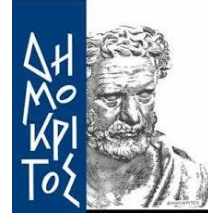




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ-
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έλεγχος αξιοπιστίας ενεργών διατομών
ελαστικής σκέδασης πρωτονίων για την
ανίχνευση ελαφρών στοιχείων

Καντρέ Καρίμ-Αλέξανδρος

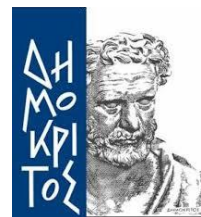
Επιβλέπων Καθηγητής: Μιχάλης Κόκκορης



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ-
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έλεγχος αξιοπιστίας ενεργών διατομών
ελαστικής σκέδασης πρωτονίων για την
ανίχνευση ελαφρών στοιχείων

Καντρέ Καρίμ-Αλέξανδρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Μιχάλης Κόκκορης

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου, αναπληρωτή καθηγητή του ΕΜΠ Δρα Μιχάλη Κόκκορη για την συμπαράσταση, την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλη την διάρκεια της εργασίας, καθώς και την καθηγήτρια του ΕΜΠ Δρα Ρόζα Ζάννη-Βλαστού για τις χρήσιμες συμβουλές της.

Επίσης ευχαριστώ θερμά την υποψήφια διδάκτορα Βαλεντίνα Πανέτα της οποίας η βοήθεια σε κάθε στάδιο του πειράματος και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ήταν πολύτιμη. Ιδιαίτερα σημαντική κυρίως στα αρχικά στάδια του πειράματος αλλά και στην συνέχεια όποτε χρειάστηκε ήταν και η βοήθεια του υποψήφιου διδάκτορα Θάνου Σταματόπουλου.

Ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα Κώστα Πρεκετέ για την βοήθεια του γενικά στο πείραμα αλλά και ειδικότερα για την συνεισφορά του στην διαδικασία της βαθμονόμησης του επιταχυντή και την εξάχνωση των στόχων με χρυσό. Επιπλέον ευχαριστώ την υποψήφια διδάκτορα Βίκυ Κανταρέλου για την μέτρηση του πάχους του χρυσού με τη μέθοδο XRF.

Ευχαριστώ επίσης όλα τα μέλη της ομάδας Πυρηνικής Φυσικής του Πολυτεχνείου καθώς και το προσωπικό του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Δημόκριτου για την στήριξη και τις συμβουλές. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα Κωνσταντίνο Κάλφα για τα μαθήματα και τις συμβουλές.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους φίλους μου, τα παιδιά που γνώρισα στην σχολή και περάσαμε μαζί αυτά τα υπέροχα επτά χρόνια: την Δήμητρα, τον Νίκο, τον Γιάννη, τον Άγγελο και όλους τους υπόλοιπους.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη της σε κάθε επίπεδο όλο αυτόν τον καιρό.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικές έννοιες	5
1.1 Ορισμός πυρηνικής αντίδρασης	5
1.2 Ελαστική σκέδαση Rutherford	6
<i>Κινηματική της σκέδασης</i>	6
<i>Διαφορική ενεργός διατομή της σκέδασης Rutherford</i>	8
1.3 Ελαστική σκέδαση non-Rutherford	8
1.4 Φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης από παχύ στόχο	9
<i>Απώλεια ενέργειας και ισχύς ανάσχεσης</i>	9
<i>Ενεργειακός και χωρικός διασκεδασμός</i>	10
<i>Ανίχνευση σε βάθος</i>	10
<i>Ύψος φάσματος</i>	12
<i>Φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης</i>	13
Κεφάλαιο 2: Έλεγχος αξιοπιστίας και αξιολόγηση ενεργών διατομών	15
2.1 Benchmarking σε ελαστική σκέδαση	15
2.2 Βιβλιοθήκη δεδομένων και εργαλεία προσομοίωσης	16
<i>IBANDL</i>	16
<i>SigmaCalc</i>	17
<i>SIMNRA</i>	18
2.3 Benchmarking σε Si, Ca και O	19
<i>Επιλογή ενεργειών δέσμης</i>	20
<i>Επιλογή γωνιών</i>	22
Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διάταξη	24
3.1 Επιταχυντής	24
3.2 Γωνιομετρικός θάλαμος	25
3.3 Στόχοι	26
3.4 Ανιχνευτές	28
3.5 Ηλεκτρονικά	28
Κεφάλαιο 4: Μέθοδος και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων	30
4.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση	30
4.2 Προσδιορισμός της διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών	32
4.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή	34
4.4 Μέθοδος και αποτελέσματα	35
A. Οξυγόνο	35
<i>Διαδικασία</i>	35
<i>Αποτελέσματα</i>	38
<i>Σύγκριση αποτελεσμάτων</i>	51
<i>Περιοχές εκτός συντονισμών</i>	51
<i>Συντονισμοί</i>	52

B. Πυρίτιο-Ασβέστιο	52
<i>Η σημασία του χρυσού και η εύρεση του πάχους του</i>	52
<i>Προβλήματα που παρουσιάστηκαν</i>	55
<i>Φθορισμός του στόχου $CaCO_3$</i>	55
<i>Εσωτερική τραχύτητα στον στόχο Si</i>	59
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προοπτικές	64
Βιβλιογραφία	65

Περίληψη

Η αξιολόγηση των γνωστών από την βιβλιογραφία διαφορικών ενεργών διατομών αντιδράσεων που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές Ion Beam Analysis (IBA) είναι σημαντική για την επικύρωση τους. Οι τεχνικές IBA χρησιμοποιούνται για τον στοιχειομετρικό προσδιορισμό και την εις βάθος μελέτη της κατανομής των στοιχείων σε δείγματα άγνωστης σύνθεσης.

Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος της ορθότητας έγινε για τις διαφορικές ενεργές διατομές των ελαστικών σκεδάσεων $^{nat}\text{Si}(p,p)^{nat}\text{Si}$, $^{nat}\text{O}(p,p)^{nat}\text{O}$ και $^{nat}\text{Ca}(p,p)^{nat}\text{Ca}$ σε ενέργειες δέσμης από 1 έως 4 MeV σε τέσσερις γωνίες σκέδασης. Η διαδικασία της αξιολόγησης πραγματοποιήθηκε με ακτινοβόληση με δέσμη σωματιδίων ομοιόμορφου παχέος στόχου γνωστής σύνθεσης και την ανίχνευση των σκεδαζόμενων σωματιδίων σε γωνίες μεγαλύτερες από 90°. Τα φάσματα που ελήφθησαν συγκρίθηκαν με προσομοιώσεις των υπάρχοντων δεδομένων που παρείχθησαν από το πρόγραμμα SIMNRA. Η χρήση στόχου μεγάλου πάχους προσομοιώνει τις πειραματικές συνθήκες κατά την στοιχειομετρική ανάλυση αγνώστου δείγματος. Επιπλέον, λόγω της απώλειας ενέργειας καθώς εισχωρούν τα σωματίδια στο στόχο, σαρώνεται μια μεγάλη ενεργειακή περιοχή παρέχοντας την δυνατότητα της εξέτασης της εξάρτησης της ενεργού διατομής της αντίδρασης σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών του βλήματος, από την μέτρηση σε κάθε ενέργεια δέσμης.

Εξετάστηκε η αξιοπιστία των υπάρχοντων μετρήσεων ενεργών διατομών από την βιβλιογραφία τόσο στις ενεργειακές περιοχές που οι αντιδράσεις αυτές εμφανίζουν συντονισμούς όσο και στις περιοχές εκτός συντονισμών. Στην περίπτωση του οξυγόνου είχαμε κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα, στα Si και Ca όμως προέκυψαν προβλήματα τα οποία κατέστησαν δύσκολη την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Το πείραμα εκτελέστηκε στο εργαστήριο του επιταχυντή TANDEM του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”.

Abstract

A benchmarking experiment in Ion Beam Analysis (IBA) is significant for the validation of charged particle differential cross section data. The IBA techniques are used to probe the composition and obtain elemental depth profiles in the near-surface layer of solids.

In the present project the benchmarking procedure was performed for the elastic scattering of protons on $^{\text{nat}}\text{Si}$, $^{\text{nat}}\text{O}$ and $^{\text{nat}}\text{Ca}$ in the energy range of 1-4 MeV at four backward angles. This was achieved by the irradiation of uniform thick targets of known composition. The spectra acquired were compared with simulations produced by SIMNRA.

We examined the reliability of the existing cross section data both in the resonant and the non-resonant energy regions. In the case of $^{\text{nat}}\text{O}$, we had some interesting results. However, in the cases of Si and Ca, problems occurred that made it difficult to draw reliable conclusions.

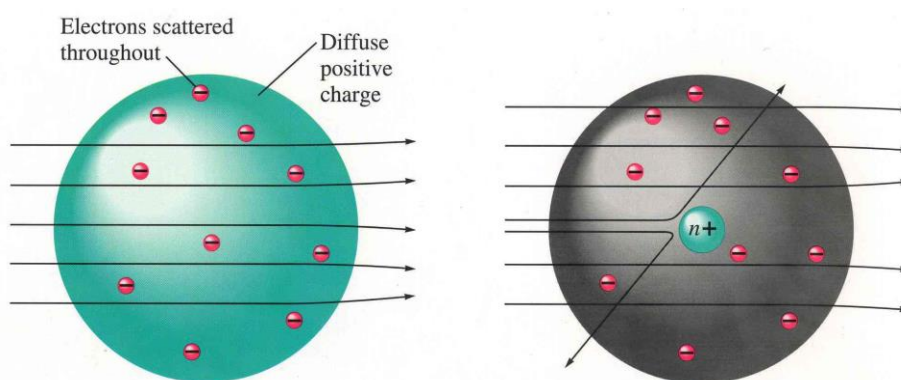
The experiments were performed in the TANDEM accelerator laboratory of N.C.S.R “Demokritos”.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγικές έννοιες

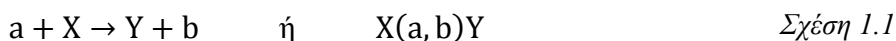
1.1 Ορισμός πυρηνικής αντίδρασης

Όταν ένας στόχος ακτινοβολείται με σωματίδια υπάρχει η πιθανότητα να συμβεί κάποια πυρηνική αντίδραση. Η πρώτη ανίχνευση μιας τέτοιου τύπου αντίδρασης έγινε στο εργαστήριο του Ernest Rutherford το 1909, όπου ακτινοβολήθηκαν φύλλα χρυσού με σωματίδια α προερχόμενα από ραδιενεργό πηγή, στο πείραμα που οδήγησε στην ανακάλυψη του ατομικού πυρήνα.



Εικόνα 1.1: Αριστερά το ατομικό μοντέλο του Thomson (σταφιδόψωμο), δεξιά το μοντέλο Rutherford. Στην θεώρηση του τελευταίου οδήγησε η ελαστική σκέδαση των σωματιδίων α από το συγκεντρωμένο θετικό φορτίο του πυρήνα.

Γενικά μια πυρηνική αντίδραση γράφεται ως εξής [1]



όπου με a συμβολίζεται το επιταχυνόμενο σωματίδιο-βλήμα (συνήθως νουκλεόνιο ή ελαφρύς πυρήνας), με X ο πυρήνας του στόχου και τα Y και b είναι τα προϊόντα της αντίδρασης. Συνήθως το Y είναι βαρύ και σταματά μέσα στον στόχο οπότε δεν ανιχνεύεται απευθείας, ενώ το b είναι ελαφρύ σωματίδιο το οποίο μπορεί να ανιχνευτεί και να μετρηθεί (νουκλεόνιο, ελαφρύς πυρήνας ή φωτόνιο).

Η πιθανότητα ένα σωματίδιο της δέσμης ενέργειας E να σκεδαστεί από πυρήνα του στόχου σε γωνία θ , ανά στερακτίνο, ονομάζεται διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta)$. Στην περίπτωση που τα αντιδρώντα είναι ίδια με τα προϊόντα και η συνολική κινητική ενέργεια διατηρείται πριν και μετά την σκέδαση έχουμε ελαστική σκέδαση.

1.2 Ελαστική σκέδαση Rutherford

Όταν η ελαστική σκέδαση οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φορτισμένου σωματιδίου-βλήματος με το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα του στόχου ονομάζεται σκέδαση Coulomb ή σκέδαση Rutherford.

