Πειραματική Διάταξη

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε η δέσμη δευτερίων επιταχύνθηκε σε ενέργειες $E_{d,lab}=1000 - 2200$ keV η οποία αυξανόταν σταδιακά με βήμα 10 keV. Η δέσμη κατά την διέλευσή της από την πειραματική γραμμή διερχόταν μέσω δύο κατευθυντήρων (έναν collimator και έναν anti-scatterer) τοποθετημένων ~ 1 m πριν τη βάση του στόχου καταλήγοντας σε έναν κυλινδρικό θάλαμο, ακτίνας ~ 40 cm, στον οποίο βρίσκεται η διπλή γωνιομετρική τράπεζα (Εικόνα 2.1.4). Λόγω των μικρών διαστάσεων του στόχου (5×5 mm²), για τον περιορισμό του μεγέθους του ίχνους της δέσμης και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σκεδάσεων σωματίων της δέσμης από τη βάση του στόχου (πρακτικά απείρου πάχους), ένας μικρός, πρόσθετος κατευθυντήρας διαμέτρου 1 mm τοποθετήθηκε πάνω στη μία γωνιομετρική τράπεζα, σε απόσταση ~ 10 cm από το στόχο.

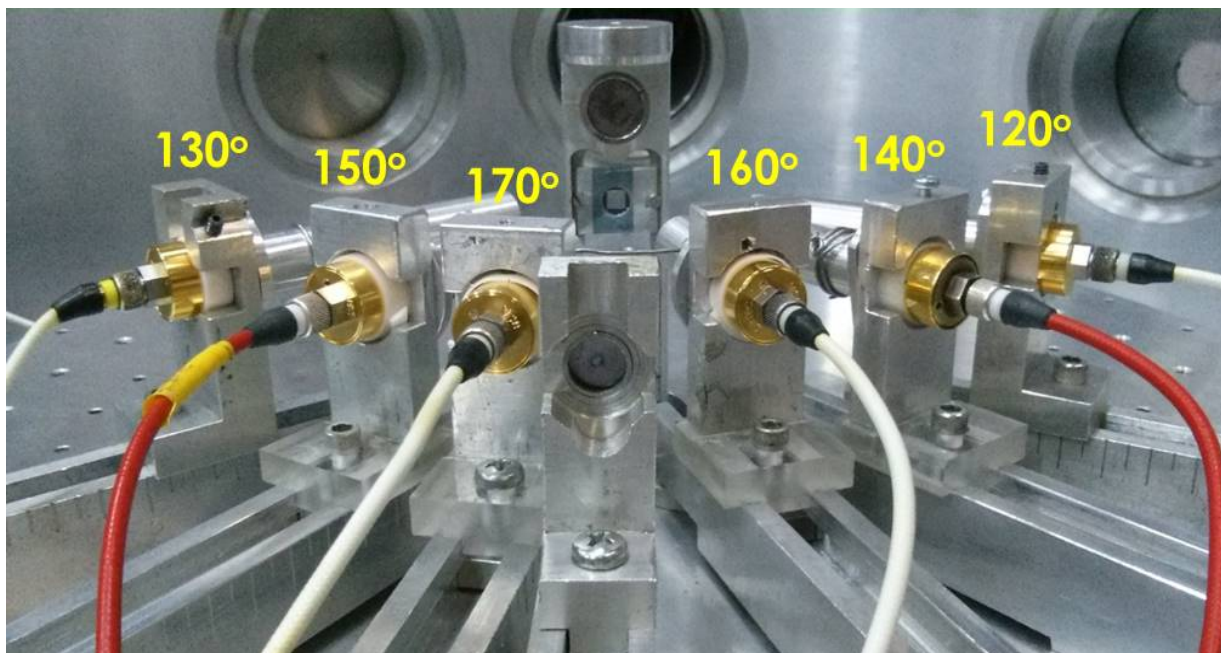
2.2.1 Θάλαμος Σκέδασης

Η πειραματική γραμμή στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα κατέληγε σε ένα γωνιομετρικό θάλαμο σκέδασης, κατάλληλο για πειράματα οπισθοσκέδασης. Στο κέντρο του θαλάμου αυτού βρίσκεται μία στήλη η οποία έχει τη δυνατότητα να μετακινείται καθέτως αλλά και να περιστρέφεται. Πάνω σ' αυτή τη στήλη τοποθετείται ο προς μελέτη στόχος, η κατάλληλη θέση του οποίου καθορίζεται έτσι ώστε η δέσμη που εισέρχεται στο θάλαμο να προσκρούει πάνω του κάθετα. Στην είσοδο του θαλάμου τοποθετήθηκαν κατευθυντήρες (collimator και anti-scatterer) της δέσμης, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, με αποτέλεσμα το μέγεθος της δέσμης να διαμορφώνεται στο 1×1 mm². Περιμετρικά του θαλάμου και πάνω στη διπλή γωνιομετρική τράπεζα υψηλής ακρίβειας (0.1°) τοποθετήθηκαν 6 ανιχνευτές πυριτίου σε γωνίες οπισθοσκέδασης, και συγκεκριμένα στις γωνίες, 120° , 130° , 140° , 150° , 160° και 170° και σε απόσταση $\sim 8 - 12$ cm από το στόχο (Εικόνες 2.2.1 και 2.2.2).

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος ο θάλαμος παρέμεινε κλειστός υπό υψηλό κενό της τάξης των 10^{-6} mbar. Το κενό επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας δύο αντλιών κενού, μιας περιστροφικής αντλίας λαδιού (rotary) για τη δημιουργία προκενού και μιας στροβιλομοριακής αντλίας (turbo) για την επίτευξη υψηλού κενού.



Εικόνα 2.2.1: Γωνιομετρικός Θάλαμος Σκέδασης. Στο κέντρο βρίσκεται η βάση του στόχου. Είναι επίσης ορατοί οι σωλήνες αλουμινίου καθώς και οι έξοδοι των σημάτων των ανιχνευτών



Εικόνα 2.2.2: Εσωτερικό θαλάμου. Στο κέντρο βρίσκεται η βάση με το στόχο – κάθετη στην κατεύθυνση της δέσμης, πλαισιώνεται από τους ανιχνευτές προσαρμοσμένους πάνω στη διπλή γωνιομετρική τράπεζα. Μπροστά από το στόχο φαίνεται ο τελευταίος κατευθυντήρας της δέσμης.

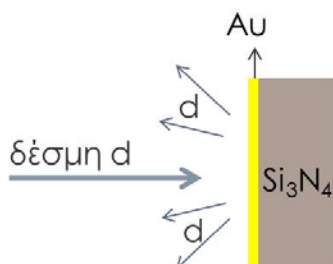
2.2.2 Προετοιμασία Στόχου

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν μια υπέρλεπτη, υψηλής καθαρότητας μεμβράνη νιτριδίου του πυριτίου (Silicon Nitride - Si_3N_4), με ονομαστικό πάχος 75 nm (Silson Ltd.). Ο στόχος περιβαλλόταν από ένα λείο παράθυρο πυριτίου (Si) και ήταν τετραγωνικού σχήματος με ενεργή περιοχή $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Στην μπροστινή επιφάνεια του στόχου (η επιφάνεια που είναι στραμμένη προς τη δέσμη) εξαχνώθηκε ένα υπέρλεπτο στρώμα χρυσού ($\sim 14 \times 10^{15} \text{ at/cm}^2$) για λόγους κανονικοποίησης. Για την εξάχνωση χρησιμοποιήθηκε ο εξαχνωτήρας του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» (Εικόνα 2.2.3). Ο στόχος τοποθετήθηκε με την προς εξάχνωση επιφάνεια προς τα κάτω σε ύψος περίπου 15 cm από τον χρυσό. Στη συνέχεια υπό την εφαρμογή υψηλού κενού στο θάλαμο του εξαχνωτήρα, αυξήθηκε σταδιακά η θερμοκρασία έως ότου επιτευχθεί η εξάχνωση του χρυσού, δημιουργώντας ταυτόχρονα ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του στόχου προς την πλευρά πρόσπτωσης της δέσμης d (Εικόνα 2.2.4).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τόσο η δημιουργία υψηλού κενού όσο και η αύξηση της θερμοκρασίας έγιναν σταδιακά και με αργό ρυθμό έτσι ώστε να αποφευχθεί τυχόν καταστροφή του στόχου, καθώς ήταν υπέρλεπτος και εξαιρετικά εύθραυστος.



Εικόνα 2.2.3: Εξαχνωτήρας



Εικόνα 2.2.4: Σχηματική αναπαράσταση στόχου

2.2.3 Ανιχνευτές Πυριτίου – Αρχές Λειτουργίας

Οι ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου ανήκουν στην κατηγορία ανιχνευτών ημιαγωγών και λειτουργούν μέσω δημιουργίας ζεύγους οπής – ηλεκτρονίου.

Το περιοδικό πλέγμα των κρυσταλλικών υλικών καθορίζει ενεργειακές ζώνες για τα ηλεκτρόνια του στερεού. Η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου που υπάρχει στο υλικό αντιστοιχεί σε κάποια από τις ενεργειακές αυτές ζώνες, οι οποίες είναι διακριτές και χωρίζονται είτε με κενά (gaps) είτε με περιοχές απαγορευμένων ενεργειών.

Πιο συγκεκριμένα στους ημιαγωγούς, η χαμηλότερη ενεργειακά ζώνη, ονομάζεται ζώνη σθένους ενώ η υψηλότερη ενεργειακά ζώνη είναι η ζώνη αγωγιμότητας και περιγράφει τα ηλεκτρόνια τα οποία είναι ελεύθερα να κυκλοφορούν στο υλικό. Οι δύο αυτές ζώνες χωρίζονται με ένα κενό το μέγεθος του οποίου ποικίλει ανάλογα με το υλικό. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διασχίσει τον ημιαγωγό αλληλεπιδρά με κάποια από τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους, τα οποία αποκτούν αρκετή ενέργεια, τέτοια ώστε να διασχίσουν το κενό μεταξύ των ζωνών και να φθάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Μέσω αυτής της διέγερσης του ηλεκτρονίου δημιουργείται στη ζώνη σθένους μία οπή, και κατ' επέκταση παρουσιάζεται η δημιουργία ενός ζεύγους οπής – ηλεκτρονίου. Επομένως, έπεται, ότι όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο με επαρκή ενέργεια διασχίζει έναν ημιαγωγό δημιουργεί πληθώρα ζευγών οπών – ηλεκτρονίων μέσα στον ημιαγωγό.

Στη συνέχεια, εφόσον ο ημιαγωγός βρίσκεται υπό τάση και οι δύο φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια και οπές) θα ολισθήσουν σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων και των οπών δημιουργεί ένα ρεύμα το οποίο θα παραμείνει έως ότου οι φορείς αυτοί συλληχθούν στα όρια του ενεργού όγκου. Οπότε κατ' αυτό τον τρόπο παράγεται από τον ανιχνευτή ένα σήμα ανάλογο της ενέργειας που αφήνει το διερχόμενο φορτισμένο σωματίδιο. Μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών, που αναφέρονται στη συνέχεια, το σήμα αυτό καταγράφεται σε μορφή φάσματος.

2.2.4 Ανιχνευτική Διάταξη

Όπως προαναφέρθηκε, το ανιχνευτικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αποτελούνταν από έξι ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (Silicon Surface Barrier – SSB). Οι πέντε ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πάχος 500 μm ενώ ένας ήταν πάχους 1000 μm . Βρέθηκε μέσω του προγράμματος SRIM [Zi13] ότι ήταν όλοι ικανοί να σταματήσουν τα δευτέρια του ενεργειακού εύρους που μελετάται ($E_{d,lab}=1000-2200$ keV) και είχαν αναλυτική ικανότητα (resolution) 13 keV

[Nt17]. Οι ανιχνευτές αυτοί τοποθετήθηκαν επάνω στη διπλή γωνιομετρική τράπεζα υψηλής ακρίβειας (0.1°), με τη βοήθεια βάσεων σε γωνίες 120° , 130° , 140° , 150° , 160° και 170° και σε απόσταση $\sim 8 - 12$ cm από το στόχο.

Η επιφάνεια των ανιχνευτών έχει διάμετρο ~ 1 cm γεγονός το οποίο αυξάνει τη γωνιακή αβεβαιότητα. Συνεπώς μπροστά από τους ανιχνευτές τοποθετήθηκαν ορθογώνιες κάθετες σχισμές (slits) εμβαδού $\sim 3.5 \times 9$ mm² για τη μείωση της αβεβαιότητας της αζιμουθιακής γωνίας ($< \pm 1^\circ$), ενώ ταυτόχρονα διατηρήθηκε η επάρκεια της ενεργού στερεάς γωνίας των ανιχνευτών. Επίσης στην είσοδο των ανιχνευτών τοποθετήθηκαν σωλήνες αλουμινίου μικρής διαμέτρου ~ 1.1 cm και διαφόρων μηκών (3-5 cm), για την αποφυγή ανίχνευσης σωματιδίων που σκεδάζονται από τα τοιχώματα του θαλάμου ή/και του Faraday cup που βρίσκεται στο τέλος της γραμμής, μετά το θάλαμο (είναι εμφανές στην Εικόνα 2.1.4 – δεξιά του θαλάμου) και συνεισφέρουν στο υπόβαθρο των κορυφών του αζώτου. Οι σχισμές και οι σωλήνες αλουμινίου είναι στοιχεία ορατά στις Εικόνες 2.2.5 και 2.2.1. Τα σήματα των ανιχνευτών εξέρχονται από το θάλαμο από τις αντίστοιχες εξόδους και είναι συνδεδεμένα με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά, έτσι ώστε να καταγράφονται ταυτόχρονα και από τους έξι ανιχνευτές για κάθε ενέργεια δευτερίων.

Η ανάγκη για πολύ μικρή αβεβαιότητα στην γωνία ($d\theta$), θα επέβαλλε είτε τη χρήση ανιχνευτή μικρής επιφάνειας, είτε την απομάκρυνση ανιχνευτή μεγάλης επιφάνειας από το στόχο. Και οι δύο λύσεις αυξάνουν σημαντικά το χρόνο μέτρησης εφόσον μειώνεται η επαρκής στατιστική και συνεπώς η μέτρηση δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε εύλογο χρονικό διάστημα. Επομένως, είναι απαραίτητος ένας συμβιβασμός στο συνδυασμό διαστάσεων ανιχνευτή και απόστασης που να οδηγεί σε αβεβαιότητα της τάξης των 1° έως το πολύ 2° . Και για τον περαιτέρω περιορισμό της αβεβαιότητας στη 1° μοίρα χρησιμοποιούνται οι σχισμές. Οι σχισμές τοποθετούνται κάθετα στην επιφάνεια των ανιχνευτών καθώς η υπό μελέτη αντίδραση (αλλά και οι περισσότερες αντιδράσεις) παραμένει αναλλοίωτη ως προς τη γωνία στροφής ϕ .



Εικόνα 2.2.5: Slits ανιχνευτών πυριτίου

2.2.5 Σύστημα Ηλεκτρονικών

Ένας ανιχνευτής παράγει σήμα ύψους ανάλογο της ενέργειας που αφήνει το ανιχνευόμενο σωματίδιο. Η κανονική λειτουργία του ανιχνευτή επιτυγχάνεται όταν αυτός βρίσκεται υπό τάση. Το σήμα του ανιχνευτή όμως για να καταλήξει στην μορφή φάσματος όπως αυτό εμφανίζεται στον υπολογιστή, διαμορφώνεται καθώς περνά μέσα από ένα σύστημα ηλεκτρονικών.

Η διαδρομή που ακολουθεί επομένως το σήμα έχει ως εξής: το σήμα που παράγει κάθε ανιχνευτής περνάει από έναν προενισχυτή, ο οποίος του δίνει μια μικρή ενίσχυση, που σκοπό έχει την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Μέσω του προενισχυτή παρέχεται στον ανιχνευτή και η τάση λειτουργίας του από ένα τροφοδοτικό τάσης. Στη συνέχεια το σήμα διαμορφώνεται μέσω ενός ενισχυτή, όπου και ενισχύεται κατά το επιθυμητό. Για την κατάλληλη διαμόρφωση ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει μερικές παραμέτρους όπως είναι ο χρόνος διαμόρφωσης (shaping time) και η παράμετρος «role zero», που καθορίζει το σημείο μηδενισμού του παλμού, δηλαδή το πότε τελειώνει ένας παλμός και το σύστημα είναι έτοιμο να μετρήσει τον επόμενο. Το σήμα έπειτα μετατρέπεται σε ψηφιακό, μέσω ενός αναλογικοψηφιακού μετατροπέα (Analog to Digital Converter – ADC) και καταχωρείται ανάλογα με το ύψος του σε ένα κανάλι, μέσω του πολυκαναλικού αναλυτή (Multi-Channel Analyzer – MCA).

