



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών

Τομέας Φυσικής

Πρώτα αποτελέσματα διαφορικών ενεργών διατομών
ελαστικής σκέδασης δευτερίων από ^{11}B στα πλαίσια της
τεχνικής EBS (Elastic Backscattering Spectroscopy)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τσακίρης Θεοφάνης

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών
και Φυσικών Επιστημών

Τομέας Φυσικής

Πρώτα αποτελέσματα διαφορικών ενεργών διατομών
ελαστικής σκέδασης δευτερίων από ^{11}B στα πλαίσια της
τεχνικής EBS (Elastic Backscattering Spectroscopy)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τσακίρης Θεοφάνης

Τριμελής Επιτροπή

Μ. Κόκκορης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ρ. Βλαστού-Ζάννη, Ομότιμη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Μ. Διακάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλα την οικογένεια μου για τη στήριξη που πρόσφερε σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού των σπουδών στη Σ.Ε.Μ.Φ.Ε.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον επιβλέποντά μου Καθηγητή του Ε.Μ.Π Δρα Κόκκορη Μιχάλη για την υπομονετική καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια αυτού του ενός χρόνου που συνεργαστήκαμε. Αλλά και στην Ομότιμη Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π. Βλαστού-Ζάννη Ρόζα για όλες τις συμβουλές που μου έδωσε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Υ.Δ. Μαραγκό Φώτη για όλη του την υποστήριξη σε όλα τα στάδια της δουλειάς μου. Όπως επίσης ευχαριστώ για τη βοήθειά τους και όλη την ομάδα της πυρηνικής του Τομέα Φυσικής: την Ελένη, το Νίκο, το Σωτήρη, τη Βεατρίκη, την Αναστασία, το Γιώργο, την Άρτεμις.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλο το προσωπικό του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” και ιδιαιτέρως στους Δρες Λαγογιάννη Αναστάσιο και Αξιώτη Μιχάλη για όλη τους τη βοήθεια στην προετοιμασία του πειράματος και στην διαδικασία των μετρήσεων.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μετρήθηκε πειραματικά η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ισότοπο βόριο-11 (80.1% αφθονία στο φυσικό βόριο) για ενέργειες δέσμης $E_{d,lab} = 1300 - 1860 \text{ keV}$ με βήμα 5-10 keV για γωνίες ανίχνευσης $150^\circ, 160^\circ$ και 170° που είναι κατάλληλες για ποσοτικό προσδιορισμό και προφίλομετρία του βορίου. Η ανάγκη αυτή είναι υπαρκτή καθώς το βόριο είναι ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται για νετρονική θωράκιση πυρηνικών αντιδραστήρων και ως πρόσμιξη για δημιουργία P-type ημιαγωγών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή tandem 5.5 MV. Ο στόχος κατασκευάστηκε στο R.B.I στο Ζάγκρεμπ και αποτελούνταν από ένα στρώμα αλουμινίου για στήριξη, ένα στρώμα βορίου και ένα υπέρλεπτο στρώμα χρυσού για λόγους κανονικοποίησης. Τα προϊόντα των αλληλεπιδράσεων του με τη δέσμη εντοπίστηκαν από ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου συνδεδεμένους με συμβατικά ηλεκτρονικά. Η διαφορική ενεργός διατομή υπολογίστηκε με τη σχετική μέθοδο. Αρχικά υπολογίστηκε η ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης των δευτερίων από το χρυσό θεωρώντας την αναλυτική σχέση Rutherford επί ένα πολλαπλασιαστικό παράγοντα λόγω ηλεκτρονικής θωράκισης. Έπειτα προσδιορίστηκε ο λόγος του χρυσού προς το βόριο-11 στο στόχο μέσω φασμάτων p-EBS και τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος SIMNRA. Τέλος υπολογίστηκε ο λόγος των γεγονότων των ελαστικών κορυφών χρυσού και βορίου-11, όπου υπήρξε ανάγκη προσαρμογής (fit) λόγω της αλληλοεπικάλυψης της κορυφής ενδιαφέροντος με την κορυφή της ελαστικής σκέδασης του άνθρακα-12 που βρισκόταν στο πίσω μέρος του στόχου. Για τον ίδιο λόγο χρειάστηκε και να εγκαταλειφθεί κομμάτι των αρχικών μετρήσεων. Ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής που φαίνεται στον πίνακα τελικών αποτελεσμάτων και σε αντίστοιχα γραφήματα έδωσε αποτελέσματα κάτω από την ενεργό διατομή της σκέδασης Rutherford κατά έναν παράγοντα 3-4 και την απουσία κάποιας συντονιστικής μορφής. Μελετώντας όλες τις γωνίες μαζί παρατηρήθηκε επιπλέον και έλλειψη γωνιακής κατανομής στις 3 γωνίες που αναλύθηκαν.

Abstract

In the present work differential cross-section values for deuteron elastic scattering from the isotope boron-11 were experimentally determined in the energy range $E_{d,lab} = 1050 - 1860 \text{ keV}$ in steps of 5-10 keV and for 3 backscattering angles $150^\circ, 160^\circ$ and 170° suitable for quantification and depth profiling of boron. The reason for this existing need lies in the implementation of boron in the neutron shielding of nuclear reactors as well as an acceptor impurity for the creation of p-type semiconductors in electronics. The measurements were carried out at the 5.5MV tandem Accelerator of the Institute of Nuclear and Particle Physics, National Center of Scientific Research "Demokritos", Athens, Greece. The target used was manufactured in RBI Zagreb, where an Al foil was created using the thermal evaporation technique, followed by the deposition of a boron layer through magnetron sputtering and the evaporation of a final ultra-thin layer of gold. The products of the interactions between the beam and the target were detected using silicon surface barrier detectors which were connected to standard nuclear electronics. The determination of the differential cross-section values was carried out using the relative measurement method. At first, the differential cross-section of the elastic scattering of deuterons from gold was calculated using the Rutherford formula along with a correction factor because of the electron screening effect. Subsequently, the ratio of gold to boron-11 in the target was determined using p-EBS and the SIMNRA program. Finally, we determined the ratio of counts from the elastic peak of boron-11 to the counts from the elastic peak of gold, in which we had to use fitting techniques because of the overlap between the peak of interest and the peak from the elastic scattering of carbon in the target's back side. That was the same reason for which some of the data had to be discarded. The calculation of the cross-section values, which is presented in both tabulated and graphical forms, showed strong deviations from the Rutherford formula by a factor of 3-4 and the absence of any resonance structure. By studying all the 3 angles together the absence of any significant angular distribution was also observed.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

- 1.1 Σκοπός
- 1.2 Πυρηνικές Αλληλεπιδράσεις - Κατηγοριοποίηση
- 1.3 Βόριο
- 1.4 Πυρηνικές Τεχνικές Ανάλυσης
- 1.5 Ελαστική σκέδαση $^{11}_5B(d, d_0)$
- 1.6 Ενεργειακό Διάγραμμα
- 1.7 Απώλεια Ενέργειας Φορτισμένων Σωματιδίων στην Ύλη

Κεφάλαιο 2: Πειραματική Διάταξη

- 2.1 Επιταχυντής
- 2.2 Πειραματική Γραμμή και Θάλαμος Σκέδασης
- 2.3 Στόχοι
- 2.4 Ανιχνευτές
- 2.5 Ηλεκτρονικά

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Δεδομένων

- 3.1 Ενεργειακή Βαθμονόμηση
- 3.2 Απόλυτη Μέτρηση και σχετική μέθοδος
- 3.3 Ενεργός Διατομή $^{197}_{79}Au(d, d_0)$
- 3.4 Προσδιορισμός Λόγου $Y_{^{11}_5B(d,d_0)}/Y_{Au}$
- 3.5 Προσδιορισμός λόγου $Nt_{Au}/Nt_{^{11}_5B(d,d_0)}$
- 3.6 Σφάλματα Διαφορικής Ενεργού Διατομής
- 3.7 Ενέργεια στο μέσο του πάχους του στόχου
- 3.8 Σφάλμα Ενέργειας
- 3.9 Ποιοτική Επαλήθευση Βαθμονόμησης Επιταχυντή

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

- 4.1 Τελικά Αποτελέσματα Ενεργού Διατομής
- 4.2 Σχολιασμός

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προοπτικές

- 5.1 Συμπεράσματα
- 5.2 Προοπτικές

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της διαφορικής ενεργού διατομής για την ελαστική σκέδαση δευτερίων από το ισότοπο $^{11}_5B$, για πρώτη φορά. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε γωνίες σκέδασης: 120° , 130° , 140° , 150° , 160° και 170° σε ενεργειακό εύρος $E_{d,lab} = 1.05 - 1.86$ MeV (μετρημένο στο σύστημα του εργαστηρίου).

Ο ακριβής προσδιορισμός της ενεργού διατομής είναι απαραίτητος για τη χρήση πυρηνικών τεχνικών ποσοτικού προσδιορισμού του βορίου σε δείγματα, αλλά και για τη δημιουργία προφίλ βάθους. Το τελευταίο αφορά τον προσδιορισμό της ποσόστωσης του βορίου στις επιφανειακές στρώσεις ενός υλικού. Επιπλέον τα δεδομένα από την παρούσα εργασία θα βοηθήσουν και τον εμπλουτισμό της ηλεκτρονικής βιβλιοθήκης δεδομένων IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [1].

1.2 Πυρηνικές Αλληλεπιδράσεις - Κατηγοριοποίηση

Μας ενδιαφέρουν κυρίως οι αλληλεπιδράσεις που καταλήγουν σε μόνο 2 προϊόντα. Η διάκριση των παραπάνω μπορεί να γίνει ανάλογα τα προϊόντα που παράγονται:

- Στις πυρηνικές αντιδράσεις έχουμε την παραγωγή διαφορετικών πυρήνων από αυτούς που πραγματοποίησαν την αντίδραση. Στην περίπτωση αυτή ισχύει προφανώς η διατήρηση της συνολικής ενέργειας και ορμής του συστήματος και έχουμε γνωστές σχέσεις για τις κινητικές ενέργειες αντιδρώντων-προϊόντων.
Συνήθως γράφονται ως: $\alpha + X \rightarrow b + Y$ ή $X(a,b)Y$
- Στην ελαστική σκέδαση τα αντιδρώντα και τα προϊόντα της πυρηνικής αλληλεπίδρασης είναι ακριβώς τα ίδια και η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος διατηρείται.
Συνήθως γράφεται ως: $a + X \rightarrow a + X$
- Στην ανελαστική σκέδαση έχουμε και πάλι ίδια αντιδρώντα και προϊόντα, όπως στην ελαστική. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει διατήρηση της κινητικής ενέργειας (μόνο της συνολικής ενέργειας), καθώς ο βαρύς πυρήνας μετά την αντίδραση δεν βρίσκεται στη βασική του κατάσταση, αλλά σε κάποια διεγερμένη στάθμη του. Ακολουθείται από την αποδιέγερση του πυρήνα αυτού, συνήθως με εκπομπή φωτονίου.
Συνήθως γράφεται ως: $a + X \rightarrow a + X^*$

Με a συμβολίζονται από σύμβαση οι πυρήνες-βλήματα και με b οι πυρήνες που συνήθως μας δίνουν τη ζητούμενη πληροφορία, ενώ με X, Y συμβολίζονται οι πυρήνες του στόχου πριν και μετά την αλληλεπίδρασή.

Μία διαφορετική κατηγοριοποίηση μπορεί επίσης να γίνει βάσει του Q-value των διαφόρων αντιδράσεων, το οποίο ορίζεται ως:

$$Q = (m_{\text{αντιδρώντα}} - m_{\text{προϊόντα}})c^2$$

- Εάν το $Q > 0$ πρόκειται για μια εξώθερμη αντίδραση, καθώς υπάρχει μια περίσσεια ενέργειας (μάζας ηρεμίας) στα αντιδρώντα, που θα μετατραπεί τελικά σε επιπλέον κινητική ενέργεια για τα προϊόντα. Τέτοιες αντιδράσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και αυθόρμητα.
- Εάν το $Q = 0$ έχουμε μια ελαστική σκέδαση, όπου δεν υπάρχει κάποια μεταβολή στο είδος των πυρήνων που συμμετέχουν.
- Εάν το $Q < 0$ πρόκειται για μια ενδόθερμη αντίδραση, η οποία δεν πραγματοποιείται αυθόρμητα.

Στην παρούσα εργασία ενδιαφερόμαστε αποκλειστικά για την ελαστική σκέδαση.

1.3 Βόριο

Όπως έχει αναφερθεί, το ισότοπο υπό μελέτη είναι το $^{11}_5B$. Γενικά το βόριο ως στοιχείο βρίσκεται στην 2η περίοδο και 13η ομάδα του περιοδικού πίνακα, έχει ατομικό αριθμό $Z=5$ και μέχρι σήμερα έχουν ανακαλυφθεί πολλά ισότοπά του. Τη δεδομένη στιγμή υπάρχουν πιο αναλυτικές πληροφορίες για τα ισότοπα από το 7_5B ως και το $^{19}_5B$, ωστόσο στη φύση τα σταθερά ισότοπα είναι μόλις δύο: το $^{10}_5B$ με αφθονία 19.9% και το $^{11}_5B$ με αφθονία 80.1%. Η ανάγκη ποσοτικού προσδιορισμού και μελέτη προφίλ βάθους του βόριου οφείλεται στο ότι είναι ένα στοιχείο με πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

Mass Number	Natural Abundance	Half-life
10	19.9%	STABLE
11	80.1%	STABLE

Εικόνα 1.1: Αφθονία των ισotόπων του Βορίου [2]

Τα οξέα και τα οξειδία του είναι συστατικά διάφορων καθημερινών προϊόντων όπως αντισηπτικά και φάρμακα, ενώ συγκεκριμένα το οξείδιο του βορίου είναι συχνά χρησιμοποιούμενο και στην κατασκευή γυαλιού Pyrex (Borosilicate glass).

Από την άποψη πυρηνικού ενδιαφέροντος το ισότοπο ^{10}B έχει έντονη απορροφητικότητα (μεγάλη ενεργό διατομή) στα θερμικά νετρόνια, κάτι που το καθιστά πάρα πολύ σημαντικό για τη θωράκιση πυρηνικών αντιδραστήρων. Βρίσκεται συνήθως με μορφή βοριοπυριτικών ράβδων ή ως βορικό οξύ που αναμειγνύεται με το ψυκτικό του αντιδραστήρα και η αντίδραση που εκτελεί είναι η: $^{10}_5B + ^1_0n \rightarrow ^7_3Li + ^4_2He + \gamma$

Τέλος το βόριο αποτελεί πρόσμιξη για τη δημιουργία p-type ημιαγωγών, που αξιοποιούνται στον κλάδο των ηλεκτρονικών, γεγονός που το τοποθετεί στα πολύ σημαντικά στοιχεία για όλη σχεδόν τη διαθέσιμη τεχνολογία.

Το ισότοπο που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το ^{11}B , όμως το φυσικό βόριο έχει αυστηρά καθορισμένη αφθονία στα ισότοπά του, επομένως γνώση της ποσότητας και προφίλ βάθους του ^{11}B συνεπάγεται και την αντίστοιχη πληροφορία για το ^{10}B .

1.4 Πυρηνικές Τεχνικές Ανάλυσης

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του βορίου σε δείγματα που προαναφέρθηκε γίνεται με τη χρήση δέσμης φορτισμένων ιόντων, στις μεθόδους που είναι γνωστές ως: "Ion Beam Analysis (IBA – ανάλυση υλικών με ιοντικές δέσμες)". Η δέσμη προσπίπτει στο δείγμα και αφότου αλληλεπιδράσει με ατομικές και πυρηνικές διεργασίες παράγονται εντοπίσιμα από ανιχνευτές προϊόντα. Η επεξεργασία του ανιχνευθέντος σήματος και στη συνέχεια η καταμέτρηση των σημάτων αυτών επιτρέπει πολύ ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό του ζητούμενου στοιχείου μέσα στο άγνωστο δείγμα.

Όλες οι μέθοδοι που θα αναφερθούν παρακάτω θεωρούνται ελάχιστα καταστροφικές για το δείγμα, με την πιθανή "φθορά" να περιορίζεται πολύ τοπικά (όσο το μέγεθος της δέσμης ιόντων που η διάμετρος της μπορεί να είναι της τάξης του 1 mm ή και λιγότερο). Αυτό σε περιπτώσεις μελέτης αντικειμένων μεγάλης χρηματικής ή αρχαιολογικής αξίας είναι μέγιστης σημασίας και καθιστά τις πυρηνικές μεθόδους ποσοτικής ανάλυσης ευρέως αξιοποιήσιμες μέχρι και σήμερα.

1) Rutherford Back scattering Spectrometry (RBS – φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford)

Πρόκειται για μια πολύ συνηθισμένη μέθοδο, η οποία βασίζεται στις σκεδάσεις Coulomb μεταξύ των σωματιδίων της δέσμης με τους πυρήνες του δείγματος υπό μελέτη. Η σκέδαση αυτή ονομάζεται σκέδαση Rutherford, είναι καθαρά ηλεκτροστατικής φύσεως και έχει μελετηθεί πλήρως με τις αρχές της κλασικής μηχανικής και του ηλεκτρομαγνητισμού, με αποτέλεσμα να έχει προσδιοριστεί αναλυτικός τύπος για την διαφορική ενεργό διατομή της.

Συγκεκριμένα για το σύστημα του εργαστηρίου η διαφορική ενεργός διατομή δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4}{(\sin\theta)^4} \frac{\{ [1 - ((M_1/M_2)\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}} + \cos\theta \}^2}{[1 - ((M_1/M_2)\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.1)$$

Όπου:

θ: Γωνία σκέδασης ενός προϊόντος

E: Κινητική ενέργεια των σωματιδίων της προσπίπτουσας δέσμης

Z_1 & M_1 : Ατομικός αριθμός και μάζα ιόντων δέσμης

Z_2 & M_2 : Ατομικός αριθμός και μάζα στόχου

Για να μπορεί όμως μια σκέδαση να θεωρηθεί καθαρά ηλεκτροστατική, βασική προϋπόθεση είναι να μην υπάρξουν καθόλου πυρηνικά φαινόμενα, δηλαδή το σωματίδιο της δέσμης (το οποίο φέρει θετικό φορτίο) πρέπει να μην καταφέρει να ξεπεράσει το φράγμα δυναμικής ενέργειας Coulomb με τον πυρήνα-στόχο. Εάν το φράγμα ξεπεραστεί θα ξεκινήσει η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση μεταξύ των νουκλεονίων βλήματος και στόχου, επομένως οι σχέσεις που έχουν βρεθεί με την υπόθεση αμιγώς ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης παύουν να έχουν ισχύ. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές της τεχνικής RBS χρησιμοποιούν δέσμες με αρκετά χαμηλό ατομικό αριθμό Z (πχ πρωτόνια, δευτέρια, σωματίδια α) και τα ισότοπα που μπορούν να μελετηθούν με αυτήν είναι πυρήνες με υψηλό Z . Ο λόγος είναι το πολύ ισχυρό φράγμα Coulomb σε αυτούς πυρήνες που δύσκολα θα υπερνικηθεί, με αποτέλεσμα οι αποκλίσεις της ενεργού διατομής από τον παραπάνω τύπο για την σκέδαση Rutherford να θεωρούνται πρακτικά αμελητέες. Η μέθοδος RBS αξιοποιείται πιο συχνά σε περιπτώσεις όπου τα βαρύτερα στοιχεία βρίσκονται σε μήτρες/υποστρώματα πιο ελαφρών στοιχείων.

2) Elastic Backscattering Spectroscopy (EBS – φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης)

Η απαίτηση που αναφέρθηκε παραπάνω όσον αφορά στο φράγμα Coulomb δεν είναι παρά μια ειδική περίπτωση που συναντά κάποιος, καθώς δεν ισχύει πάντα σε υψηλότερες κινητικές ενέργειες των ιόντων της δέσμης ή σε πυρήνες στόχων με χαμηλότερο ατομικό αριθμό (άρα και φράγμα δυναμικού Coulomb πιο χαμηλής ενέργειας). Εκεί το σωματίδιο της δέσμης θα καταφέρει να έχει ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση με το στόχο. Γενικότερα το φράγμα Coulomb μπορεί να υπερνικηθεί μόνο σε 2 περιπτώσεις. Η πρώτη είναι όταν η δέσμη έχει μεγαλύτερη κινητική ενέργεια από την μέγιστη τιμή του φράγματος, που θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε απόσταση ιόντος-στόχου ίση με μέση ακτίνα του πυρήνα-στόχου. Ωστόσο οι κανόνες της κβαντομηχανικής επιτρέπουν την διέλευση του προσπίπτοντος σωματιδίου από το φράγμα Coulomb ακόμα και όταν αυτό δεν έχει την απαραίτητη ενέργεια, μέσω του κβαντικού φαινομένου σήραγγας (quantum tunneling effect).

Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι και πάλι δυνατό να υπάρξει μια ελαστική διεργασία, η οποία θα είναι ουσιαστικά μια γενίκευση της RBS.

Δυστυχώς για τέτοιου είδους διεργασίες δεν υπάρχει κάποια αναλυτική μελέτη που να οδηγεί στον προσδιορισμό της ακριβούς διαφορικής ενεργού διατομής για διάφορες γωνίες και ενέργειες, επομένως θα πρέπει να γίνει χρήση πειραματικών μετρήσεων, όπως αυτές που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία.

3) Nuclear Reaction Analysis (NRA – ανάλυση με χρήση πυρηνικών αντιδράσεων)

Πρόκειται για μια τεχνική η οποία αξιοποιεί συχνά τα πιο μεγάλα Q -values από πυρηνικές αντιδράσεις (όπου ένα κομμάτι της ενέργειας μάζας ηρεμίας θα μετατραπεί σε κινητική, οπότε δεν είναι ελαστική διεργασία). Τα σωματίδια της δέσμης αλληλεπιδρούν με το στόχο με ποικίλους τρόπους και παράγονται διαφορετικά προϊόντα με τιμές κινητικής ενέργειας που ορίζονται από την κινηματική της εκάστοτε αντίδρασης. Συχνά τα προϊόντα των αντιδράσεων που επιλέγονται για ποσοτική ανάλυση βρίσκονται και σε περιοχές χαμηλού υποβάθρου, μακριά από ελαστικά κανάλια. Τέλος αξιοποιούνται και χαρακτηριστικοί

συντονισμοί για τα διάφορα στοιχεία/ισότοπα δίνοντας γρήγορη συλλογή ικανοποιητικής στατιστικής και άμεση ένδειξη ύπαρξης κάποιου στοιχείου.

Όπως και στην περίπτωση της EBS υπάρχει ξανά ανάγκη πειραματικού προσδιορισμού των διαφορικών ενεργών διατομών για την χρήση της μεθόδου. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν θα παρουσιαστεί κάποια τέτοια μελέτη.

4) Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA – ανάλυση μέσω ανίχνευσης ελαστικά ανακρουόμενου πυρήνα)

Η ERDA είναι μια τεχνική συμπληρωματική στις τεχνικές EBS/RBS, καθώς βασίζεται στην ανίχνευση των πυρήνων του ίδιου του στόχου. Αξιοποιείται κυρίως για την ανίχνευση πιο ελαφρών στοιχείων όπως Η και He με χρήση δεσμών από βαρύτερα ιόντα (όπως ^{16}O) σε υψηλές ενέργειες (ακόμα και 10αδες MeV)

Η διαφορική ενεργός διατομή για κλασική εμπροσθοσκέδαση δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E}\right)^2 \left(\frac{M_1 + M_2}{M_2}\right)^2 \frac{1}{(\cos\phi)^3} \quad (1.2)$$

Όπου :

ϕ : η γωνία σκέδασης του ανακρουόμενου πυρήνα

5) Particle Induced Gamma-ray Emission (PIGE – Ακτινοβολία-γ προκαλούμενη από σωματίδια)

Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί χαρακτηριστικές ακτίνες-γ που προέρχονται από την αποδιέγερση των διεγερμένων σύνθετων πυρήνων που προέκυψαν κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων δέσμης και πυρήνα-στόχου. Οι ενέργειες των ακτίνων γ αντιστοιχούν σε διαφορές συγκεκριμένων κβαντικών ενεργειακών σταθμών και θεωρούνται γνωστές από την επιστημονική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί για τα διάφορα ισότοπα στοιχείων.

Όσον αφορά στο βόριο, αυτή την στιγμή η κυρίαρχη μέθοδος **από τις παραπάνω** για την ποσοτικοποίηση του είναι η NRA μέσω της αντίδρασης $^{11}_5B(p, \alpha)^8_4Be$, η οποία έχει πολύ καλά προσδιορισμένη διαφορική ενεργό διατομή για γωνία σκέδασης 165 μοιρών. Ωστόσο εξαιτίας του υψηλού της Q-value (8.59 MeV) μετά την αντίδραση αυτή τα παραγόμενα σωματίδια α έχουν πολύ υψηλές ενέργειες (της τάξης των 5.5 MeV). Η υψηλή αυτή κινητική ενέργεια μεταφράζεται σε σχετικά μικρή ενεργειακή απώλεια των α καθώς βγαίνουν από το δείγμα. Στις αναλυτικές τεχνικές η πληροφορία του προφίλ βάθους εξάγεται από την ενεργειακή αυτή απώλεια, έτσι λόγω του Q value της αντίδρασης η συγκεκριμένη εφαρμογή της NRA καταλήγει να έχει μέτρια διακριτική ικανότητα βάθους.