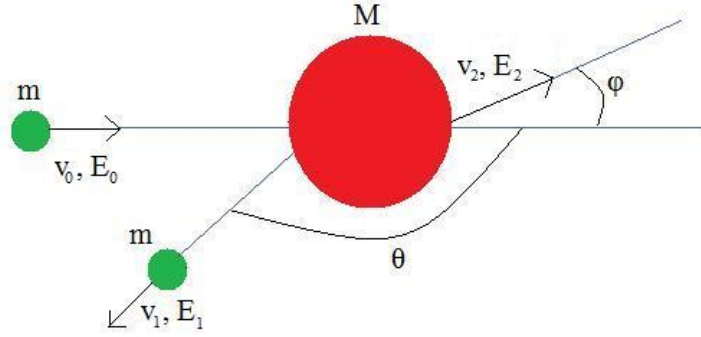
Κινηματική της σκέδασης

Όταν ένα σωματίδιο με μάζα m , που κινείται με σταθερή ταχύτητα, συγκρούεται ελαστικά με ακίνητο σωματίδιο μάζας M μεταφέρεται ενέργεια από το κινούμενο στο ακίνητο. Στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης το σωματίδιο με μάζα m είναι αυτό της δέσμης και με μάζα M ο πυρήνας του στόχου.

Για να θεωρηθεί ότι η σκέδαση είναι ελαστική και οφείλεται σε ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις (σκέδαση Rutherford) πρέπει να ισχύουν δύο προϋποθέσεις [2]:

- Η ενέργεια των σωματιδίων της δέσμης να είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης των ατόμων του στόχου (οι χημικοί δεσμοί είναι της τάξης των 10 eV).
- Να μην εμφανίζονται πυρηνικές αντιδράσεις και συντονισμοί. Αυτό εξαρτάται από τους πυρήνες που εμπλέκονται στην αλληλεπίδραση, οπότε το ανώτερο επιτρεπόμενο όριο για την ενέργεια της δέσμης διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση.

Το αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχές διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Έστω ότι το βλήμα έχει ταχύτητα \mathbf{v}_0 και ενέργεια $E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$ πριν την αλληλεπίδραση ενώ ο πυρήνας είναι αρχικά ακίνητος. Μετά την αλληλεπίδραση το βλήμα αποκτά ταχύτητα \mathbf{v}_1 και ενέργεια $E_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$ και ο πυρήνας ταχύτητα \mathbf{v}_2 και ενέργεια $E_2 = \frac{1}{2}Mv_2^2$. Η γωνία σκέδασης είναι θ ενώ η γωνία ανάκρουσης του πυρήνα ϕ .



Εικόνα 1.2: Σχήμα αναπαράστασης της ελαστικής σκέδασης

Οι εξισώσεις διατήρησης της ενέργειας και της ορμής στον οριζόντιο και τον κάθετο άξονα είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_0^2 &= \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}Mv_2^2 \\ mv_0 &= mv_1 \cos \theta + Mv_2 \cos \varphi \\ 0 &= mv_1 \sin \theta - Mv_2 \sin \varphi \end{aligned}$$

Εξαλείφοντας από τις εξισώσεις το φ και το v_2 έχουμε ότι

$$\frac{v_1}{v_0} = \left[(M^2 - m^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} + m \cos \theta \right] / (M + m)$$

με $m \leq M$.

Ορίζουμε τον κινηματικό παράγοντα K ως

$$K \equiv \frac{E_1}{E_0}$$

Σχέση 1.2

Οπότε σε σκέδαση από πυρήνα μάζας M είναι:

$$\begin{aligned} K_M &= \left[\frac{(M^2 - m^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} + m \cos \theta}{M + m} \right]^2 \\ &= \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{m}{M}\right)^2 \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{m}{M}\right) \cos \theta}{1 + \left(\frac{m}{M}\right)} \right\}^2 \end{aligned}$$

Σχέση 1.3

Από την Σχέση 1.3 είναι εμφανές ότι ο κινηματικός παράγοντας K εξαρτάται μόνο από το λόγο των μαζών βλήματος-πυρήνα και από την γωνία σκέδασης θ . Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι αν ανιχνευτεί η ενέργεια του σκεδαζόμενου σωματιδίου σε γωνία θ (γνωρίζοντας την αρχική του ενέργεια και την μάζα του), μπορεί να προσδιοριστεί η μάζα M του πυρήνα του στόχου. Το γεγονός αυτό αποτελεί την βασική αρχή της ανάλυσης υλικών με φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford (RBS). Δηλαδή γνωρίζοντας την ενέργεια της δέσμης, οι ενέργειες των σωματιδίων που ανιχνεύονται μπορούν να προσδιορίσουν ποιοτικά και ποσοτικά το στόχο.

Διαφορική ενεργός διατομή της σκέδασης Rutherford

Η πιθανότητα να σκεδαστεί ένα σωματίδιο μάζας m από πυρήνα μάζας M σε γωνία θ με σκέδαση Rutherford μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά και δίνεται από την σχέση της διαφορικής ενεργού διατομής κατά Rutherford (στο σύστημα του εργαστηρίου)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right)^2 \frac{4}{\sin^4 \theta} \frac{\left\{ \left[1 - \left(\frac{m}{M} \sin \theta\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \cos \theta \right\}^2}{\left[1 - \left(\frac{m}{M} \sin \theta\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Σχέση 1.4}$$

όπου Z_1, Z_2 τα φορτία του βλήματος και του πυρήνα του στόχου αντίστοιχα, και E η ενέργεια της δέσμης.

1.3 Ελαστική σκέδαση non-Rutherford

Η σκέδαση Rutherford είναι η μοναδική ελαστική σκέδαση που λαμβάνει χώρα όταν ο πυρήνας του στόχου είναι βαρύς και οι ενέργειες της δέσμης χαμηλές. Όμως από κάποια ενέργεια δέσμης και πάνω (η οποία εξαρτάται από το σωματίδιο της δέσμης και τον πυρήνα του στόχου), τα σωματίδια έχουν ενέργεια αρκετή ώστε να ξεπεράσουν το φράγμα του δυναμικού Coulomb και να “δουν” το πυρηνικό δυναμικό (το ίδιο έχει πιθανότητα να συμβεί και σε μικρότερη ενέργεια λόγω του φαινομένου σήραγγας). Οπότε σε αυτή την περίπτωση η ενεργός διατομή δίνεται συνολικά από τον συνδυασμό των σωματιδίων που σκεδάζονται από το ηλεκτρικό και αυτών που σκεδάζονται από το πυρηνικό δυναμικό. Επομένως τότε η τιμή της ενεργού διατομής αποκλίνει από την πρόβλεψη που δίνει η Σχέση 1.4. Δεν υπάρχει αναλυτικός τρόπος εύρεσης της non-Rutherford ενεργού διατομής, οπότε για τον υπολογισμό της βασιζόμαστε στα πειραματικά δεδομένα.