Η ρύθμιση της ενίσχυσης (gain) έγινε μέσω ακτινοβόλησης του στόχου με δέσμη πρωτονίων. Όπως αναφέρθηκε στην επιφάνεια του στόχου βρίσκεται λεπτό στρώμα χρυσού, επομένως χρησιμοποιώντας δέσμη πρωτονίων με ενέργεια $E_{p,lab}=980$ keV ρυθμίστηκε η ενίσχυση έτσι ώστε η κορυφή του χρυσού που έχει τη μεγαλύτερη ενέργεια (βαρύ στοιχείο) να βρίσκεται σχεδόν στο μέσο του πλήθους των καναλιών που υπάρχουν διαθέσιμα (καθιστώντας έτσι δυνατή τη μέτρηση εντός φάσματος των οπισθοσκεδαζόμενων, ελαστικά σκεδαζόμενων δευτερίων από χρυσό μέγιστης ενέργειας, $E_{d,lab}=2200$ keV). Τα σκεδαζόμενα πρωτόνια από το χρυσό, έχουν ενέργεια κοντινή στην τιμή ενέργειας της δέσμης.

Για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε μια ενιαία μονάδα για την προενίσχυση και ενίσχυση του σήματος καθώς και το αντίστοιχο τροφοδοτικό τάσης. Επιπλέον επιλέχθηκε η καταχώρηση των παλμών σε 1024 κανάλια, λόγω της ανάλογης διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών. Τέλος το φάσμα που προκύπτει απεικονίζει σωματίδια (γεγονότα) που ανιχνεύθηκαν με αντίστοιχη ενέργεια (κανάλι). Ο προσδιορισμός της αντιστοιχίας καναλιών σε ενέργειες, γίνεται μέσω της βαθμονόμησης των ηλεκτρονικών που περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου.

2.3 Ενεργειακή Βαθμονόμηση Επιταχυντή

Πριν την έναρξη του πειράματος έγινε η απαραίτητη βαθμονόμηση του επιταχυντή, δηλαδή η βαθμονόμηση της ενέργειας που έχει πρακτικά η δέσμη όταν φτάνει στον υπό μελέτη στόχο. Η δέσμη που παρέχεται από τον επιταχυντή είναι θεωρητικά μονοενεργειακή και ιδανικά έχει τη μορφή μιας συνάρτησης δέλτα (δ -function). Στην πραγματικότητα όμως, καθώς η μονοενεργητικότητα της δέσμης καθορίζεται μέσω μαγνητικού πεδίου, που προσαρμόζεται αναλόγως με την επιθυμητή από το χρήστη τιμή, παρουσιάζονται μικρές αποκλίσεις στην ενέργεια αυτής. Έτσι η συνάρτηση που περιγράφει την ενέργεια της δέσμης είναι μορφής κατανομής τύπου Gauss, η οποία περιγράφει τις αποκλίσεις που παρουσιάζονται γύρω από την κεντρική τιμή της ενέργειας.

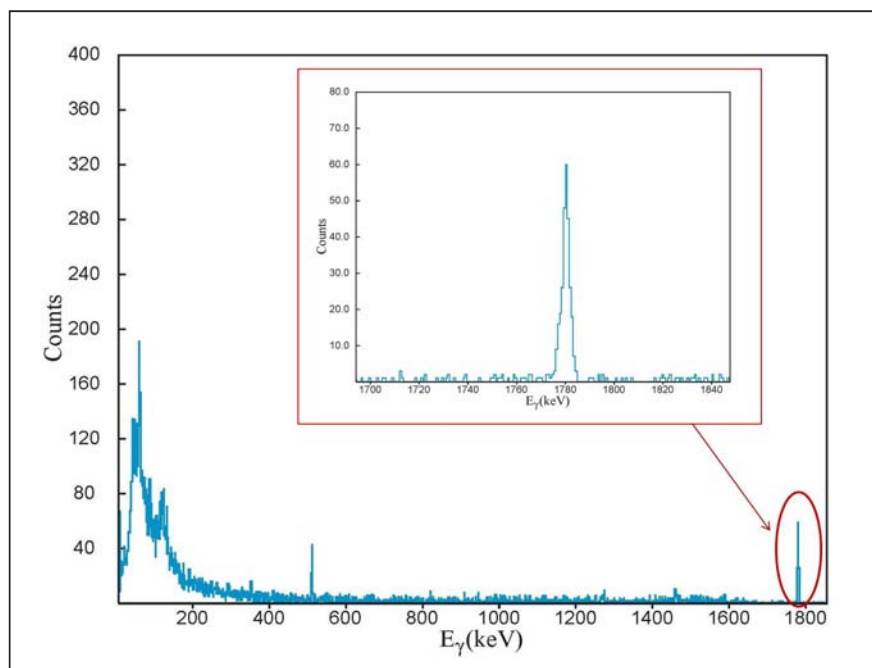
Η αβεβαιότητα αυτή, στην ενέργεια της δέσμης, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της μελέτης λεπτών συντονισμών που μας δίνουν οι αντιδράσεις (p, γ) [Wa09] όπως είναι για παράδειγμα οι αντιδράσεις $^{27}\text{Al}(p,\gamma)$, $^{13}\text{C}(p,\gamma)$ και $^{32}\text{Si}(p,\gamma)$. Ειδικότερα για τη βαθμονόμηση του επιταχυντή στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση $^{27}\text{Al}(p,\gamma)$ η οποία παρουσιάζει έναν πολύ καλά μελετημένο ισχυρό και λεπτό συντονισμό (εύρους $\Gamma \sim 110$ eV) για ενέργεια δέσμης πρωτονίων $E_{p,\text{lab}} = 991.89$ keV. Το ενεργειακό επίπεδο αυτό, του διεγερμένου πυρήνα $^{28}\text{Si}^*$ που προκύπτει, αποδιεγείρεται κατά $\sim 50\%$ με ένα κλάδο δύο φωτονίων, όπου το ένα είναι ενέργειας περίπου $E_\gamma = 11$ MeV ενώ το άλλο αντιστοιχεί στην αποδιέγερση της πρώτης διεγερμένης κατάστασης του πυρήνα προς τη βασική στάθμη αυτού και έχει ενέργεια $E_\gamma = 1779$ keV. Στο πείραμα, λόγω της χρήσης ανιχνευτή HPGe μικρής απόδοσης, 18%, ανιχνεύεται αποκλειστικά η αποδιέγερση της πρώτης διεγερμένης κατάστασης ($E_\gamma = 1779$ keV), η οποία παρουσιάζει μεγάλη αύξηση γεγονότων στη φωτοκορυφή όταν η ενέργεια της δέσμης φτάσει την ενέργεια του συντονισμού $E_{p,\text{lab}} = 991.89$ keV.

Επομένως η διαδικασία της βαθμονόμησης έχει ως εξής, χρησιμοποιείται ένα παχύ φύλλο αλουμινίου το οποίο αποτελεί και τον ακτινοβολούμενο στόχο, στο εσωτερικό του Faraday cup στο τελικό σημείο της διάταξης του γωνιομέτρου. Ακριβώς πίσω από το στόχο και εκτός κενού και πειραματικής γραμμής τοποθετείται υψηλής καθαρότητας ανιχνευτής γερμανίου σχετικής απόδοσης 18% για την ανίχνευση των ακτίνων- γ και τέλος χρησιμοποιείται δέσμη πρωτονίων με αρχική ενέργεια κοντά στα $E_{p,\text{lab}} = 991.89$ keV. Στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση η αρχική ενέργεια της δέσμης ήταν $E_{p,\text{lab}} = 980$ keV, αυξανόμενη με αρχικό βήμα 5 keV έως ότου ξεκινήσει η μεγάλη αύξηση των γεγονότων στη φωτοκορυφή, δηλαδή η ενέργεια της δέσμης να πλησιάσει την ενέργεια του συντονισμού οπότε και το βήμα διαμορφώθηκε στο 1 keV για την καλύτερη μελέτη αυτού. Η τελική ενέργεια δέσμης έφτασε τα $E_{p,\text{lab}} = 1006$ keV. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα φάσμα σε ενέργεια $E_{p,\text{lab}} = 998$

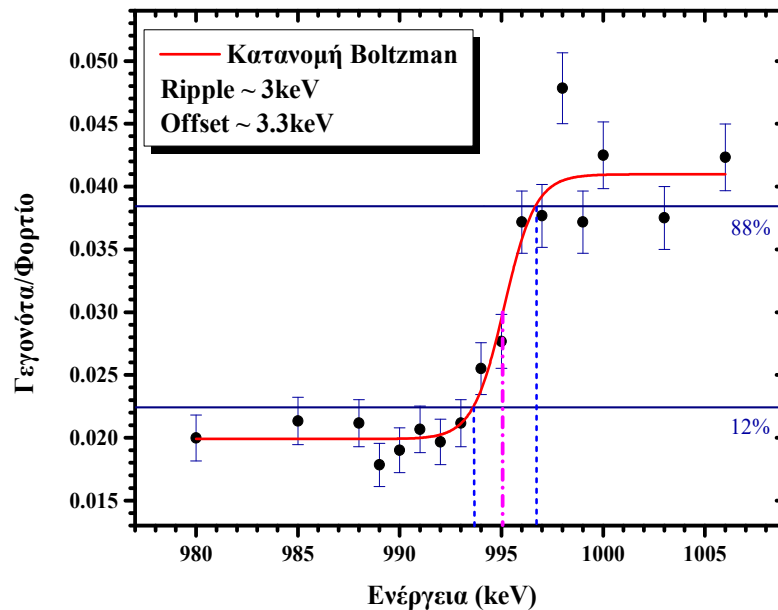
keV, από τα συνολικά 17 φάσματα που λήφθηκαν και μελετήθηκαν, της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p,\gamma)$ (Εικόνα 2.3.1).

Όπως προαναφέρθηκε σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η εύρεση της κεντρικής τιμής της ενέργειας της δέσμης, εφόσον θεωρείται μη μονοενεργειακή. Η τιμή αυτή προσδιορίζεται γραφικά μέσω του διαγράμματος γεγονότων ανά φορτίο συναρτήσει της ενέργειας (Εικόνα 2.3.2). Τα γεγονότα ανά φορτίο προκύπτουν από την ολοκλήρωση των γεγονότων που έχει η κορυφή του συντονισμού με χρήση του προγράμματος SPECTRW [Ka16] και την κανονικοποίηση αυτών ως προς το φορτίο (Εικόνα 2.3.1). Η καμπύλη του διαγράμματος έχει μια αναμενόμενη σιγμοειδή μορφή. Η μέση της ανόδου της σιγμοειδούς καμπύλης αποτελεί την κεντρική τιμή της ενέργειας της δέσμης, η οποία βρέθηκε ίση με $E_{p,\text{lab}}=995.2$ keV, ενώ το ενεργειακό εύρος που καλύπτει η άνοδος αντιπροσωπεύει το ενεργειακό εύρος της δέσμης (ripple), δηλαδή την αβεβαιότητα στην μονοενεργητικότητα της δέσμης, η οποία βρέθηκε ίση με 3 keV.

Για το προσδιορισμό της κλίσης της ανόδου και κατ' επέκταση του ενεργειακού εύρους της δέσμης χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που βρίσκονται ανάμεσα στο 12% και 88% της ανόδου αντίστοιχα. Ενώ η ενεργειακή διαφορά μεταξύ της μέσης της ανόδου $E_{p,\text{lab}}=995.2$ keV και της τιμής $E_{p,\text{lab}}=991.89$ keV όπου αναμένεται ο συντονισμός αποτελεί την ενεργειακή απόκλιση της δέσμης (offset) και βρέθηκε ίση με 3.3 keV. Η απόκλιση αυτή θεωρείται σταθερή σε όλο το ενεργειακό φάσμα που καλύπτεται στο πείραμα αυτό, καθώς το ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε ήταν περιορισμένο.



Εικόνα 2.3.1: Ενδεικτικό φάσμα της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p,\gamma)$ με $E_{p,\text{lab}}=998$ keV



Εικόνα 2.3.2: Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή

2.4 Ενεργειακή Βαθμονόμηση ADC /MCA (Αναλογικοψηφιακού Μετατροπέα/ Πολυδιαυλικού Αναλυτή)

Η επόμενη βαθμονόμηση που πρέπει να λάβει χώρα πριν την έναρξη της επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων είναι αυτή του ADC/MCA. Η βαθμονόμηση αυτή εξυπηρετεί ουσιαστικά την αντιστοίχιση των καναλιών, που ορίζονται από τα ηλεκτρονικά της διάταξης, με τις «κατάλληλες» ενέργειες που υπάρχουν στα φάσματα. Για να πραγματοποιηθεί όμως αυτή η αντιστοίχιση θα πρέπει να προσδιοριστούν οι «κατάλληλες» ενέργειες, επομένως είναι απαραίτητη η χρήση ενός στοιχείου για το οποίο να μπορεί να προσδιοριστεί μέσω υπολογισμών η τιμή της ενέργειας των σκεδαζόμενων σωματιδίων που ανιχνεύονται στο πειραματικό φάσμα. Την απαίτηση αυτή καλύπτει με εξαιρετική ακρίβεια ο χρυσός που έχει εξαχρωθεί στο έμπροσθεν μέρος του στόχου που μελετάται. Οπότε η βαθμονόμηση προκύπτει ως η αντιστοίχιση της τιμής της ενέργειας των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων με το κανάλι στο οποίο εμφανίζεται ο μέγιστος αριθμός γεγονότων ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο χρυσό $^{197}\text{Au}(d,d_0)$, για κάθε συγκεκριμένη ενέργεια και γωνία αντίστοιχα.

Η ενέργεια του οπισθοσκεδαζόμενου σωματιδίου στην ελαστική σκέδαση δευτερίων σε χρυσό στο σύστημα του εργαστηρίου υπολογίζεται μέσω του κινηματικού παράγοντα και δίνεται από την εξίσωση:

$$E_1 = E_0 \frac{M_1^2}{(M_1 + M_2)^2} \left\{ \cos\theta \pm \sqrt{\left[\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 - \sin^2\theta\right]} \right\}^2 \quad \text{Σχέση 2.2}$$

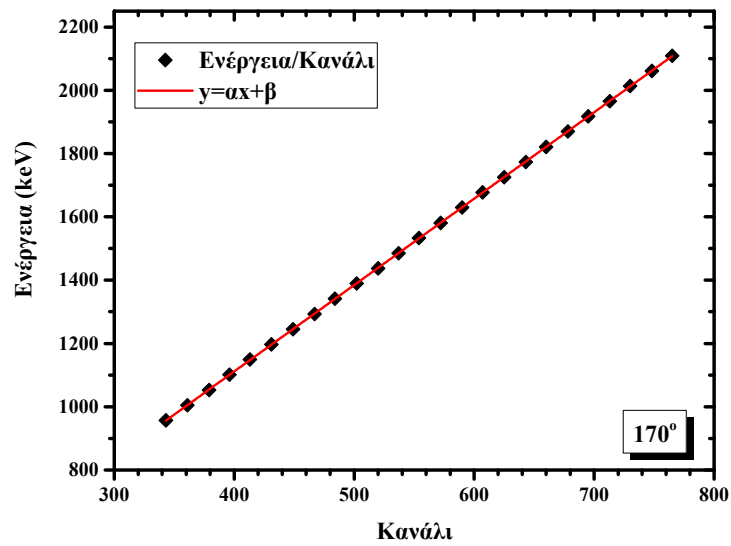
όπου E_1 είναι η ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων στο σύστημα του εργαστηρίου, E_0 είναι η ενέργεια της δέσμης, εφόσον έχει ληφθεί υπ' όψιν η ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή, M_1 και M_2 είναι οι ατομικές μάζες του σωματιδίου του δευτερίου και του χρυσού αντίστοιχα και θ είναι η γωνία σκέδασης του σωματιδίου. Εφόσον ισχύει ότι $M_1 < M_2$ στη παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται μόνο η πράξη της πρόσθεσης.

Στη συνέχεια εντοπίζεται και καταγράφεται το κανάλι στο οποίο εμφανίζεται ο μέγιστος αριθμός σκεδαζόμενων δευτερίων για κάθε ενέργεια και γωνία, για τις οποίες έχει υπολογιστεί η ενέργεια σκεδαζόμενων δευτερίων με την χρήση της παραπάνω εξίσωσης. Στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν φάσματα χρυσού με ενεργειακό βήμα ~ 50 keV. Τα αποτελέσματα αυτά αναπαριστώνται γραφικά, όπως φαίνεται στα διαγράμματα ενέργειας – καναλιών (Εικόνες 2.4.1-2.4.6) Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι η σχέση που περιγράφει τα αποτελέσματα είναι γραμμική και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η κλίση (α) και ο σταθερός όρος (β) της γραμμικής μορφής της συνάρτησης για κάθε γωνία ανίχνευσης. Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη αυτά για κάθε γωνία είναι εφικτή η ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων που δίνει ο κάθε ανιχνευτής.