Εναλλακτική επιλογή για προφίλομετρία αποτελούν οι αντιδράσεις (d,p) και (d, α) στα ισότοπα του βορίου. Τη δεδομένη στιγμή εξετάζεται η δυνατότητα να συνδυαστούν με την ελαστική σκέδαση προκειμένου να προσφέρουν μια μέθοδο ακόμα πιο ακριβούς προσδιορισμού προφίλ βάθους. Προφανώς το βόριο, ως ελαφρύ στοιχείο, αναμένεται να παρουσιάζει αποκλίσεις από τον αναλυτικό τύπο της διαφορικής ενεργού διατομής

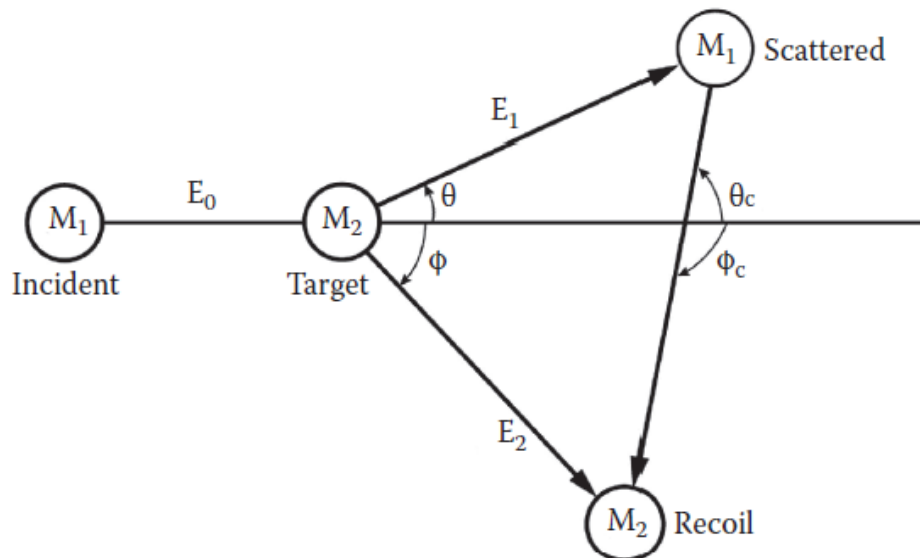
Rutherford, ενώ (όπως αναφέρθηκε και στην αρχή) δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή καθόλου πειραματικά δεδομένα για την ελαστική σκέδαση δευτερίων από βόριο.

Με άλλα λόγια η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί τη γέφυρα σύνδεσης των αναλυτικών τεχνικών d-EBS & d-NRA για το βόριο.

1.5 Ελαστική σκέδαση $^{11}_5B(d, d_0)$

Καταρχήν πρέπει να παρουσιάσουμε ορισμένα αποτελέσματα από την κινηματική μεταξύ 2 σωματιδίων. Ανεξαρτήτως από το μηχανισμό που θα ακολουθήσει η ελαστική σκέδαση (καθάρη ηλεκτροστατική ή με δημιουργία σύνθετου πυρήνα) είναι δυνατόν να εξάγουμε από τις αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής στο σύστημα του εργαστηρίου τη σχέση που συνδέει την αρχική και την κινητική ενέργεια του ελαφρού πυρήνα-βλήματος .

Ενδιαφερόμαστε για την περίπτωση όπου $M_2 > M_1$:



Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής σκέδασης

θ : Γωνία σκέδασης ελαφρού πυρήνα M_1

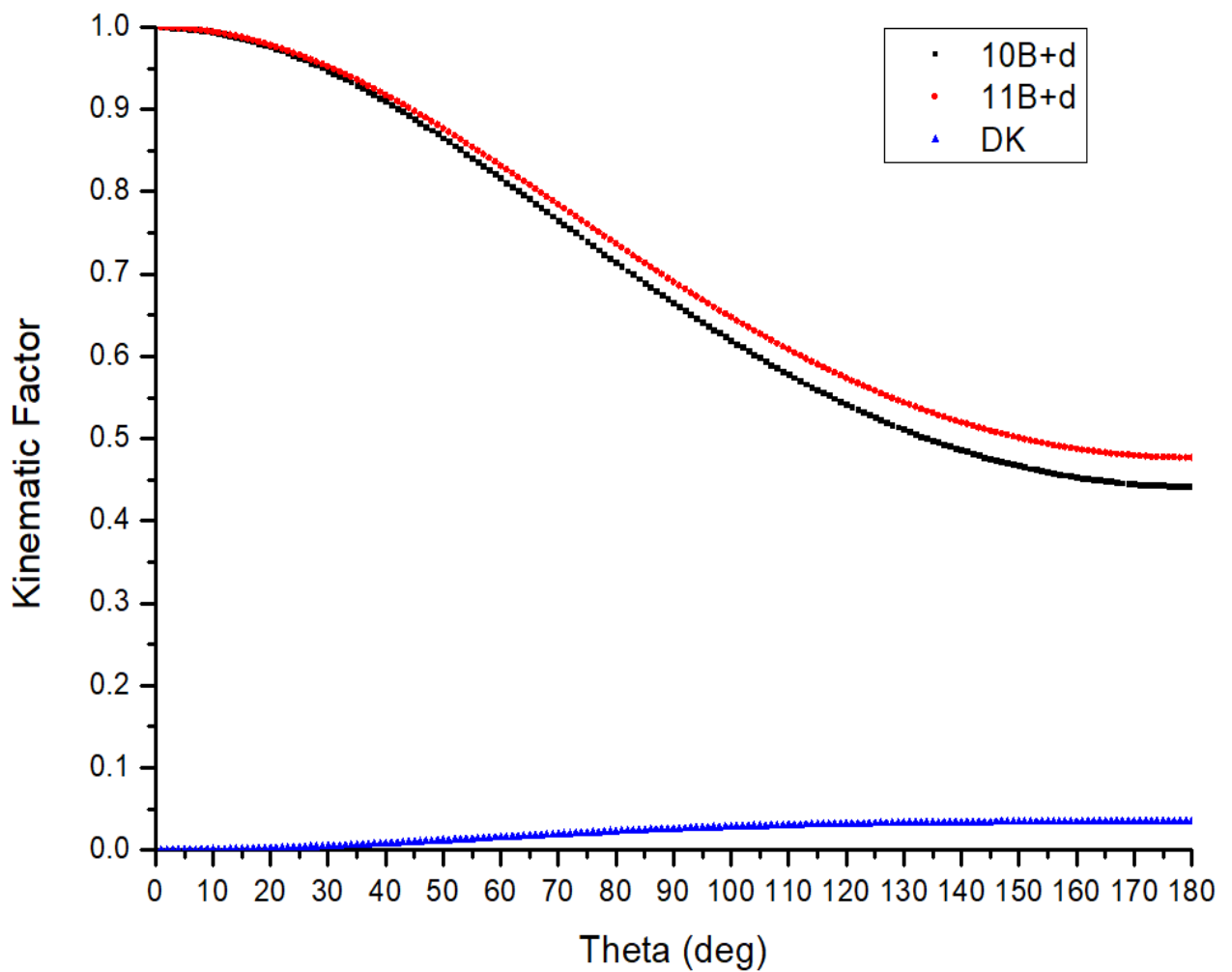
ϕ : Γωνία σκέδασης βαρύ πυρήνα M_2

θ_c, ϕ_c : Οι γωνίες στο σύστημα κέντρου μάζας (δεν αφορούν την παρούσα εργασία)

Η αρχική κινητική ενέργεια E_0 του βλήματος συνδέεται με την τελική κινητική ενέργεια E_1 του ελαφρού πυρήνα, μέσω της σχέσης (1.3) που φαίνεται παρακάτω. Το πηλίκο αυτό ονομάζεται κινηματικός παράγοντας K και εξαρτάται αποκλειστικά από τις μάζες και τη γωνία που θα σκεδαστεί ο ελαφρής πυρήνας.

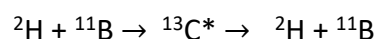
$$\frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{(M_2^2 + M_1^2 (\sin\theta)^2)^{1/2} + M_1 \cos\theta}{M_1 + M_2} \right)^2 \quad (1.3)$$

Τα 2 ισότοπα του βορίου έχουν διαφορετική μάζα, για αυτό το λόγο δίνουν και διαφορετικό κινηματικό παράγοντα για την ελαστική σκέδαση με το δευτέριο. Στην Εικόνα 1.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο κινηματικός παράγοντας για γωνίες 0-180 μοιρών στις 2 περιπτώσεις: $^{10}_5B + ^2_1H$ και $^{11}_5B + ^2_1H$, αλλά και η απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ των 2 αυτών κινηματικών παραγόντων. Στο συγκεκριμένο γράφημα φαίνεται καθαρά ότι για μεγαλύτερες γωνίες οπισθοσκέδασης αυξάνεται η διαφορά των κινηματικών παραγόντων, κάτι το οποίο θα μεταφραστεί σε καλύτερη ενεργειακή διάκριση μεταξύ των κορυφών που αντιστοιχούν στα $^{10}_5B$ και $^{11}_5B$. Το αποτέλεσμα αυτό ισχύει γενικότερα για την ενεργειακή διάκριση των ισωτόπων των διαφόρων στοιχείων.



Εικόνα 1.3: Κινηματικοί παράγοντες ανά γωνία σκέδασης για τα συστήματα του δευτερίου με το ^{10}B και το ^{11}B , αλλά και η μεταξύ τους διαφορά (μπλε γραμμή)

Για να έχουμε μια ξεκάθαρη εικόνα παραθέτουμε και την σχέση της ελαστικής σκέδασης με εμφανή τον ενδιάμεσο σύνθετο πυρήνα (compound nucleus) που θα δημιουργηθεί (στις περιπτώσεις όπου θα ξεπεραστεί το φράγμα Coulomb).



Το * υποδηλώνει ότι ο σύνθετος πυρήνας (compound nucleus) θα εμφανιστεί σε διεγερμένη κατάσταση. Αυτή η ενέργεια διέγερσης αποβάλλεται συνήθως με την εκπομπή ενός ελαφρού και ενός βαρύτερου πυρήνα, που στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης είναι οι ίδιοι που το δημιούργησαν.

1.6 Ενεργειακό Διάγραμμα

Πιο αυστηρά η ενέργεια διέγερσης του ενδιάμεσου σύνθετου πυρήνα θα δίνεται από τη σχέση 1.4:

$$E_{excite} = K_{cm} + Q \quad (1.4)$$

όπου K η κινητική ενέργεια των αντιδρώντων στο σύστημα κέντρου μάζας και Q το Q -value του “σκέλους” της αντίδρασης που αφορά στη δημιουργία του σύνθετου πυρήνα.

Οι ενέργειες που θα χρησιμοποιηθούν στο παρόν πείραμα δίνονται στο σύστημα του εργαστηρίου: $E_{d,lab} = 1.05-1.86$ MeV , θα χρειαστεί όμως να μετατραπούν σε ενέργειες συστήματος κέντρου μάζας με τη χρήση του τύπου:

$$K_{cm} = K_{lab} \frac{M_{tar}}{M_{tar} + M_{^1_1H}} \quad (1.5)$$

όπου K_{cm} είναι η ενέργεια του σωματιδίου βλήματος στο σύστημα κέντρου μάζας και K_{lab} είναι η ενέργεια του στο σύστημα του εργαστηρίου. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι ο λόγος που περιέχει τις μάζες αναφέρεται προφανώς στις μάζες των αντίστοιχων πυρήνων. Ωστόσο μια πολύ κοντινή του εκτίμηση με αμελητέες αποκλίσεις μπορεί να υπολογιστεί βάσει των τιμών για τις ατομικές μάζες που υπάρχουν στην NNDC [3]. Προφανώς τα 2 ισότοπα του βορίου θα έχουν διαφορετική τιμή στο λόγο μαζών. Για λόγους εποπτείας υπολογίστηκαν ορισμένες ενδεικτικές τιμές του K_{cm} μεταξύ 1 MeV και 2 MeV και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

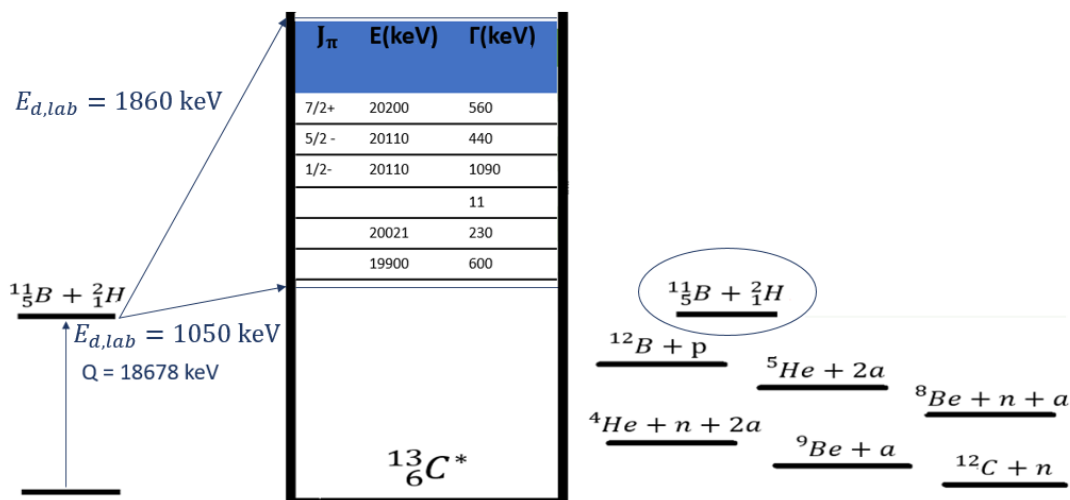
Long Name	K_{lab}	K_{cm}	K_{cm}
Units	MeV	MeV	MeV
Comments		d + B10	d + B11
1	1	0,83254	0,84535
2	1,2	0,99904	1,01442
3	1,4	1,16555	1,18349
4	1,6	1,33206	1,35256
5	1,8	1,49856	1,52163
6	2	1,66507	1,6907

Εικόνα 1.4: Πίνακας με ενδεικτικές τιμές K_{CM} των συστημάτων για $^{10,11}_5B$ για κινητικές ενέργειες δευτερίων μεταξύ 1 και 2 MeV

Το Q-Value για τη δημιουργία του σύνθετου πυρήνα προσδιορίστηκε με τη βοήθεια του online Q-value calculator της NNDC [4] και για την εύρεση των ενεργειακών επιπέδων που θα διεγερθούν σε αυτόν αξιοποιήθηκαν ξανά τα δεδομένα της NNDC [5]

Για τη δημιουργία του ^{13}C έχουμε $Q = 18678 \text{ keV}$, άρα βάσει της σχέσης (1.4) αναμένουμε **διέγερση** του ενδιάμεσου σύνθετου πυρήνα ^{13}C σε **ενεργειακό εύρος 19523-20250 keV**

Εδώ υπάρχουν πολλά ενεργειακά επίπεδα (στάθμες) τα οποία παρουσιάζονται στο παρακάτω ενεργειακό διάγραμμα μαζί με το εύρος τους, τη στροφορμή και την ομοτιμία τους. Στα σημεία του διαγράμματος που δεν αναγράφεται κάτι σημαίνει ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα στη διεθνή βιβλιογραφία.



Εικόνα 1.5: Το ενεργειακό διάγραμμα της ελαστικής σκέδασης $^{11}\text{B}(d, d_0)$

1.7 Απώλεια Ενέργειας Φορτισμένων Σωματιδίων στην Ύλη

Τα φορτισμένα σωματίδια που αξιοποιούνται ως βλήματα στο μεγαλύτερο ποσοστό τους θα χρειαστεί να διασχίσουν κάποιο κομμάτι ύλης (μέσα στο στόχο) προτού αλληλεπιδράσουν με οποιοδήποτε τρόπο. Γι' αυτό είναι σημαντική η γνώση των μηχανισμών και των βασικών σχέσεων που διέπουν τις ενεργειακές απώλειες.

Ο βασικός μηχανισμός ενεργειακών απωλειών ενός βαρέος φορτισμένου σωματιδίου, όπως τα πρωτόνια και τα δευτέρια, είναι οι σκεδάσεις με ατομικά ηλεκτρόνια των διαφόρων ατόμων του στόχου.

Η μέση ενεργειακή απώλεια ανά μήκος $\frac{dE}{dx}$ μπορεί να εκτιμηθεί με τη σχέση (1.6) από τους Bethe και Bloch :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z_1^2}{m_0 v^2} N Z_2 \left[\ln \left(\frac{2m_0 v^2}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (1.6)$$

όπου:

Z_1, Z_2 : ατομικός αριθμός ατόμων βλήματος και στόχου αντίστοιχα

e, m_0 : φορτίο και μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου

v : ταχύτητα σωματιδίου-βλήματος

c : ταχύτητα του φωτός

I : δυναμικό ιονισμού (χαρακτηριστικό για κάθε στοιχείο)

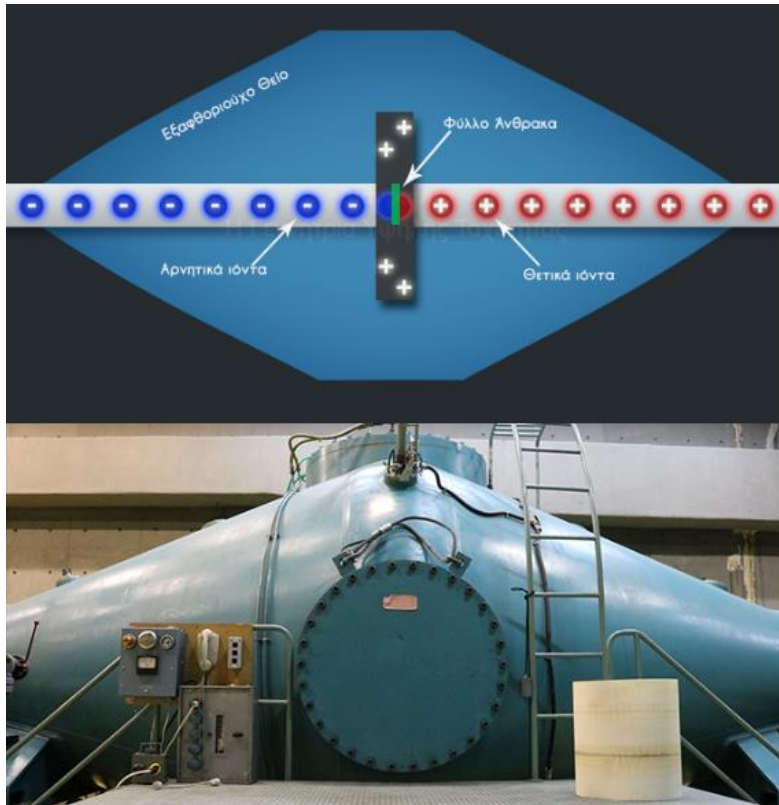
Η απώλεια ενέργειας παραμένει ωστόσο μια καθαρά στατιστική διαδικασία, επομένως υπάρχει μία αβεβαιότητα στην ενέργεια που θα χάσει το κάθε σωματίδιο (energy straggling). Η δέσμη αποτελείται από πολλά σωματίδια, αυτό λοιπόν που θα συμβεί καθώς θα εισέρχεται σε μεγαλύτερο βάθος στο στόχο είναι μια σταδιακή αύξηση του εύρους που θα ανήκουν οι κινητικές τους ενέργειες. Τέλος οι σκεδάσεις που θα υποστούν τα ιόντα μέσα στο στόχο συχνά έχουν και ως αποτέλεσμα (πέραν της προσθήκης ενεργειακής αβεβαιότητας) και τη δημιουργία μιας χωρικής αποεστίασης της συνολικής δέσμης. Στις δικές μας μετρήσεις το τελευταίο φαινόμενο δεν θα έχει κάποια σημαντική επιρροή.

Κεφάλαιο 2: Πειραματική Διάταξη

2.1 Επιταχυντής

Για να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε μέτρηση ενεργού διατομής χρειάζεται μια ροή από φορτισμένα σωματίδια με γνωστή (στην ακρίβεια που αυτό είναι επιτεύξιμο φυσικά) ενέργεια. Η τάξη της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων πρέπει να είναι στα MeV, ώστε να είναι συγκρίσιμη με το φράγμα δυναμικής ενέργειας Coulomb πυρήνα-βλήματος, αλλά και για να μην υπάρχει έντονη χωρική απόκλιση των ιόντων της δέσμης. Στην παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, έγινε βομβαρδισμός με ιόντα που είχαν κινητικές ενέργειες στο ενεργειακό εύρος 1.05-1.86 MeV και για την παραγωγή τους είναι απαραίτητη η χρήση επιταχυντικής διάταξης.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος” στον ηλεκτροστατικό επιταχυντή σωματιδίων tandem 5.5 MV. Θα ξεκινήσουμε με μια συνοπτική περιγραφή της διάταξης που μας παράγει την τελική δέσμη. Το αρχικό τμήμα είναι μια πηγή παραγωγής φορτισμένων ιόντων τύπου “duoplasmatron”. Πρόκειται για μία κλειστή κοιλότητα υψηλού κενού, όπου διοχετεύεται υδρογόνο, στο οποίο προσκρούουν ηλεκτρόνια από μια θερμαινόμενη κάθοδο δημιουργώντας πλάσμα. Τα αρνητικά ιόντα του πλάσματος θα καθοδηγηθούν από μια τάση δημιουργώντας μια ροή αρνητικών ιόντων στο πρώτο τμήμα του σωλήνα επιτάχυνσης (Εικόνα 2.1), ο οποίος έχει κενό αέρος για αποφυγή αλληλεπιδράσεων με άτομα και μόρια του ατμοσφαιρικού αέρα. Η πρώτη επιτάχυνση γίνεται μέσω μιας φορτισμένης σφαίρας σε πολύ υψηλό δυναμικό (με μέγιστο τα 5,5 MV) η οποία έλκει τα ανιόντα. Μόλις βρεθούν στο κέντρο της θα περάσουν από ένα υμένιο άνθρακα (C), το οποίο θα αφαιρέσει ηλεκτρόνια (carbon stripper) μετατρέποντας τα ανιόντα σε κατιόντα, θετικά δηλαδή ιόντα που πλέον θα απωθούνται από το ίδιο υψηλό δυναμικό επιτυγχάνοντας έτσι ένα ακόμα στάδιο επιτάχυνσης. Η περιοχή γύρω από τον επιταχυντικό σωλήνα είναι γεμάτη με SF_6 (για αποφυγή σπινθήρα). Πολύ βασικό αποτελεί το επόμενο τμήμα, όπου πρέπει να γίνει η επιλογή των ιόντων που θέλουμε να στείλουμε στο στόχο. Για να επιτευχθεί αυτό υπάρχει ένας κατευθυντικός μαγνήτης στρέψης (analyzing magnet) που αξιοποιεί ότι τα διάφορα θετικά ιόντα που έχουν παραχθεί έχουν διαφορετικούς λόγους φορτίου μάζας (q/m) και κινούνται με ένα εύρος ταχυτήτων. Με σωστή ρύθμιση του μαγνητικού του πεδίου είναι δυνατή η στρέψη προς τη συνέχεια του σωλήνα (κατά 90 μοίρες) μόνο των επιθυμητών ιόντων με την κατάλληλη ταχύτητα (άρα και ενέργεια), τα οποία θα περάσουν και από έναν 2° μαγνήτη (switching magnet) προκειμένου να κατευθυνθούν προς την πειραματική γραμμή με την μετρητική διάταξη.