1.4 Φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης από παχύ στόχο

Το πείραμα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ακτινοβολώντας στόχους μεγάλου πάχους με φορτισμένα σωματίδια. Είναι χρήσιμο λοιπόν στο σημείο αυτό να εξεταστούν τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε αυτήν την περίπτωση και που τελικά διαμορφώνουν το φάσμα που λαμβάνουμε [2].

Απώλεια ενέργειας και ισχύς ανάσχεσης

Τα σωματίδια της δέσμης χάνουν ενέργεια καθώς εισχωρούν στο υλικό λόγω των αλληλεπιδράσεων με το ηλεκτρονιακό νέφος, με αποτέλεσμα πριν την σκέδαση από πυρήνα του στόχου, η ενέργειά τους να είναι μικρότερη από την αρχική ενέργεια δέσμης. Προφανώς η απώλεια ενέργειας συνεχίζεται και καθώς τα σκεδαζόμενα σωματίδια εξέρχονται από τον στόχο μετά από πιθανή οπισθοσκέδαση. Οπότε τελικά η ενέργεια των ανιχνευόμενων σωματιδίων εξαρτάται από το βάθος του υλικού στο οποίο πραγματοποιήθηκε η αντίδραση.

Η ισχύς ανάσχεσης (stopping power) ενός υλικού για ένα συγκεκριμένου τύπου σωματίδιο δέσμης ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου προς την απόσταση που διένυσε στο υλικό. Δηλαδή:

$$S = \frac{dE}{dx} \quad \text{Σχέση 1.5}$$

Η ενεργός διατομή ανάσχεσης (stopping cross section) ε ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας ανά άτομο ανά μονάδα επιφάνειας (επιφανειακή πυκνότητα) του υλικού που διασχίζεται. Δηλαδή:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \frac{dE}{dx} \quad \text{Σχέση 1.6}$$

όπου N είναι η ατομική πυκνότητα (άτομα/cm³).

Στην περίπτωση υλικού που αποτελείται από διαφορετικά ήδη ατόμων (πχ ατομικής σύνθεσης $A_m B_n$) η ενεργός διατομή ανάσχεσης είναι

$$\varepsilon^{A_m B_n} = m\varepsilon^A + n\varepsilon^B \quad \text{Σχέση 1.7}$$

όπου τα ε^A και ε^B είναι οι ενεργές διατομές ανάσχεσης για τα στοιχεία A και B αντίστοιχα.

Τότε η ισχύς ανάσχεσης δίνεται από την σχέση:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)^{AB} = N^{AB}\epsilon^{AB} = N_A^{AB}\epsilon^A + N_B^{AB}\epsilon^B \quad \text{Σχέση 1.8}$$

όπου το N^{AB} είναι η μοριακή πυκνότητα και τα N_A^{AB} και N_B^{AB} είναι οι ατομικές πυκνότητες των A και B αντίστοιχα.

Ενεργειακός και χωρικός διασκεδασμός

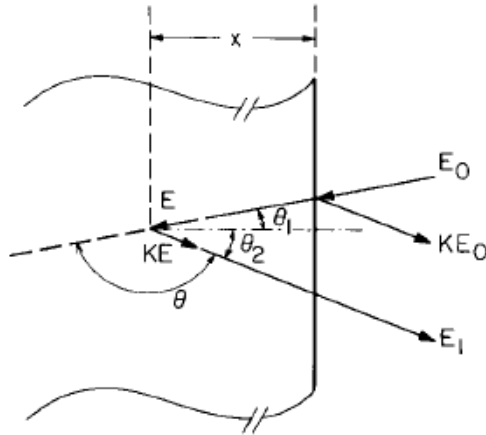
Η επιβράδυνση των σωματιδίων της δέσμης καθώς διατρέχουν το υλικό συνοδεύεται από μια προοδευτική διασπορά της ενεργειακής και χωρικής τους κατανομής (energy and lateral straggling). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όμοια σωματίδια με την ίδια αρχική ταχύτητα να μην έχουν την ίδια ενέργεια αφού διανύσουν μία απόσταση Δx εντός ομοιογενούς μέσου.

Στις τεχνικές IBA, ο διασκεδασμός αλλοιώνει τις μετρημένες ενεργειακές κατανομές και τους συντονισμούς, με αποτέλεσμα να εμποδίζει τη σε βάθος ανάλυση του υλικού και να μπαίνει αναγκαστικά ένα όριο στην ακρίβεια με την οποία μπορούν να προσδιοριστούν οι απώλειες ενέργειας και ως εκ τούτου τα βάρη, με φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης. Επίσης περιορίζεται η ικανότητα για τον προσδιορισμό των μαζών των πυρήνων του στόχου σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια επειδή η δέσμη δεν είναι πια μονοενεργειακή. Οπότε είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν το μέγεθος της συνεισφοράς της ενεργειακής και χωρικής διασποράς της δέσμης στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

Ανίχνευση σε βάθος

Αναφερθήκαμε προηγουμένως στον κινηματικό παράγοντα K της ελαστικής σκέδασης που δίνεται από την Σχέση 1.3 και είδαμε ότι εξαρτάται μόνο από τον λόγο της μάζας του βλήματος προς την μάζα του πυρήνα και από την γωνία σκέδασης θ . Είναι φανερό ότι σε στόχους αποτελούμενους από πολλά στοιχεία (διαφορετικά M), οι ενέργειες των ανιχνευόμενων σωματιδίων διαφέρουν ανάλογα με την μάζα του πυρήνα από τον οποίο σκεδάστηκαν. Οπότε τελικά στο φάσμα υπάρχει διαχωρισμός των σημάτων ανάλογα με το στοιχείο του στόχου στο οποίο αντιστοιχούν. Στην περίπτωση που ο στόχος αποτελείται από δύο είδη ατόμων των οποίων οι μάζες διαφέρουν λίγο (έστω ΔM), είναι σημαντικό αυτή η διαφορά να αντιστοιχεί σε μεγάλη διαφορά στις ενέργειες στις οποίες ανιχνεύονται τα σωματίδια από κάθε στοιχείο. Για τον λόγο αυτό προτιμάται η τοποθέτηση των ανιχνευτών σε μεγάλες γωνίες σκέδασης (κοντά στις 180°).