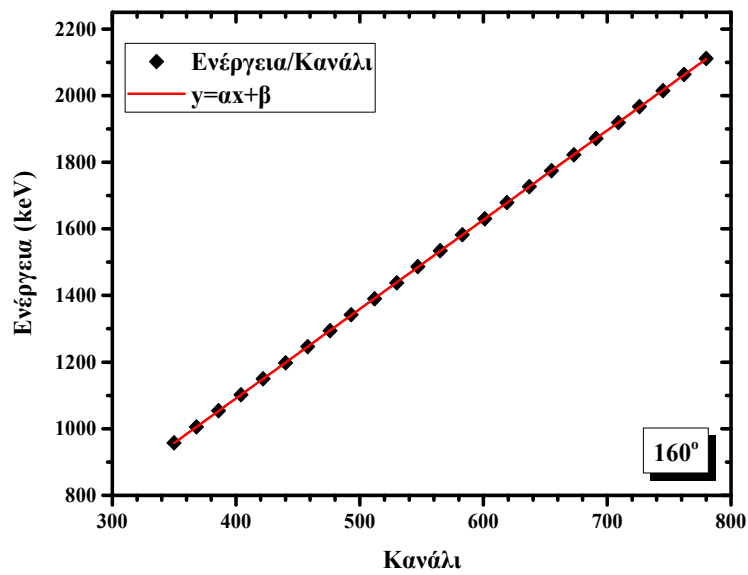
Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.1. Σε όλες τις περιπτώσεις η γραμμικότητα ήταν εξαιρετική και οι αποκλίσεις δεν ξεπέρασαν το 0.12% στη χειρότερη των περιπτώσεων (120°). Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι δεν συνυπολογίσθηκε το PHD (Pulse Height Defect), η μικρή αναντιστοιχία δηλαδή μεταξύ της καταγραφόμενης από τον ανιχνευτή και της 'πραγματικής' ενέργειας των σωματιδίων, η οποία οφείλεται στην επίδραση του παραθύρου του ανιχνευτή και του πολύ μικρού ποσοστού της συνολικής ενέργειας των δευτερίων το οποίο δεν προκαλεί ιονισμό, δηλαδή δεν οδηγεί στη δημιουργία ζευγών οπών-ηλεκτρονίων εντός του ανιχνευτή. Αυτό έγινε διότι η επίδραση του PHD για ενέργειες δευτερίων της τάξης των 1-2 MeV είναι πρακτικά αμελητέα (αποκλίσεις από τη γραμμικότητα μικρότερες του 0.4% [Le90]).

Πίνακας 2.1

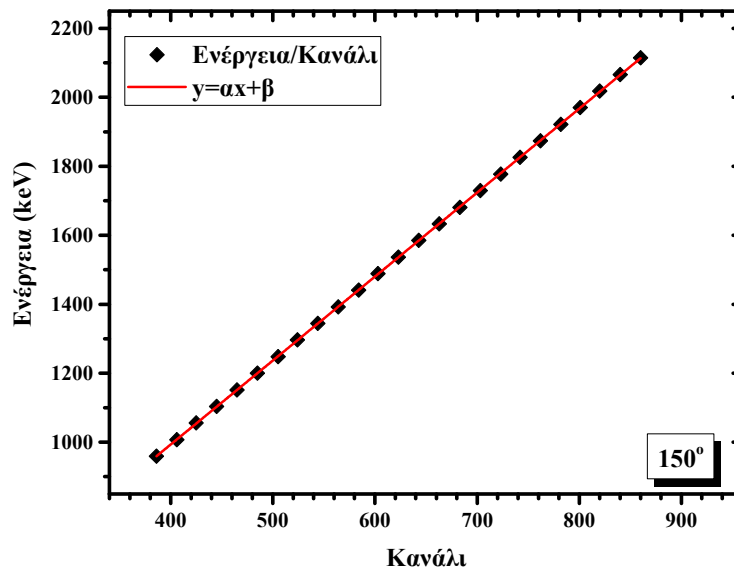
Γωνία	Ενέργεια/Κανάλι		Σταθερός Όρος	
	α	$\delta(\alpha)$	β	$\delta(\beta)$
170	2.7292	± 0.0016	19.9	± 0.9
160	2.6818	± 0.0014	18.7	± 0.8
150	2.4345	± 0.0016	19.6	± 1.0
140	2.7200	± 0.0017	18.3	± 0.9
130	2.5195	± 0.0011	19.3	± 0.7
120	3.196	± 0.003	-17.4	± 1.9



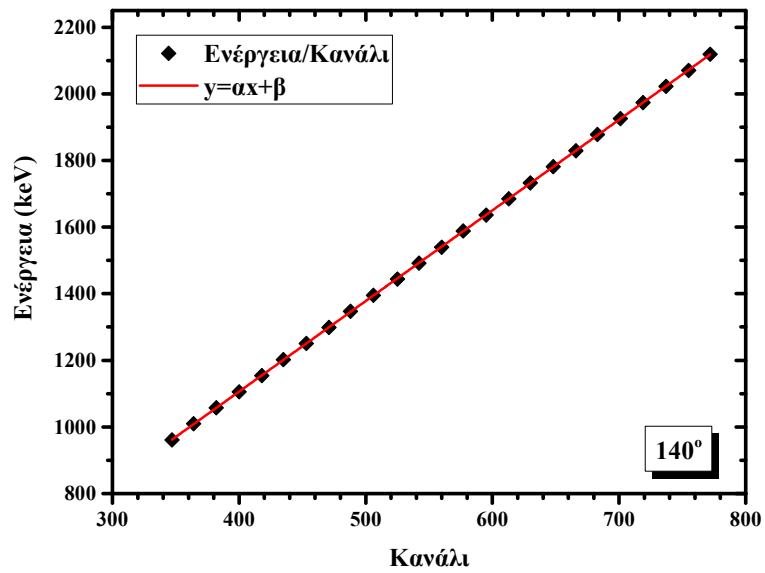
Εικόνα 2.4.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή στις 170°.



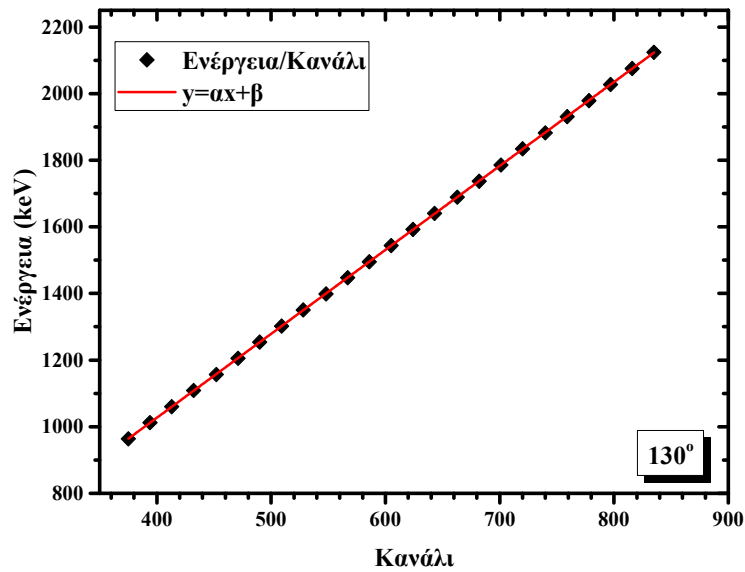
Εικόνα 2.4.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή στις 160°.



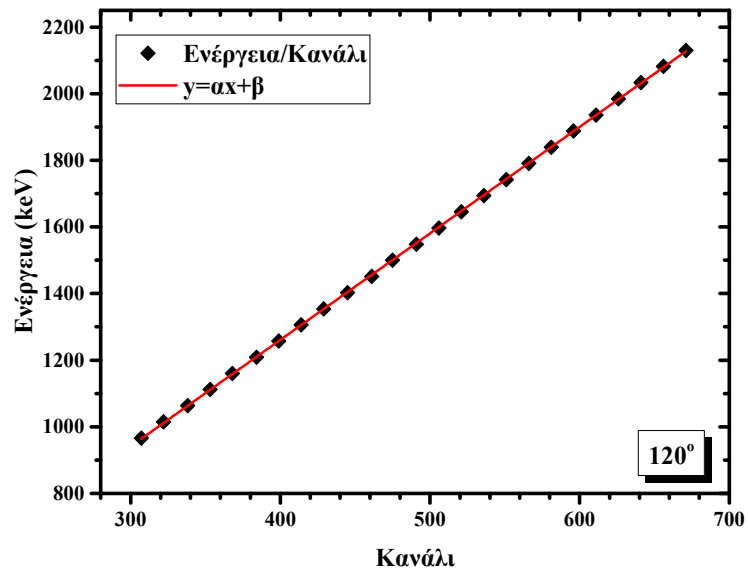
Εικόνα 2.4.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή στις 150°



Εικόνα 2.4.4 Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή στις 140°.



Εικόνα 2.4.5 Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή στις 130°.



Εικόνα 2.4.6 Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή στις 120°.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων & Αποτελέσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας, όπως προαναφέρθηκε, είναι ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο (^{nat}N). Επομένως στο παρόν κεφάλαιο επεξηγείται – βήμα προς βήμα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από το πείραμα, ενώ ταυτόχρονα παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής με τα αντίστοιχα σφάλματα.

3.1 Διαφορική Ενεργός Διατομή

Η διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης ενός στοιχείου προσδιορίζεται μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων, για κάθε τιμή της ενέργειας (E) στο μέσο του πάχους του στόχου και της γωνίας σκέδασης (θ) μέσω της σχέσης:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta} = \frac{Y}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N_t} \quad \text{\underline{Σχέση 3.1}}$$

όπου τα μεγέθη που εμφανίζονται είναι αντιστοίχως τα εξής:

Y : συνολικό άθροισμα γεγονότων της κορυφής του προς μελέτη στοιχείου που προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα

ε : απόδοση ανιχνευτή (quantum efficiency) (=1 για φορτισμένα σωματίδια και ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου)

Q : αριθμός σωματιδίων που πέφτουν στο στόχο

Ω : στερεά γωνία ανιχνευτή [sr]

N_t : συνολικός αριθμός των ατόμων του στοιχείου στο στόχο [σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας, άτομα/cm²]

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται σε πειράματα όπου πραγματοποιούνται απόλυτες μετρήσεις διαφορικής ενεργού διατομής.

Μία εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού της διαφορικής ενεργού διατομής ενός στοιχείου είναι μέσω της σχετικής αυτής μέτρησης [Pa14]. Σε μία σχετική μέτρηση διαφορικής ενεργού διατομής, μετράται ταυτόχρονα με το στοιχείο που είναι προς μελέτη και η διαφορική ενεργός διατομή ενός στοιχείου, του οποίου η διαφορική ενεργός διατομή είναι γνωστή για τις ενέργειες και γωνίες στις οποίες

πραγματοποιείται το πείραμα. Ειδικότερα, εάν το στοιχείο αυτό ακολουθεί την σχέση διαφορικής ενεργού διατομής κατά Rutherford, όπως είναι ο χρυσός που εξαχνώθηκε στην επιφάνεια του παρόντος στόχου, τότε η αβεβαιότητα του τελικού αποτελέσματος για τη διαφορική ενεργό διατομή του αγνώστου στοιχείου μειώνεται σημαντικά, διότι η διαφορική ενεργός διατομή κατά Rutherford δεν εμπεριέχει σφάλματα. Επομένως καθώς οι μετρήσεις αυτές για τα δύο στοιχεία γίνονται ταυτόχρονα και στην ίδια πειραματική διάταξη τα μεγέθη Q και Ω είναι κοινά, οπότε διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις για τη διαφορική ενεργό διατομή κάθε στοιχείου (Σχέση 3.1), και πιο συγκεκριμένα για το άζωτο και το χρυσό, προκύπτει η εξής σχέση:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^N = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E',\theta}^{Au,Ruth} \times \frac{Y_N}{Y_{Au}} \times \frac{N_{Au}}{N_N} \quad \underline{\text{Σχέση 3.2}}$$

όπου τα μεγέθη που εμφανίζονται είναι αντιστοίχως:

θ : γωνία σκέδασης

E : ενέργεια στο μέσο του πάχους του στόχου

E' : ενέργεια στην επιφάνεια του στόχου (βαθμονομημένη ενέργεια δέσμης)

Y_N : συνολικό άθροισμα γεγονότων της κορυφής του αζώτου, όπως προκύπτουν από τα πειραματικά φάσματα

Y_{Au} : συνολικό άθροισμα γεγονότων της κορυφής του χρυσού, όπως προκύπτουν από τα πειραματικά φάσματα

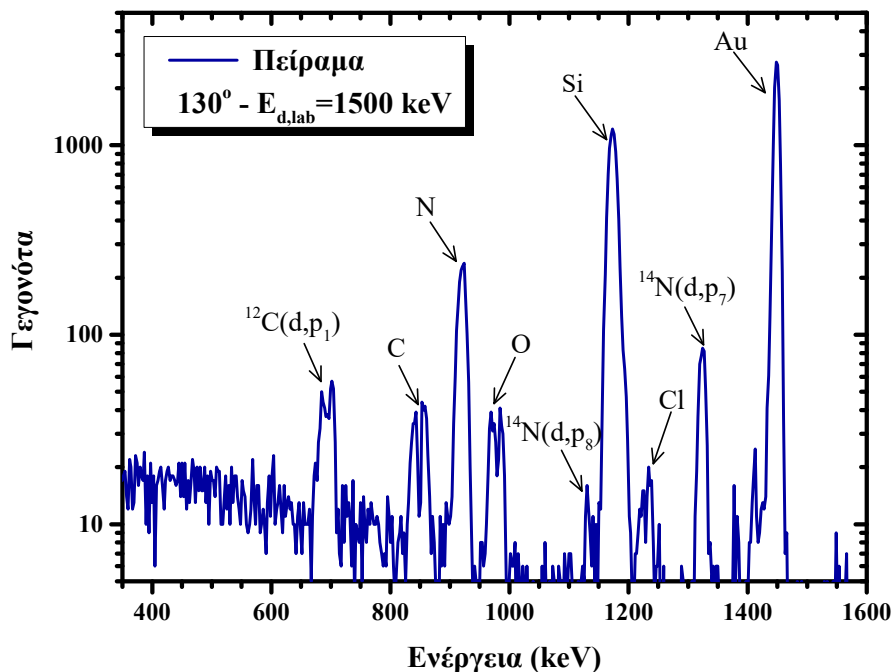
N_{Au}/N_N : ο λόγος του συνολικού αριθμού ατόμων χρυσού προς τον αντίστοιχο συνολικό αριθμό ατόμων αζώτου στο στόχο

Σε αυτή την εργασία προτιμήθηκε η μέθοδος της σχετικής μέτρησης της διαφορικής ενεργού διατομής καθώς απαλλάσσει το τελικό αποτέλεσμα από μεγέθη που ο προσδιορισμός τους προσθέτει μεγάλη αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα, όπως είναι η μέτρηση του αριθμού των σωματιδίων που φθάνουν στην επιφάνεια του στο στόχου (Q) και η στερεά γωνία των ανιχνευτών (Ω).

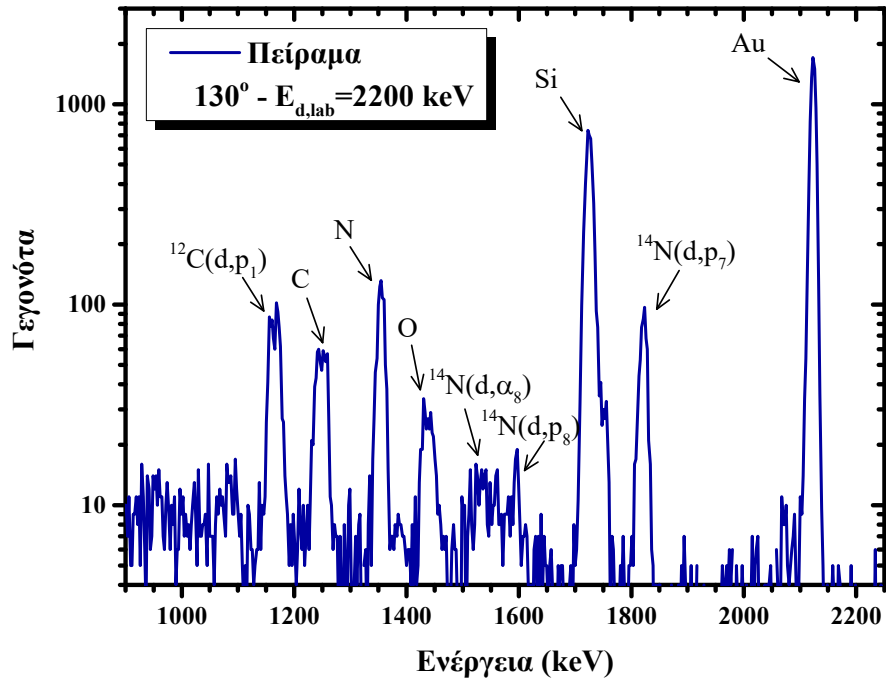
Στη συνέχεια εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκαν οι επιμέρους παράγοντες της παραπάνω σχέσης για τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο.