Εικόνα 2.1: Επιταχυντικός σωλήνας εντός της μηχανής tandem

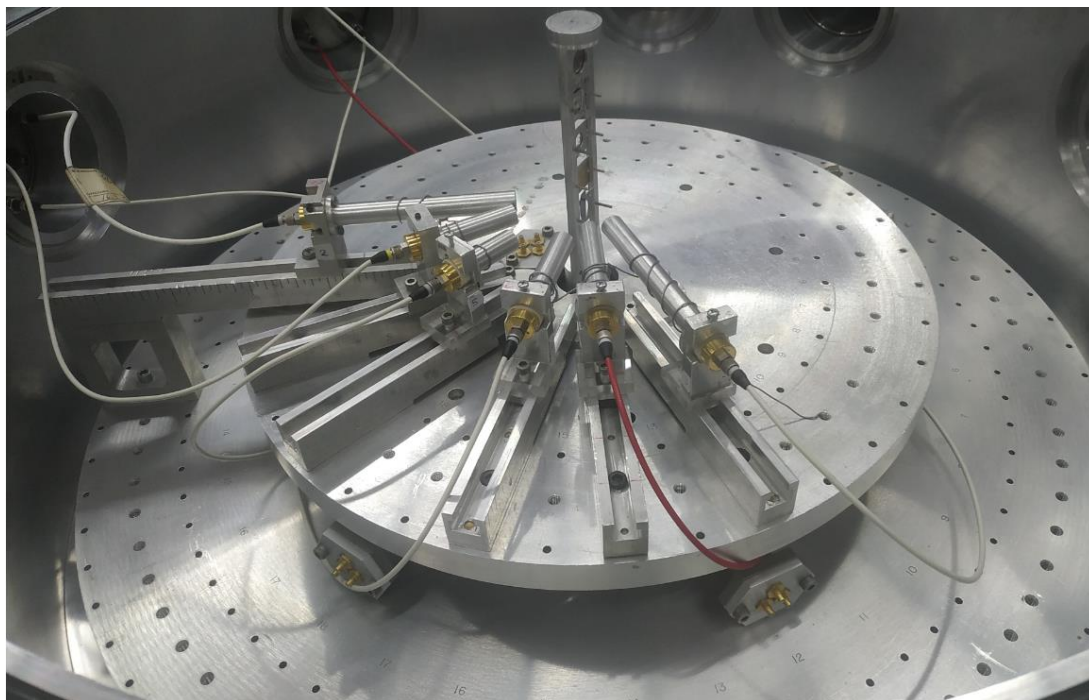
2.2 Πειραματική Γραμμή και Θάλαμος Σκέδασης

Έχοντας πλέον την επιθυμητή δέσμη ιόντων για το πείραμα, στην παρούσα περίπτωση τα δευτέρια, περνάμε στο τμήμα της διάταξης που βρίσκεται στο χώρο όπου θα πραγματοποιηθεί το πείραμα. Η δέσμη θα περάσει από ένα τελευταίο τετράπολο εστίασης μέσα από έναν σωλήνα που διατηρείται επίσης σε κενό αέρος και θα συναντήσει τον κατευθυντήρα (collimator) που έχει σκοπό τον χωρικό εντοπισμό της πριν εισέλθει στο κεντρικό θάλαμο (chamber) με τους στόχους, που φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



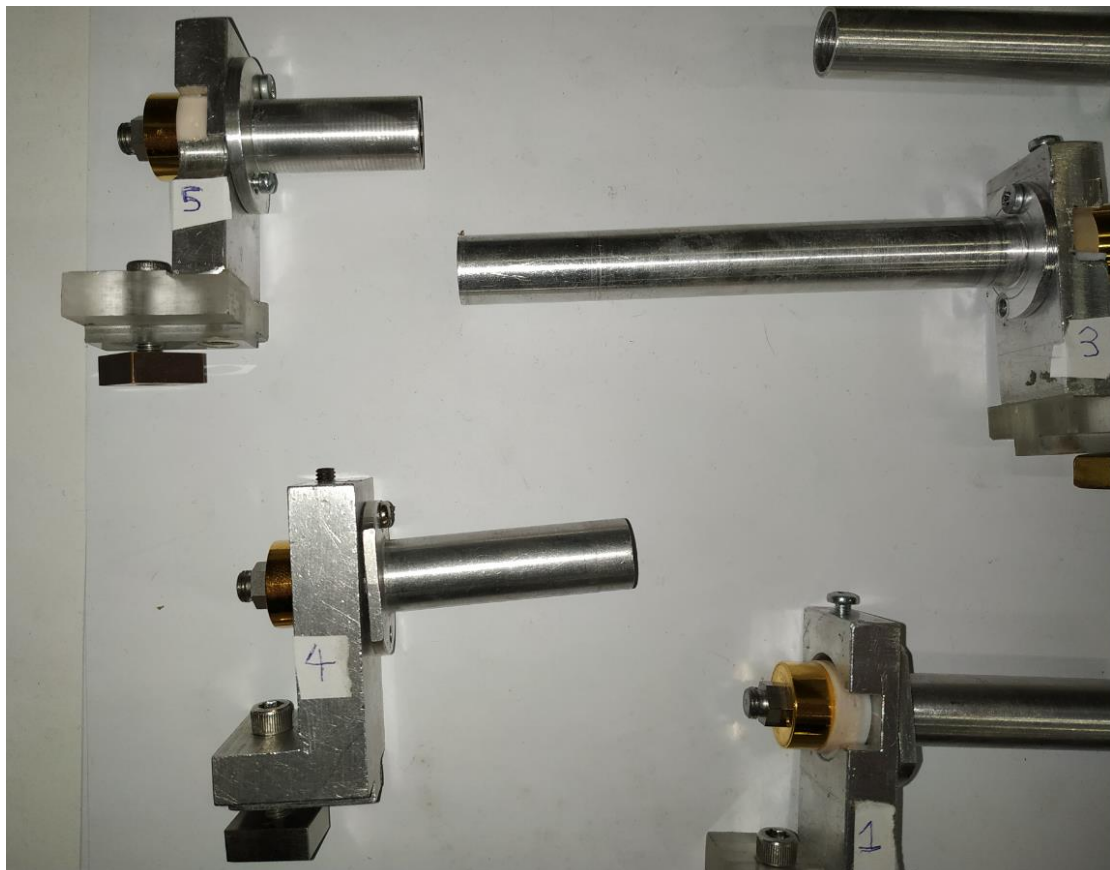
Εικόνα 2.2: Πειραματική γραμμή και εξωτερικό θαλάμου σκέδασης

Ο θάλαμος περιέχει μια μεγάλης ακριβείας γωνιομετρική τράπεζα (Εικόνα 2.3) με ειδικές εσοχές για να βιδώνονται μεταλλικές ράγες. Εκεί θα τοποθετηθούν τα διάφορα εξαρτήματα της διάταξης. Ο κάθε ανιχνευτής τοποθετείται μέσα σε μια βάση, η οποία θα βιδωθεί στη ράγα σε επιθυμητή απόσταση ώστε να διατηρηθεί σταθερός κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής του πειράματος. Οι αποστάσεις ανιχνευτή-στόχου είναι της τάξης των 8-15 cm και έχουν υπολογιστεί προκειμένου να καλύπτεται στερεά γωνία που θα δώσει ικανοποιητική στατιστική. Το κέντρο του παραθύρου των ανιχνευτών, το κέντρο του εκάστοτε στόχου και η δέσμη βρίσκονται περίπου στο ίδιο ύψος.



Εικόνα 2.3: Εσωτερικό του θαλάμου σκέδασης

Μπροστά από την επιφάνεια του κάθε ανιχνευτή τοποθετείται μία μάσκα με ορθογώνιο άνοιγμα (slit) με σκοπό τον περιορισμό της γωνιακής αβεβαιότητας στη γωνία θ . Για τις αποστάσεις της τάξης των 10 cm, το άνοιγμα 2-3 mm του slit αντιστοιχεί σε αβεβαιότητα 1-1.5 μοιρών. Επιπλέον, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 2.3 & 2.4, βιδώνουμε στη βάση και ένα μεταλλικό σωλήνα αλουμινίου μεγέθους μερικών εκατοστών που αποσκοπεί στην προστασία του παραθύρου του ανιχνευτή από ιόντα που ενδέχεται να σκεδαστούν στο θάλαμο και να φτάσουν στον ανιχνευτή αλλοιώνοντας το πειραματικό αποτέλεσμα μας με επιπλέον ψευδή γεγονότα. Στο παρόν πείραμα προετοιμάστηκαν 6 “συμπλέγματα” ανιχνευτής-βάση-slit-σωλήνας αλουμινίου, τα οποία τοποθετήθηκαν σε γωνίες 120° - 170° με βήμα 10° . Χαρακτηριστικά “συμπλέγματα” βάσεων με βιδωμένο σωλήνα αλουμινίου και ανιχνευτή παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.4. Για χωροταξικούς λόγους επιλέγουμε τους ανιχνευτές που αντιστοιχούν σε γωνίες σκέδασης 130° , 150° , 170° να βρίσκονται αριστερά της δέσμης και τους ανιχνευτές που αντιστοιχούν σε γωνίες 120° , 140° , 160° δεξιά (Εικόνα 2.3)



Εικόνα 2.4: Βάσεις με βιδωμένο σωλήνα αλουμινίου και ανιχνευτή

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται να δοθεί στο ποια τμήματα της διάταξης αυτής είναι σε αγώγιμη επαφή μεταξύ τους. Εάν οι σωλήνες αλουμινίου δεν είναι γειωμένοι με το θάλαμο υπάρχει κίνδυνος καθώς περνά η δέσμη και έχουμε σκεδαζόμενα ιόντα και ηλεκτρόνια στο χώρο να συλλέξουν φορτίο. Αυτό θα οδηγούσε στην ύπαρξη ενός παρασιτικού ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο, εφόσον αυξανόταν υπέρμετρα, θα μπορούσε να οδηγήσει σε σπινθήρα, προκαλώντας ηλεκτρονικό θόρυβο στους ανιχνευτές ή/και θα αλλοίωνε τις τροχιές των προϊόντων της αντίδρασης καταστρέφοντας τη μέτρηση. Ταυτόχρονα πρέπει να σιγουρευτούμε ότι οι ανιχνευτές είναι πλήρως μονωμένοι από το θάλαμο, διαφορετικά η τάση που θα εφαρμοστεί σε αυτούς μπορεί να φτάσει σε άλλα κομμάτια της διάταξης και να αλλοιωθεί το σήμα, λόγω αύξησης και πάλι του ηλεκτρονικού θορύβου.

Ο θάλαμος κατά την πραγματοποίηση του πειράματος βρίσκεται, όπως και όλα τα άλλα τμήματα της επιταχυντικής διάταξης, σε υψηλό κενό. Η δημιουργία του κενού αέρος βασίζεται στη λειτουργία μιας περιστροφικής αντλίας λαδιού που θα φέρει την πίεση του θαλάμου σε κατάσταση προ-κενού ($\sim 10^{-3} \text{ mbar}$) και σε μια στροβιλομοριακή αντλία (turbo) που ξεκινώντας από το προ-κενό θα μειώσει την πίεση άλλες 3 τάξεις μεγέθους φτάνοντας $\sim 10^{-6} \text{ mbar}$.

2.3 Στόχοι

Για το πείραμα δοκιμάστηκαν 2 είδη στόχων. Ο πρώτος στόχος επιλέχθηκε από μια σειρά στόχων που κατασκευάστηκαν στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε 'Δημόκριτος' με την τεχνική της θερμικής εξαχνωσης. Σε κάθε βήμα που θα περιγραφεί ο θάλαμος (Εικόνα 2.5) βρισκόταν σε κενό της τάξης των 10^{-4} mbar και είχε καθαριστεί ενδελεχώς με ακετόνη και οινόπνευμα για τη μείωση παρασιτικών στοιχείων στα τοιχώματα που θα δημιουργούσαν πρόβλημα στη διατήρηση του κενού αέρος και πιθανώς θα έφταναν και μέσα στο στόχο. Οι προς εξαχνωση ουσίες τοποθετήθηκαν σε βάση που κόπηκε από μία λωρίδα φύλλου τανταλίου και σφυρηλατήθηκε στο κέντρο της μια θήκη. Το πρώτο βοηθητικό στρώμα που εξαχνώθηκε ήταν η ένωση KCl , η οποία τοποθετήθηκε σε στερεά μορφή άλατος και σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα εξαχνώθηκε πάνω σε γυάλινα πλακίδια που είχαν τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο. Στη συνέχεια εξαχνώθηκε πάνω από το χλωριούχο κάλιο μια σχετικά μεγάλη ποσότητα χρυσού (ζυγίστηκε περίπου $\frac{1}{4}$ του γραμμαρίου) ο οποίος θα αξιοποιηθεί για κανονικοποίηση (θα αναφερθούμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο σε αυτό). Τα πλακίδια τοποθετήθηκαν σε νερό ώστε να διαλυθεί το άλας και να συλλεχθούν τα υμένια του χρυσού σε ειδικές βάσεις. Τέλος τα υμένια αυτά τοποθετήθηκαν ξανά στο θάλαμο όπου εξαχνώθηκε ένα στρώμα, που περιέχει το βόριο που μας ενδιαφέρει για την παρούσα εργασία.

Η γενική σχέση που μας δίνει την επιφανειακή πυκνότητα σ (σε $\frac{g}{cm^2}$) που αναμένεται να έχουμε στους στόχους μας είναι:

$$\sigma = \frac{m}{2\pi R^2} \quad (2.1)$$

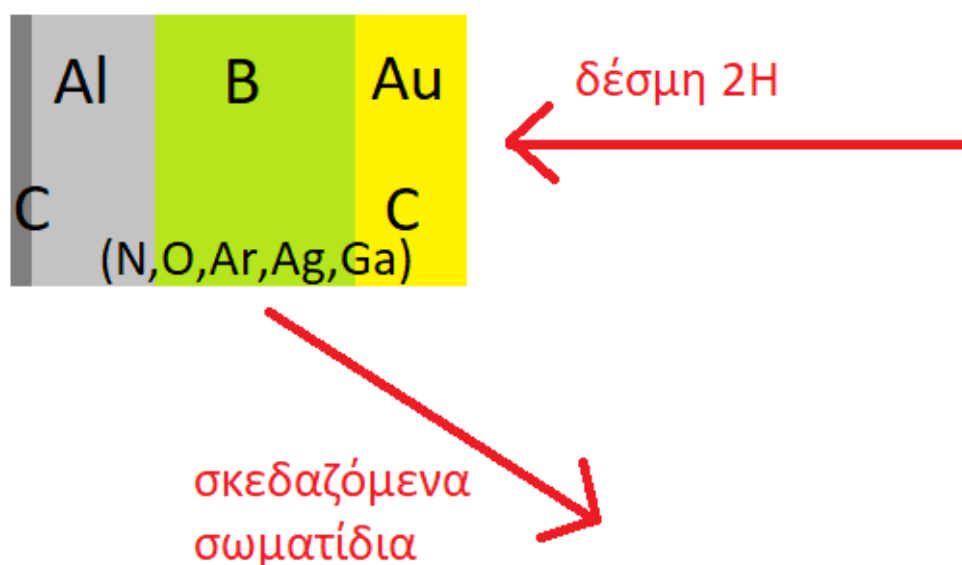
(τα πλακίδια δεν ήταν όλα στην ίδια απόσταση άρα υπάρχουν αποκλίσεις από την παραπάνω σχέση)



Εικόνα 2.5: Εξαχνωτήρας στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος"

Το δεύτερο είδος στόχου κατασκευάστηκε στο R.B.I. στο Ζάγκρεμπ. Αρχικά εξαχνώθηκε ένα στρώμα Al που πρόσφερε στήριξη. Στη συνέχεια με την τεχνική του magnetron sputtering εναποτέθηκε ένα 2^ο στρώμα βορίου πάνω στο Al και τέλος εξαχνώθηκε ένα 3^ο στρώμα χρυσού. Αυτός ήταν ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε τελικά για τις μετρήσεις καθώς ήταν λεπτότερος, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μικρότερη αβεβαιότητα στις ενέργειες των ιόντων που σκεδάζονταν από αυτόν.

Κατά τη δημιουργία του εισχώρησαν πέρα από τα 3 βασικά (Al, Au, B) και διάφορα παρασιτικά στοιχεία, όπως αυτά που φαίνονται στην Εικόνα 2.6 παρακάτω και θα συζητηθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.6: Σχεδιάγραμμα του στόχου και της εισερχόμενης δέσμης

2.4 Ανιχνευτές

Οι 6 ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 2.7 και ανήκουν στην κατηγορία των ανιχνευτών ημιαγωγών. Το επόμενο κομμάτι αφορά στην περιγραφή της απαραίτητης φυσικής που διέπει τη λειτουργία τους.

Ένα ημιαγωγικό υλικό, όπως το πυρίτιο (Si), ανήκει στην 4η ομάδα του περιοδικού πίνακα και σχηματίζει στο χώρο τρισδιάστατο πλέγμα με δομή διαμαντιού. Εξαιτίας της περιοδικής δομής οι επιτρεπτές κβαντικές καταστάσεις των ηλεκτρονίων του πλέγματος δεν είναι τα γνωστά ατομικά τροχιακά του μεμονωμένου στοιχείου. Τα ηλεκτρόνια αποεντοπίζονται και δημιουργείται μια δομή ενεργειακών ζωνών με πολύ πυκνές ενεργειακές καταστάσεις. Οι 2 βασικές είναι η ζώνη σθένους, που θεωρούμε ότι περιέχει τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων του πλέγματος και η ζώνη αγωγιμότητας στην οποία ανήκουν τα "ελεύθερα" ηλεκτρόνια του. Οι 2 ζώνες χωρίζονται από ένα ενεργειακό κενό (energy gap) που δεν περιέχει επιτρεπτές κβαντικές καταστάσεις. Όταν ο κρύσταλλος βρεθεί σε θερμοδυναμική ισορροπία με

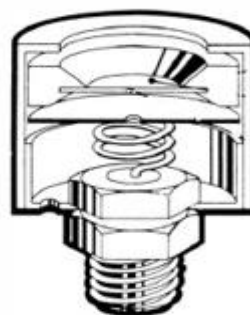
περιβάλλον απόλυτης θερμοκρασίας T τα ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους έχουν μη μηδενική πιθανότητα να περάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω ένα κενό/οπή που δρα ως φορέας θετικού φορτίου.

Συχνά οι κρύσταλλοι αυτοί εμφυτεύονται με στοιχεία της 3ης και 5ης περιόδου του περιοδικού πίνακα με αποτέλεσμα τη δημιουργία κβαντικών καταστάσεων εντός της απαγορευμένης περιοχής, αλλάζοντας τοπικά την πυκνότητα των φορέων. Ανάλογα με το είδος της πρόσμειξης έχουμε n-type τμήματα με περίσσεια e^- και p-type τμήματα με περίσσεια οπών. Όταν τα 2 αυτά τμήματα είναι διαδοχικά έχουμε μία διεπαφή p-n, που στο κέντρο της υπάρχει η λεγόμενη περιοχή απογύμνωσης με την πυκνότητα φορέων να μεταβάλλεται όσο κατευθυνόμαστε από το p προς το n κομμάτι. Συχνά με τη διαδικασία της διάχυσης τα μέρη p-n ανταλλάσσουν αυθόρμητα φορείς δημιουργώντας μια εσωτερική διαφορά δυναμικού.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διασχίσει την περιοχή απογύμνωσης θα αλληλεπιδράσει (ως εξωτερικό διαταρακτικό δυναμικό ιονισμού) δημιουργώντας επιπλέον ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής από αυτά που θα υπήρχαν στην θερμοδυναμική ισορροπία. Εφαρμόζοντας εξωτερική τάση στα άκρα της διεπαφής, τα ζεύγη αυτά εξαναγκάζονται να κινηθούν κατευθυνόμενα από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μέχρι να φτάσουν στα άκρα της διεπαφής, όπου υπάρχουν ηλεκτρόδια για τη συλλογή τους. Επιπλέον η εξωτερική τάση ενισχύει την εσωτερική διαφορά δυναμικού της διόδου με αποτέλεσμα να μειώνεται το ρεύμα διαρροής.

Το αποτέλεσμα της συλλογής των επιπλέον φορέων φορτίου είναι η δημιουργία μιας μικρής μεταβολής στην τάση στα άκρα της διόδου, που είναι ανάλογη της ενέργειας που εναποτέθηκε από το φορτισμένο σωματίδιο στον κρύσταλλο.

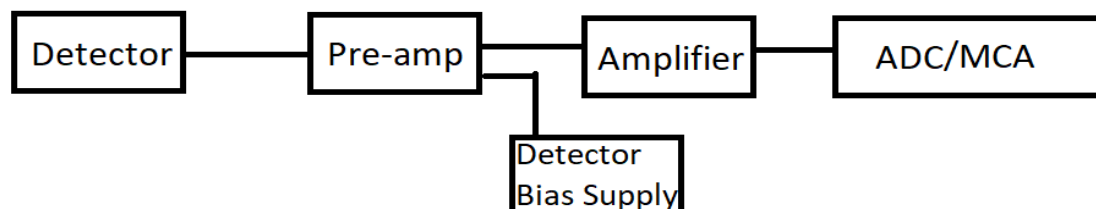
Βασικό χαρακτηριστικό των ανιχνευτών μας είναι ότι πρέπει να λειτουργούν σε σκοτεινό θάλαμο. Τα φωτόνια στο οπτικό φάσμα έχουν ενέργειες της τάξης των eV, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πάρα πολλών ζευγών, εξαιτίας της υψηλής έντασης του καθημερινού φωτός που έχουμε γύρω μας, που θα οδηγήσει σε μόνιμη φθορά του ανιχνευτή.



Εικόνα 2.7: Ανιχνευτής επιφανειακού φραγμού πυριτίου

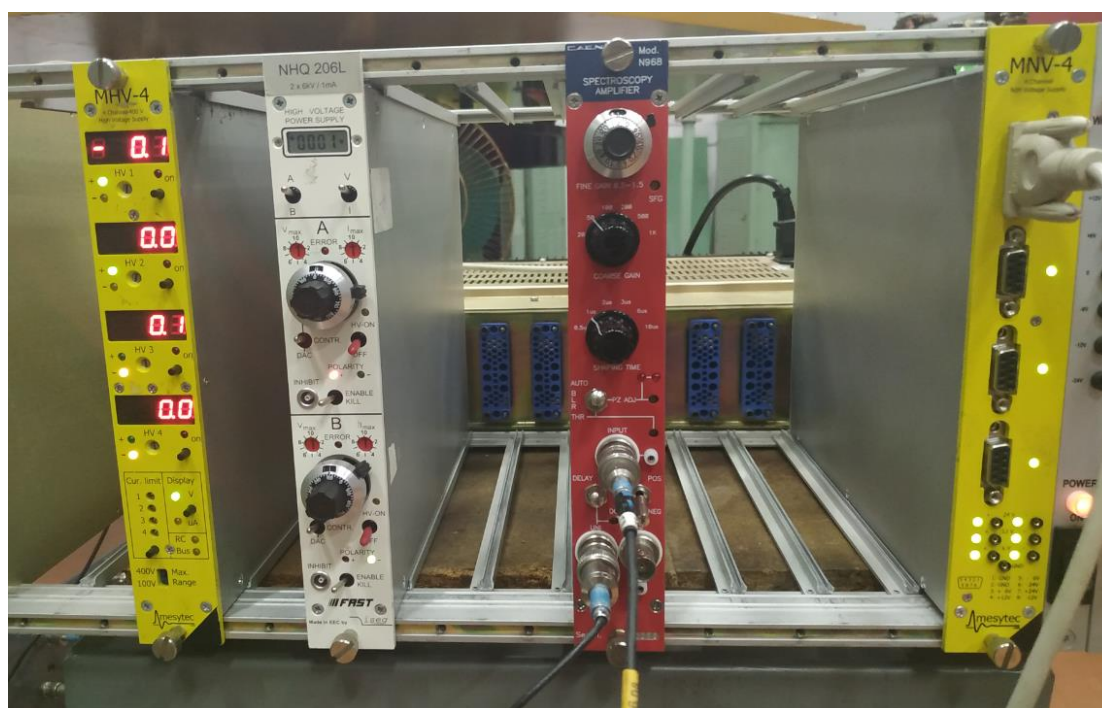
2.5 Ηλεκτρονικά

Θα ξεκινήσουμε με ένα σχήμα που φαίνεται η διάταξη των ηλεκτρονικών και με μία περιγραφή των τυπικών ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται:



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα των ηλεκτρονικών φασματοσκοπίας που χρησιμοποιήθηκαν

Όλος ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται παίρνει τροφοδοσία από μια κεντρική μονάδα (crate), που μετατρέπει την τάση της πρίζας σε inputs $\pm 6\text{ V}$, $\pm 12\text{ V}$, $\pm 24\text{ V}$ για να τροφοδοτηθούν οι απαραίτητες ηλεκτρονικές μονάδες (Εικόνα 2.9).



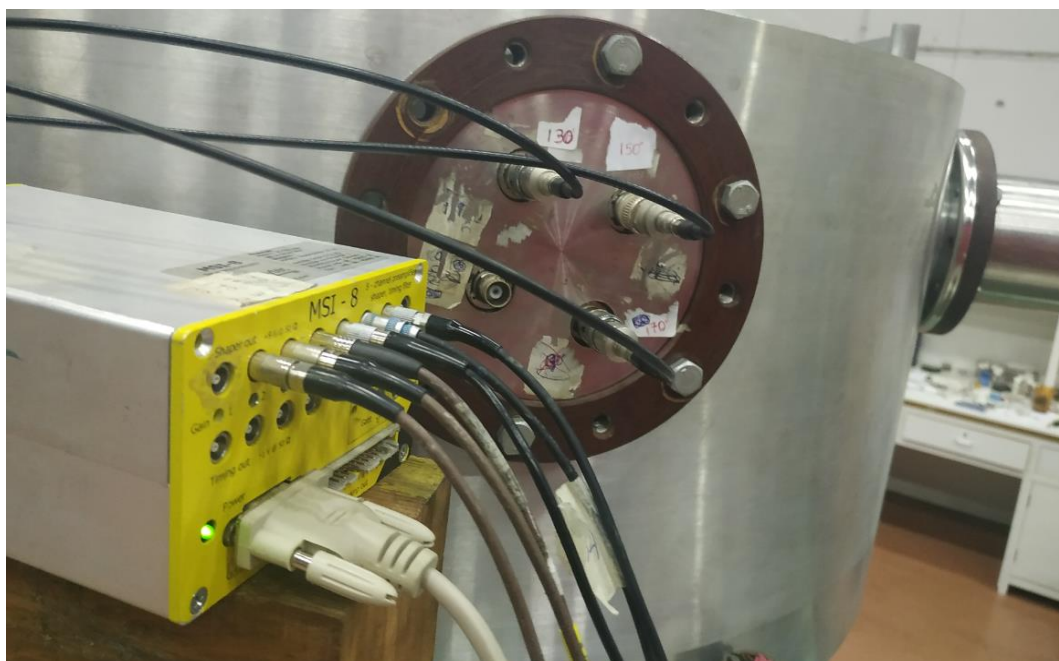
Εικόνα 2.9: Κεντρική μονάδα (NIM crate) με τις ηλεκτρονικές μονάδες.