Θα δούμε τώρα (Εικόνα 1.3) την σχέση της ενέργειας του ανιχνευόμενου σωματιδίου (E_1) σε σχέση με το βάθος του δείγματος στο οποίο αυτό σκεδάστηκε (x). Προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις που περιγράφουν την διαδρομή εισόδου και την διαδρομή εξόδου από το δείγμα αντίστοιχα.



Εικόνα 1.3: Γεωμετρία πειράματος οπισθοσκέδασης, όπου φαίνεται η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου καθώς αυτό διανύει το μέσο [2]

$$\frac{x}{\cos \theta_1} = - \int_{E_0}^E \frac{dE}{\frac{dE}{dx}} \quad \text{Σχέση 1.9}$$

$$\frac{x}{\cos \theta_2} = - \int_{KE}^{E_1} \frac{dE}{\frac{dE}{dx}} \quad \text{Σχέση 1.10}$$

Θεωρώντας ότι το $\frac{dE}{dx}$ είναι σε κάθε περίπτωση γνωστή συνάρτηση της ενέργειας, κατά την είσοδο και κατά την έξοδο των σωματιδίων, μπορεί να υπολογιστεί η διαφορά στην ενέργεια ενός σωματιδίου που ανιχνεύτηκε μετά από σκέδαση στην επιφάνεια του στόχου και ενός σωματιδίου που ανιχνεύτηκε μετά από σκέδαση σε βάθος x . Αν η διαφορά των δύο ενεργειών είναι ΔE για στόχο που αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο είναι:

$$\Delta E = [S]x \quad \text{Σχέση 1.11}$$

όπου η ποσότητα $[S]$ είναι ο παράγοντας απώλειας ενέργειας (energy loss factor) και ισούται με:

$$[S] = \left[K \left(\frac{dE}{dx} \right)_{in} \frac{1}{\cos \theta_1} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{out} \frac{1}{\cos \theta_2} \right] \quad \text{Σχέση 1.12}$$

ή αλλιώς (από Σχέση 1.6):

$$\Delta E = [\varepsilon]Nx \quad \text{Σχέση 1.13}$$

όπου το $[\varepsilon]$ είναι ο παράγοντας ενεργού διατομής ανάσχεσης (stopping cross section factor):

$$[\varepsilon] = \left[\frac{K}{\cos\theta_1} \varepsilon_{in} + \frac{1}{\cos\theta_2} \varepsilon_{out} \right] \quad \text{Σχέση 1.14}$$

Το K στις παραπάνω σχέσεις είναι ο κινηματικός παράγοντας και οι θ_1, θ_2 οι γωνίες που φαίνονται στην Εικόνα 1.3.

Στην περίπτωση που ο στόχος αποτελείται από πολλά στοιχεία η εξάρτηση της ανιχνευόμενης ενέργειας από το βάθος υπολογίζεται για κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

Για στόχο σύνθεσης $A_m B_n$ με μοριακή πυκνότητα N^{AB} (μόρια/cm³) και με τα αντίστοιχα K και ε , η ολική ενεργός διατομή ανάσχεσης ε_0 δίνεται από την Σχέση 1.7. Οπότε τελικά ο παράγοντας ενεργού διατομής ανάσχεσης είναι:

$$[\varepsilon]_A^{AB} = \left[K_A \varepsilon_{in}^{AB} \frac{1}{\cos\theta_1} + \varepsilon_{out,A}^{AB} \frac{1}{\cos\theta_2} \right] \quad \text{Σχέση 1.15}$$

Οι άνω δείκτες αναφέρονται στο υλικό του στόχου ενώ οι κάτω στον πυρήνα από τον οποίο έγινε η σκέδαση. Κατά την εισχώρηση στο υλικό το ε_{in} είναι ίδιο για όλα τα είδη των στοιχείων. Κατά την έξοδο όμως διαφέρει αφού η ενέργεια αμέσως μετά την σκέδαση είναι διαφορετική αφού εξαρτάται από το K (δηλαδή από την μάζα του πυρήνα του στόχου).

Η εξάρτηση της ανιχνευόμενης ενέργειας ΔE από το βάθος (x) στο οποίο έγινε η σκέδαση από πυρήνα A είναι τελικά:

$$\Delta E_A = [\varepsilon]_A^{AB} N^{AB} x \quad \text{Σχέση 1.16}$$

Ύψος φάσματος

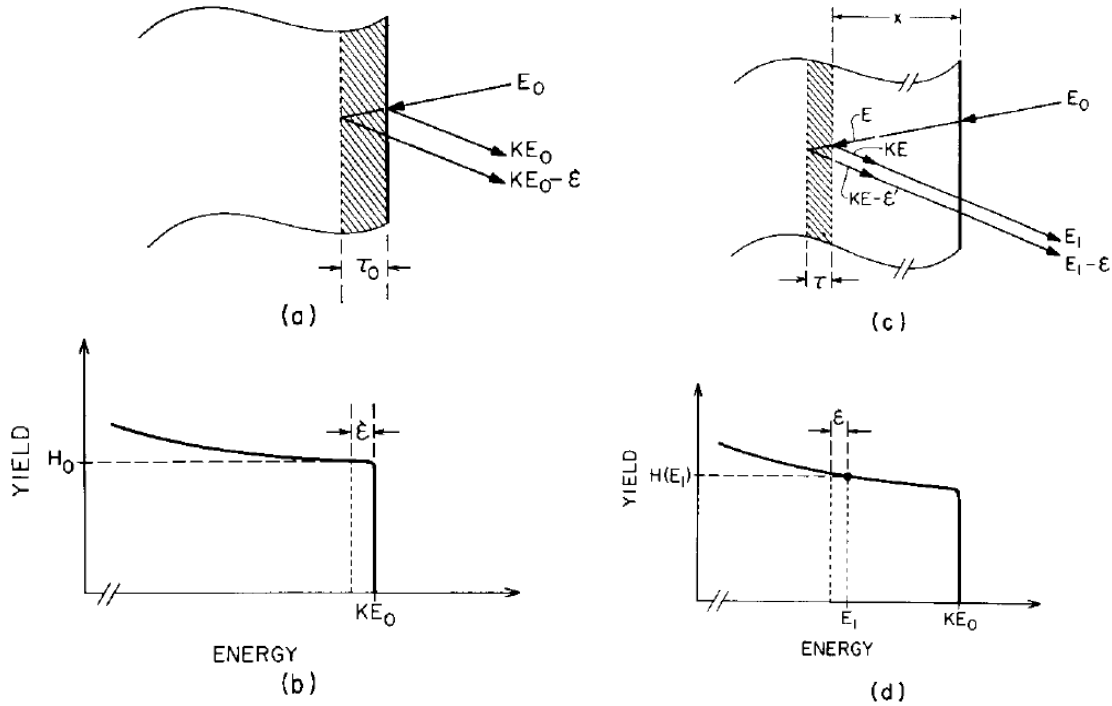
Τα σήματα από τα ανιχνευόμενα σωματίδια καταχωρούνται σε κανάλια ανάλογα με την τιμή της ενέργειας τους. Έτσι σχηματίζεται το φάσμα που λαμβάνουμε, το ύψος του οποίου σε κάθε σημείο αντιστοιχεί στον αριθμό των σωματιδίων που μετρήθηκαν στο ενεργειακό διάστημα \mathcal{E} του συγκεκριμένου καναλιού.