3.1.1 Ολοκλήρωση Κορυφών

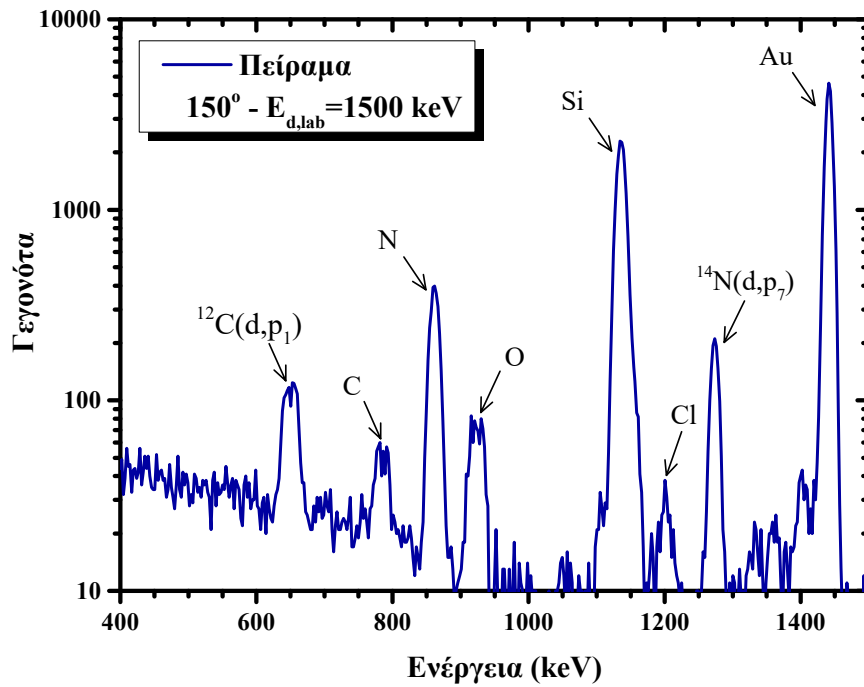
Για την επεξεργασία των πειραματικών φασμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SPECTRW, με την βοήθεια του οποίου έγινε η ολοκλήρωση των κορυφών του αζώτου και του χρυσού αφού πρώτα αφαιρούνταν από το κάθε ένα από αυτά το υποβάθρο. Όπως παρατηρείται στα ενδεικτικά φάσματα που ακολουθούν (Εικόνες 3.1.1 - 3.1.5), δεν υπήρχαν επικαλύψεις κορυφών ή μεγάλη συνεισφορά υποβάθρου στις κορυφές που μελετώνται. Επίσης, παρ' όλο που υπήρξε παρασιτική συνεισφορά από οξυγόνο και άνθρακα δεν επηρεάστηκαν οι κορυφές του αζώτου και του χρυσού. Επίσης σημαντικό είναι ότι το στατιστικό σφάλμα στην τιμή των γεγονότων στη κορυφή του χρυσού (γ_{Au}) δεν ξεπέρασε το 1% ενώ το αντίστοιχο στατιστικό σφάλμα για τα γεγονότα στις κορυφές του αζώτου (γ_N) έφτασε έως το 3.5%. Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω πέντε πειραματικά φάσματα από το σύνολο των 726 πειραματικών φασμάτων που μελετήθηκαν, μαζί με το χαρακτηρισμό των καταγεγραμμένων κορυφών. Είναι προφανές ότι με την αύξηση της ενέργειας των δευτερίων ενισχύεται η πολυπλοκότητα των φασμάτων και αντίστοιχα ο αριθμός των γεγονότων υποβάθρου.



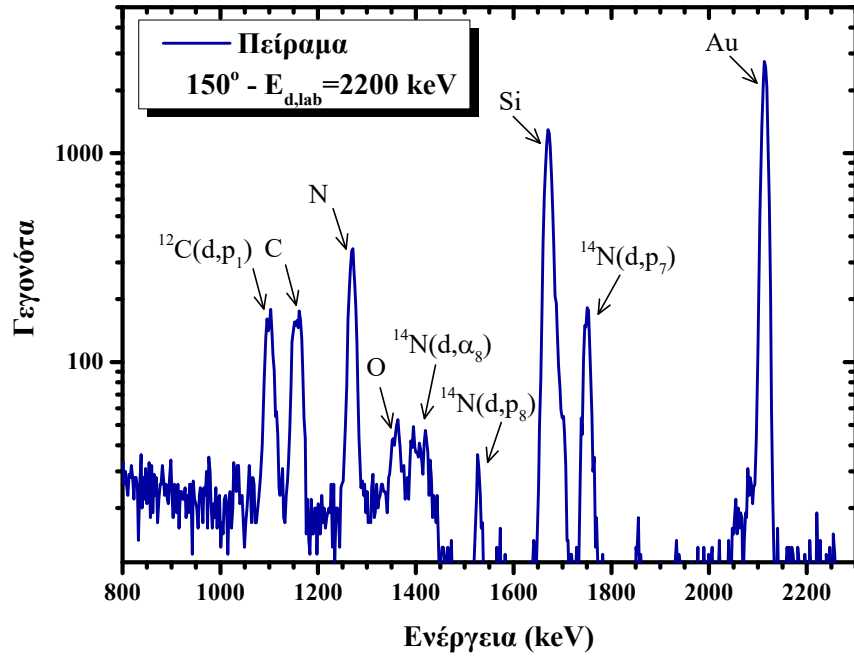
Εικόνα 3.1.1: Πειραματικό Φάσμα $E_{d,lab}=1500$ keV, 130° .



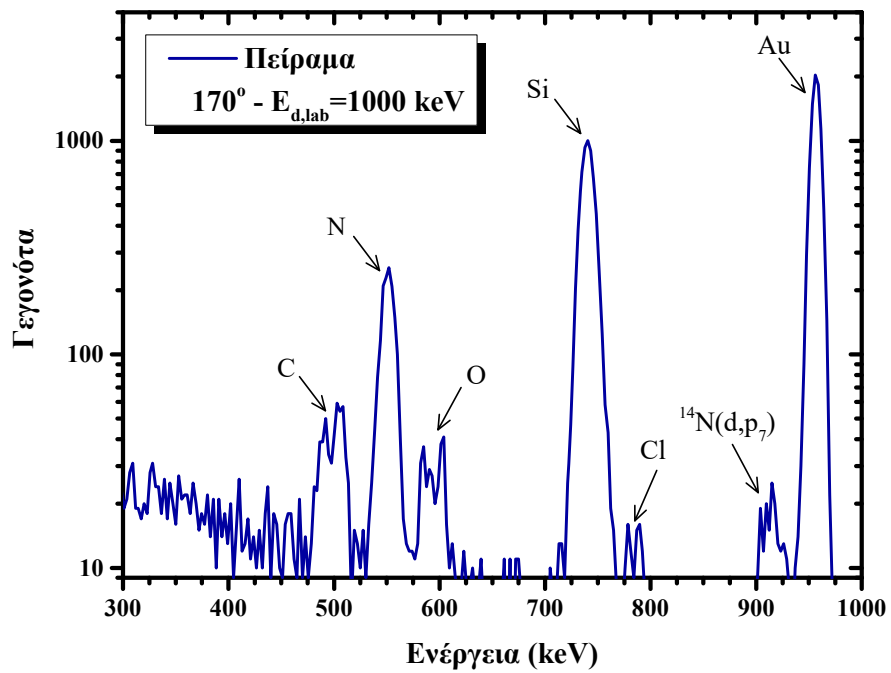
Εικόνα 3.1.2: Πειραματικό Φάσμα $E_{d,lab} = 2200 \text{ keV}$, 130°



Εικόνα 3.1.3: Πειραματικό Φάσμα $E_{d,lab} = 1500 \text{ keV}$, 150°



Εικόνα 3.1.4: Πειραματικό Φάσμα $E_{d,lab}=2200$ keV, 150°



Εικόνα 3.1.5: Πειραματικό Φάσμα $E_{d,lab}=1000$ keV, 170°

3.1.2 Υπολογισμός Ενεργού Διατομής Χρυσού

Η μέθοδος της σχετικής μέτρησης διαφορικής ενεργού διατομής προϋποθέτει τον προσδιορισμό της διαφορικής ενεργού διατομής του στοιχείου ως προς το οποίο γίνεται η μέτρηση. Στο παρόν πείραμα εξαχνώθηκε χρυσός (Au) έμπροσθεν του δείγματος για την εκπλήρωση του σκοπού αυτού. Καθώς ο χρυσός πληροί τη σχέση της διαφορικής ενεργού διατομής κατά Rutherford μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$\sigma_R = 5.1837436 \cdot 10^6 \left(\frac{Z_1 Z_2}{E_0 [keV]} \right)^2 \cdot \frac{\left(\sqrt{M_2^2 - M_1^2 \cdot \sin^2 \theta} + M_2 \cos \theta \right)^2}{M_2 \sin^4 \theta \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \cdot \sin^2 \theta}} \left[\frac{mb}{sr} \right] \quad \text{Σχέση 3.3}$$

Η παραπάνω σχέση έχει μελετηθεί εκτενώς μέσω πειραμάτων και έχει διαπιστωθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' αυτή απέχουν από τα πειραματικά κατά ένα παράγοντα διόρθωσης (F). Η απόκλιση οφείλεται στο φαινόμενο της ηλεκτρονιακής θωράκισης του πυρήνα (screening) κατά το οποίο το φορτίο του πυρήνα του στόχου εμφανίζεται υποτιμημένο λόγω της θωράκισής του από τα πλησιέστερα σε αυτόν ηλεκτρόνια του ατόμου. Κατά συνέπεια η προσπίπτουσα δέσμη σκεδάζεται από στόχο χαμηλότερου δυναμικού το οποίο επηρεάζει την τιμή της ενεργού διατομής που μετράται, ελαττώνοντάς την.

Ο διορθωτικός παράγοντας του screening έχει μελετηθεί μέσω πειραμάτων [L'E78]. Για χαμηλές ενέργειες και γωνίες οπισθοσκέδασης έχει διαπιστωθεί ότι ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των στοιχείων του στόχου αλλά και της δέσμης και από την ενέργεια αυτής ως προς το κέντρο μάζας και δίνεται από τη σχέση:

$$F_{L'Ecuyer} = 1 - \frac{0.4873 Z_1 Z_2^{4/3}}{E_{CM}} \quad \text{Σχέση 3.4}$$

όπου η ενέργεια στο κέντρο μάζας προκύπτει ως:

$$E_{CM} = \frac{M_2 E_0}{M_1 + M_2} \quad [keV] \quad \text{Σχέση 3.5}$$

Επομένως οι τιμές της ενεργού διατομής κατά Rutherford για τον χρυσό υπολογίστηκαν μέσω της σχέσης:

$$\sigma_{screened} = F \sigma_R \quad \text{Σχέση 3.6}$$

και υπενθυμίζεται ότι η τιμή της σ_R δίνεται από τη Σχέση 3.3.

Ενδεικτικά παρατίθενται στο πίνακα που ακολουθεί μερικές τιμές της ενεργού διατομής του χρυσού για διάφορες τιμές ενέργειας και γωνία 120° , όπως

υπολογίστηκαν από τη σχέση της διαφορικής ενεργού διατομής κατά Rutherford αλλά και της διορθωμένης λόγω screening. Οι διαφορές κυμαίνονται από 1.7% για ενέργεια 1000 keV, μέχρι 0.7% για ενέργεια 2200 keV. Το φαινόμενο της ηλεκτρονιακής θωράκισης είναι πολύ λιγότερο σημαντικό για υλικά μικρού Z. Για την διευκόλυνση της αναλυτικής προσπάθειας, κατασκευάστηκε ειδικό λογιστικό φύλλο του Excel, στο οποίο ενσωματώθηκαν οι Σχέσεις 3.3-3.6 για όλους τους συνδυασμούς ενεργειών και γωνιών που μελετήθηκαν στο παρόν πείραμα.

Πίνακας 3.1

E_0 (keV)	120° Rutherford	120° Screened
1000	14376.86	14136.95
1100	11881.70	11701.46
1200	9983.93	9845.09
1300	8507.02	8397.82
1400	7335.13	7247.70
1500	6389.72	6318.63
1600	5615.96	5557.39
1700	4974.69	4925.86
1800	4437.30	4396.17
1900	3982.51	3947.53
2000	3594.22	3564.23
2100	3260.06	3234.15
2200	2970.43	2947.89

Για τον προσδιορισμό της διαφορικής ενεργού διατομής του αζώτου υπολογίστηκαν οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής του χρυσού κατά Rutherford, για κάθε γωνία (120°, 130°, 140°, 150°, 160° και 170°) και ενέργεια ($E_{d,lab} = 1000-2200$ keV) που μελετήθηκε σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω (Σχέσεις 3.3 έως 3.6).

3.1.3 Υπολογισμός του λόγου $\left(\frac{N_{Au}}{N_N}\right)$

Για το προσδιορισμό του λόγου $\left(\frac{N_{Au}}{N_N}\right)$ είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του συνολικού αριθμού ατόμων αζώτου και χρυσού που υπάρχουν στον υπό μελέτη στόχο. Για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών έγιναν συμπληρωματικές μετρήσεις με χρήση δέσμης πρωτονίων. Ο λόγος της χρήσης πρωτονίων έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν αξιολογημένα δεδομένα (evaluated data) για τη διαφορική ενεργό διατομή της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων τόσο στο άζωτο [Gu08] $^{14}\text{N}(p,p)$ όσο και στο πυρίτιο [Gu98] $^{28}\text{Si}(p,p)$ που περιέχεται στο στόχο.

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις ενέργειες δέσμης $E_{p,lab} = 980, 1200$ και 1300 keV και οι ανιχνευτές που υπήρχαν ήδη στη διάταξη, δηλαδή στις γωνίες $120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ$ και 170° . Από τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα από τους ανιχνευτές που βρίσκονταν στις $130^\circ, 150^\circ, 160^\circ$ και 170° μοίρες αντίστοιχα και σε συγκεκριμένες ενέργειες για τον κάθε ένα. Συνολικά αναλύθηκαν 10 πειραματικά φάσματα, καθώς η ανάλυση των υπολοίπων φασμάτων ήταν αδύνατη διότι εμφάνιζαν επικαλύψεις κορυφών σε συγκεκριμένους συνδυασμούς ενεργειών δέσμης και γωνίας σκέδασης.

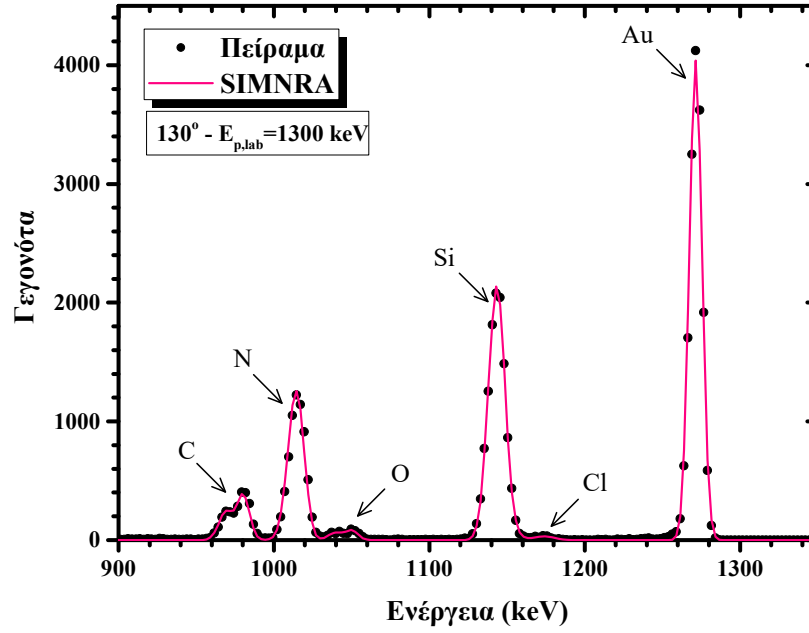
Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SIMNRA [Ma14] και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των φασμάτων περιγράφεται στη συνέχεια. Κύριος στόχος της επεξεργασίας είναι η στοιχειομετρική αναπαραγωγή του στόχου μέσω προγράμματος προσομοιώσεων (SIMNRA). Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων στο πυρίτιο $^{28}\text{Si}(p,p)$ είναι γνωστές [Gu98], για τις ενέργειες και τις γωνίες που μελετώνται και διαθέσιμες μέσω της διαδικτυακής βιβλιοθήκης SigmaCalc (<http://sigmacalc.iate.obninsk.ru>) επομένως χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού του συνολικού αριθμού ατόμων πυριτίου στο στόχο. Συνεπώς χρησιμοποιώντας ως στοιχείο αναφοράς το πυρίτιο, το οποίο περιέχεται σε ικανοποιητική ποσότητα στο στόχο, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τα μεγέθη Q (αριθμός σωματιδίων που πέφτουν στο στόχο, φορτίο) και Ω (στερεά γωνία ανιχνευτή) για κάθε ενέργεια και γωνία μέτρησης. Ο προσδιορισμός αυτός είναι δυνατός, εφόσον η διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{28}\text{Si}(p,p)$, είναι μελετημένη και πολύ καλά προσδιορισμένη (evaluated). Τα μεγέθη Q και Ω διατηρούνται σταθερά για κάθε συνδυασμό ενέργειας – γωνίας που προσδιορίζονται. Ένα ακόμη δεδομένο που χρησιμοποιήθηκε, για την αναπαραγωγή του στόχου μέσω προσομοίωσης, ήταν η ενεργειακή διακριτική ικανότητα κάθε ανιχνευτή, που είχε μετρηθεί σε προηγούμενα πειράματα [Nt17] αλλά και οι παράγοντες που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση αυτών (τα μεγέθη a

και β, βλ. Κεφ. 2.4). Έχοντας επομένως εισάγει τα παραπάνω δεδομένα στο πρόγραμμα, οι μόνοι παράγοντες που μεταβάλλονταν κατά την επεξεργασία κάθε φάσματος ήταν η ποσότητα (άτομα/cm²) των στοιχείων του αζώτου (N) και του χρυσού (Au) έως ότου γίνει η πλήρης αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής φαίνονται στα ενδεικτικά 4 φάσματα που ακολουθούν όπου τα σημεία είναι τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ η συνεχής γραμμή είναι η προσομοίωση που επετεύχθη μέσω του προγράμματος (Εικόνες 3.1.6 έως 3.1.9). Επίσης στο Πίνακα 3.2 φαίνονται οι τιμές των αριθμών σωματιδίων για το άζωτο και το χρυσό όπως προέκυψαν από την κάθε αναπαραγωγή στόχου.