Το σήμα στα άκρα του ανιχνευτή δυστυχώς δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμο για να εξάγουμε τη φυσική πληροφορία, καθώς είναι πολύ χαμηλής έντασης (πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ως μη ηλεκτρολογικά μετρήσιμο). Το πρώτο βήμα λοιπόν είναι να ενισχυθεί σε ένα επίπεδο που δε χάνεται μέσα στον ηλεκτρονικό θόρυβο. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με τη σύνδεση ενός προ-ενισχυτή (preamplifier) με τον ανιχνευτή πυριτίου. Ο προ-ενισχυτής θα μεταφέρει ταυτόχρονα και την εξωτερική “υψηλή” τάση που θα τροφοδοτήσει τον ανιχνευτή (για τους ανιχνευτές Si η τάση τροφοδοσίας είναι 50 Volt και για ανιχνευτές Ge χρειάζεται τάση της τάξης των kV),

ενώ ταυτόχρονα θα ενισχύσει το χρήσιμο σήμα και θα βελτιώσει (μειώσει) σημαντικά την αναλογία θορύβου-χρήσιμου σήματος. Είναι βασικό ο προ-ενισχυτής να συνδέεται όσο το δυνατό πιο κοντά στον ανιχνευτή ώστε να μην εκτεθεί το αδύναμο αρχικό σήμα σε μεγάλη εμπέδηση προτού να έχει ενισχυθεί επαρκώς.

Το σήμα πρέπει μετά να περάσει από έναν ενισχυτή που ταυτόχρονα θα πραγματοποιήσει και μια διαμόρφωση στο σχήμα του. Οι κύριες παράμετροι στις οποίες επεμβαίνει ο χρήστης είναι η ενίσχυση (Gain), ο χρόνος διαμόρφωσης (shaping time) του παλμού και το “pole-zero cancellation”. Το τελευταίο αφορά μια ρύθμιση ώστε όταν έρθουν 2 διαδοχικοί παλμοί, να είμαστε σίγουροι ότι ξεκινούν και οι 2 από κοινό σημείο αναφοράς (ώστε να έχουν νόημα οι μετρήσεις). Ο κάθε παλμός ακολουθείται τυπικά από ένα τμήμα μη μηδενικής τάσης ως αποτέλεσμα της ηλεκτρονικής επεξεργασίας και δίχως το “pole-zero cancellation” υπάρχει ο κίνδυνος όταν έρθει ένας 2^{ος} κοντινός παλμός να υπερτεθεί με τη συνέχεια του πρώτου αποκτώντας μικρότερο ή μεγαλύτερο ύψος από αυτό που θα έπρεπε να έχει, επιδρώντας έτσι αρνητικά στη συνολική ενεργειακή διακριτική ικανότητα του μετρητικού συστήματος (energy resolution).

Στη συνδεσμολογία των ανιχνευτών πυριτίου στη δική μας διάταξη έχουμε μια μονάδα που περιέχει 8 ζεύγη προ-ενισχυτή και ενισχυτή. Από τους 6 ανιχνευτές πυριτίου ξεκινούν καλώδια που φτάνουν στη μονάδα και από αυτήν στις γραμμές μεταφοράς του επιταχυντή με τη συνδεσμολογία που φαίνεται στις Εικόνες 2.10 & 2.11:





Εικόνες 2.10 & 2.11: Διάταξη ενισχυτή και προ-ενισχυτή

Στη σύνδεση με τις γραμμές μεταφοράς δόθηκε προσοχή στην εμπέδηση των καλωδίων για να αποφευχθούν ανακλάσεις. Το σήμα φτάνει τελικά σε μία μονάδα αναλογικοψηφιακού μετατροπέα ADC (Analog to Digital Converter) και έναν πολυκαναλικό αναλυτή (MultiChannel Analyzer) ώστε να καταχωρηθεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ένα ιστόγραμμα που θα μετράει τα γεγονότα που καταγράφηκαν σε κάθε κανάλι του ADC, το οποίο είναι το πειραματικό φάσμα.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Δεδομένων

3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση

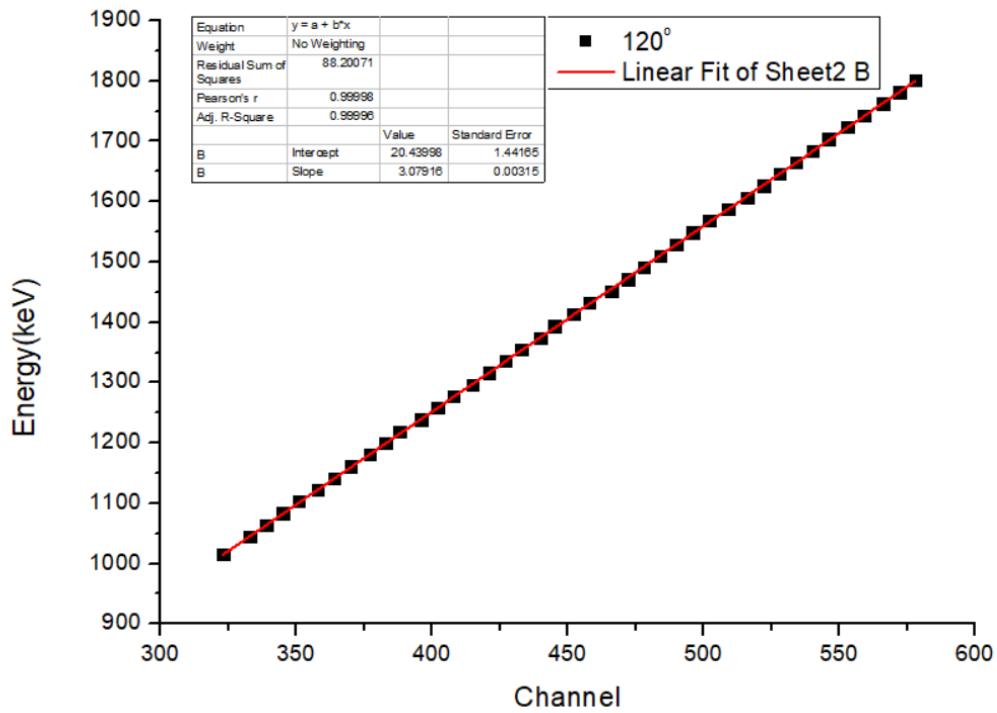
Το πρώτο βήμα πριν ξεκινήσει η ανάλυση των φασμάτων από το πείραμα είναι η ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή αφού είναι γνωστό ότι υπάρχει μια απόκλιση της πραγματικής ενέργειας της δέσμης από την ονομαστική που δίνει ο χειριστής. Αν δεν γνωρίζουμε ακριβώς την ενέργεια της δέσμης, τότε η ενεργός διατομή που θα εξάγουμε δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Στην παρούσα εργασία η βαθμονόμηση αυτή βασίστηκε σε δεδομένα προηγούμενων πειραμάτων βάσει των οποίων θεωρήσαμε ότι η πραγματική ενέργεια της δέσμης E είναι κατά 3 keV μειωμένη από την ονομαστική ενέργεια που δίνει ο χειριστής.

$$E = E_{\text{ονομαστική}} - 3 \text{ keV}$$

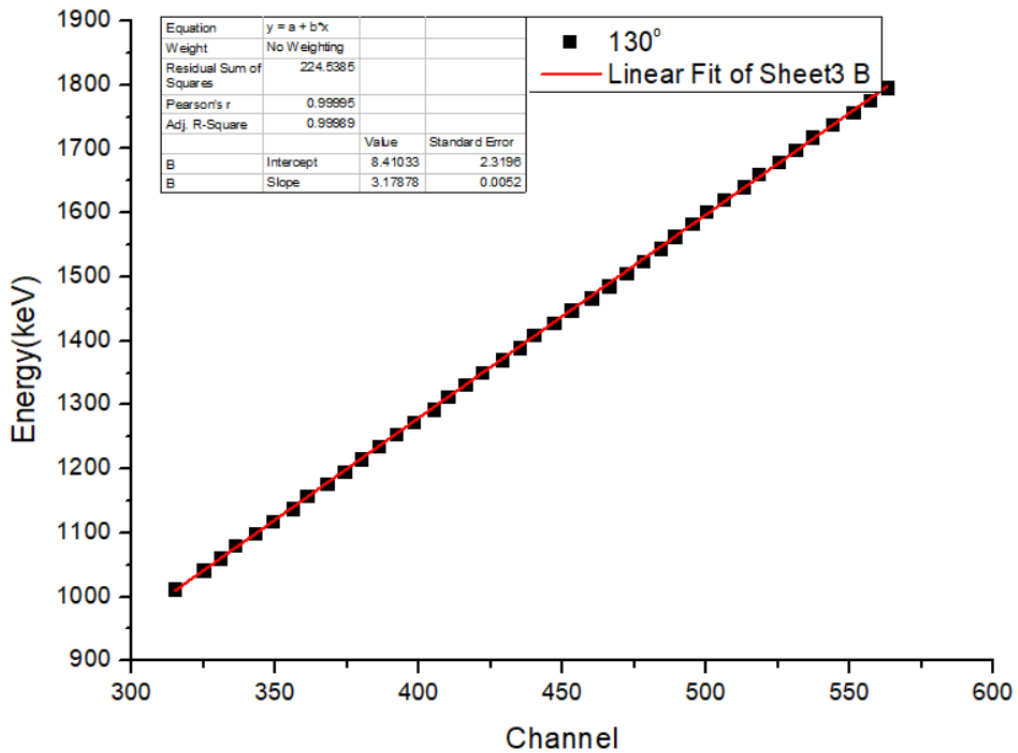
Ταυτόχρονα είναι γνωστό ότι τα ιόντα της δέσμης δεν είναι πραγματικά μονοενεργειακά. Η ενεργειακή αβεβαιότητα (ripple) ήταν επίσης μια παράμετρος που θεωρήθηκε γνωστή από παρελθοντικά πειράματα και θεωρήθηκε ίση με 3 keV

$$\text{Ripple} \sim 3 \text{ keV}$$

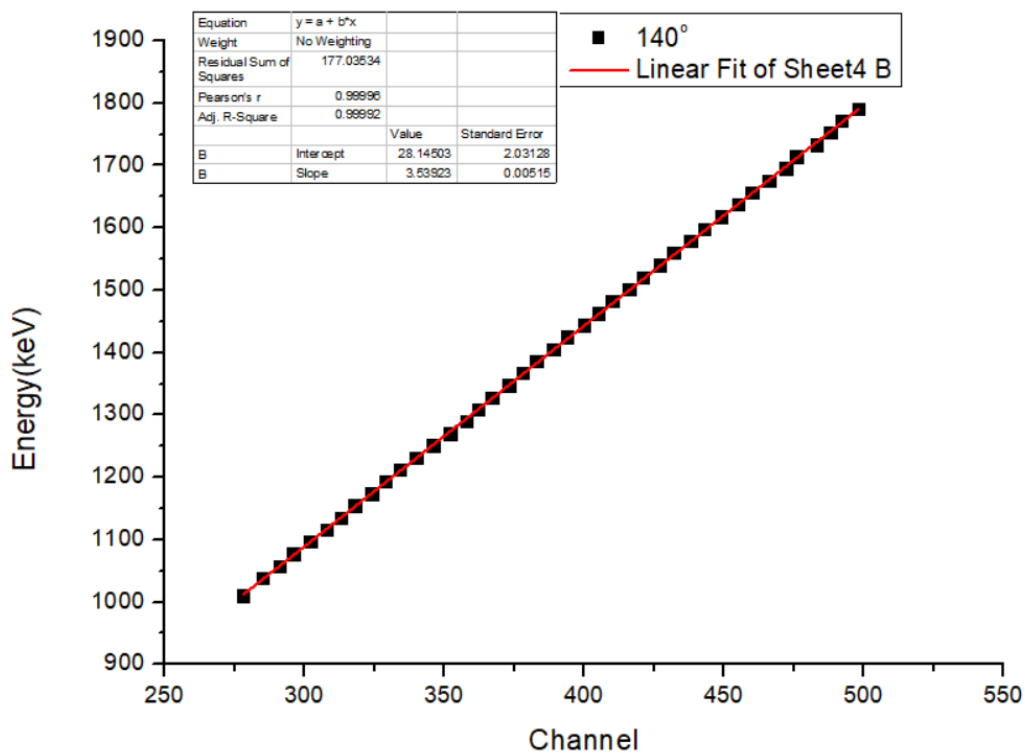
Το επόμενο βήμα είναι η ενεργειακή βαθμονόμηση των μονάδων ADC. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 41 φάσματα σε κάθε γωνία (περίπου ανά 20 keV). Σε κάθε ένα από αυτά εντοπίστηκε το κανάλι στο οποίο αντιστοιχεί η κορυφή του χρυσού και προσδιορίστηκε κινηματικά η ενέργεια που πρέπει να εμφανιστεί αυτή η κορυφή. Για τον υπολογισμό θεωρήθηκε ότι η δέσμη είχε την πραγματική της ενέργεια E και έγινε χρήση των γνωστών σχέσεων από την κινηματική. Στα ζεύγη ενέργεια-κανάλι ήταν εμφανής η γραμμικότητα για όλο το εύρος καναλιών, κάτι που υποδείκνυε ότι δεν υπήρξε κάποια ανωμαλία (gain shift) στην ενίσχυση σήματος που πρόσφεραν οι ηλεκτρονικές μονάδες από μέρα σε μέρα. Στα σημεία αυτά έγινε προσαρμογή (fit) με το πρόγραμμα Origin 8.5 με μία ευθεία της μορφής $y=ax+b$. Αυτό επέτρεψε τον προσδιορισμό της κλίσης της ευθείας που είναι το keV/ch για τα φάσματα από την κάθε μονάδα ADC, αλλά και την ενεργειακή τους απόκλιση (offset) σε keV. Ο μεγάλος αριθμός φασμάτων που χρησιμοποιήθηκε στη βαθμονόμηση αυτή αποσκοπούσε στην ελαχιστοποίηση του στατιστικού σφάλματος του keV/ch, διότι αποτελεί μια πολύ σημαντική (για λόγους που θα εξηγηθούν αναλυτικά στην παράγραφο 3.4) παράμετρο της πειραματικής μας διάταξης. Τα αποτελέσματα για την κάθε μονάδα ADC (δηλαδή για τα φάσματα που αφορούν κάθε γωνία) φαίνονται παρακάτω στις Εικόνες 3.1 ως 3.6, όπου τα πειραματικά σημεία αποδίδονται με μαύρο χρώμα και το fit με την πολύ καλά προσαρμοσμένη σε αυτά κόκκινη γραμμή:



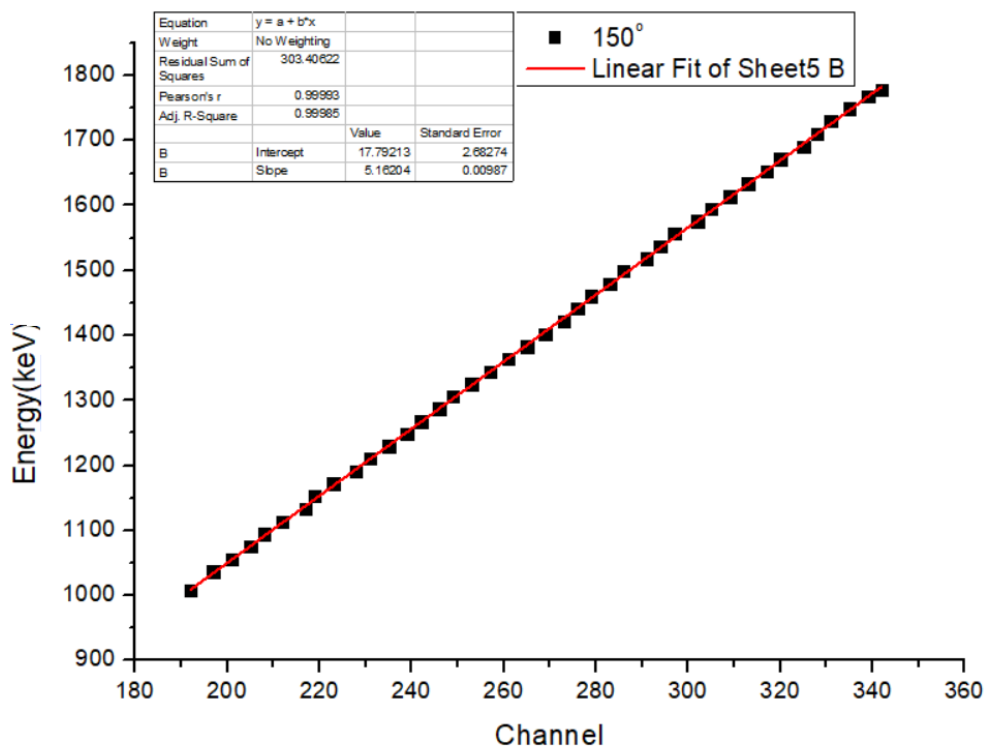
Εικόνα 3.1: Βαθμονόμηση μονάδας ADC για ανιχνευτή 120 μοιρών



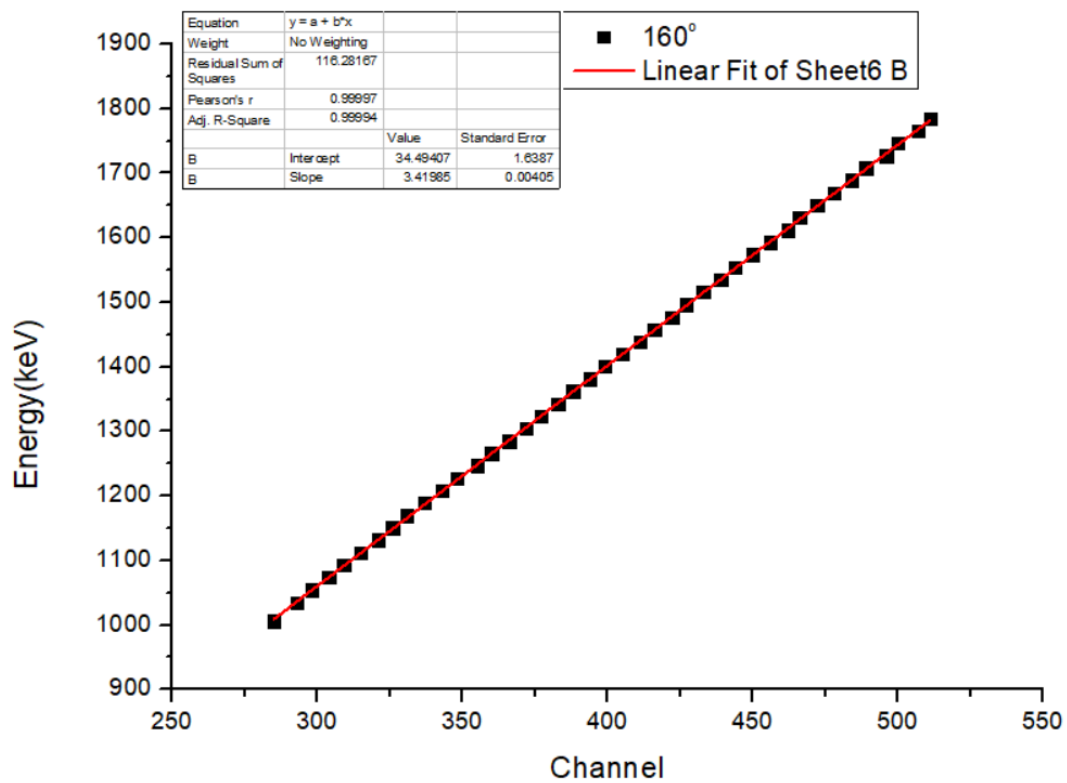
Εικόνα 3.2: Βαθμονόμηση μονάδας ADC για ανιχνευτή 130 μοιρών



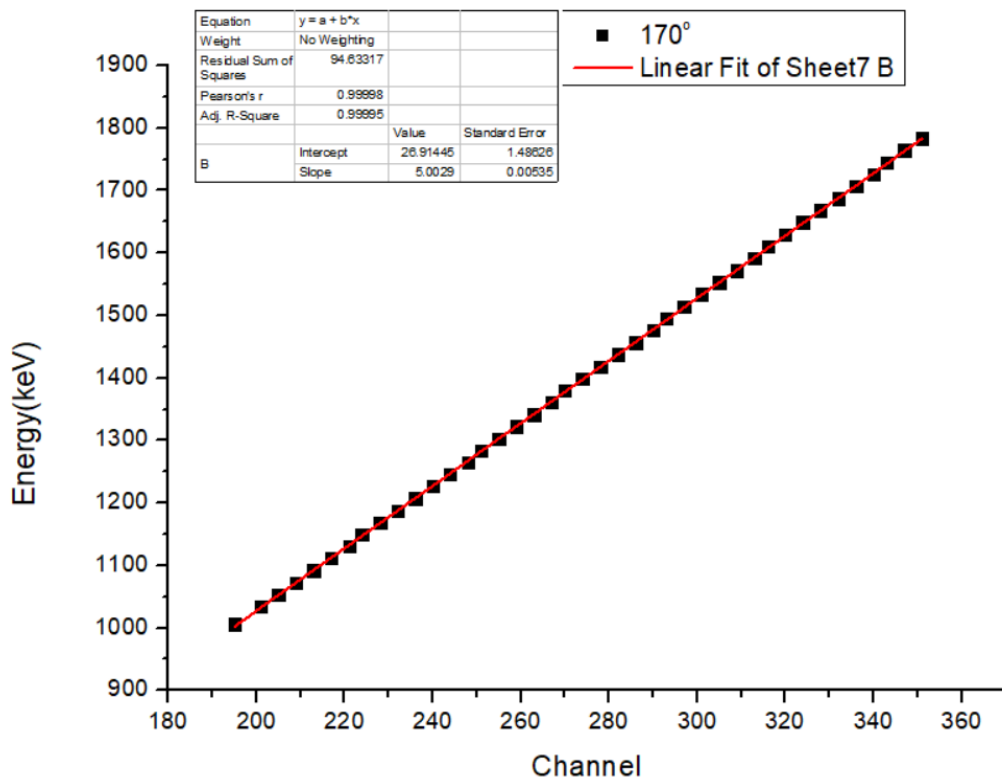
Εικόνα 3.3: Βαθμονόμηση μονάδας ADC για ανιχνευτή 140 μοιρών



Εικόνα 3.4: Βαθμονόμηση μονάδας ADC για ανιχνευτή 150 μοιρών



Εικόνα 3.5: Βαθμονόμηση μονάδας ADC για ανιχνευτή 160 μοιρών



Εικόνα 3.6: Βαθμονόμηση μονάδας ADC για ανιχνευτή 170 μοιρών

Η βαθμονόμηση που παρουσιάζεται παραπάνω είναι εξαιρετικά ακριβής αν δούμε την παράμετρο R^2 στην προσαρμογή, αλλά μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη μόνο για το εύρος καναλιών που αξιοποιήθηκαν. Η θεώρηση ότι η γραμμικότητα θα συνεχίσει να ισχύει με τον ίδιο τρόπο και για υψηλότερα κανάλια είναι λανθασμένη, κάτι που διαπιστώθηκε στην απόκλιση της κορυφής $^{12}\text{C}(d, p_0)^{13}\text{C}$ από την αναμενόμενη θέση στις υψηλότερες ενέργειες.

3.2 Απόλυτη μέτρηση και σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών

Η διαφορική ενεργός διατομή $\frac{d\sigma}{d\Omega_{E,\theta}}$ μπορεί να προσδιοριστεί από τα πειραματικά μας δεδομένα με τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{E,\theta}} = \frac{Y}{\epsilon Q \Omega N_t} \quad (3.1)$$

Y: Συνολικός αριθμός γεγονότων της κορυφής ενδιαφέροντος

Q: Συνολικός αριθμός σωματιδίων της δέσμης, που φτάνουν στο στόχο.

Ω : Στερεά γωνία που καλύπτει ο εκάστοτε ανιχνευτής.

N_t : Επιφανειακή πυκνότητα του ισότοπου σε $\frac{at}{cm^2}$

ϵ : Απόδοση του ανιχνευτή (στους ανιχνευτές πυριτίου θεωρείται 1 για βαρέα φορτισμένα σωματίδια)

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$: η πειραματικά προσδιοριζόμενη διαφορική ενεργός διατομή

Σε έναν λεπτό στόχο, η ολοκλήρωση των κορυφών, που θα συζητηθεί σε επόμενη ενότητα, θα δώσει το συνολικό αριθμό γεγονότων (yield) που αντιστοιχούν στην ελαστική σκέδαση.

Ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων που φτάνουν στο στόχο συνήθως προσδιορίζεται με την τοποθέτηση ενός μεταλλικού faraday cup πίσω από το στόχο, όπου θα συλλέγεται όλο το φορτίο που θα περάσει από το στόχο και θα καταμετρείται. Προφανώς ένα μικρό ποσοστό από τα σωματίδια της δέσμης θα σκεδαστεί προς τους ανιχνευτές και προς διάφορες κατευθύνσεις και δε θα φτάσει ποτέ το faraday cup, αλλά είναι αμελητέο όσον αφορά τη μέτρηση του φορτίου. Η στερεά γωνία μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση απόλυτα βαθμονομημένης πηγής ακτινοβολίας- α . Δυστυχώς δεν είναι εύκολο να γίνει με μικρό σφάλμα ο προσδιορισμός αυτών των παραγόντων, γι' αυτό θα γίνει χρήση μιας διαφορετικής μεθόδου που θα μας επιτρέψει να παρακάμψουμε τα σφάλματα του $Q\Omega$ χρησιμοποιώντας μια γνωστή ενεργό διατομή.