Το ύψος της κορυφής ενός στοιχείου κοντά στην επιφάνεια του στόχου (αποτελούμενου από μόνο ένα στοιχείο) που αντιστοιχεί σε ανιχνευόμενα σωματίδια ενέργειας E_1 , δίνεται από τον τύπο

$$H(E_1) = \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) Q \Omega \frac{\mathcal{E}}{[\varepsilon(E)] \cos\theta_1} \quad \text{Σχέση 1.17}$$

όπου $\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta)$ είναι η ενεργός διατομή της αντίδρασης σε γωνία σκέδασης θ , E η ενέργεια του σωματιδίου ακριβώς πριν την σκέδαση, $[\varepsilon(E)]$ ο παράγοντας απώλειας ενέργειας, Q ο συνολικός αριθμός σωματιδίων της δέσμης που έπεσαν στον στόχο και Ω η στερεά γωνία ανίχνευσης.

Το κλάσμα $\frac{\varepsilon}{[\varepsilon(E)]}$ είναι η επιφανειακή πυκνότητα N_i που αντιστοιχεί σε ένα κανάλι του φάσματος.



Εικόνα 1.4: Διαδικασία οπισθοσκέδασης και το αντίστοιχο φάσμα. Αριστερά σκέδαση από την επιφάνεια του στόχου, δεξιά σκέδαση από βάθος x [2]

Στην περίπτωση που ο στόχος αποτελείται από περισσότερα στοιχεία (έστω $A_m B_n$) το ύψος του φάσματος ενός στοιχείου (έστω του A) είναι

$$H(E_1) = \frac{d\sigma_A}{d\Omega}(E, \theta) Q \Omega \frac{m\varepsilon}{[\varepsilon(E)]_A^{AB} \cos\theta_1} \quad \text{Σχέση 1.18}$$

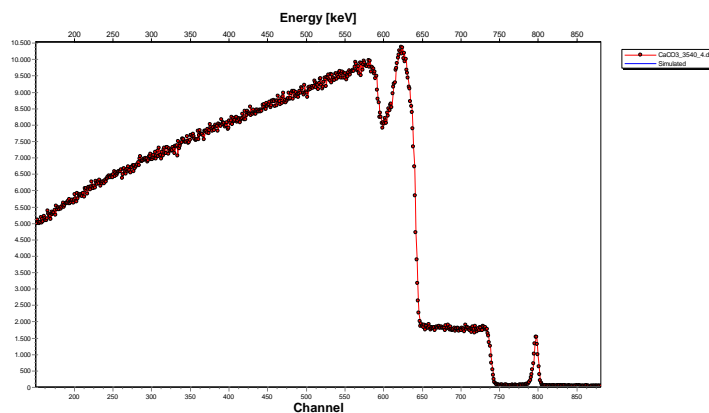
Φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης

Η RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) και η γενική περίπτωση EBS (Elastic Backscattering Spectrometry) είναι τεχνικές IBA (Ion Beam Analysis) για την στοιχειομετρική ανάλυση υλικών. Στην RBS εξάγονται συμπεράσματα από την ανίχνευση σωματιδίων που προέρχονται από σκέδαση Rutherford, ενώ στην EBS γενικά από ελαστική σκέδαση. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται προκειμένου να προσδιοριστεί ποσοτικά και να αναλυθεί σε βάθος ένα άγνωστο δείγμα χωρίς όμως να καταστραφεί.

Καθώς τα δείγματα προς εξέταση είναι μεγάλου πάχους (μη διαπερατά από την δέσμη), οι ανιχνευτές τοποθετούνται σε μεγάλες γωνίες σκέδασης ($>90^\circ$) ώστε να ανιχνεύουν τα εκεί σκεδαζόμενα σωματίδια και με βάση την ενέργεια και την ενεργό διατομή τους να προσδιοριστεί το είδος των πυρήνων του δείγματος συνεπώς και το υλικό.

Οι τεχνικές που αναφέρθηκαν παρέχουν την δυνατότητα ανάλυσης σε βάθος λόγω της απώλειας ενέργειας από τις αλληλεπιδράσεις με τα ηλεκτρόνια του στόχου (σε ποσοστό $>98\%$ για κάθε τυπική ενέργεια δέσμης). Οπότε η ενέργεια ενός σωματιδίου πριν την σκέδαση εξαρτάται από το βάθος που αυτό θα έχει διανύσει έως ότου σκεδαστεί. Επίσης μετά την σκέδαση καθώς εξέρχεται από το υλικό το σωματίδιο χάνει επιπλέον ενέργεια. Τελικά η ενέργεια των ανιχνευόμενων σωματιδίων σε μια συγκεκριμένη γωνία θα έχει ένα εύρος ΔE ανάλογο της κατανομής των πυρήνων που προκάλεσαν τη σκέδαση, δηλαδή του πάχους του υπό μελέτη στοιχείου. Αν ο στόχος είναι λεπτός, δηλαδή αν χάνουν μικρή ποσότητα ενέργειας τα σωματίδια της δέσμης μέσα του πριν και μετά τη σκέδαση τότε στο φάσμα που καταγράφει ο ανιχνευτής θα έχουμε μια λεπτή κορυφή. Αν όμως ο στόχος είναι απείρου πάχους (σταματάει μέσα του η δέσμη) τότε ανιχνεύουμε και σωματίδια που προέκυψαν από σκέδαση βαθιά στο στόχο με ακραίο σημείο αυτά που φτάνουν στον ανιχνευτή μας με σχεδόν μηδενική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή το φάσμα εκτείνεται από την μέγιστη ενέργεια σκέδασης που αντιστοιχεί σε σκεδάσεις στην επιφάνεια του στόχου μέχρι σχεδόν το μηδέν (Εικόνα 1.5).