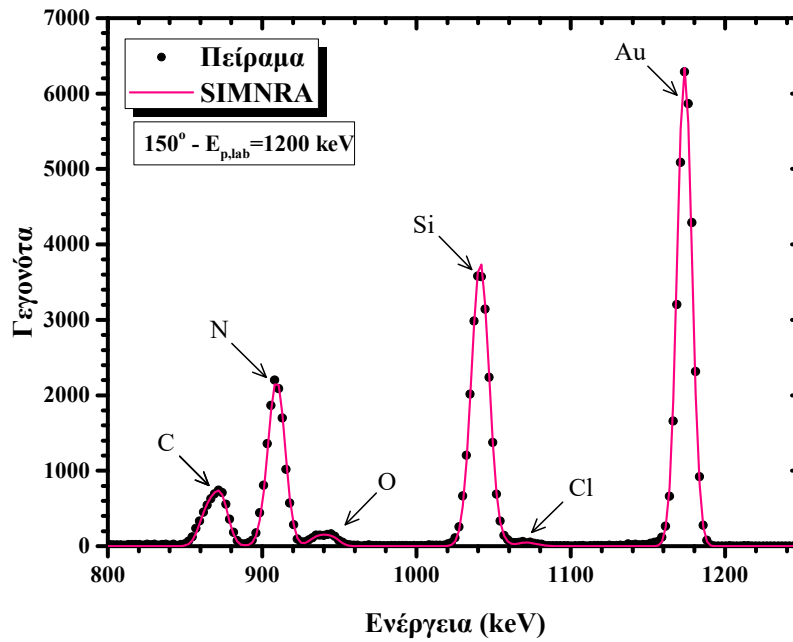
Η τελική τιμή του λόγου $\left(\frac{N_{Au}}{N_N}\right)$ αποτελεί, τον μέσο όρο των λόγων που προέκυψαν από κάθε φάσμα που αναλύθηκε, με το αντίστοιχο στατιστικό σφάλμα. Η τιμή αυτή βρέθηκε ίση με:

$$\left(\frac{N_{Au}}{N_N}\right) = 0.0423 \pm 0.0011$$

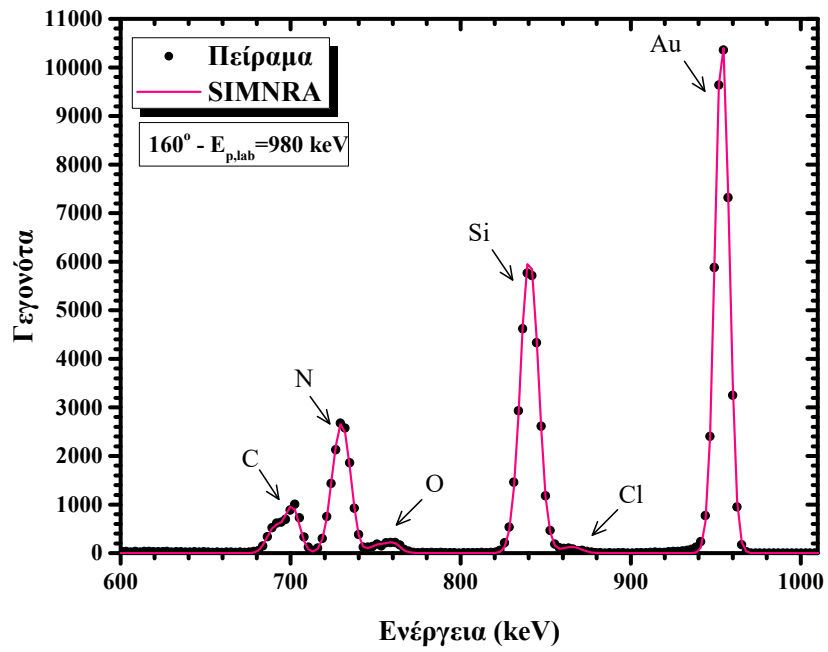
όπου το ποσοστιαίο σφάλμα είναι ίσο με 2.6%. Στο σφάλμα δεν συμπεριλαμβάνονται συστηματικά σφάλματα λόγω επιλογής συγκεκριμένης ισχύος ανάσχεσης, ενεργειακής βαθμονόμησης και συνάρτησης/προτύπου ενεργειακού και χωρικού διασκεδασμού. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η συλλογή ισχύων ανάσχεσης ZBL [Zi85] μαζί με τις πρόσφατες διορθώσεις για το πυρίτιο [Ko98a, Ko98b] και το πρότυπο των Chu [Ch76] και Yang [Ya91] για τον ενεργειακό διασκεδασμό, όπως υλοποιούνται από τον κώδικα SIMNRA v.6.94.



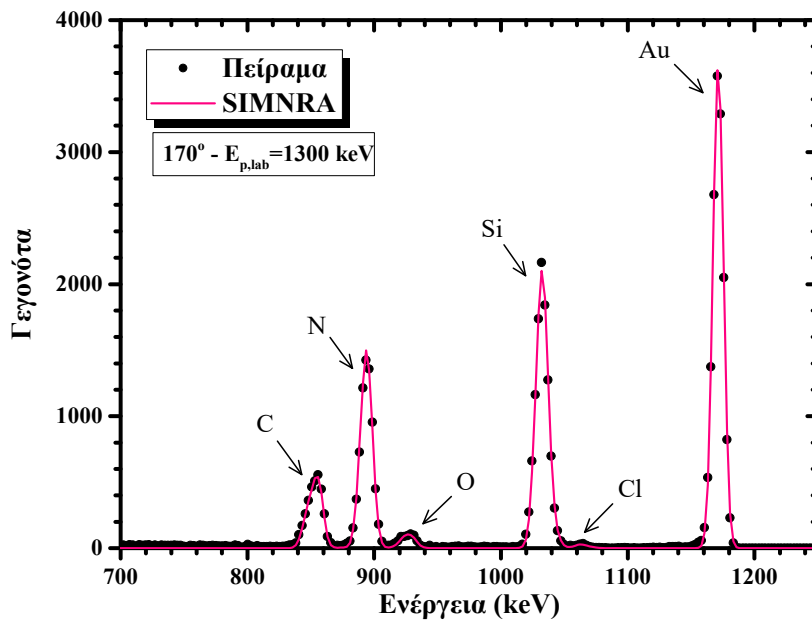
Εικόνα 3.1.6: Αναπαραγωγή Στόχου $E_{p,lab}=1300$ keV, 130°



Εικόνα 3.1.7: Αναπαραγωγή Στόχου $E_{p,lab}=1200$ keV, 150°



Εικόνα 3.1.8: Αναπαραγωγή Στόχου $E_{p,lab}=980$ keV, 160°



Εικόνα 3.1.9: Αναπαραγωγή Στόχου $E_{p,lab}=1300$ keV, 170°

Πίνακας 3.2

Γωνία	Ενέργεια	N_N (10^{15} ατομα/cm ²)	N_{Au} (10^{15} ατομα/cm ²)	Λόγος
170	1300	347.812	14.15	0.0407
170	1200	325.962	13.927	0.0427
170	980	343.63	14.049	0.0409
160	1300	336.9	14.438	0.0429
160	1200	327.18	14.123	0.0432
160	980	342.04	14.196	0.0415
150	1300	332.68	14.279	0.0429
150	1200	333.85	14.15	0.0424
140	1300	320.03	14.16	0.0442
130	1300	337.75	14.446	0.0428
130	1200	345.7	14.234	0.0412
Μέσος Όρος =				0.0423
Απόκλιση =				0.0011

3.1.4 Υπολογισμός Ενέργειας στο Μέσο του Πάχους του Στόχου

Έχοντας προσδιορίσει τη σύσταση του στόχου όπως περιγράφηκε παραπάνω καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της απώλειας ενέργειας της δέσμης δευτερίων έως το μέσο του πάχους του στόχου. Ο υπολογισμός αυτός εξυπηρετεί τον προσδιορισμό των εκάστοτε ενεργειών της δέσμης στο μέσο του στόχου και κατά συνέπεια τον υπολογισμό της ενεργού διαφορικής διατομής του αζώτου στο σημείο αυτό. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είχε ως εξής, με βάση τη σύσταση του στόχου, ο οποίος προσδιορίστηκε με την μέθοδο που συζητήθηκε προηγουμένως, δημιουργήθηκε ένας νέος εικονικός στόχος, ο οποίος αποτελούνταν από ένα πρώτο στρώμα χρυσού ίδιας ποσότητας με αυτή του πραγματικού στόχου και ενός δεύτερου στρώματος το οποίο διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχει τις μισές ποσότητες των στοιχείων που υπήρχαν στο πραγματικό στόχο, κρατώντας φυσικά σταθερές τις αναλογίες μεταξύ των στοιχείων. Συνεπώς είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απώλειας ενέργειας που έχει η δέσμη δευτερίων στον εικονικό αυτό στόχο και κατ' επέκταση στο μέσο του πραγματικού για το εύρος ενεργειών που μελετάται στο πείραμα ($E_{d,lab}=1000-2200$ keV).

Η απώλεια ενέργειας της δέσμης δευτερίων στο μέσο του πάχους του στόχου βρίσκεται να κυμαίνεται, για το ενεργειακό εύρος που μελετάται από 3 keV έως 4 keV. Η σύμβαση αυτή του προσδιορισμού της ενέργειας της δέσμης στο μέσο του πάχους του στόχου είναι αποδεκτή, εφόσον δεν παρατηρούνται απότομες αλλαγές (εντός ενεργειακού βήματος της τάξης των 3 – 4 keV) στις αξιολογημένες τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών για τις αντιδράσεις $^{14}\text{N}(d,p)$ και $^{14}\text{N}(d,\alpha)$, και για το ενεργειακό εύρος που πραγματοποιήθηκε το παρόν πείραμα. Επομένως εφόσον τόσο οι αντιδράσεις $^{14}\text{N}(d,p)$ και $^{14}\text{N}(d,\alpha)$ όσο και η $^{nat}\text{N}(d,d)$ που μελετάται δημιουργούν τον ίδιο σύνθετο πυρήνα $^{16}\text{O}^*$, δεν αναμένονται επίσης απότομες μεταβολές στις τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο.

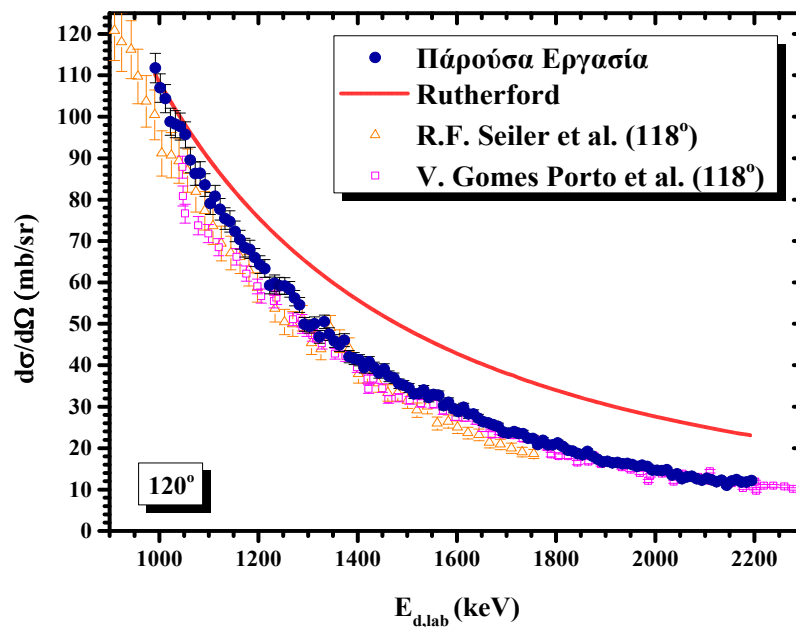
Καταλήγοντας, η τιμή της ενέργειας δέσμης για το κάθε ενεργειακό βήμα, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, προκύπτει ως εξής, $E = E' - \Delta E_{Au} - \Delta E_{N/2}$ όπου E' είναι η διορθωμένη ενέργεια δέσμης λόγω βαθμονόμησης του επιταχυντή, ΔE_{Au} είναι η απώλεια ενέργειας λόγω του λεπτού στρώματος χρυσού που υπάρχει εμπροσθεν του στόχου και $\Delta E_{N/2}$ αντιστοιχεί στην απώλεια ενέργειας στο μέσο του πάχους του στόχου. Για τον προσδιορισμό της διαφορικής ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{nat}\text{N}(d,d)$ χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ενέργειας όπως προέκυψαν από τους παραπάνω προσδιορισμούς και λαμβάνοντας επίσης υπ' όψιν την διόρθωση λόγω ηλεκτρονιακής θωράκισης για τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής κατά Rutherford τόσο στο χρυσό όσο και στο άζωτο.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι μέσω του προγράμματος SIMNRA μπορεί επίσης να προσδιορισθεί και ο συνολικός ενεργειακός διασκεδασμός της δέσμης στο μέσο του πάχους του στόχου, δηλαδή η πρόσθετη αβεβαιότητα στην ενέργεια των δευτερίων λόγω τη στατιστικής αβεβαιότητας των σκεδάσεων των δευτερίων με τα ηλεκτρόνια του στόχου, η οποία θα πρέπει να προστεθεί τετραγωνικά στο energy ripple που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να καθοριστεί η συνολική ενεργειακή αβεβαιότητα σε κάθε ενεργειακό βήμα. Οι τελικές τιμές των ενεργειών των δευτερίων στο μέσο του πάχους του στόχου για κάθε ενεργειακό βήμα, καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα, παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

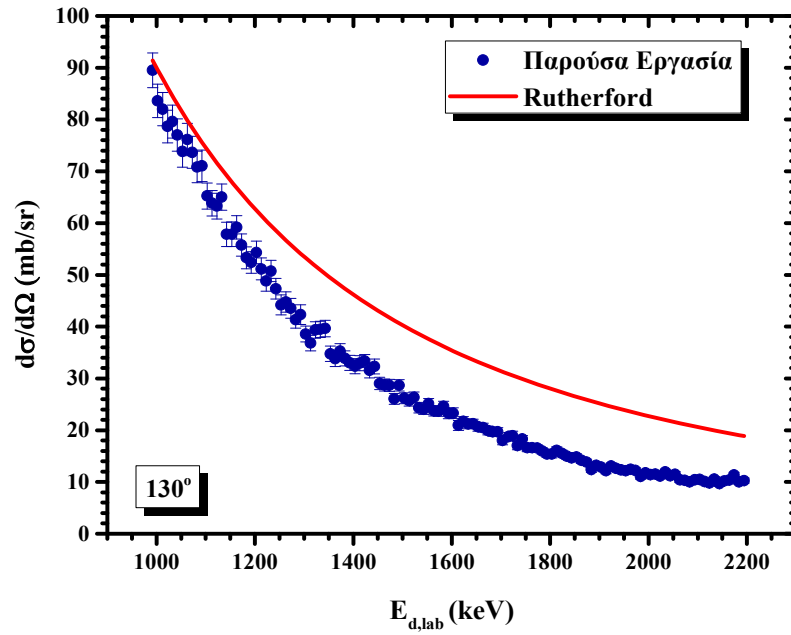
3.2 Πειραματικά Αποτελέσματα & Σχολιασμός

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο ($^{nat}\text{N}(d,d_0)$), που υπολογίστηκαν στη παρούσα εργασία για γωνίες οπισθοσκέδασης, και συγκεκριμένα για τις 120° , 130° , 140° , 150° , 160° , και 170° μοίρες, παρουσιάζονται αντίστοιχα στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνα 3.2.1-3.2.6). Στα διαγράμματα φαίνεται επίσης με συνεχή γραμμή η διαφορική ενεργός διατομή της ίδιας αντίδρασης, όπως υπολογίζεται κατά Rutherford μέσω των αντίστοιχων σχέσεων (Σχέσεις 3.3 έως 3.6). Επιπροσθέτως παρουσιάζονται αποτελέσματα παλαιότερων μετρήσεων, για όποιες γωνίες και ενέργειες υπήρχαν διαθέσιμα στη διαδικτυακή βιβλιοθήκη IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library, <http://www-nds.iaea.org/ibandl/>)

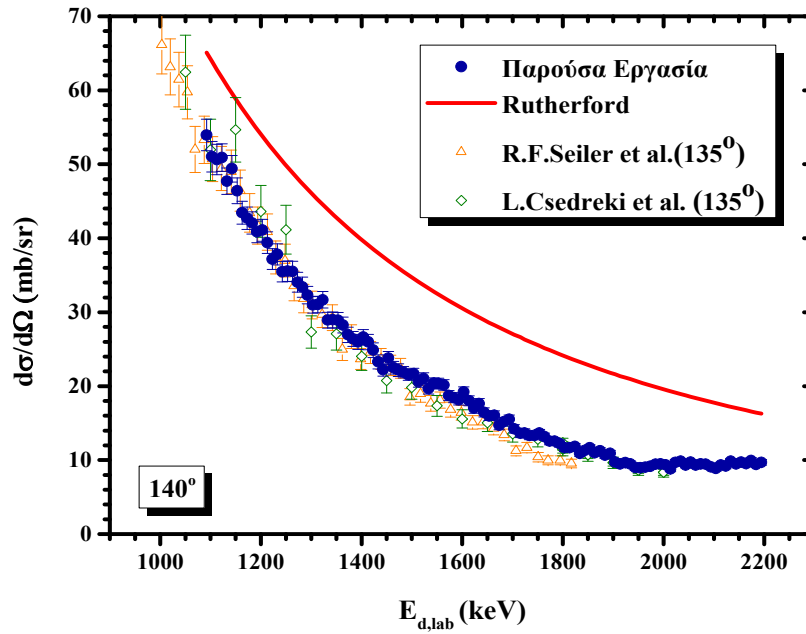
Τα αποτελέσματα για τη διαφορική ενεργό διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο παρουσιάζονται επίσης και σε μορφή πίνακα μαζί με τα αντίστοιχα σφάλματα στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας. Συνολικά η στατιστική αβεβαιότητα των μετρήσεων δεν ξεπέρασε το 5.3% σε κάθε περίπτωση. Η συνολική στατιστική αβεβαιότητα προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της διάδοσης σφαλμάτων.