Πιο συγκεκριμένα, θα αξιοποιηθεί το στρώμα χρυσού που εξαχνώθηκε πάνω στο στόχο του βορίου. Λόγω των κινητικών ενεργειών των δευτερίων που φτάνουν

στο χρυσό μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτά θα σκεδαστούν καθαρά ηλεκτροστατικά, κάτι που σημαίνει ότι η διαφορική ενεργός διατομή είναι αναλυτικά υπολογίσιμη.

Για μία δεδομένη ενέργεια και γωνία θεωρούμε για την ελαστική σκέδαση των δευτερίων από το χρυσό μια ακριβώς ίδια σχέση με την (3.1) (θέτοντας την απόδοση του ανιχνευτή $\epsilon=1$):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E',\theta}^{11B(d,d_0)} = \frac{Y_{11B}(d,d_0)}{Q\Omega N_{11B}} \quad (3.2)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{197Au(d,d_0)} = \frac{Y_{197Au}(d,d_0)}{Q\Omega N_{Au}} \quad (3.3)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις 2 παραπάνω σχέσεις παίρνουμε μια νέα σχέση εργασίας:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E',\theta}^{11B(d,d_0)} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{197Au(d,d_0)} \left(\frac{Y_{11B}(d,d_0)}{Y_{197Au}(d,d_0)}\right) \left(\frac{N_{Au}}{N_{11B}}\right) \quad (3.4)$$

Εδώ έχει θεωρηθεί ότι σε όλα τα στρώματα φτάνει πρακτικά το ίδιο φορτίο και ο ανιχνευτής καλύπτει συγκεκριμένη στερεά γωνία. Η ενεργός διατομή του χρυσού υπολογίστηκε βάσει της πραγματικής ενέργειας της δέσμης E, όχι της ονομαστικής (nominal) που δόθηκε από το χειριστή.

Αντίθετα, η υπολογιζόμενη διαφορική ενεργός διατομή (όπως φαίνεται και στον τύπο 3.4) δεν θα αποδοθεί στην πραγματική ενέργεια της δέσμης E. Ο στόχος δεν είναι σημειακός και καθώς τον διαπερνά η δέσμη έχει ενεργειακές απώλειες, αυτό συνεπάγεται ότι τα γεγονότα που καταγράφηκαν έρχονται από αλληλεπιδράσεις του στόχου με ιόντα διαφορετικών ενεργειών.

Από σύμβαση η ενέργεια E' που επιλέγουμε να αποδώσουμε την υπολογιζόμενη διαφορική ενεργό διατομή είναι η πραγματική ενέργεια της δέσμης εάν αφαιρέσουμε τη μικρή ενεργειακή απώλεια από το υπέρλεπτο στρώμα του χρυσού και την ενεργειακή απώλεια από το μισό του πάχους του στρώματος το οποίο περιέχει το βόριο:

$$E' = E_{\text{ονομαστική}} - 3keV - E_{Au}^{loss} - E_{mid B}^{loss} \quad (3.5)$$

Συνεπώς για τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το βόριο χρειαζόμαστε τους 3 όρους της σχέσης (3.4) και την ενεργειακή απώλεια ως το μέσο του πάχους του στόχου.

3.3 Ενεργός διατομή $^{197}_{79}\text{Au}(d, d_0)$

Αρχικά ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής του Au πραγματοποιήθηκε με τον παρακάτω τύπο:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{^{197}\text{Au}(d,d_0)} = F_{L'Ecuyer} * \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{Au\text{ Rutherford}} \quad (3.6)$$

Η ενεργός διατομή του χρυσού θα αναμενόταν να ακολουθεί το γνωστό τύπο της διαφορικής ενεργού διατομής Rutherford για το σύστημα του εργαστηρίου:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right)^2 \frac{4}{(\sin\theta)^4} \frac{\{[1 - ((M_1/M_2)\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}} + \cos\theta\}^2}{[1 - ((M_1/M_2)\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.7)$$

Για να αξιοποιηθεί άμεσα σε αριθμητικούς υπολογισμούς ο παραπάνω τύπος χρειάζεται σωστή αντικατάσταση του e^2 [6] δίνοντας:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 5.18256 * \left(\frac{Z_1 * Z_2}{E}\right)^2 * \frac{\{[1 - ((M_1/M_2)\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}} + \cos\theta\}^2}{(\sin\theta)^4 [1 - ((M_1/M_2)\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{mb}{sr}\right] \quad (3.8)$$

όπου ως “E” θεωρούμε την αριθμητική τιμή της κινητικής ενέργειας σε MeV.

Ωστόσο πειραματικές μετρήσεις προηγούμενων ετών έχουν δείξει την ύπαρξη μίας απόκλισης από τον παραπάνω τύπο. Ο χρυσός είναι βαρύς πυρήνας με ατομικό αριθμό $Z=79$ και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια της στοιβάδας K να βρίσκονται πιο “κοντά” του (μικρότερη ακτίνα στο εκθετικό της κυματοσυνάρτησης του τροχιακού $1S$). Αυτή η παρουσία των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα “εφέ” θωράκισης που σημαίνει ότι το ερχόμενο δευτέριο δεν αλληλεπιδρά με το πραγματικό φορτίο του πυρήνα αλλά με ένα ασθενέστερο πεδίο που είναι η επαλληλία του πυρηνικού φορτίου και των κοντινών e.

Στη σχέση 3.9 φαίνεται ο διορθωτικός παράγοντας που δίνει ικανοποιητικές διορθώσεις για οπισθοσκεδάσεις στο ενεργειακό εύρος της παρούσας εργασίας. Ονομάζεται παράγοντας L’Ecuyer [7] και ορίζεται ως:

$$F_{L'Ecuyer} = 1 - \frac{0.04873 Z_1 Z_2^{4/3}}{E_{CM}} \quad (3.9)$$

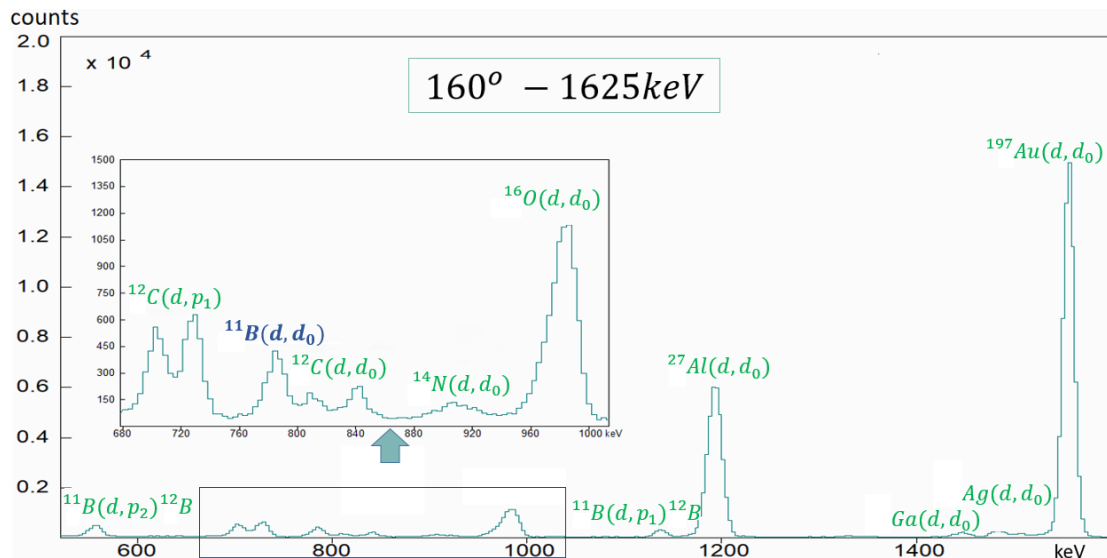
$$\text{όπου: } E_{CM} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} E_{d,lab}$$

Η διόρθωση που επιφέρει είναι αρκετά μικρή αφού ο υπολογισμός του παράγοντα σε όλες τις ενέργειες και γωνίες που έγινε με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου αξιοποιώντας τις σχέσεις 3.8 & 3.9 δίνει πάντα διορθώσεις μικρότερες του 2%.

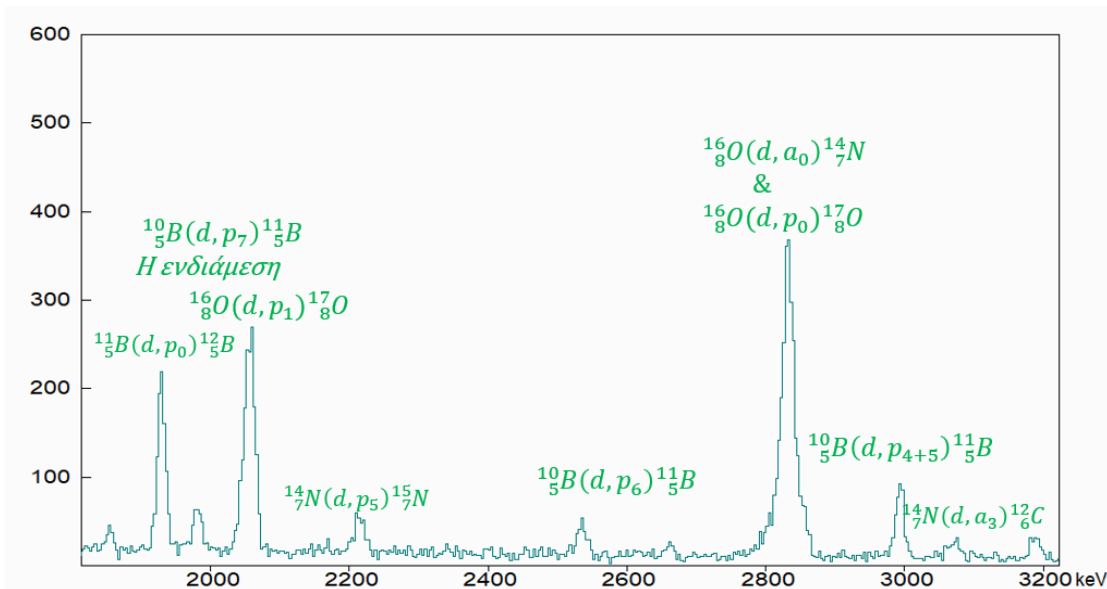
3.4 Προσδιορισμός λόγου $Y_{^{11}B(d,d_0)}/Y_{Au}$

Από τις πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώθηκαν περισσότερα από 500 φάσματα, στα οποία πρέπει να γίνει η εμβαδομέτρηση των κορυφών της ελαστικής σκέδασης των δευτερίων από το χρυσό και το ^{11}B . Για αυτό το σκοπό αξιοποιήθηκε το λογισμικό SPECTRW [8], το οποίο επιτρέπει και την αφαίρεση του υποβάθρου που υπάρχει.

Το πρώτο όμως βήμα είναι να γίνει χρήση των keV/ch που προσδιορίστηκαν από την ενεργειακή βαθμονόμηση της κάθε μονάδας ADC για την αναγνώριση των κορυφών που εμφανίζονται στα αρκετά πλούσια σε πληροφορία φάσματα των πειραματικών μετρήσεων. Όπως και στο τμήμα του φάσματος της Εικόνας 3.7, έτσι και σε όλα τα άλλα πειραματικά φάσματα είναι ορατές οι κορυφές που αντιστοιχούν την ελαστική σκέδαση των δευτερίων από τα βασικά στοιχεία του στόχου (Au, Al, B). Διακρίνονται επιπλέον και άλλες ελαστικές κορυφές που ταυτοποιήθηκαν με τα στοιχεία N, O, C, καθώς αυτά είναι συχνή πρόσμειξη στους στόχους που δημιουργούνται με θερμική εξάχνωση, με έμφαση στον άνθρακα που φαίνεται να παρουσιάζει 2 κορυφές. Η παραπάνω διαπίστωση έγινε μετά από εντατική μελέτη φασμάτων σε πολλές διαφορετικές ενέργειες και γωνίες. Επιπλέον παρατηρείται ότι και στην αντίδραση $^{12}C(d,p_1)^{13}C$ παρουσιάζονται 2 κοντινές κορυφές επιβεβαιώνοντας τον ισχυρισμό παρουσίας άνθρακα και στα 2 στρώματα από θερμική εξάχνωση, πιο συγκεκριμένα, στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του στόχου. Στα αριστερά της κορυφής της ελαστικής σκέδασης του χρυσού εμφανίζονται μικρές κορυφές οι οποίες αποδόθηκαν στην ελαστική σκέδαση των δευτερίων από μεσοβαρή στοιχεία όπως Ga, Mo, και Ag. Αυτά συχνά υπάρχουν μέσα στα φύλλα χρυσού ως κατάλοιπα από την επεξεργασία του και εξαχνώνονται μαζί με αυτόν στα στρώματα του στόχου. Στο ίδιο τμήμα του φάσματος φαίνονται και οι κορυφές των αντιδράσεων $^{11}B(d,p_{1,2})^{12}B$. Δεξιότερα από το τμήμα του φάσματος με τα ελαστικά κανάλια (Εικόνα 3.8) φαίνονται περαιτέρω αντιδράσεις του βορίου όπως η $^{11}B(d,p_0)^{12}B$ και οι $^{10}B(d,p_{4,5,6})^{11}B$ από το λιγότερο άφθονο ισότοπο. Τα παρασιτικά στοιχεία εμφανίζουν και σε αυτήν την περιοχή κορυφές ορισμένων από τις πιο καλά προσδιορισμένες και γνωστές αντιδράσεις όπως οι $^{16}O(d,p_{0,1})^{17}O$, $^{14}N(d,p_1)^{15}N$, $^{12}C(d,p_0)^{13}C$.



Εικόνα 3.7: Τμήμα (Α) φάσματος δευτερίων για ενέργεια 1625 keV και γωνία 160°

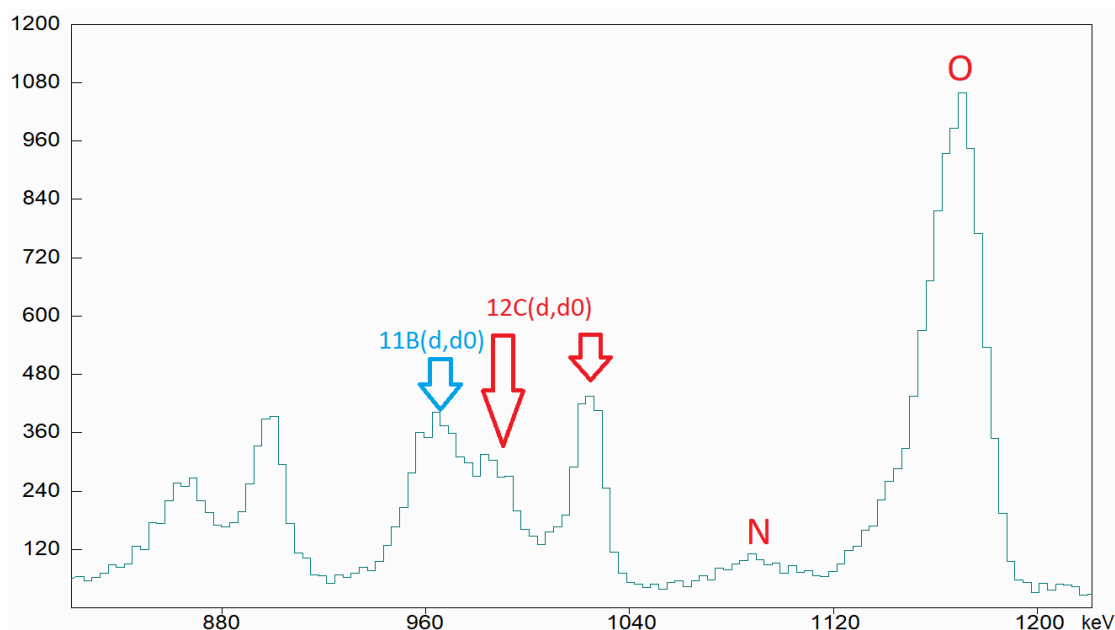


Εικόνα 3.8: Τμήμα (Β) φάσματος δευτερίων για ενέργεια 1625 keV και γωνία 160°

Όσον αφορά στην κορυφή της $^{197}_{79}\text{Au}(d, d_0)$ ήταν απλή η ολοκλήρωσή της λόγω της πολύ υψηλής στατιστικής που παρουσίαζε (αναμενόμενο καθώς η ενεργός διατομή Rutherford είναι ανάλογη του τετραγώνου του ατομικού αριθμού) και την απουσία παρασιτικών επικαλύψεων από άλλες κορυφές, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7.

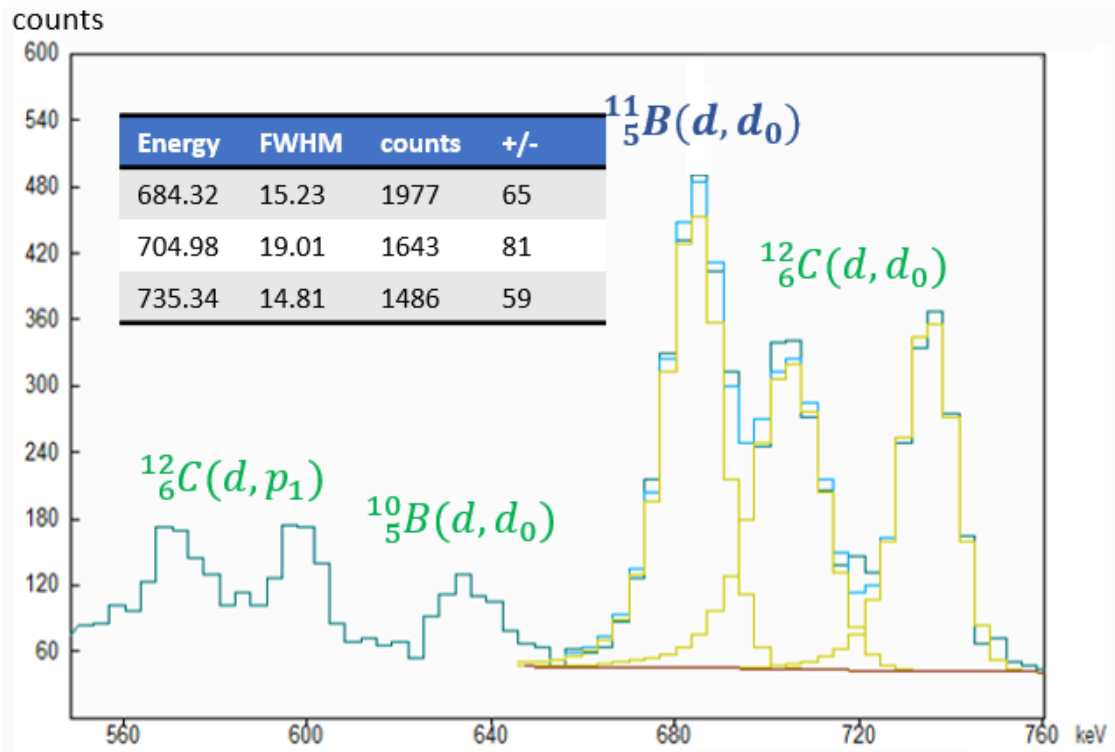
Δυστυχώς δεν ισχύει το ίδιο για την κορυφή $^{11}_5\text{B}(d, d_0)$, στην οποία παρουσιάστηκε επικάλυψη με την κορυφή της ελαστικής σκέδασης του άνθρακα που βρισκόταν στο πίσω μέρος του στόχου. Ο βαθμός της επικάλυψης εξαρτάται από την ενέργεια της δέσμης και τη γωνία σκέδασης. Συγκεκριμένα, αύξηση της ενέργειας της δέσμης οδηγεί σε καλύτερη διάκριση των κορυφών της ελαστικής σκέδασης με αποτέλεσμα η επικάλυψη των κορυφών για χαμηλότερες τιμές ενέργειας της δέσμης να είναι τόσο έντονη που δεν ήταν δυνατή η ανάλυση των κορυφών. Το φαινόμενο αυτό ήταν περισσότερο έντονο για ενέργειες δέσμης στην αρχική ενεργειακή περιοχή

1050 keV ως 1300 keV, η οποία και εξαιρέθηκε από τα τελικά αποτελέσματα για όλες τις γωνίες. Ταυτόχρονα η εξάρτηση από την γωνία σκέδασης έχει ως αποτέλεσμα εντονότερη αλληλοεπικάλυψη των δύο αυτών κορυφών σε μικρότερες γωνίες σκέδασης. Συγκεκριμένα στις 120° , 130° και 140° ήταν αδύνατη η ανάλυση των κορυφών για όλες τις ενέργειες που καταγράφηκαν, όποτε χρειάστηκε να εξαιρεθούν όλες αυτές οι μετρήσεις από τα τελικά αποτελέσματα. Στην Εικόνα 3.9 φαίνεται το φάσμα για γωνία σκέδασης 130° και για μία από τις πιο υψηλές ενέργειες που λήφθηκε φάσμα (ενέργεια δέσμης 1800 keV), όπου είναι πολύ εμφανής η δυσκολία που περιεγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 3.9: Τμήμα φάσματος για γωνία 130° και ενέργεια δέσμης 1800 keV

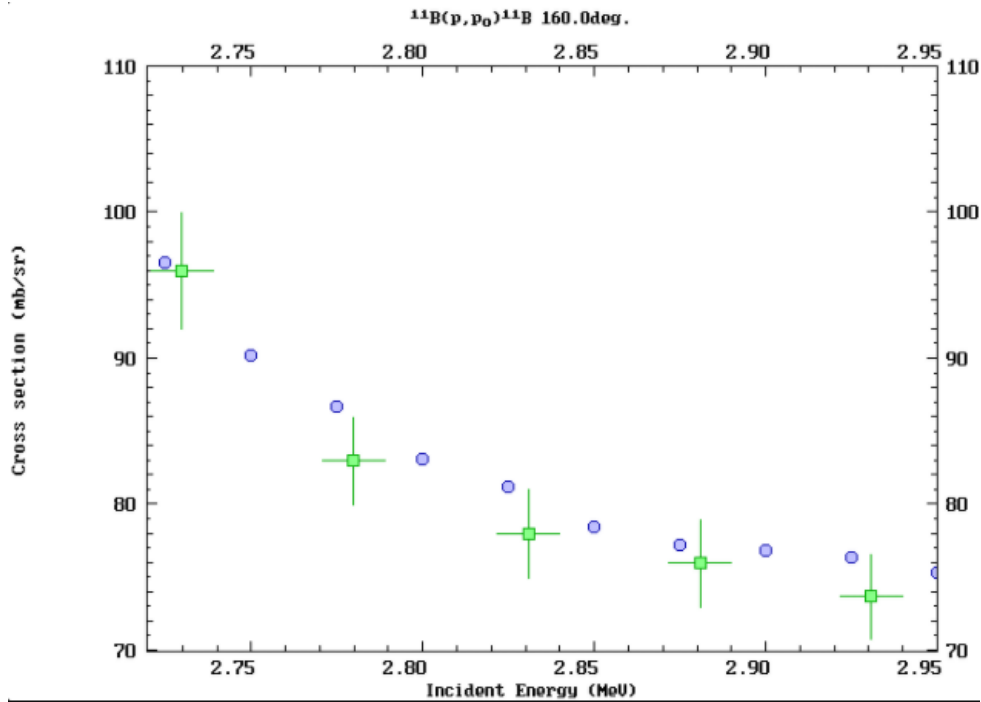
Στις γωνίες 150° , 160° και 170° η αλληλοεπικάλυψη των κορυφών της ελαστικής σκέδασης του βορίου με τον άνθρακα ήταν διαχειρίσιμη, όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 3.10. Το πρώτο βήμα είναι να οριοθετηθεί το υπόβαθρο σε κάθε φάσμα, ώστε να γίνει η αυτόματη αφαίρεσή του από το πρόγραμμα. Στην εικόνα 3.10 είναι η καφέ γραμμή που φαίνεται κάτω από τις κορυφές ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, αξιοποιήθηκε η επιλογή προσαρμογής (fit) που φαίνεται ως η μπλε γραμμή στην ίδια εικόνα, δίνοντας πολύ καλή συμφωνία με το φάσμα (πράσινη γραμμή). Φυσικά πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή fit πάντα θα παρουσιάσει αυξημένο σφάλμα σε σχέση με την απλή ολοκλήρωση, το οποίο θα μεταφερθεί μέσω της διάδοσης των στατιστικών σφαλμάτων και στα τελικά μας δεδομένα. Είναι όμως εμφανές από τα ίδια τα φάσματα ότι η προσαρμογή ήταν κάτι αναπόφευκτο στην παρούσα εργασία. Στον πίνακα εντός της Εικόνας 3.10 φαίνονται τα γεγονότα (με το σφάλμα τους) που αποδίδει σε κάθε επιμέρους κορυφή το πρόγραμμα, ενώ οι κίτρινες γραμμές βοηθούν στην οπτικοποίηση αυτών από το χρήστη. Επιπλέον μπορούμε να διακρίνουμε και το FWHM της κάθε κορυφής που διαφέρει για την κάθε κορυφή, όπως είναι αναμενόμενο, αφού το τελευταίο εξαρτάται από την ποσότητα του ισότοπου που θα δώσει την κορυφή.