Από τις Σχέσεις 1.17 και 1.18 είδαμε ότι το ύψος της καμπύλης (ο αριθμός των ανιχνευόμενων σωματιδίων σε κάποια ενέργεια) εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των σωματιδίων της δέσμης που φτάνουν στο στόχο (Q) και τη διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης σε αυτή την ενέργεια. Όμως εξαρτάται και από τον αριθμό των πυρήνων του στοιχείου του στόχου (N_i) στο συγκεκριμένο βάθος. Έτσι λοιπόν μπορούν να βγουν συμπεράσματα για τη σε βάθος κατανομή κάποιου στοιχείου.



Εικόνα 1.5: Φάσμα (παχύς στόχος CaCO_3 με λεπτό στρώμα χρυσού στην επιφάνεια) χαρακτηριστικό των όσων αναφέρονται παραπάνω. Το λεπτό στρώμα Au είναι η κορυφή στα δεξιά με το εύρος της να εξαρτάται από το πάχος του στρώματος. Αντίθετα οι καμπύλες των υπόλοιπων στοιχείων του απείρου πάχους στόχου εκτείνονται μέχρι το μηδέν.

Κεφάλαιο 2

Έλεγχος αξιοπιστίας και αξιολόγηση ενεργών διατομών

Λόγω της σημασίας των ενεργών διατομών και της ακρίβειας που χρειαζόμαστε στην εκτίμησή τους κρίνεται αναγκαίο να γίνουν συμπληρωματικά πειράματα για τον έλεγχο της ορθότητάς τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων γενικά για την συμπεριφορά τους (benchmarking experiments). Ένα τέτοιο πείραμα πραγματοποιείται η παρούσα εργασία.

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά αναλύεται η έννοια του ελέγχου αξιοπιστίας (benchmarking) ενεργών διατομών, έπειτα παρουσιάζονται οι μέθοδοι και τα εργαλεία για την επίτευξη του και τέλος εξηγείται ο τρόπος που επιλέχθηκε να υλοποιηθεί στο πείραμα που πραγματοποιείται η παρούσα εργασία.

2.1 Benchmarking σε ελαστική σκέδαση

Το benchmarking είναι ένα πείραμα που γίνεται για τον έλεγχο της ορθότητας ήδη μετρημένων ενεργών διατομών κάποιου στοιχείου σε συγκεκριμένες γωνίες. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας σύγκριση των φασμάτων που έχουν προκύψει από ελαστική οπισθοσκέδαση σε παχύ, ομοιόμορφο στόχο γνωστής σύνθεσης, με προσομοιώσεις φασμάτων που βασίζονται σε δεδομένα από παλαιότερες μετρήσεις ενεργών διατομών ή από θεωρητικά δεδομένα που είναι βασισμένα στη θεωρία R-matrix και είναι προσαρμοσμένα σε προϋπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις (evaluated data). Τα δεδομένα αυτά παρέχονται στη διεθνή επιστημονική κοινότητα μέσω της βιβλιοθήκης IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) υπό την αιγίδα της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (IAEA – International Atomic Energy Agency). Είναι σημαντικό ότι η διαδικασία του benchmarking γίνεται ακριβώς στις ίδιες συνθήκες που υφίστανται και σε μια διαδικασία μέτρησης ενός δείγματος άγνωστης στοιχειομετρίας, μια που στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων τα προς ανάλυση δείγματα είναι παχείς στόχοι (απείρου πάχους ως προς τις τυπικές ενέργειες ιόντων δέσμης) που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές IBA.

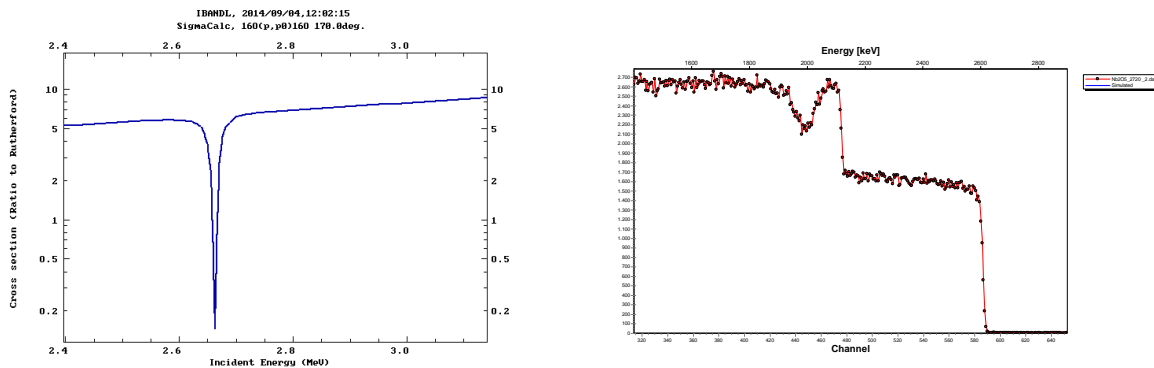
Το γεγονός ότι το πείραμα γίνεται σε παχύ στόχο παρέχει το πλεονέκτημα ότι λόγω της απώλειας ενέργειας της δέσμης καθώς τα ιόντα εισχωρούν στο υλικό, σαρώνεται μια αρκετά μεγάλη ενεργειακή περιοχή. Οπότε σε αντίθεση με ένα πείραμα για την μέτρηση μιας ενεργού διατομής που σε κάθε ενέργεια δέσμης μετράται η ενεργός διατομή αυστηρά σε αυτή την ενέργεια, κάθε μέτρηση benchmarking μπορεί να εξαγάγει συμπεράσματα για ένα εύρος ενεργειών από την ενέργεια δέσμης και κάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο εξηγήθηκε η επίδραση του ενεργειακού διασκεδασμού (energy straggling) και της ισχύος ανάσχεσης (stopping power) στην διαμόρφωση του φάσματος από παχύ στόχο. Από την Σχέση 1.18 φαίνεται ότι εάν στις προσομοιώσεις των φασμάτων ενσωματωθούν τα κατάλληλα μοντέλα υπολογισμού των επιδράσεων αυτών,

τότε η όποια περαιτέρω απόκλιση μπορεί να αποδοθεί σε λάθος μέτρηση των ενεργών διατομών.