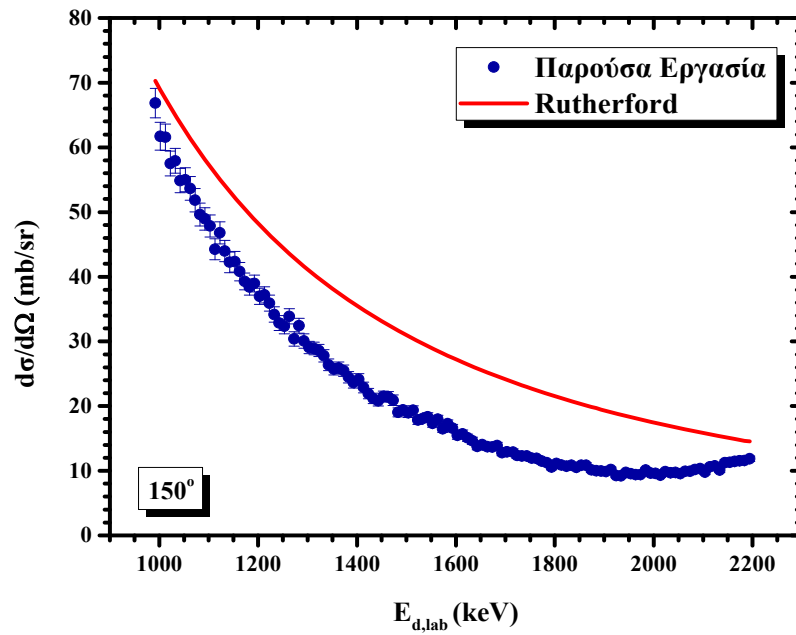
Εικόνα 3.2.1: Διαφορική ενεργός διατομή $^{nat}\text{N}(d,d_0)$, 120° .



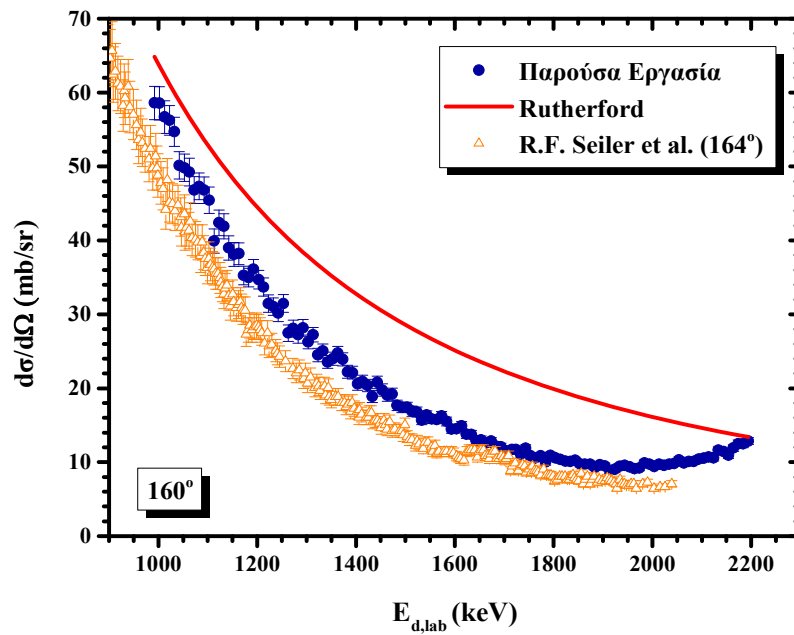
Εικόνα 3.2.2: Διαφορική ενεργός διατομή $^{nat}N(d,d_0)$, 130° .



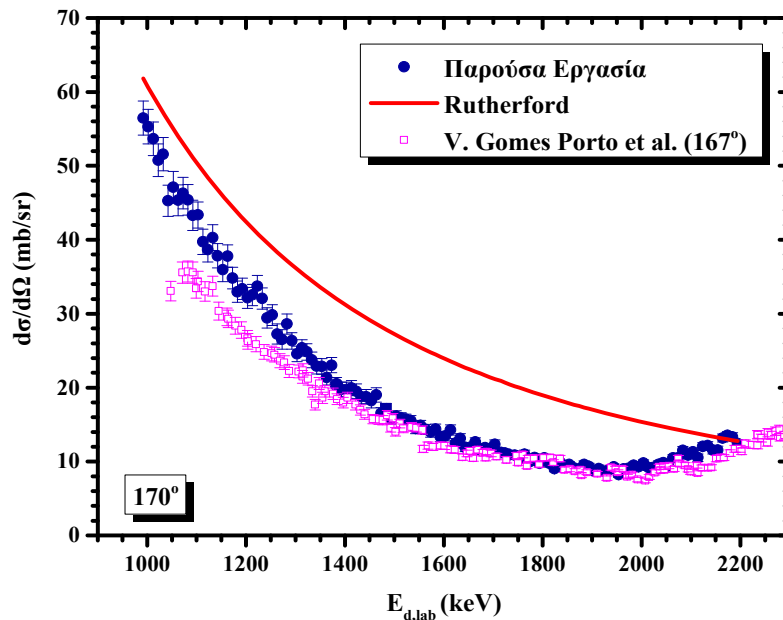
Εικόνα 3.2.3: Διαφορική ενεργός διατομή $^{nat}N(d,d_0)$, 140° .



Εικόνα 3.2.4: Διαφορική ενεργός διατομή $^{nat}N(d,d_0)$, 150° .



Εικόνα 3.2.5: Διαφορική ενεργός διατομή $^{nat}N(d,d_0)$, 160° .



Εικόνα 3.2.6: Διαφορική ενεργός διατομή $^{nat}N(d,d_0)$, 170° .

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.1 τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για τις 120° γωνία βρίσκονται σε καλή συμφωνία, κυρίως για τις υψηλές ενέργειες δέσμης, με τα πειραματικά αποτελέσματα από παλαιότερες μετρήσεις των *R. F. Seiler et al.* [Se64] και των *V. Gomez Porto et al.* [Go69] που είχαν γίνει για γωνία 118° . Με εξαίρεση τα αποτελέσματα σε χαμηλή ενέργεια δέσμης δευτερίων, οι περισσότερες τιμές παρατηρείται ότι βρίσκονται εντός των ορίων σφάλματος.

Επίσης τα αποτελέσματα στις 140° (Εικόνα 3.2.3), βρίσκονται και αυτά σε εξαιρετική συμφωνία με τα αποτελέσματα των παλαιότερων μετρήσεων των *R. F. Seiler et al.* και *L. Csedreki et al.* [Cs14] για τις 135° γωνία.

Μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τη προηγούμενη μέτρηση των *R. F. Seiler et al.* είναι εμφανείς για όλο το ενεργειακό φάσμα που καλύφθηκε στη παρούσα εργασία για τα αποτελέσματα στις 160° γωνία (Εικόνα 3.2.5). Δεν φαίνεται να υπάρχει ξεκάθαρος λόγος για τη διαφοροποίηση αυτή στα συγκεκριμένα αποτελέσματα, ούτε κάποια εμφανής γωνιακή εξάρτηση.

Θα πρέπει να αναφερθεί όμως πως τα πειράματα των *R. F. Seiler et al.* και *V. Gomez Porto et al.* έγιναν με χρήση αέριου στόχου και με τη μέθοδο της απόλυτης μέτρησης της διαφορικής ενεργού διατομής, κατά την οποία τα σφάλματα αναμένονται να είναι μεγαλύτερα. Επίσης σημαντικό ρόλο κατέχει το γεγονός ότι οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής που δίνονταν από τα πειράματα των *L.*

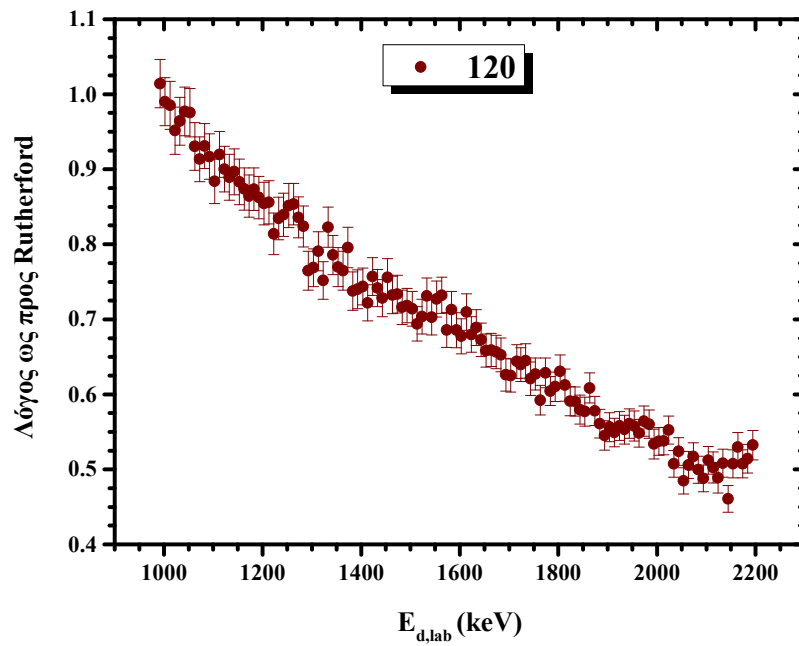
Csedreki et al. ήταν κακώς διατυπωμένα στη μορφή πίνακα που υπάρχει στην διαδικτυακή βιβλιοθήκη IBANDL (<https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>). Επομένως έγινε εκ νέου επεξεργασία για την εύρεση των τιμών μέσω των διαγραμμάτων που υπήρχαν στην ίδια βιβλιοθήκη και τα σφάλματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα της παρούσας εργασίας προήλθαν από την επεξεργασία των διαγραμμάτων.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα για τις 170° γωνία είναι σε εξαιρετική συμφωνία με την παλαιότερη μέτρηση των *V.Gomez Porto et al.* στις 167° γωνία και για ενέργεια δέσμη δευτερίων από περίπου 1500 keV και άνω.

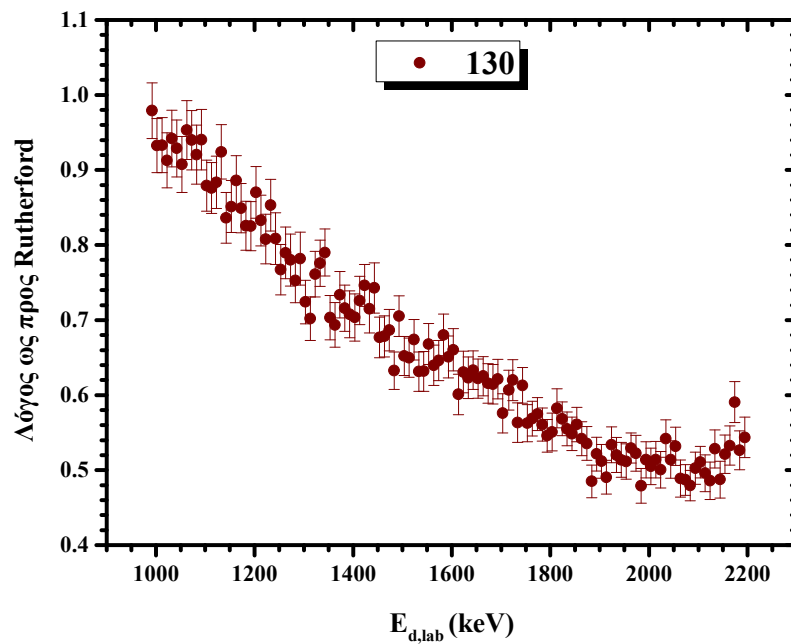
3.3 Λόγος Διαφορικής Ενεργού Διατομής ως προς Rutherford

Υπολογίζοντας την τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων σε άζωτο κατά Rutherford και προσδιορίζοντας τον λόγο μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών των υπολογισμένων μέσω Rutherford, προκύπτουν τα διαγράμματα που ακολουθούν, όπου παρουσιάζεται ο λόγος συναρτήσει της ενέργειας για κάθε γωνία.

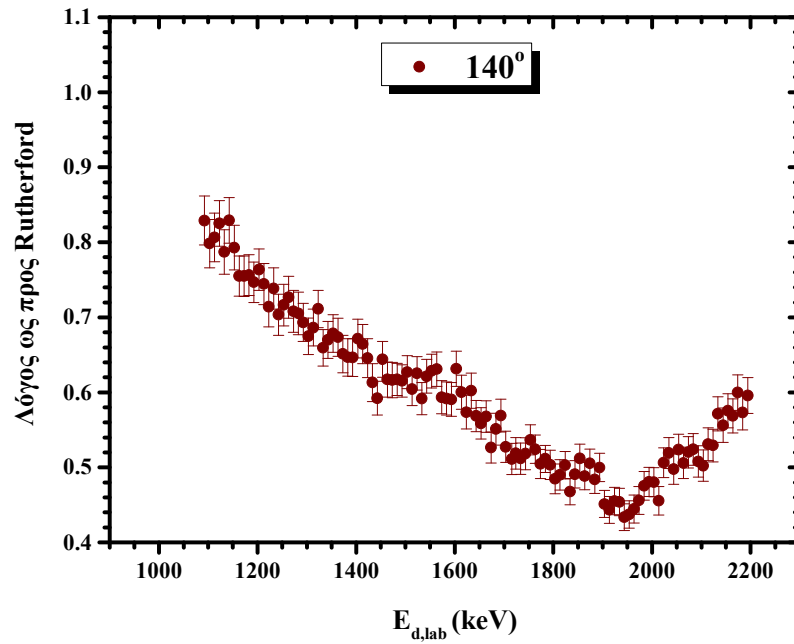
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνες 3.2.7-3.2.12) αλλά και από τα προηγούμενα διαγράμματα, όπου φαίνεται και η διαφορική ενεργός διατομή κατά Rutherford, οι πειραματικές τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών πλησιάζουν τις τιμές που προκύπτουν κατά Rutherford τόσο για χαμηλές τιμές ενέργειας δέσμης και κυρίως μικρές γωνίες, όσο και για μεγάλες γωνίες και υψηλές τιμές ενέργειας.



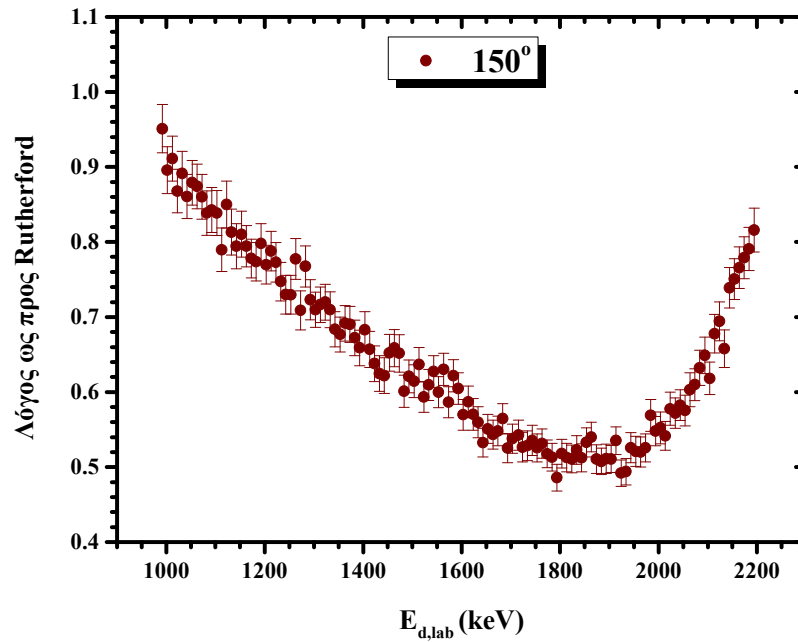
Εικόνα 3.2.7: Λόγος διαφορικής ενεργού διατομής $^{nat}N(d,d_0)$ ως προς Rutherford, 120° .