Εικόνα 3.10: Τμήμα φάσματος για γωνία 160° και ενέργεια δέσμης 1625 keV με χρήση προσαρμογής του προγράμματος SPECTRW

3.5 Προσδιορισμός λόγου $Nt_{Au}/Nt_{11B(d,d_0)}$

Για τον προσδιορισμό αυτής της παραμέτρου χρειάστηκε να ληφθούν επιπλέον φάσματα. Συγκεκριμένα έγινε βομβαρδισμός του στόχου με δέσμη πρωτονίων ονομαστικής ενέργειας **2750 keV και 2920 keV**, όπου η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης $^{11}B(p,p_0)$ ήταν αρκετά καλά προσδιορισμένη. Όπως έχει αναφερθεί δεν υπάρχει κάποια διαθέσιμη ενεργειακή περιοχή όπου η ελαστική σκέδαση του βορίου να ακολουθεί τον αναλυτικό τύπο Rutherford, ούτε υπάρχουν evaluated (αξιολογημένα) θεωρητικά δεδομένα για να βασιστούμε. Η συγκεκριμένη επιλογή ενεργειών έγινε εξαιτίας της ύπαρξης ενός ενεργειακού plateau, (ιδίως κοντά στα 2920 keV) που εξασφαλίζει ότι ένα μικρό σφάλμα στην ενέργεια δεν θα αλλοιώσει σημαντικά την τιμή που βρέθηκε. Επιπλέον, στις ενέργειες αυτές υπάρχουν 2 σετ πειραματικών δεδομένων σε αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ τους αυξάνοντας την εγκυρότητα του τελικού αποτελέσματος. Στην Εικόνα 3.11 φαίνεται η διαφορική ενεργός διατομή $^{11}B(p,p_0)$ για γωνία σκέδασης 160 μοιρών από την ηλεκτρονική βιβλιοθήκη δεδομένων IBANDL με τα 2 σετ δεδομένων να απεικονίζονται με μπλε και πράσινο χρώμα.

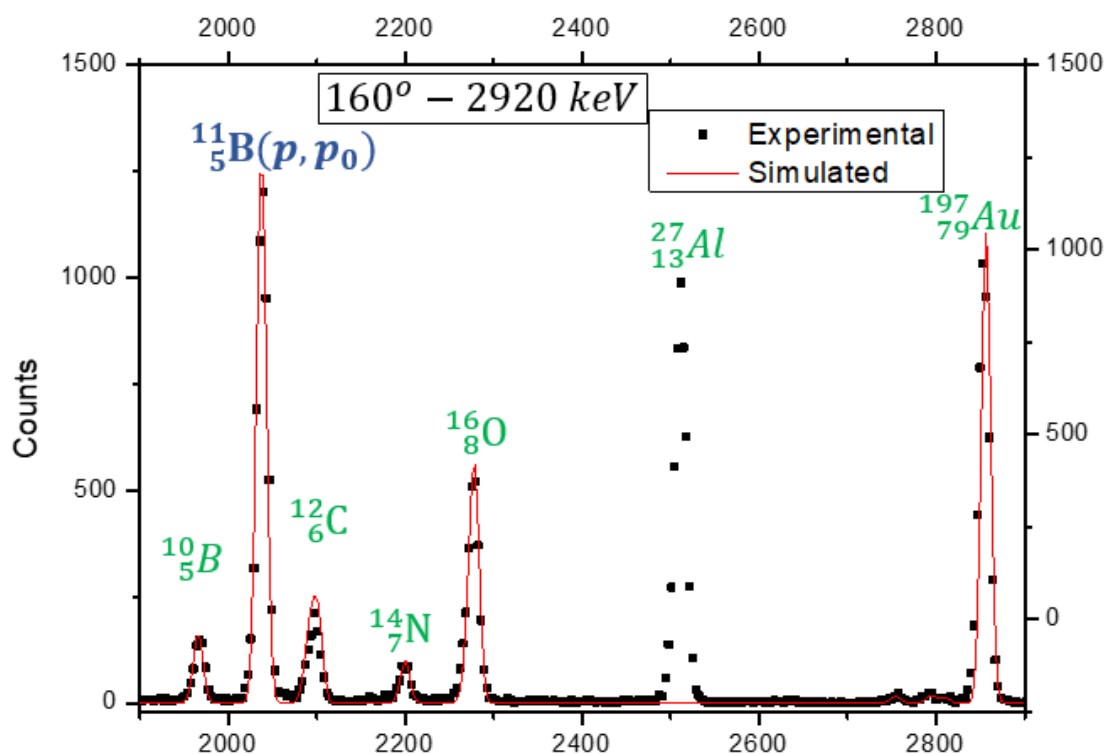


Εικόνα 3.11: Ενεργός διατομή $^{11}\text{B}(p, p_0)$ στην περιοχή 2.72-2.95 MeV για 160° (IBANDL)

Για την ανάλυση εργαστήκαμε στο υπολογιστικό πρόγραμμα SIMNRA [9] που μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα φάσμα προσομοίωσης, το οποίο θα συγκριθεί με τα πειραματικά φάσματα. Στο πρόγραμμα αυτό δημιουργήθηκε ένας εικονικός στόχος βάσει του πραγματικού με στρώματα από διαφορετικά στοιχεία. Στη συνέχεια δόθηκαν βασικές παράμετροι όπως η ενέργεια της δέσμης, τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και οι γωνίες σκέδασης. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα φάσματα από τους ανιχνευτές σε γωνίες σκέδασης 140° και 160° , καθώς οι 120° και 130° δεν έχουν τόσο καλή διακριτική ικανότητα στις κορυφές, ενώ οι 150° , 170° είχαν ρυθμιστεί με υψηλό keV/ch άρα και λιγότερα διαθέσιμα κανάλια για να προσαρμόσουμε κάθε κορυφή. Έτσι είχαμε στη διάθεσή μας 4 συνολικά φάσματα πρωτονίων (2 γωνίες και 2 ενέργειες).

Η προσομοίωση (κόκκινη συνεχής γραμμή) και τα πειραματικά δεδομένα (μαύρα σημεία) φαίνονται στην Εικόνα 3.12. Ξεκινήσαμε αξιοποιώντας το γεγονός ότι ο χρυσός έχει ενεργό διατομή που δίνεται από τον αναλυτικό τύπο που συζητήθηκε. Βάσει αυτού θεωρήθηκε ένας παράγοντας $Q\Omega$ που δίνει για την κορυφή $^{197}_{79}\text{Au}(p, p_0)$ ίδιο αριθμό γεγονότων μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικού φάσματος. Ο παράγοντας αυτός διατηρείται σταθερός για όλη την υπόλοιπη ανάλυση. Συνεχίσαμε μεταβάλλοντας την ποσόστωση και τη θέση των υπόλοιπων στοιχείων στο στόχο ως ότου να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα και για την κορυφή $^{11}_5\text{B}(p, p_0)$. Όσον αφορά στα υπόλοιπα στοιχεία έγινε μια προσπάθεια να φτάσουμε όσο πιο κοντά γίνεται στο πειραματικό φάσμα δίχως να τους δοθεί υπερβολική έμφαση καθώς δεν αφορούν άμεσα το τελικό μας αποτέλεσμα. Στην προσομοίωση δεν φαίνεται το αλουμίνιο καθώς δεν ήταν δυνατή η ανάγνωση των δεδομένων από

τη βιβλιογραφία, ενώ στην περίπτωση του άνθρακα παρουσιάζεται μία μόνο κορυφή.

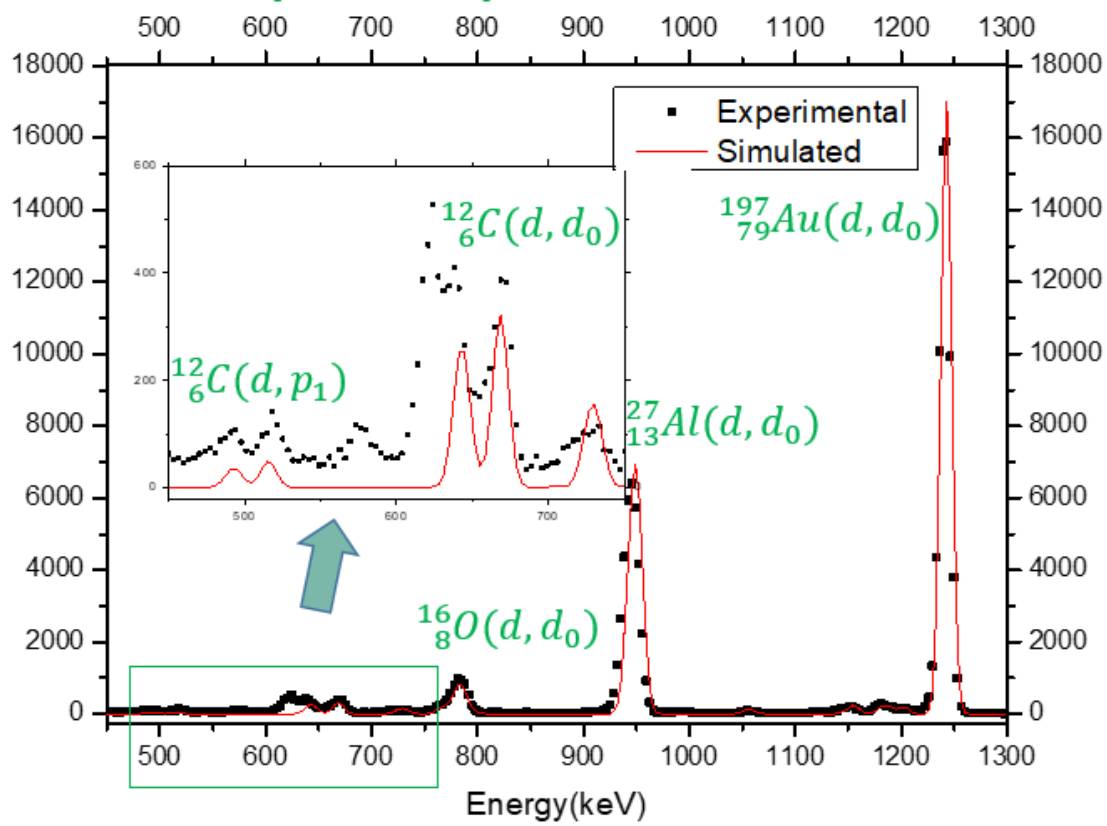


Εικόνα 3.12: Τμήμα από το πειραματικό φάσμα και το προσομοιωμένο μέσω του κώδικα SIMNRA

Τα πρωτόνια είναι γνωστό ότι έχουν μικρότερη ενεργειακή απώλεια μέσα στο στόχο σε σχέση με τα δευτέρια, αυτό αποτυπώνεται ως μείωση της απόστασης μεταξύ των ελαστικών κορυφών $^{12}\text{C}(p, p_0)$ από το μπροστινό και το πίσω μέρος του στόχου. Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου οι ενέργειες των πρωτονίων είναι πιο υψηλές μειώνοντας ακόμα περισσότερο την ενεργειακή τους απώλεια. Επιπλέον αυτή η διαφορά μάζας μεταφράζεται και σε διαφορετικό κινηματικό παράγοντα επηρεάζοντας περαιτέρω τον ενεργειακό διαχωρισμό των κορυφών. Το τελικό αποτέλεσμα είναι οι 2 κορυφές να βρίσκονται τόσο κοντά η μία με την άλλη που να έχουν αλληλεπικαλυφθεί πλήρως δημιουργώντας την “υπερκορυφή” που φαίνεται στην Εικόνα 3.12.

Για να μπορέσουμε όμως να κάνουμε ακόμα καλύτερο χαρακτηρισμό του στόχου έγινε χρήση και ενός βοηθητικού φάσματος από τα κύρια φάσματα με δέσμη δευτερίων. Επιλέχθηκε το φάσμα για γωνία σκέδασης 160 μοιρών και ονομαστικής ενέργειας δέσμης 1300 keV, καθώς υπήρχε ικανοποιητική στατιστική στις κορυφές του άνθρακα και το υπόβαθρο ήταν σημαντικά μειωμένο συγκριτικά με φάσματα από υψηλότερες ενέργειες δέσμης. Ο προσδιορισμός του αλουμινίου έγινε καθαρά βάσει αυτού του φάσματος, όπου θεωρήθηκε ότι η ελαστική σκέδαση $^{27}\text{Al}(d, d_0)$ δεν παρουσιάζει αποκλίσεις από την αναλυτική σχέση του Rutherford. Η υπόθεση αυτή μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη βάσει της χαμηλής ενέργειας των δευτερίων και τον ατομικό αριθμό του Al, ενώ υποστηρίζεται και από πρόσφατα πειραματικά

δεδομένα. Το φάσμα από αυτήν την ανάλυση με τον κώδικα SIMNRA φαίνεται στην Εικόνα 3.13 παρακάτω :



Εικόνα 3.13: Προσαρμογή μέσω του κώδικα SIMNRA σε φάσμα δευτερίων ονομαστικής ενέργειας 1300 keV για γωνία σκέδασης 160°

Όσον αφορά στις κορυφές του άνθρακα είναι εμφανής και στην προσομοίωση η ύπαρξή του στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του στόχου. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι το σημαντικό είναι να ταιριάζει ο αριθμός των γεγονότων του προσομοιωμένου φάσματος με το πειραματικό, καθώς η προσομοίωση δεν μπορεί να κάνει αναπαραγωγή φαινομένων όπως το υπόβαθρο στα πραγματικά φάσματα. Η έμφαση δόθηκε στις 2 κορυφές $^{12}\text{C}(d, p_1)$ ^{13}C για τις οποίες έχουμε καλά προσδιορισμένη διαφορική ενεργό διατομή από τη βιβλιογραφία, όπως και στην δεξιά από τις κορυφές $^{12}\text{C}(d, d_0)$ που δεν έχει αλληλοεπικάλυψη με το βόριο και είναι και evaluated (αξιολογημένη) θεωρητικά. Στην Εικόνα 3.13 δε φαίνεται το φάσμα της ελαστικής του βορίου καθώς ήταν η μετρούμενη οπότε δεν είχε νόημα να προσομοιώσουμε κάτι.

Ο λόγος $Nt_{\text{Au}}/Nt_{^{13}\text{B}(d, d_0)}$ προσδιορίστηκε αποκλειστικά από τα 4 φάσματα που λήφθηκαν με δέσμη πρωτονίων. Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από έναν καλά χαρακτηρισμένο στόχο κάναμε μικρές αλλαγές στην ποσότητα του βορίου στο κάθε επιμέρους φάσμα ώστε ο αριθμός γεγονότων στην προσομοίωση να ταιριάζει ακριβώς σε κάθε πειραματικό φάσμα και τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν στον πίνακα της Εικόνας 3.14. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε 2 φορές λόγω της ύπαρξης 2 σετ πειραματικών μετρήσεων, τα οποία αν και είχαν αρκετά μικρές

διαφορές δεν ήταν σε απόλυτη συμφωνία. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα έδωσε τη συνολική ποσότητα βορίου στον εικονικό στόχο, η οποία πολλαπλασιάστηκε με την γνωστή ισοτοπική περιεκτικότητα για να βρεθεί το $^{11}_5B$. Στη συνέχεια βρέθηκαν οι λόγοι και υπολογίστηκε η μέση τιμή αυτών με το σφάλμα της.

SIMNRA RESULTS				
	B ($10^{15} \frac{at}{cm^2}$)	Au ($10^{15} \frac{at}{cm^2}$)	^{11}B ($10^{15} \frac{at}{cm^2}$)	Ratio
2920keV-160deg-dataset1	695,542	35,09	557,1291	0,05045
2750keV-160deg-dataset1	720,842	35,075	577,3944	0,048658
2920keV-140deg-dataset1	753,29	35,075	603,3853	0,046562
2750keV-140deg-dataset1	734,1	35,075	588,0141	0,04778
2920keV-160deg-dataset2	676,652	35,09	541,9983	0,051858
2750keV-160deg-dataset2	683,334	35,075	547,3505	0,051329
2920keV-140deg-dataset2	719,99	35,075	576,712	0,048716
2750keV-140deg-dataset2	715,542	35,075	573,1491	0,049019

Εικόνα 3.14: Πίνακας λόγων των παχών χρυσού προς $^{11}_5B$

Το τελικό αποτέλεσμα του λόγου ήταν: 0.0493 ± 0.0018

3.6 Σφάλμα διαφορικής ενεργού διατομής

Σε αυτό το σημείο της ανάλυσης έχουμε όλα όσα χρειαζόμαστε για να προσδιορίσουμε τη ζητούμενη ενεργό διατομή με τη σχέση (3.4):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E',\theta}^{^{11}B(d,d_0)} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{^{197}Au(d,d_0)} \left(\frac{Y_{^{11}B}(d,d_0)}{Y_{Au}}\right) \left(\frac{N_{Au}}{N_{^{11}B}}\right)$$

Ο όρος με την διαφορική ενεργό διατομή του χρυσού θεωρούμε ότι δεν έχει σφάλμα καθώς προέρχεται καθαρά από θεωρία. Ο όρος για το λόγο των παχών έχει το σταθερό σφάλμα που φαίνεται λίγο παραπάνω, ενώ για τον όρο με το λόγο των γεγονότων το κάθε φάσμα έχει τα δικά του σφάλματα. Η εξαγωγή του συνολικού σφάλματος θα γίνει με τον τύπο (3.10):

$$\delta\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) * \sqrt{\left(\frac{\delta\left(\frac{Y_{^{11}B}(d,d_0)}{Y_{Au}}\right)}{\left(\frac{Y_{^{11}B}(d,d_0)}{Y_{Au}}\right)}\right)^2 + \left(\frac{\delta\left(\frac{N_{Au}}{N_{^{11}B}}\right)}{\left(\frac{N_{Au}}{N_{^{11}B}}\right)}\right)^2} \quad (3.10)$$

Προφανώς με $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$ αναφερόμαστε στην $^{11}B(d, d_0)$.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στρογγυλοποιημένα στο επόμενο κεφάλαιο.

3.7 Ενέργεια στο μέσο του πάχους του στόχου

Όπως αναφέρθηκε η διαφορική ενεργός διατομή θα αποδοθεί στην ενέργεια:

$$E' = E_{\text{ονομαστική}} - 3\text{keV} - E_{\text{Au}}^{\text{loss}} - E_{\text{mid B}}^{\text{loss}}$$

Ο υπολογισμός των δύο παραπάνω όρων που αφορούν την ενεργειακή απώλεια ως το μέσο του πάχους του στόχου έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος SIMNRA. Ο πολύ καλά χαρακτηρισμένος εικονικός στόχος (χάρη στο συνδυασμό φασμάτων με δέσμη πρωτονίων και δευτερίων) έδωσε ενεργειακή απώλεια της τάξης των 3-3.5 keV ως το μέσο του. Οι διαφορές σε αυτή την τιμή οφείλονται στην διαφορετική ενεργειακή απώλεια που έχουν τα ιόντα καθώς κινούνται μέσα στην ύλη με τα πιο υψηλοενεργειακά να χάνουν λιγότερη ενέργεια (όπως φαίνεται και στη σχέση 1.6)

3.8 Σφάλμα Ενέργειας

Έχοντας προσδιορίσει τις ενέργειες που θα αποδοθεί η ενεργός διατομή πρέπει να συζητηθεί και το σφάλμα τους. Σε αυτό το σημείο αξιοποιήθηκε για τρίτη φορά ο καλά χαρακτηρισμένος στόχος στο SIMNRA. Από την επιλογή “stopping” στο μενού του προγράμματος καταφέραμε να προσδιορίσουμε το straggling της δέσμης ως το μέσο του πάχους του στόχου που ήταν της τάξης των 2.5 keV (πρακτικά ανεξάρτητο της ενέργειας της δέσμης).

Το τελικό σφάλμα στην ενέργεια προσδιορίστηκε από την σχέση 3.11:

$$\delta E' = \sqrt{\text{straggling}^2 + \text{ripple}^2} \quad (3.11)$$

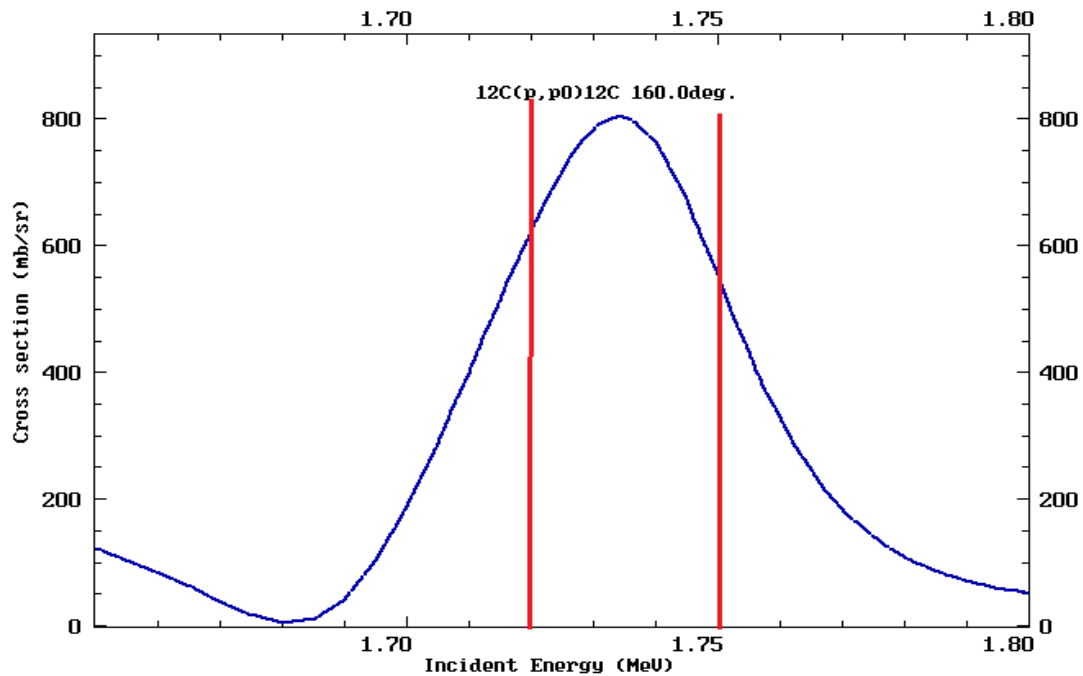
Τοποθετώντας τις παραμέτρους προκύπτει τελικό σφάλμα στην ενέργεια ίσο με 4 keV

3.9 Ποιοτική Επαλήθευση Βαθμονόμησης Επιταχυντή

Όπως έχει αναφερθεί η ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή είναι πολύ βασικό κομμάτι για τα αποτελέσματά μας, για αυτό το λόγο έγινε μια μικρή διερεύνηση με σκοπό να επαληθεύσει ότι η διάφορα μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής ενέργειας που θεωρήσαμε είναι λογική.

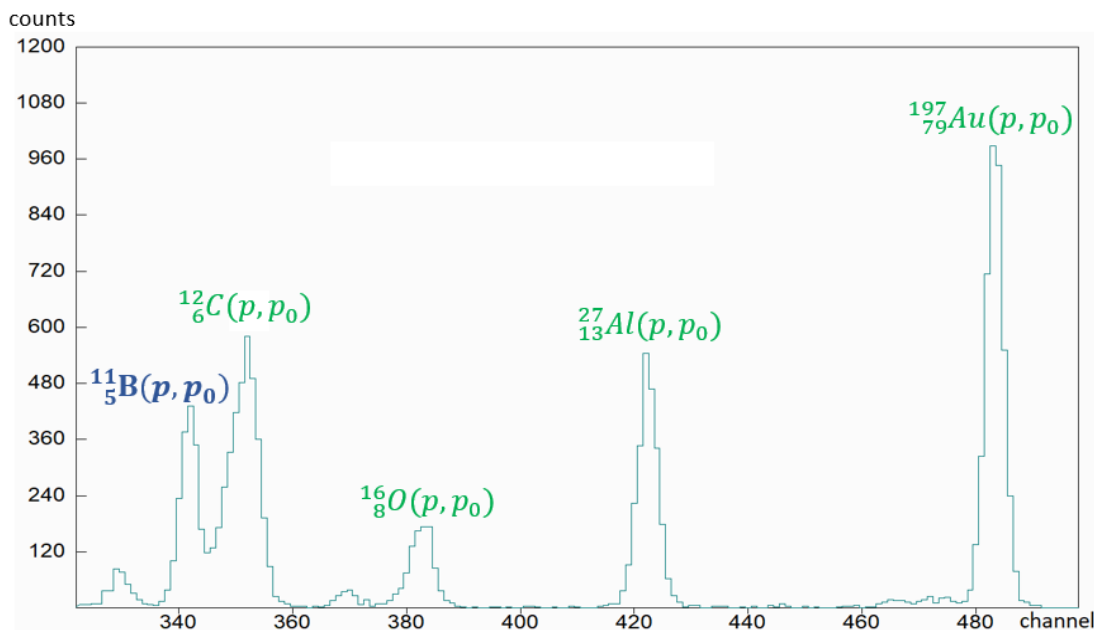
Για τον έλεγχο αυτό αξιοποιήθηκε η ελαστική σκέδαση του άνθρακα $^{12}_6\text{C}(p, p_0)$ εξαιτίας της ύπαρξης ενός χαρακτηριστικού ενισχυτικού συντονισμού. Ο συντονισμός αυτός έχει την κορυφή του για ενέργεια πρωτονίων 1734 keV, οπότε έγινε ακτινοβολήση του στόχου (την πρώτη μέρα του πειράματος) με πρωτόνια ενέργειας 1722-1750 keV με μεταβλητό βήμα (γύρω στα 2 keV). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο αρχικός σχεδιασμός ήταν να γίνει η ίδια η βαθμονόμηση με αυτές τις

μετρήσεις, όμως την μέρα που αυτές πραγματοποιήθηκαν δεν είχαμε ακόμα διαπιστώσει την ύπαρξη άνθρακα σε 2 σημεία του στόχου. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{12}\text{C}(p, p_0)$ φαίνεται με μπλε γραμμή στην Εικόνα 3.15, όπου με κόκκινες κάθετες γραμμές οριοθετείται το ενεργειακό εύρος που μετρήθηκε.



Εικόνα 3.15: Διαφορική ενεργός διατομή της $^{12}\text{C}(p, p_0)$ για 160° (IBANDL)

Τα φάσματα που αξιοποιήθηκαν για την ανάλυση ήταν αποκλειστικά από τον ανιχνευτή που βρισκόταν στις 160 μοίρες, καθώς είχε παρατηρηθεί ότι διαθέτει την καλύτερη διακριτική ικανότητα. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στην Εικόνα 3.16 το φάσμα για ονομαστική ενέργεια δέσμης 1730 keV



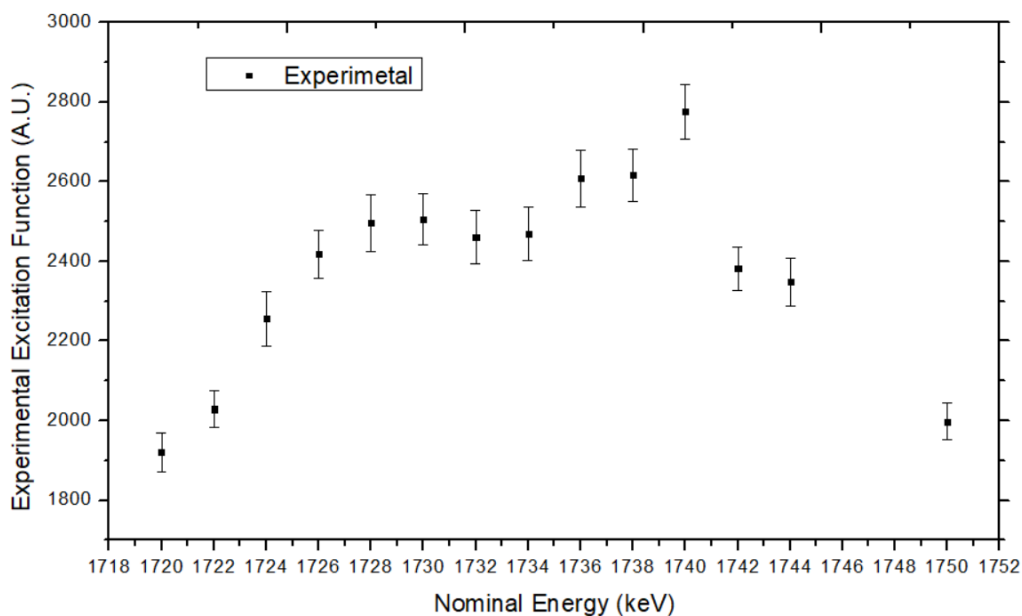
Εικόνα 3.16: Φάσμα 160 μοιρών για δέσμη πρωτονίων ενέργειας 1730 keV

Σε κάθε ένα από αυτά τα φάσματα έγινε αρχικά ολοκλήρωση των κορυφών ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από τον άνθρακα και το χρυσό και υπολογίστηκε ο λόγος Y_{12C}/Y_{Au} .

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η διαφορική ενεργός διατομή Rutherford για την κορυφή του χρυσού προκειμένου να μπορέσουμε να σχηματίσουμε μία πειραματική excitation function για τον άνθρακα με τη σχέση:

$$\text{Πειραματική excitation function} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{197Au(p,p_0)} \left(\frac{Y_{12C}(p,p_0)}{Y_{Au}}\right) \quad (3.12)$$

Πρακτικά η σχέση 3.12 είναι ακριβώς σαν τη σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της διαφορικής ενεργού διατομής για την $^{11}B(d, d_0)$ απλά απουσιάζουν οι λόγοι των παχών αφού ο σκοπός μας είναι να δούμε πού βρίσκεται το πειραματικό μέγιστο.

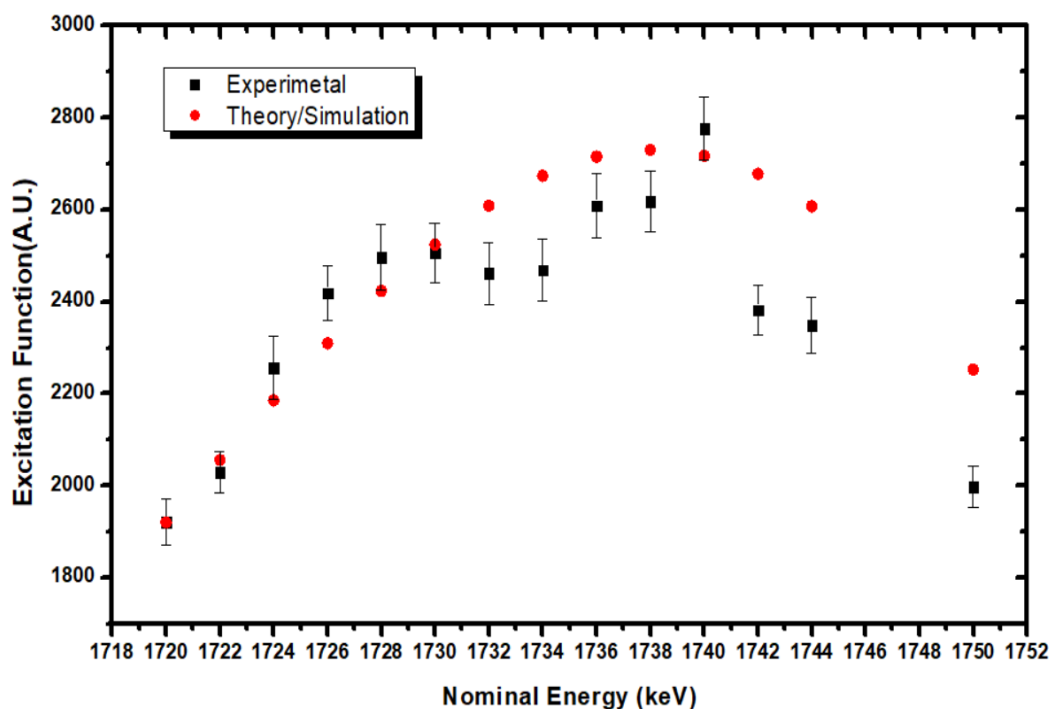


Εικόνα 3.17: Γράφημα πειραματικής excitation function συναρτήσεως της ονομαστικής ενέργειας δέσμης

Η ύπαρξη άνθρακα στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του στόχου δημιουργεί 2 κορυφές $^{12}C(p, p_0)$. Η κορυφή που φαίνεται στο φάσμα της Εικόνας 3.16 είναι στην πραγματικότητα επαλληλία των 2 αυτών κορυφών, οι οποίες λόγω των επιχειρημάτων που παραθέσαμε και στην παράγραφο 3.5 (λόγος παχών) είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Το πρόβλημα όμως εδώ είναι ότι οι 2 περιοχές άνθρακα αλληλεπιδρούν, εξαιτίας της απώλειας ενέργειας στο εσωτερικό του στόχου, με πρωτόνια διαφορετικής ενέργειας και καθώς βρισκόμαστε σε περιοχή συντονισμού αυτή η μικρή διαφορά στην ενέργεια οδηγεί σε σημαντική διαφορά στην ενεργό διατομή της $^{12}C(p, p_0)$. Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 3.17 το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας μορφής με σχετικά ακανόνιστο σχήμα, που δεν θυμίζει πλέον συντονισμό. Ωστόσο αυτό που πραγματικά μας ενδιαφέρει να κρατήσουμε από το

παραπάνω γράφημα είναι το σημείο που φαίνεται να εμφανίζει “την κορυφή” η excitation function, το οποίο εντοπίζεται για ονομαστική ενέργεια 1740 keV.

Στο επόμενο βήμα θα αξιοποιήσουμε για άλλη μία φορά τον εικονικό στόχο του SIMNRA. Συγκεκριμένα με τον καλά προσδιορισμένο στόχο έγινε προσομοίωση των φασμάτων σε όλες τις ενέργειες πρωτονίων που λήφθηκαν για την επαλήθευση της ενεργειακής βαθμονόμησης. Σε κάθε προσομοιωμένο φάσμα καταγράφηκε ο αριθμός των γεγονότων που αντιστοιχούν στην υπερκορυφή $^{12}_6C(p, p_0)$. Εφόσον όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με ακριβώς το ίδιο φορτίο να φτάνει στο στόχο (άρα τα γεγονότα είναι εξ ορισμού κανονικοποιημένα), θεωρήθηκε ότι τα προσομοιωμένα γεγονότα $Y_{^{12}_6C(p, p_0)}$ δημιουργούν μια θεωρητική excitation function, η οποία θα συγκριθεί με την πειραματική. Στην Εικόνα 3.18 που ακολουθεί γίνεται παράθεση των 2 excitation functions από το πείραμα και την προσομοίωση.



Εικόνα 3.18: Γράφημα πειραματικής και “θεωρητικής” excitation function συναρτήσεως της ονομαστικής ενέργειας δέσμης

Παρατηρούμε ότι η πειραματική κορυφή της excitation function (μαύρα σημεία) φαίνεται για ενέργεια 1740 keV ενώ η προσομοίωση μέσω του κώδικα SIMNRA (κόκκινα σημεία) προβλέπει την κορυφή στα 1738 KeV. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο που θεωρητικά θα έπρεπε να εμφανιστεί στα 1738 keV το πείραμα το εμφανίζει μετατοπισμένο κατά 2 keV. Με άλλα λόγια η πραγματική ενέργεια της δέσμης που δίνει η προσομοίωση φαίνεται να είναι κατά 2 keV χαμηλότερη από την ονομαστική ενέργεια στην οποία βασίστηκε το πειραματικό γράφημα.

Το αποτέλεσμα όλης της παραπάνω μελέτης δείχνει ότι η βαθμονόμηση που θεωρήθηκε στην αρχή της ανάλυσης των δεδομένων είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα, ενισχύοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα

4.1 Τελικά αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε παράθεση της σχέσης 3.4 με την οποία έγινε ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής $^{11}_5B(d, d_0)$ και των σφαλμάτων αυτής (σχέση 3.10). Στις επόμενες εικόνες ακολουθεί ο πίνακας με τα τελικά αποτελέσματα στρογγυλοποιημένα βάσει του σφάλματός τους.

E	δE	$\sigma \pm \delta \sigma$ (mb/sr)					
		150°		160°		170°	
1294	4					7,2	0,4
1304	4					7,3	0,5
1314	4			8,2	0,5		
1324	4			8,2	0,4	7,5	0,4
1334	4			6,8	0,4		
1344	4			6,9	0,4		
1354	4			7,8	0,4		
1364	4			7,0	0,3	7,1	0,3
1374	4			6,6	0,3		
1384	4			6,9	0,3	6,8	0,3
1394	4			5,75	0,28	5,78	0,28
1404	4					6,0	0,3
1414	4			6,7	0,3	6,0	0,3
1424	4			5,82	0,27	5,77	0,29
1434	4			5,63	0,26	5,63	0,27
1444	4			5,87	0,27		
1454	4						
1464	4						
1474	4			7,0	0,3		
1484	4			6,1	0,3	5,7	0,3
1494	4			5,41	0,27	5,47	0,28
1504	4					5,3	0,3
1514	4			5,57	0,28	5,03	0,28
1524	4			5,34	0,27	5,2	0,3
1534	4			5,0	0,3	5,20	0,28
1544	4			5,58	0,27		
1554	4	6,04	0,27	5,12	0,25	5,09	0,26
1564	4	5,55	0,25	4,41	0,23	5,00	0,25
1574	4	5,04	0,23	4,93	0,23	4,65	0,23
1584	4	5,40	0,25	4,75	0,23	4,49	0,23
1594	4	4,92	0,28	4,84	0,24	4,58	0,23
1599	4	5,39	0,25	5,00	0,24	4,63	0,24

1604	4	5,05	0,23	4,82	0,23	4,78	0,25
1609	4	5,05	0,24	4,63	0,23	4,36	0,23
1614	4	4,98	0,24	4,62	0,23	4,32	0,23
1619	4	4,91	0,24	4,56	0,22	4,22	0,23
1624	4	4,73	0,23	4,67	0,23	4,17	0,22
1629	4	4,97	0,24	4,34	0,21	4,31	0,23
1634	4	4,77	0,23	4,41	0,22	3,95	0,22
1639	4	4,99	0,23	4,25	0,21	4,28	0,23
1644	4	4,56	0,22	4,30	0,21	4,15	0,22
1654	4	5,00	0,24	4,25	0,22	3,91	0,21
1665	4	4,30	0,20	4,17	0,20	4,13	0,20
1675	4	4,02	0,20	4,04	0,20	3,77	0,20
1685	4	4,51	0,21	4,03	0,20	3,79	0,20
1695	4	4,26	0,20	4,15	0,20	3,58	0,19
1705	4	3,95	0,20	4,11	0,20	3,51	0,20
1715	4	3,93	0,19	3,89	0,19	3,48	0,18
1725	4			3,64	0,18	3,17	0,18
1735	4			3,50	0,18	3,24	0,18
1745	4	3,40	0,17	3,79	0,19	2,96	0,17
1755	4	3,30	0,16	3,52	0,18	3,11	0,21
1765	4	3,73	0,18	3,39	0,17	2,92	0,18
1775	4	3,48	0,17	3,28	0,17	2,80	0,20
1785	4	3,54	0,17	3,14	0,16	2,82	0,20
1795	4	3,12	0,16	2,85	0,17	2,75	0,19
1805	4	3,14	0,15	3,08	0,18	2,33	0,17
1815	4	2,96	0,14	2,69	0,16	2,36	0,17
1825	4	2,82	0,13	2,89	0,14	2,15	0,13
1835	4	2,90	0,13	2,53	0,13	2,11	0,14
1845	4	2,88	0,14	2,72	0,16	2,12	0,15
1855	4	3,20	0,14	2,51	0,15	2,03	0,09

Εικόνες 4.1 & 4.2: Τελικός πίνακας αποτελεσμάτων με σφάλματα

Τα ενδιάμεσα κενά στον παραπάνω πίνακα αφορούν κυρίως περιοχές όπου η ελαστική σκέδαση του άνθρακα είχε πολύ υψηλή διαφορική ενεργό διατομή λόγω κάποιου ενισχυτικού συντονισμού. Όταν υπήρχε μερική αλληλοεπικάλυψη των κορυφών άνθρακα και βορίου με τον άνθρακα να έχει τόσο υψηλή στατιστική ήταν αδύνατη η ανάλυση, άρα τα σημεία αυτά εξαιρέθηκαν από τον πίνακα.

Επιπλέον είναι φανερό ότι απουσιάζουν οι 120° , 130° και 140° εξαιτίας την αλληλοεπικάλυψης των κορυφών $^{11}_5B(d, d_0)$ και $^{12}_6C(d, d_0)$ από τον άνθρακα στο πίσω μέρος του στόχου που συζητήθηκε και στην παράγραφο 3.5. Για τον ίδιο λόγο δεν εμφανίζονται και τα δεδομένα για ενέργειες ιόντων δέσμης κάτω των 1300 keV περίπου.

4.2 Σχολιασμός

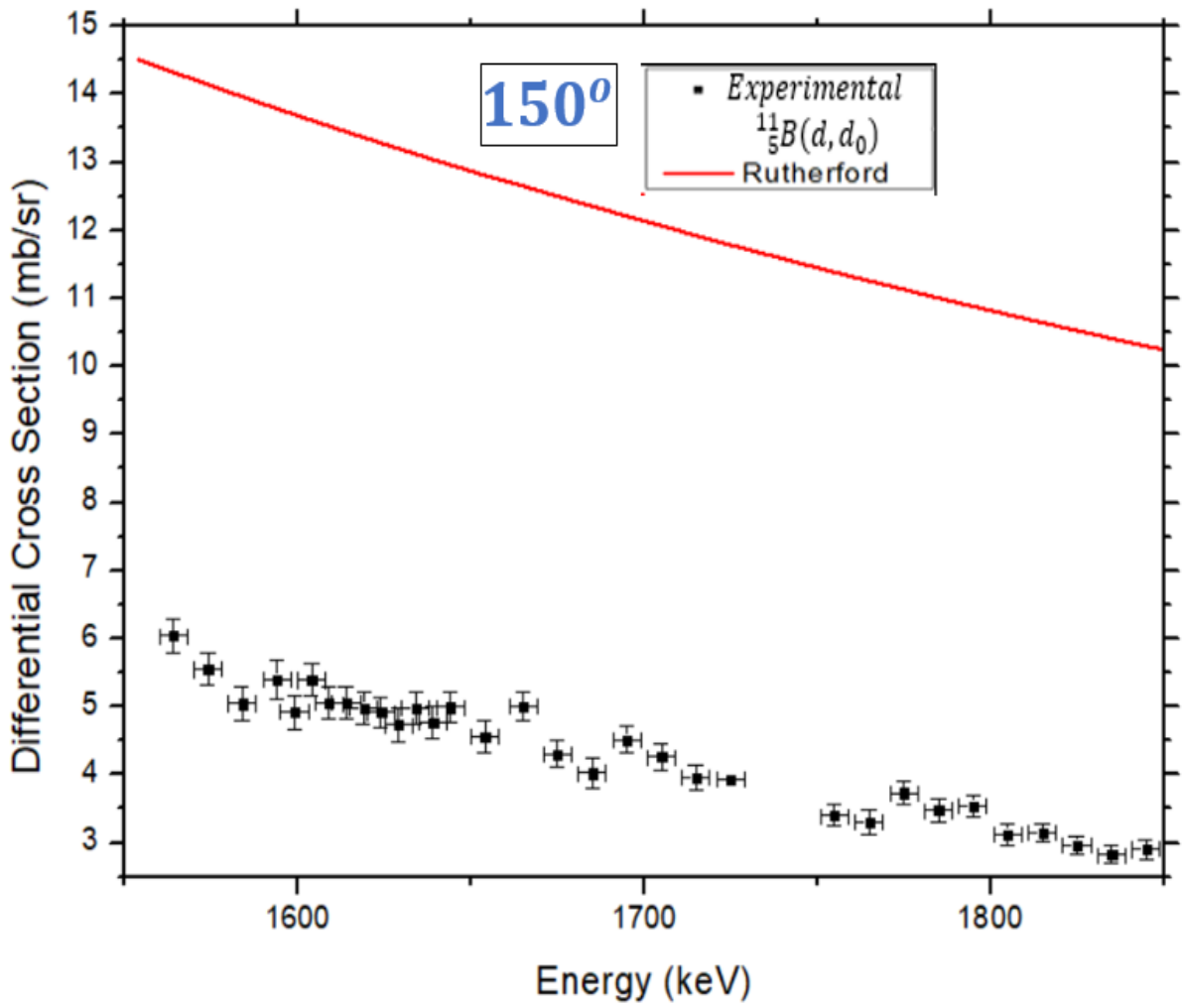
Τα τελικά αποτελέσματα για τις 150° , 160° και 170° φαίνονται και γραφικά παρακάτω στις Εικόνες 4.3 ως 4.5 όπου με κόκκινη συνεχή γραμμή παρουσιάζεται το γράφημα της διαφορικής ενεργού διατομής Rutherford για το ενεργειακό εύρος των αποτελεσμάτων. Τα πειραματικά σημεία εμφανίζονται με μαύρο χρώμα και φαίνεται σε αυτά και το εύρος του σφάλματος στους άξονες X (ενέργεια) και Y (διαφορική ενεργός διατομή) που υπολογίστηκε βάσει των σχέσεων 3.11 και 3.10 αντίστοιχα.

Η πρώτη βασική παρατήρηση είναι ότι η διαφορική ενεργός διατομή ${}^{11}_5B(d, d_0)$ μετρήθηκε κάτω από την Rutherford κατά ένα παράγοντα 3-4. Μάλιστα με την αύξηση της ενέργειας φαίνεται να απομακρύνεται όλο και περισσότερο από την Rutherford. Αυτό μπορεί να φανεί πιο καθαρά και στις Εικόνες 4.6 ως 4.8 όπου έχει γίνει γράφημα της ενέργειας με το λόγο των ενεργών διατομών ως προς τη Rutherford (ratio to Rutherford) και αυτές παρουσιάζουν μία φθίνουσα πορεία με την αύξηση της ενέργειας της δέσμης. Για την προέλευση της συμπεριφοράς αυτής μπορούν να γίνουν μόνο κάποιες υποθέσεις καθώς δεν γίνεται να γνωρίζουμε θεωρητικά την αναμενόμενη μορφή της. Η μορφή αυτή θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα επαλληλίας πολλών ενεργειακών σταθμών που συμβάλλουν καταστροφικά στις συγκεκριμένες γωνίες οπισθοσκέδασης, ή θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα κάποιου ενεργειακού επίπεδου με μεγάλο εύρος (πάνω από MeV) που συντονίζεται ομοίως καταστροφικά, μειώνοντας την τιμή της ενεργού διατομής σε μια μεγάλη ενεργειακή περιοχή (για ανώτερες ενέργειες διέγερσης υπάρχει πράγματι μία στάθμη με μεγάλο εύρος). Θα μπορούσε να είναι ακόμα και συνδυασμός των δύο παραπάνω παραγόντων.

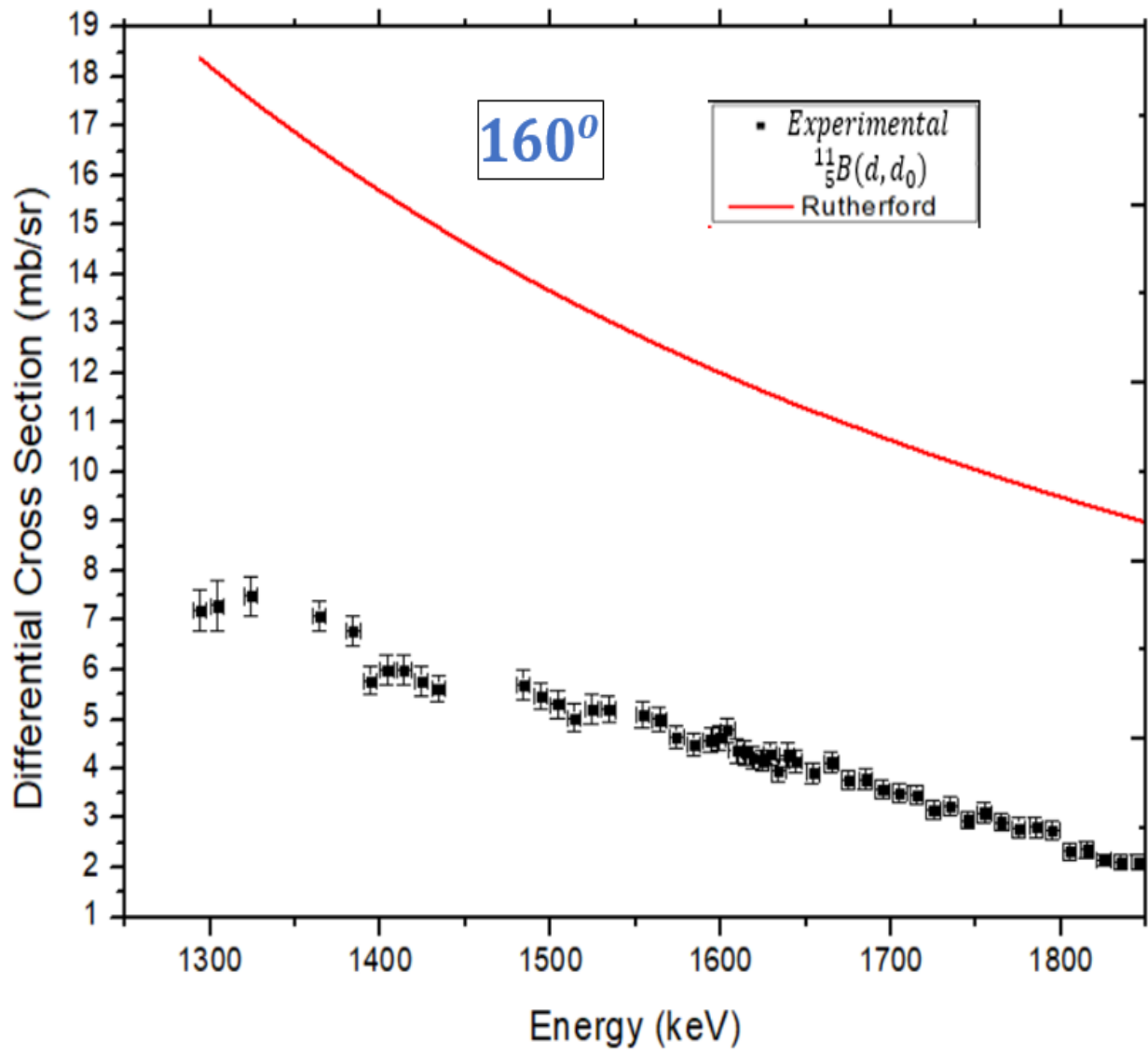
Όσον αφορά στη μορφή της ενεργού διατομής παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια έντονη συντονιστική δομή. Αυτό δεν είναι κάτι που αποτελεί έκπληξη, καθώς όλες σχεδόν οι διεγερόμενες ενεργειακές στάθμες του σύνθετου πυρήνα είχαν μεγάλο εύρος άρα θα ήταν αφύσικο αν εμφανιζόταν ξαφνικά ένας υπέρλεπτος συντονισμός. Εξαίρεση αποτελεί μόνο η ενεργειακή περιοχή που ο σύνθετος πυρήνας διεγείροταν σε μία ενεργειακή στάθμη με εύρος 11 keV η οποία και μελετήθηκε με λεπτότερο ενεργειακό βήμα δίχως όμως να εμφανίσει κάτι αξιοσημείωτο στη μορφή της ενεργού διατομής.