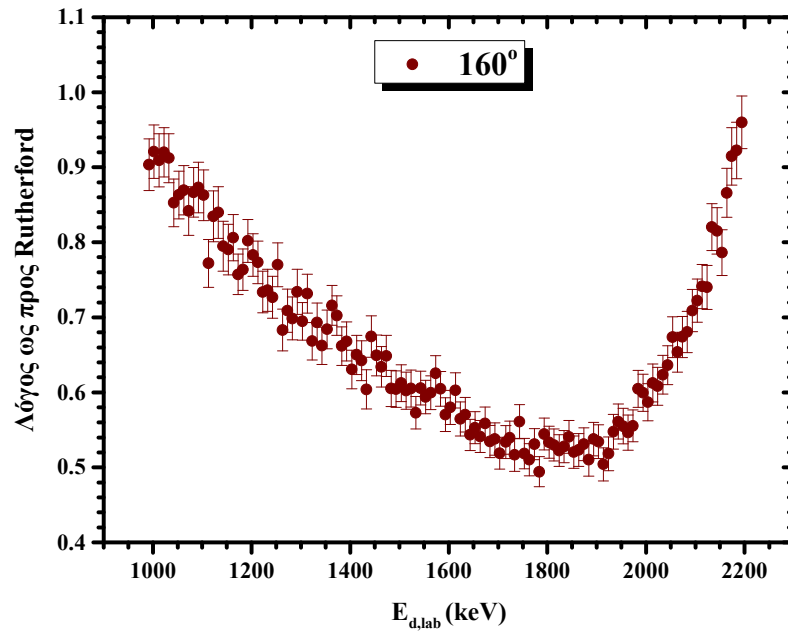
Εικόνα 3.2.8: Λόγος διαφορικής ενεργού διατομής $^{nat}N(d,d_0)$ ως προς Rutherford, 130° .



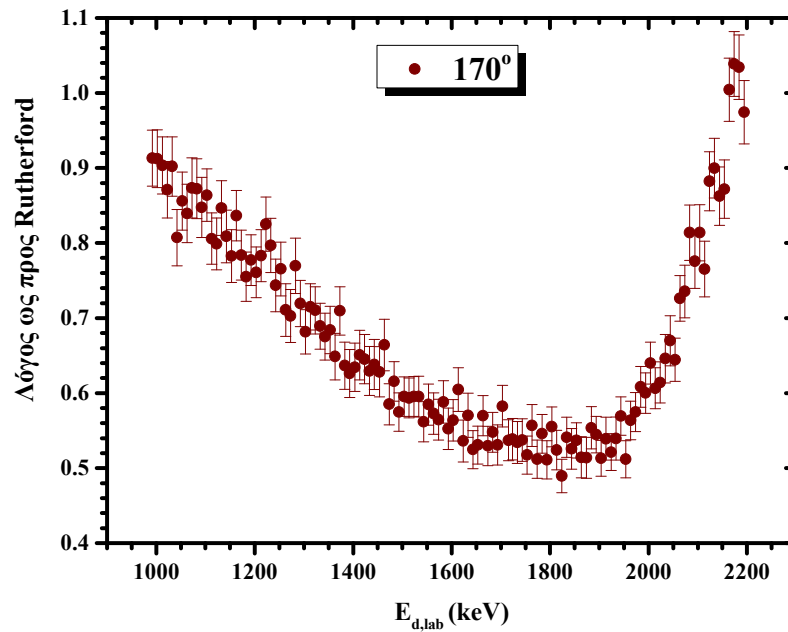
Εικόνα 3.2.9: Λόγος διαφορικής ενεργού διατομής $^{nat}N(d,d_0)$ ως προς Rutherford, 140°



Εικόνα 3.2.10: Λόγος διαφορικής ενεργού διατομής $^{nat}N(d,d_0)$ ως προς Rutherford, 150° .



Εικόνα 3.2.11: Λόγος διαφορικής ενεργού διατομής $^{nat}N(d,d_0)$ ως προς Rutherford, 160° .



Εικόνα 3.2.12: Λόγος διαφορικής ενεργού διατομής $^{nat}N(d,d_0)$ ως προς Rutherford, 170° .

Παρατηρείται ότι η πειραματική τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής παραμένει μικρότερη από την τιμή της αντίστοιχης κατά Rutherford για σχεδόν όλο το εύρος ενεργειών που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και πρακτικά για όλες τις γωνίες σκέδασης (με την εξαίρεση των μεγάλων ενεργειών στις 170° μοίρες). Παρ' όλα αυτά εμφανίζεται επίσης μια αυξητική τάση της πειραματικής τιμής της διαφορικής ενεργού διατομής για ενέργειες από περίπου 1800 με 1900 keV και ειδικότερα στις μεγαλύτερες γωνίες, 150° , 160° , 170° μοίρες. Παρατηρείται μάλιστα ότι η αυξητική αυτή τάση εμφανίζεται προοδευτικά για μεγαλύτερες τιμές γωνιών. Η συγκεκριμένη μορφή πιθανόν να οφείλεται στους πολλαπλούς και επικαλυπτόμενους συντονισμούς του σύνθετου πυρήνα $^{16}\text{O}^*$. Πράγματι το ενεργειακό εύρος που διεγείρεται στις ενέργειες δέσμης που μελετάται στην παρούσα εργασία, δηλαδή για $E_{d,lab}=1000-2200$ keV, αντιστοιχεί σε $E_x^* \sim 21611-22661$ keV (Εικόνα 1.3.1) στο οποίο υπάρχουν οι εξής ευρείς και επικαλυπτόμενες ενεργειακές στάθμες: 21623 keV ($\Gamma=60$ keV), 21648 keV ($\Gamma=115$ keV), 21776 keV ($\Gamma=43$ keV), 22040 keV ($\Gamma=60$ keV), 22150 keV ($\Gamma=680$ keV), 22350 keV ($\Gamma=175$ keV), 22500 keV ($\Gamma=400$ keV), και 22650 keV ($\Gamma=60$ keV). Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι υπάρχουν ευρείες ενεργειακές στάθμες και σε υψηλότερες ενέργειες διέγερσης, οι οποίες θα μπορούσαν εξίσου να επηρεάζουν τη τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής, για παράδειγμα υπάρχουν οι στάθμες στα 21500 keV ($\Gamma=120$ keV) και 22890 keV ($\Gamma=300$ keV) [Ko17].

Επομένως, τόσο η διαφοροποίηση της τιμής της διαφορικής ενεργού διατομής συναρτήσει της ενέργειας που είναι εμφανής σε όλο το ενεργειακό εύρος, που μελετήθηκε όσο και η αυξητική τάση ανά γωνία που παρατηρείται στο λόγο της τιμής ως προς τη Rutherford θα μπορούσε να οφείλεται στην επίδραση όλων αυτών των ευρέων ενεργειακών σταθμών που προαναφέρθηκαν.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα & Προοπτικές

Η παρούσα πειραματική μελέτη έγινε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Τομέα Φυσικής και είχε ως θέμα την μέτρηση διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο $^{nat}\text{N}(d,d)$ στα πλαίσια της τεχνικής EBS. Συνεπώς μελετήθηκε πειραματικά και υπολογίστηκε η διαφορική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης δευτερίων από φυσικό άζωτο ^{nat}N για ενεργειακό εύρος δέσμης $E_{d,lab} = 1000 - 2200$ keV και για γωνίες οπισθοσκέδασης $120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ$ και 170° . Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτροστατικού επιταχυντή TN11 TANDEM 5.5 MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».

4.1 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών ελαστικής σκέδασης που προέκυψαν δεν παρουσίαζαν έντονες διακυμάνσεις ανά ενεργειακό βήμα γεγονός που καταδεικνύει την μη ύπαρξη ισχυρών, λεπτών συντονισμών του σύνθετου πυρήνα $^{16}\text{O}^*$. Αντιθέτως παρατηρώντας τα αποτελέσματα όπου η πειραματική διαφορική ενεργός διατομή συγκρίνεται με τις τιμές που προκύπτουν από τη σχέση του Rutherford συμπεραίνεται ότι η μορφή των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης πιθανότατα οφείλεται στις πολλαπλές, ευρείες και επικαλυπτόμενες ενεργειακές στάθμες του σύνθετου πυρήνα $^{16}\text{O}^*$. Παρατηρήθηκαν βέβαια, όπως ήταν αναμενόμενο, σημαντικές αποκλίσεις από τη σκέδαση Rutherford, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη πειραματικής μελέτης των ενεργών διατομών όχι μόνο του αζώτου, αλλά και όλων των ελαφρών στοιχείων.

Αξίζει ακόμη να αναφερθεί ότι με την παρούσα εργασία καλύφθηκε μια σημαντική έλλειψη σε τιμές διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης δευτερίων σε ελαφρύ στοιχείο, (άζωτο), και πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκαν παραπάνω από 700 τιμές για ένα σχετικά μεγάλο εύρος ενεργειών δέσμης. Τα αποτελέσματα θα γίνουν διαθέσιμα μέσω της διαδικτυακής βιβλιοθήκης IBANDL και θα είναι στη διάθεση κάθε ενδιαφερόμενου για χρήση τους σε αντίστοιχες μελέτες. Τα αποτελέσματα της τεχνικής d-EBS συμπληρώνουν αυτά που προκύπτουν μέσω της τεχνικής d-NRA προσθέτοντας ακόμη ένα εργαλείο στη μελέτη υλικών μέσω μη καταστροφικών πυρηνικών μεθόδων.

Επίσης μέσω των πειραμάτων που διεξήχθησαν με το συγκεκριμένο στόχο επετεύχθη ο έλεγχος παλαιότερης εργασίας που είχε πραγματοποιηθεί με ίδιο στόχο στο παρόν εργαστήριο και με χρήση της τεχνικής NRA. Επομένως με την ολοκλήρωση του ελέγχου αυτού, μέσω της χρήσης μέρους των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, και πιο συγκεκριμένα αυτών που αφορούν στο πάχος του στόχου θα προσδιοριστούν εκ νέου και θα γίνουν διαθέσιμες οι διαφορικές ενεργές διατομές των αντιδράσεων $^{14}\text{N}(d,\alpha_0)$, $^{14}\text{N}(d,p_0)$ και $^{14}\text{N}(d,\alpha_1)$ ενέργειας δέσμης $E_{d,\text{lab}} = 1500 - 2000 \text{ keV}$ και για γωνίες 145° έως 170° με γωνιακό βήμα 5° [Κο09] συμπληρώνοντας έμπρακτα και στο σύνολο της τη μελέτη των αντιδράσεων των δευτερίων στο άζωτο.

4.2 Προοπτικές

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από άζωτο. Εξίσου σημαντική είναι όμως η συμπλήρωση της εργασίας αυτής μέσω πειραμάτων ελέγχου αξιοπιστίας (benchmarking) της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο. Τα πειράματα benchmarking ελαστικών σκεδάσεων δευτερίων από ελαφρά στοιχεία, είναι μεγαλύτερης πολυπλοκότητας, καθώς τα ελαφρά στοιχεία συνήθως περιέχονται σε στόχους με σύνθετες μήτρες που περιέχουν τόσο ελαφρά όσο και βαρέα στοιχεία. Κατ' επέκταση, η μελέτη ενός στόχου απείρου πάχους εμπλουτισμένου με άζωτο καταλήγει σε μία μορφή φάσματος όπου οι κορυφές των αντιδράσεων του αζώτου επικαλύπτονται από κορυφές που προκύπτουν από τις ενεργειακές στάθμες των αντιδράσεων των στοιχείων της μήτρας του στόχου (ή και του ίδιου του αζώτου) με αποτέλεσμα η ανάλυσή τους να είναι πολύ δύσκολη. Η χρήση όμως κατάλληλου στόχου, που να αποτελείται από στοιχεία μήτρας με ατομικό αριθμό κοντά σε αυτόν του αζώτου, κατάλληλων ενεργειών δέσμης και μιας πιο περίπλοκης πειραματικής διάταξης με ανιχνευτές διαφόρων παχών και τηλεσκόπια, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης διαφορετικών σωματιδίων, θα καθιστούσε επιτυχή τη διεξαγωγή πειραμάτων benchmarking των ελαστικών σκεδάσεων δευτερίων στο άζωτο. Ο έλεγχος αξιοπιστίας πέραν του ελέγχου στην ορθότητα των διαφορικών ενεργών διατομών συμβάλλει και στην ανάπτυξη σωστών θεωρητικών μοντέλων.

Επίσης η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσθήκη στη συστηματική μελέτη της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από όλα τα κύρια σταθερά ισότοπα έως το ^{40}Ca . Η συνέχιση της συστηματικής πειραματικής μελέτης των συστημάτων αυτών θα δώσει σημαντικά αποτελέσματα σε μια ανεξερεύνητη μέχρι στιγμής περιοχή της πυρηνικής φυσικής χαμηλών ενεργειών. Άμεση εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων αυτών

αποτελεί η προσπάθεια αναπαραγωγής τους μέσω θεωρίας R-matrix (σε συνδυασμό με υπολογισμούς DWBA) που ως στόχο έχει την ανάπτυξη της θεωρίας της πυρηνικής φυσικής χαμηλών ενεργειών μέσω θεωρητικών μοντέλων για την περιοχή των πυρηνικών συντονισμών.

Τέλος ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο άζωτο ήταν όπως προαναφέρθηκε ένας Silicon Nitride (τυπικά Si_3N_4), επομένως στο ίδιο πείραμα μελετήθηκε επίσης και η διαφορεική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων στο πυρίτιο $^{nat}\text{Si}(d,d)$. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών θα παρουσιασθούν σε επόμενη εργασία και θα αποτελέσουν μια ακόμη προσθήκη στη μελέτη ελαστικής σκέδασης δευτερίων από ελαφρά στοιχεία.

Βιβλιογραφία

- [Ba05] N. P. Barradas *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., **B227**(2005), p. 397–419.
- [Be92] K. Bethge, Nucl. Instr. and Meth., **B66**(1992), p. 146–157.
- [Ch76] W. K. Chu, Phys. Rev. A13, 2057(1976), p. 2057-2060
- [Cs14] L. Csedreki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., **B328**(2014), p. 20–26.
- [Go69] V. Gomes Porto *et al.*, Nucl. Phys. **A136**(1969), p. 385–413
- [Gu08] A. F. Gurbich, Nucl. Instr. and Meth., **B266**(2008), p. 1193–1197.
- [Gu98] A. F. Gurbich, Nucl. Instr. and Meth., **B145**(1998), p. 578–583.
- [Ka16] C. Kalfas, M. Axiotis, C. Tsabaris, Nucl. Instr. and Meth., **A830**(2016), p. 265–274.
- [Ko09] M. Kokkoris *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. **B267**(2009), p. 1744-1747
- [Ko17] M. Kokkoris, X. Aslanoglou, M. Axiotis, A. Lagoyannis, P. Misaelides, E. Ntemou, N. Patronis, K. Preketes-Sigalas, P. Tsintari, Differential cross-section measurements for deuteron elastic scattering on natN, suitable for EBS. *Accepted for publication in Nucl. Instrum. and Meth B* (2017)
- [Ko98a] G. Konac, S. Kalbitzer, Ch. Klatt, D. Niemann, and R. Stoll., Nucl. Instrum. and Meth. B136-138 (1998), p. 159.
- [Ko98b] G. Konac, Ch. Klatt, and S. Kalbitzer, Nucl. Instrum. and Meth. B146 (1998), p. 106.
- [L'E78] J. L'Ecuyer *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., **160**(1997), p.337–346.
- [Le90] Lennard *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. **B45**(1990), p.281-284
- [Ma14] M. Mayer, Nucl. Instrum. and Meth. **B332**(2014), p. 176-180.
- [Nt17] Ε. Ντέμου, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Διατμ. Πρόγρ. Μεταπτ. Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές, Ιούνιος 2017.
- [Pa14] N. Patronis *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B337**(2014), p. 97–101.
- [Pa12] Β. Πανέτα, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Διατμ. Πρόγρ. Μεταπτ. Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές, Ιούλιος 2012.
- [Se64] R. F. Seiler, D. F. Herring and K. W. Jones, Phys. Rev. **136** (4B) (1964), p.994–1000.
- [Wa09] Y. Wang and M. A. Nastasi, Handbook of Modern Ion Beam Analysis, (2009), 2nd edition.
- [Ya91] Q. Yang, D.J. O'Connor, Z. Wang. Nucl. Instr. Meth. **B61**(1991), p. 149.
- [Zi13] J.F.Ziegler, SRIM2013, <http://www.srim.org/> .
- [Zi85] 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), p. 29–31, 82, 93–95, 102, 118.

Παράρτημα Α

Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα τελικά αποτελέσματα, μαζί με τα σφάλματά τους, όπως αυτά προκύπτουν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, δηλαδή κάθε τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης ανά γωνία σκέδασης και ανά ενέργεια. Να σημειωθεί ότι τόσο οι τιμές της ενέργειας, όσο και του σφάλματός της, παρουσιάζονται όπως προέκυψαν από την ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή, συνυπολογίζοντας την απώλεια ενέργειας από το επιφανειακό στρώμα χρυσού και την απώλεια ενέργειας μέχρι το μέσο του πάχους του στόχου του νιτριδίου του πυριτίου και είναι ως εκ τούτου στρογγυλοποιημένες στο πρώτο δεκαδικό ψηφίο.

Αντιθέτως οι τιμές και τα σφάλματα της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης, τα οποία προέκυψαν με τη μέθοδο διάδοσης σφαλμάτων είναι στρογγυλοποιημένα με βάση τη θεωρία στο πρώτο σημαντικό ψηφίο.

$E_{d,lab}$ (keV)	$dE_{d,lab}$ (keV)	$(\sigma \pm d\sigma)$ (mb/sr)											
		120°		130°		140°		150°		160°		170°	
992.4	5.7	112	4	90	3	-	-	66.8	2.3	58.6	2.2	56.5	2.3
1002.3	5.7	107	3	84	3	-	-	61.7	2.1	58.6	2.3	55.3	2.3
1012.3	5.7	104	3	82	3	-	-	61.6	2.0	56.7	2.2	53.7	2.3
1022.4	5.7	99	3	79	3	-	-	57.5	1.9	56.2	2.0	50.8	2.2
1032.4	5.7	98	3	80	3	-	-	57.9	1.9	54.7	2.0	51.6	2.3
1042.4	5.7	98	3	77	3	-	-	54.9	1.9	50.2	1.9	45.3	2.1
1052.4	5.7	96	3	74	3	-	-	55.0	1.9	49.8	1.8	47.1	2.1
1062.5	5.7	90	3	76	3	-	-	53.7	1.8	49.2	1.9	45.3	2.1
1072.5	5.7	86.3	2.8	73.7	3	-	-	51.8	1.8	46.8	1.8	46.3	2.1
1082.5	5.7	86.3	2.8	70.8	3	-	-	49.6	1.8	47.3	1.8	45.4	2.1
1092.5	5.7	83.5	2.7	71.1	3	54.0	2.1	48.9	1.7	46.8	1.8	43.3	2.0

1102.5	5.7	79.1	2.6	65.2	2.5	51.0	2.1	47.8	1.7	45.4	1.8	43.4	1.8
1112.6	5.7	80.8	2.7	63.9	2.5	50.6	2.0	44.2	1.6	39.9	1.6	39.7	1.7
1122.6	5.7	77.7	2.6	63.3	2.5	50.9	1.9	46.8	1.7	42.4	1.7	38.7	1.7
1132.6	5.7	75.4	2.6	65.0	2.5	47.7	1.8	44.0	1.7	41.9	1.7	40.3	1.7
1142.6	5.7	74.7	2.6	57.8	2.3	49.4	1.8	42.2	1.6	39.0	1.6	37.8	1.6
1152.7	5.7	72.3	2.5	57.8	2.4	46.4	1.7	42.3	1.6	38.1	1.6	36.0	1.6
1162.7	5.7	70.3	2.3	59.2	2.2	43.5	1.5	40.8	1.4	38.2	1.5	37.8	1.5
1172.7	5.7	68.4	2.2	55.8	2.2	42.7	1.5	39.3	1.3	35.3	1.3	34.8	1.5
1182.7	5.7	68.0	2.2	53.3	2.1	42.1	1.5	38.4	1.3	35.0	1.3	33.0	1.4
1192.7	5.7	66.0	2.2	52.4	2.1	40.9	1.5	38.9	1.3	36.1	1.3	33.4	1.4
1202.8	5.7	64.3	2.1	54.3	2.2	41.1	1.5	37.0	1.2	34.7	1.3	32.1	1.4
1212.8	5.7	63.4	2.1	51.2	2.1	39.4	1.4	37.2	1.2	33.7	1.2	32.5	1.4
1222.8	5.7	59.3	2.0	48.8	2.0	37.2	1.4	35.9	1.2	31.5	1.2	33.7	1.5
1232.8	5.7	59.8	2.0	50.7	2.1	37.8	1.4	34.2	1.2	31.0	1.2	32.0	1.5
1242.8	5.7	59.2	2.0	47.3	2.0	35.5	1.4	32.8	1.2	30.2	1.2	29.4	1.4
1252.8	5.7	59.1	2.0	44.2	1.9	35.5	1.4	32.3	1.1	31.5	1.2	29.8	1.4
1262.9	5.7	58.3	1.9	44.8	2.0	35.5	1.4	33.9	1.2	27.5	1.1	27.3	1.3
1272.9	5.7	56.2	1.8	43.5	1.9	34.0	1.3	30.4	1.1	28.1	1.1	26.5	1.3
1282.9	5.7	54.6	1.8	41.4	1.6	33.4	1.3	32.4	1.2	27.2	1.1	28.6	1.4
1292.9	5.7	49.9	1.7	42.3	1.9	32.3	1.2	30.1	1.1	28.2	1.1	26.3	1.1
1302.9	5.7	49.4	1.6	38.6	1.5	31.0	1.1	29.1	1.0	26.3	0.9	24.6	1.1
1312.9	5.7	50.0	1.6	36.8	1.5	31.0	1.1	28.9	1.0	27.2	1.0	25.4	1.1
1323.0	5.7	46.8	1.6	39.3	1.6	31.7	1.1	28.6	1.0	24.5	0.9	24.8	1.1
1333.0	5.7	50.5	1.6	39.5	1.6	28.9	1.1	27.8	0.9	25.0	0.9	23.7	1.1
1343.0	5.7	47.5	1.6	39.6	1.6	29.0	1.1	26.4	0.9	23.6	0.9	22.9	1.1

1353.0	5.7	45.9	1.5	34.8	1.5	28.9	1.1	25.7	0.9	24.0	0.9	22.9	1.1
1363.0	5.7	44.9	1.5	33.8	1.5	28.3	1.1	25.9	0.9	24.7	0.9	21.4	1.0
1373.0	5.7	46.0	1.6	35.2	1.5	26.9	1.0	25.5	0.9	23.9	0.9	23.0	1.0
1383.1	5.7	42.1	1.5	33.9	1.5	26.4	1.0	24.5	0.9	22.2	0.9	20.4	1.0
1393.1	5.7	41.6	1.5	33.0	1.5	26.0	1.0	23.6	0.8	22.1	0.9	19.8	1.0
1403.1	5.7	41.2	1.4	32.4	1.5	26.6	1.0	24.1	0.9	20.6	0.8	19.7	1.0
1413.1	5.7	39.5	1.3	32.9	1.5	26.0	1.0	22.9	0.8	20.9	0.8	20.0	1.0
1423.1	5.7	40.8	1.4	33.4	1.3	24.9	1.0	21.9	0.8	20.4	0.8	19.5	1.0
1433.1	5.7	39.4	1.3	31.5	1.4	23.3	1.0	21.2	0.8	18.9	0.8	18.8	1.0
1443.2	5.7	38.2	1.3	32.3	1.5	22.2	0.8	20.8	0.8	20.8	0.8	18.8	1.0
1453.2	5.7	39.1	1.3	29.0	1.2	23.8	0.9	21.5	0.8	19.8	0.8	18.2	1.0
1463.2	5.7	37.4	1.3	28.7	1.2	22.5	0.8	21.4	0.8	19.0	0.8	19.0	1.0
1473.2	5.7	36.9	1.3	28.7	1.2	22.2	0.8	20.9	0.8	19.2	0.8	16.5	0.8
1483.2	5.7	35.5	1.1	26.1	1.0	21.9	0.8	19.0	0.7	17.7	0.7	17.2	0.7
1493.2	5.7	35.2	1.1	28.7	1.1	21.5	0.8	19.4	0.7	17.4	0.7	15.8	0.7
1503.2	5.7	34.5	1.1	26.2	1.0	21.7	0.8	18.9	0.7	17.4	0.7	16.1	0.7
1513.3	5.7	33.1	1.1	25.7	1.0	20.6	0.7	19.4	0.7	16.9	0.7	15.9	0.7
1523.3	5.7	33.1	1.1	26.3	1.1	21.0	0.7	17.8	0.6	16.8	0.7	15.7	0.7
1533.3	5.7	34.0	1.1	24.3	1.0	19.7	0.7	18.1	0.6	15.7	0.6	15.5	0.7
1543.3	5.7	32.2	1.1	24.0	1.0	20.4	0.7	18.4	0.6	16.4	0.6	14.5	0.7
1553.3	5.7	32.9	1.1	25.1	1.0	20.3	0.7	17.3	0.6	15.8	0.6	14.9	0.7
1563.3	5.7	32.7	1.1	23.7	1.0	20.2	0.7	18.0	0.6	15.8	0.6	14.4	0.7
1573.3	5.7	30.3	1.0	23.7	1.0	18.7	0.7	16.5	0.6	16.3	0.6	14.0	0.7
1583.3	5.7	31.1	1.1	24.6	1.0	18.4	0.7	17.3	0.6	15.5	0.6	14.4	0.7
1593.4	5.7	29.5	1.0	23.3	1.0	18.2	0.7	16.6	0.6	14.5	0.6	13.3	0.7
1603.4	5.7	28.8	1.0	23.3	1.0	19.2	0.7	15.5	0.6	14.5	0.6	13.4	0.7
1613.4	5.7	29.8	1.0	20.9	0.9	18.0	0.7	15.7	0.6	14.9	0.6	14.3	0.7
1623.4	5.7	28.2	1.0	21.7	1.0	17.0	0.7	15.1	0.6	13.8	0.6	12.5	0.7
1633.4	5.7	28.2	1.0	21.2	0.9	17.6	0.7	14.6	0.5	13.8	0.6	13.1	0.7
1643.4	5.7	27.2	0.9	21.3	0.9	16.5	0.6	13.8	0.5	12.9	0.5	11.9	0.6

1653.4	5.7	26.3	0.9	20.6	0.9	16.0	0.6	14.1	0.5	13.0	0.5	11.9	0.6
1663.4	5.7	26.1	0.9	20.5	0.9	16.0	0.6	13.7	0.5	12.6	0.5	12.6	0.6
1673.5	5.7	25.6	0.9	19.9	0.8	14.7	0.6	13.7	0.5	12.8	0.5	11.6	0.6
1683.5	5.7	25.2	0.9	19.7	0.8	15.2	0.6	13.9	0.5	12.1	0.5	11.9	0.6
1693.5	5.7	23.9	0.8	19.7	0.8	15.5	0.6	12.8	0.5	12.1	0.5	11.4	0.6
1703.5	5.7	23.6	0.8	18.0	0.8	14.2	0.6	12.9	0.5	11.5	0.5	12.3	0.6
1715.8	5.7	24.0	0.8	18.8	0.8	13.6	0.6	12.9	0.5	11.7	0.5	11.2	0.6
1723.5	5.7	23.6	0.8	18.9	0.8	13.7	0.6	12.4	0.5	11.7	0.5	11.1	0.6
1733.5	5.7	23.5	0.8	17.0	0.8	13.3	0.5	12.3	0.5	11.1	0.5	10.9	0.6
1743.5	5.7	22.3	0.8	18.3	0.7	13.3	0.5	12.3	0.5	11.9	0.5	10.9	0.6
1753.5	5.7	22.3	0.8	16.6	0.7	13.7	0.5	11.9	0.4	10.9	0.4	10.3	0.5
1763.6	5.7	20.8	0.7	16.6	0.7	13.2	0.5	11.9	0.4	10.6	0.4	11.0	0.5
1773.6	5.7	21.9	0.7	16.6	0.6	12.5	0.5	11.5	0.4	10.9	0.4	10.0	0.5
1783.6	5.7	20.8	0.7	16.0	0.6	12.6	0.4	11.3	0.4	10.0	0.4	10.5	0.5
1793.6	5.7	20.8	0.7	15.4	0.6	12.2	0.5	10.5	0.4	10.9	0.4	9.8	0.5
1803.6	5.7	21.2	0.7	15.4	0.7	11.7	0.5	11.1	0.4	10.6	0.4	10.5	0.5
1813.6	5.7	20.4	0.7	16.1	0.7	11.7	0.5	10.9	0.4	10.4	0.4	9.8	0.5
1823.6	5.7	19.4	0.6	15.5	0.6	11.8	0.4	10.7	0.4	10.1	0.4	9.0	0.4
1833.6	5.7	19.2	0.6	15.0	0.6	10.9	0.4	10.9	0.4	10.1	0.4	9.9	0.5
1843.6	5.7	18.7	0.6	14.7	0.6	11.3	0.4	10.5	0.4	10.3	0.4	9.5	0.5
1853.7	5.7	18.4	0.6	14.8	0.6	11.7	0.4	10.8	0.4	9.8	0.4	9.6	0.4
1863.7	5.7	19.2	0.6	14.2	0.6	11.0	0.4	10.9	0.4	9.7	0.4	9.1	0.5
1873.7	5.7	18.0	0.6	13.9	0.6	11.3	0.4	10.2	0.4	9.7	0.4	9.0	0.5
1883.7	5.7	17.3	0.6	12.4	0.6	10.7	0.4	10.0	0.3	9.3	0.4	9.6	0.5
1893.7	5.7	16.6	0.6	13.2	0.6	10.9	0.4	10.0	0.4	9.7	0.4	9.3	0.4
1903.7	5.8	16.8	0.6	12.8	0.6	9.7	0.4	9.8	0.3	9.5	0.4	8.7	0.4
1913.7	5.8	16.4	0.6	12.2	0.6	9.5	0.4	10.2	0.4	8.9	0.4	9.0	0.5
1923.7	5.8	16.5	0.6	13.1	0.6	9.6	0.4	9.3	0.3	9.0	0.4	8.7	0.4
1933.7	5.8	16.2	0.6	12.6	0.6	9.5	0.4	9.2	0.3	9.4	0.4	8.9	0.5
1943.7	5.8	16.3	0.6	12.4	0.6	9.0	0.4	9.7	0.4	9.6	0.4	9.3	0.4
1953.8	5.8	16.0	0.6	12.2	0.6	9.0	0.4	9.5	0.4	9.4	0.4	8.2	0.4

1963.8	5.8	15.6	0.5	12.5	0.5	9.0	0.4	9.4	0.4	9.1	0.4	9.0	0.4
1973.8	5.8	15.9	0.6	12.2	0.6	9.2	0.4	9.4	0.3	9.2	0.4	9.1	0.4
1983.8	5.8	15.6	0.5	11.1	0.5	9.5	0.4	10.1	0.4	9.9	0.4	9.5	0.4
1993.8	5.8	14.7	0.5	11.7	0.6	9.5	0.4	9.6	0.3	9.7	0.4	9.3	0.4
2003.8	5.8	14.7	0.5	11.4	0.5	9.4	0.4	9.6	0.4	9.4	0.4	9.8	0.4
2013.8	5.8	14.5	0.5	11.5	0.5	8.8	0.4	9.3	0.3	9.7	0.4	9.2	0.4
2023.8	5.8	14.8	0.5	11.1	0.5	9.7	0.4	9.9	0.4	9.6	0.4	9.2	0.4
2033.8	5.8	13.4	0.5	11.9	0.5	9.8	0.4	9.7	0.3	9.7	0.4	9.6	0.5
2043.8	5.8	13.7	0.5	11.2	0.5	9.3	0.4	9.7	0.3	9.8	0.4	9.9	0.5
2053.8	5.8	12.6	0.5	11.5	0.6	9.7	0.4	9.5	0.3	10.3	0.4	9.4	0.4
2063.9	5.8	13.0	0.5	10.4	0.5	9.3	0.4	9.9	0.4	9.9	0.4	10.5	0.4
2073.9	5.8	13.2	0.5	10.3	0.4	9.5	0.4	9.9	0.3	10.1	0.4	10.5	0.5
2083.9	5.8	12.6	0.5	10.0	0.4	9.5	0.4	10.2	0.4	10.1	0.4	11.5	0.5
2093.9	5.8	12.2	0.4	10.4	0.4	9.1	0.4	10.3	0.4	10.4	0.4	10.9	0.5
2103.9	5.8	12.7	0.5	10.5	0.4	8.9	0.4	9.8	0.3	10.5	0.4	11.3	0.5
2113.9	5.8	12.3	0.5	10.1	0.5	9.3	0.4	10.6	0.4	10.7	0.4	10.5	0.5
2123.9	5.8	11.9	0.5	9.8	0.5	9.2	0.4	10.8	0.4	10.6	0.4	12.0	0.5
2133.9	5.8	12.2	0.4	10.6	0.5	9.8	0.4	10.1	0.4	11.6	0.4	12.2	0.5
2143.9	5.8	11.0	0.4	9.6	0.5	9.5	0.4	11.2	0.4	11.4	0.4	11.5	0.5
2153.9	5.8	12.0	0.4	10.2	0.5	9.7	0.4	11.3	0.4	10.9	0.4	11.6	0.5
2163.9	5.8	12.4	0.5	10.3	0.5	9.5	0.4	11.4	0.4	11.9	0.4	13.2	0.6
2173.9	5.8	11.8	0.4	11.4	0.5	9.9	0.4	11.5	0.4	12.5	0.5	13.5	0.6
2184.0	5.8	11.8	0.4	10.0	0.5	9.4	0.4	11.6	0.4	12.5	0.5	13.3	0.6
2194.0	5.8	12.1	0.4	10.3	0.5	9.7	0.4	11.9	0.4	12.9	0.5	12.5	0.5