Η ανάλυση ολοκληρώνεται στην Εικόνα 4.9 όπου παρουσιάζεται η διαφορική ενεργός διατομή για 150° , 160° και 170° ως προς την αντίστοιχη της σκέδασης Rutherford. Στο γράφημα αυτό παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια αξιοσημείωτη γωνιακή κατανομή για τις 3 γωνίες που μελετήθηκαν.

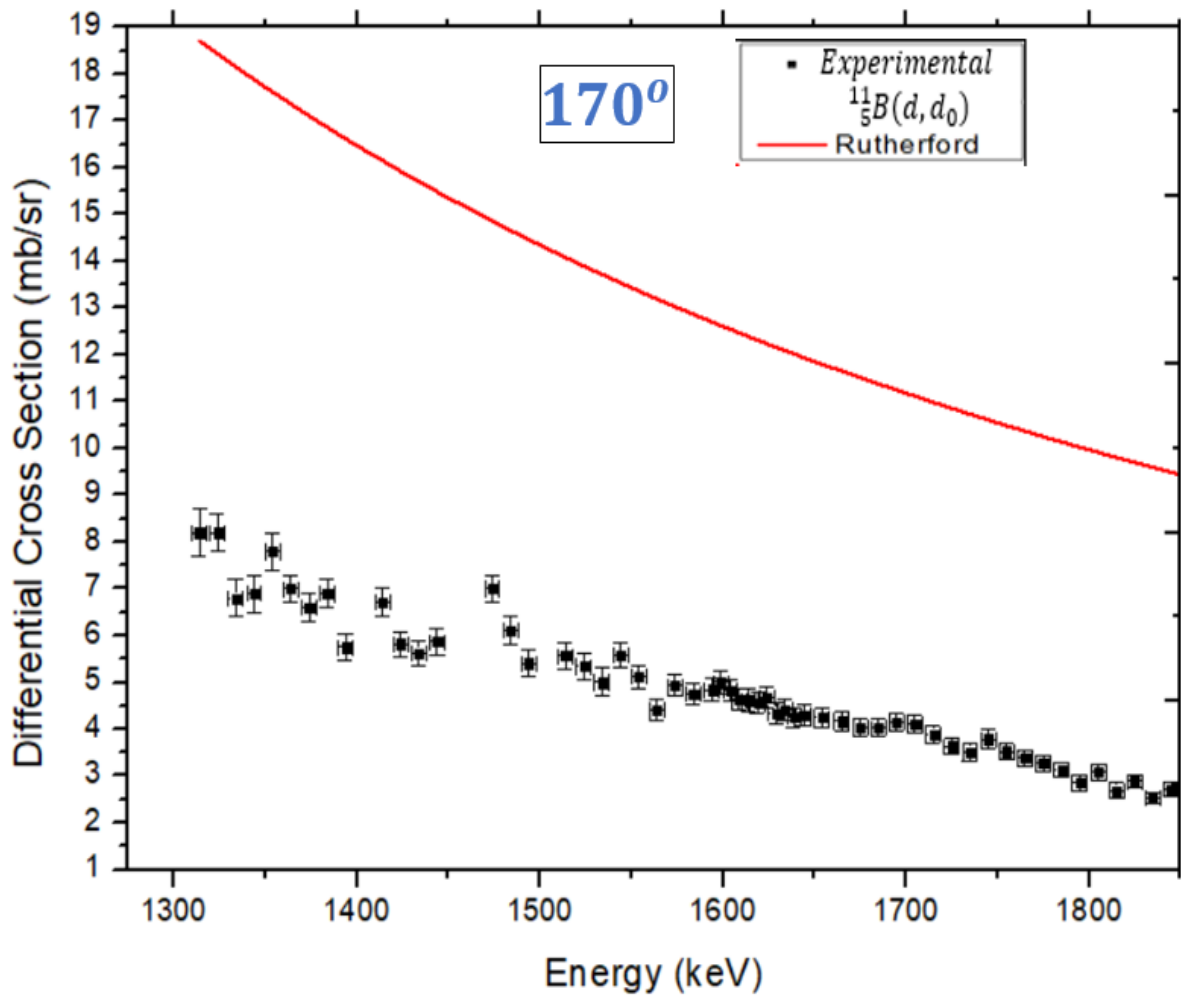
Οι Εικόνες 4.3 ως 4.9 παρατίθενται παρακάτω:



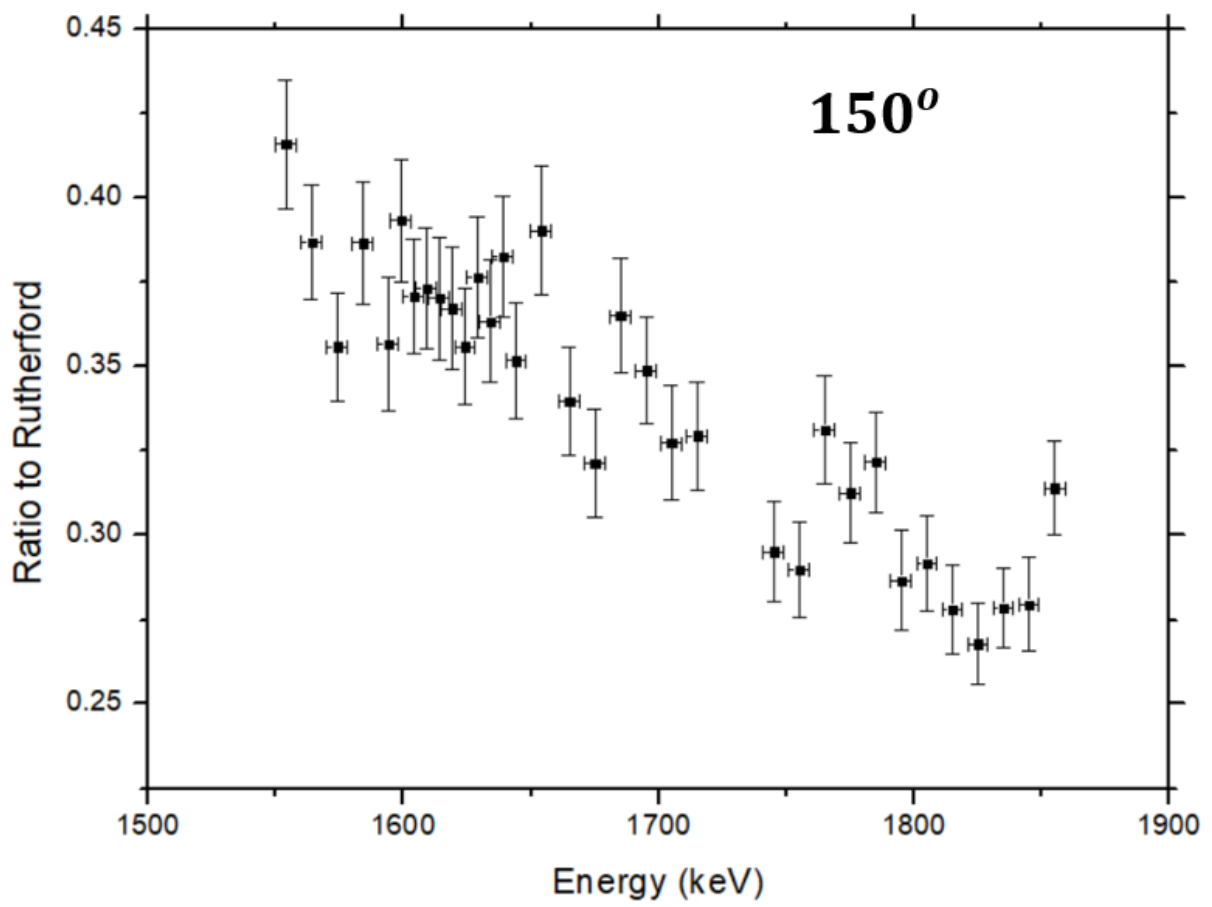
Εικόνα 4.3: Πειραματικά αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής $^{11}_5\text{B}(d, d_0)$ και διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Rutherford για γωνία σκέδασης 150°



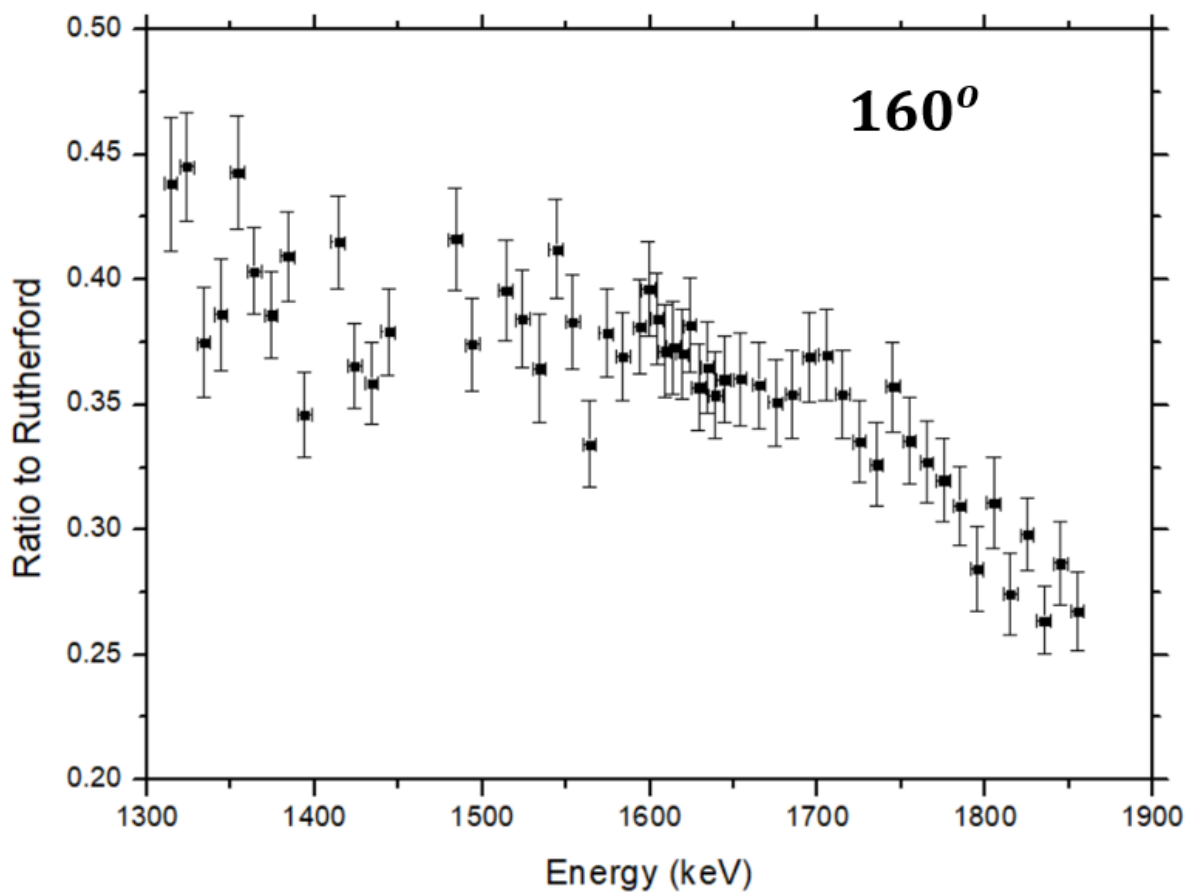
Εικόνα 4.4: Πειραματικά αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής $^{11}_5\text{B}(d, d_0)$ και διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Rutherford για γωνία σκέδασης 160°



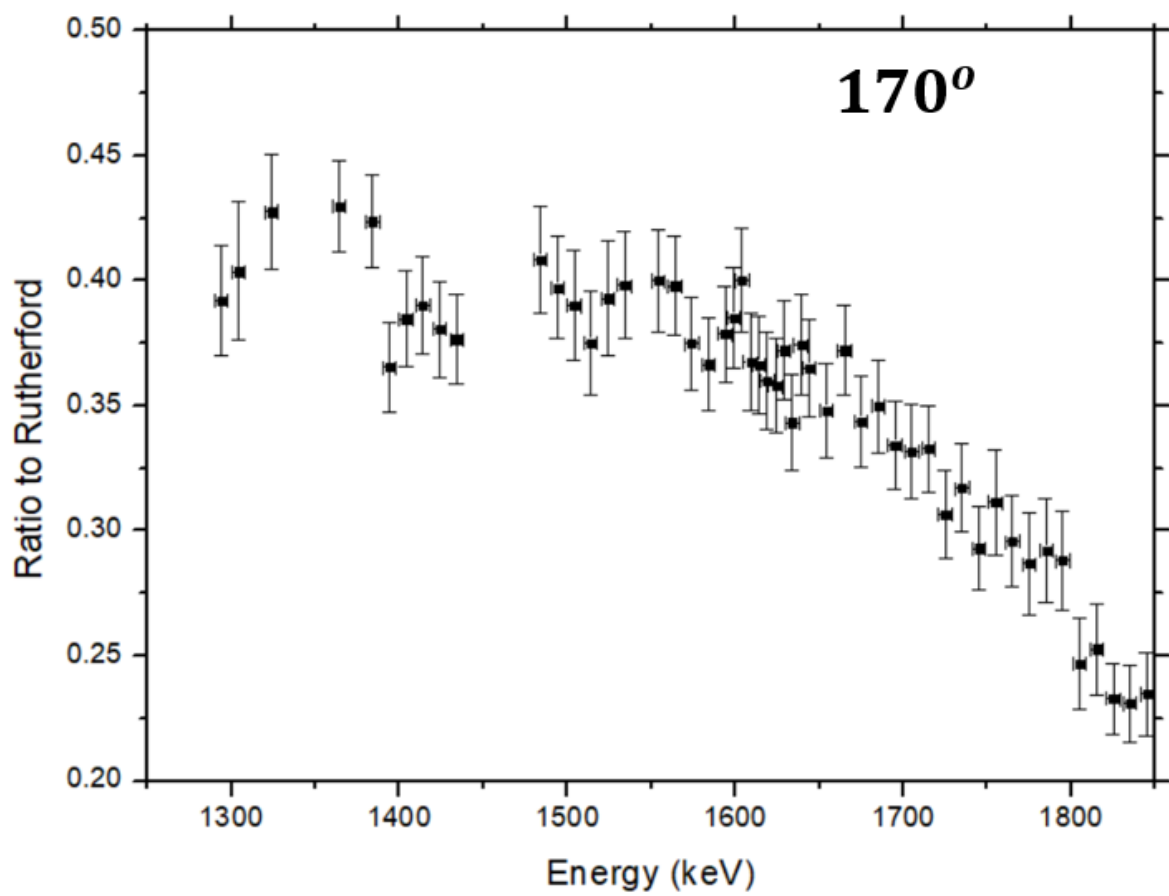
Εικόνα 4.5: Πειραματικά αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής $^{11}_5\text{B}(d, d_0)$ και διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Rutherford για γωνία σκέδασης 170°



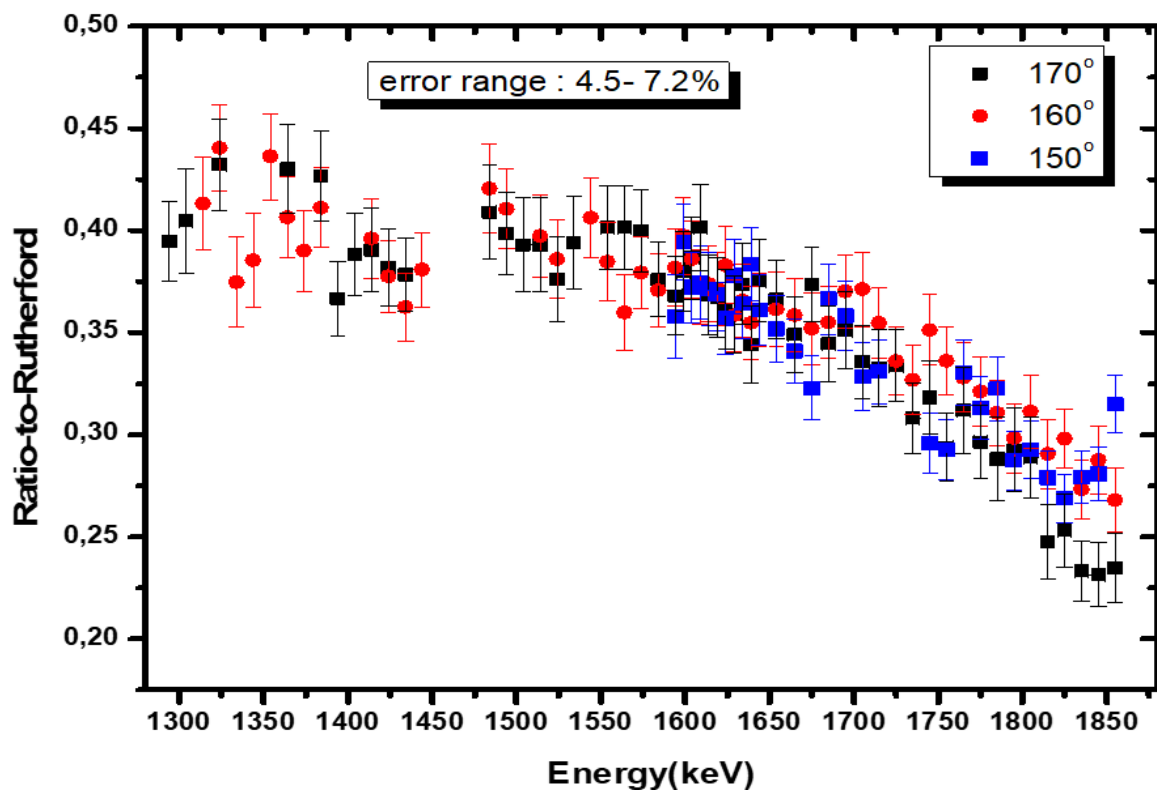
Εικόνα 4.6: Πειραματικές τιμές της ενεργού διατομής ως προς την ενεργό διατομή Rutherford για γωνία σκέδασης 150°



Εικόνα 4.7: Πειραματικές τιμές της ενεργού διατομής ως προς την ενεργό διατομή Rutherford για γωνία σκέδασης 160°



Εικόνα 4.8: Πειραματικές τιμές της ενεργού διατομής ως προς την ενεργό διατομή Rutherford για γωνία σκέδασης 170°



Εικόνα 4.9: Πειραματικές τιμές της ενεργού διατομής ως προς την ενεργό διατομή Rutherford για γωνίες σκέδασης 150° , 160° και 170°

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα και προοπτικές

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη έγινε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών. Μετρήθηκε πειραματικά η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ισότοπο βόριο-11 (80.1% αφθονία στο φυσικό βόριο) για ενέργειες δέσμης $E_{d,lab} = 1300 - 1860 \text{ keV}$ με βήμα 5-10 keV και για γωνίες ανίχνευσης $150^\circ, 160^\circ$ και 170° που είναι κατάλληλες για ποσοτικό προσδιορισμό και προφίλομετρία του βορίου σε δείγματα άγνωστης περιεκτικότητας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”, στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή tandem 5.5 MV με στόχο που κατασκευάστηκε στο R.B.I., Ζάγκρεμπ.

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εμφανίζουν έντονη απόκλιση από τη διαφορική ενεργό διατομή της σκέδασης Rutherford σε όλο το ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε, όπως αναμενόταν λόγω του χαμηλού ατομικού αριθμού του βορίου. Συγκεκριμένα είναι μειωμένες κατά ένα παράγοντα 3-4 και εμφανίζουν τάση ακόμα μεγαλύτερης απομάκρυνσης από τη σχέση του Rutherford όσο αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης. Παρατηρήθηκε έλλειψη συντονιστικών δομών που μπορεί να οφείλεται σε επαλληλία επικαλυπτόμενων ενεργειακών σταθμών ή θα μπορούσε να είναι και το αποτέλεσμα μιας στάθμης με μεγάλο εύρος που να παρουσιάζει έντονα καταστροφική συμπεριφορά στις συγκεκριμένες γωνίες οπισθοσκέδασης που μελετήθηκαν. Οι αποκλίσεις από τη σχέση του Rutherford που εμφανίζονται στις μετρήσεις αποτελούν ένα ακόμα παράδειγμα για τη σημασία/αναγκαιότητα του πειράματος για τον προσδιορισμό των ενεργών διατομών. Οι 3 γωνίες που εξετάστηκαν δεν παρουσιάζουν κάποια αξιοσημείωτη γωνιακή κατανομή, ωστόσο δεν μπορούμε να έχουμε ξεκάθαρη εικόνα μέχρι να μελετηθεί μεγαλύτερο γωνιακό εύρος.

Τα παρόντα αποτελέσματα θα καλύψουν την έλλειψη δεδομένων για την ελαστική σκέδαση δευτερίων από βόριο στις ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες δεδομένων IBANDL και EXFOR στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε. Τέλος, η παρούσα εργασία αποτελεί την ολοκλήρωση μιας πιο εκτενούς μελέτης της σκέδασης δευτερίων από ελαφρά στοιχεία/ισότοπα για ενέργειες μικρότερες από 2.2 MeV (ενέργεια σύνδεσης του δευτερίου)

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παρούσας εργασίας, τα δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών που προσδιορίστηκαν θα επιτρέψουν τη χρήση του συνδυασμού d-EBS και d-NRA για την προφίλομετρία του βορίου σε σύνθετες μήτρες.

5.2 Προοπτικές

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το ενεργειακό εύρος 1300-1860 keV εξαιτίας της αλληλοεπικάλυψης με τον άνθρακα, οπότε υπάρχει η προοπτική μελέτης ακόμα μεγαλύτερου ενεργειακού εύρους με τη χρήση ενός αυτοϋποστηριζόμενου (self-supported) στόχου βορίου, ενδεχομένως και με απόλυτη μέτρηση. Στην περίπτωση αυτή δεν πρόκειται να εμφανιστεί άνθρακας σε 2 σημεία με σημαντική ενεργειακή μάλιστα απόσταση μεταξύ τους.

Επιπλέον είναι δυνατόν να εξάγουμε από τα παρόντα πειραματικά δεδομένα και πληροφορία για ενεργειακές περιοχές που ως τώρα εξαιρέθηκαν. Για το σκοπό αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί το λογισμικό SIMNRA όπου, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, έχει γίνει ένας αρκετά καλός χαρακτηρισμός της ποσότητας άνθρακα. Ο προσδιορισμός της ακριβούς ποσότητας του άνθρακα μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω με τη βοήθεια επιπλέον φασμάτων δευτερίων επιτρέποντας την εκτίμηση της συνεισφοράς του άνθρακα σε περιπτώσεις που η αλληλοεπικάλυψη δεν ήταν διαχειρίσιμη ούτε καν με fit. Φυσικά αυτό δεν σημαίνει ότι όλα τα σημεία που εξαιρέθηκαν μπορούν να δώσουν αξιόπιστη φυσική πληροφορία. Σίγουρα όμως η παραπάνω τεχνική έχει την προοπτική να εμπλουτίσει με νέα σημεία τα αποτελέσματα.

Τέλος, στα πειραματικά φάσματα παρουσιάστηκαν κορυφές από τις αντιδράσεις: $^{11}_5B(d, p_1)^{12}_5B$ και $^{11}_5B(d, p_2)^{12}_5B$ για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα στη βιβλιογραφία, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει προοπτική επέκτασης των αποτελεσμάτων για την διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης $^{11}_5B(d, p_0)^{12}_5B$ που επίσης εμφανίζεται με ικανοποιητική στατιστική στα πειραματικά φάσματα.

Βιβλιογραφία

[1] <https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>

[2] <https://education.jlab.org/itselemental/iso005.html>

[3] <http://amdc.impcas.ac.cn/masstables/Ame2016/mass16.txt>

[4] <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>

[5] <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

[6] Backscattering Spectrometry, Wei-Kan Chu, James W. Mayer, and Marc-A. Nicolet, Academic Press, 1978, page 27

[7] SIMNRA Manual

[8] C. Kalfas, M. Axiotis, C. Tsabaris, "SPECTRW: A software package for nuclear and atomic spectroscopy", Nuclear Instruments and Methods

[9] M. Mayer, "SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, EBS and ERDA", AIP Conference Proceedings, 415(1), 1999

[10] W.N Catford, "Catkin, v 2.02 the relativistic kinematics program"

[11] G. F. Knoll, "Radiation detection and measurements", John Wiley & Sons (2010)

[12] M. Nastasi, J. W. Mayer and Y. Wang. "Ion beam analysis: Fundamentals and applications" CRC Press (2014)