Το ακριβέστερο μοντέλο για τον υπολογισμό της επίδρασης του straggling είναι η συνάρτηση Chu & Young και για το stopping power το μοντέλο των Ziegler-Biersack-Littmark [3] τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τελικά. Έχει διαπιστωθεί όμως ότι σε μεγάλο ενεργειακό βάθος το μοντέλο των Chu & Young εξακολουθεί να έχει σημαντική απόκλιση από την πραγματικότητα. Θεωρείται επομένως ότι η σάρωση είναι αξιόπιστη σε ενεργειακό βάθος μέχρι 250 keV από την επιφάνεια και ότι σε μεγαλύτερο βάθος η αβεβαιότητα μεγαλώνει και δεν μπορούν να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα όσον αφορά την αξιοπιστία των υπό έλεγχο ενεργών διατομών[3].

Στα φάσματα που λαμβάνονται από ένα τέτοιο πείραμα λοιπόν αναμένεται το στοιχείο που εξετάζεται να έχει ποιοτικά παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της ενεργού διατομής (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Το “βύθισμα” της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{16}\text{O}(p,p)^{16}\text{O}$ καταγράφεται στο φάσμα από οπισθοσκέδαση σε παχύ στόχο Nb_2O_5 στην ίδια ενεργειακή περιοχή

2.2 Βιβλιοθήκη δεδομένων και εργαλεία προσομοίωσης

Πριν προχωρήσουμε σε λεπτομέρειες για το θέμα της εργασίας, θα αναφερθούμε στην ενότητα αυτή στις πηγές δεδομένων και τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση των μετρήσεων και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

IBANDL

Το κύριο ζητούμενο του benchmarking είναι η αξιολόγηση παλαιότερων μετρήσεων. Η διαδικτυακή βιβλιοθήκη δεδομένων IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [4] παρέχει πειραματικά δεδομένα ενεργών διατομών για πυρηνικές αντιδράσεις. Είναι εύχρηστη και μπορεί να αναζητήσει κανείς στην διαθέσιμη βιβλιογραφία τις μετρήσεις ενεργών διατομών που έχουν γίνει για συγκεκριμένα στοιχεία και σε συγκεκριμένες γωνίες και ενέργειες.

Στην ιστοσελίδα παρέχεται επίσης και το online λογισμικό SigmaCalc, το οποίο παρουσιάζει τους θεωρητικούς υπολογισμούς που προαναφέρθηκαν.

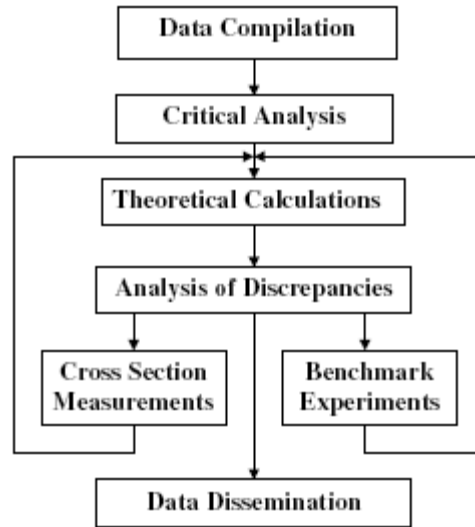
SigmaCalc

Το λογισμικό SigmaCalc αναπτύχθηκε προκειμένου να παρέχει στις τεχνικές IBA ένα εργαλείο θεωρητικού υπολογισμού των διαφορικών ενεργών διατομών στα πλαίσια της θεωρίας R-matrix, παράμετροι της οποίας ρυθμίζονται από πειραματικές μετρήσεις διαφορικών ενεργών διατομών.

Αν και εκτελούνται πειράματα για τον υπολογισμό των ενεργών διατομών και υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση αποτελεσμάτων στις βάσεις δεδομένων, αυτά πρέπει να αξιολογηθούν στα πλαίσια ενός θεωρητικού προτύπου πριν γίνει γενικευμένη χρήση. Ο λόγος είναι ότι η ανάλυση της υπάρχουσας πληροφορίας από τα πειράματα έδειξε αρκετές αποκλίσεις από τις τιμές των ενεργών διατομών που ξεπερνούν τα όρια του σφάλματος. Επιπλέον, λόγω της εξάρτησης της ενεργού διατομής από την γωνία σκέδασης, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι έγκυρα μόνο στην περίπτωση που η γεωμετρία σκέδασης είναι παρόμοια με την γεωμετρία του πειράματος κατά την μέτρηση της ενεργού διατομής.

Συνοπτικά η διαδικασία αξιολόγησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [5]:

- Αρχικά γίνεται αναζήτηση στην βιβλιογραφία ώστε να συλλεχθούν σχετικά πειραματικά δεδομένα.
- Τα δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές συγκρίνονται λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες των πειραμάτων και τα σφάλματα των δεδομένων.
- Επιλέγονται τελικά τα δεδομένα που κρίνονται πιο αξιόπιστα.
- Οι υπολογισμοί του μοντέλου χρησιμοποιούνται ώστε να παραχθεί η βέλτιστη θεωρητική διαφορική ενεργός διατομή. Έτσι οι μετρήσεις που έγιναν κάτω από διαφορετικές συνθήκες και σε διαφορετικές γωνίες σκέδασης ενσωματώνονται στα πλαίσια μιας ενιαίας θεωρητικής προσέγγισης.
- Τέλος συγκρίνονται τα προϊόντα αυτής της διαδικασίας με τα πειραματικά σημεία και αναλύονται οι όποιες αποκλίσεις. Αν δεν μπορεί να βρεθεί εξήγηση, τότε επαναλαμβάνεται η επιλογή των αξιόπιστων δεδομένων.



Εικόνα 2.2: Τα βήματα της αξιολόγησης των διαθέσιμων ενεργών διατομών από το SigmaCalc

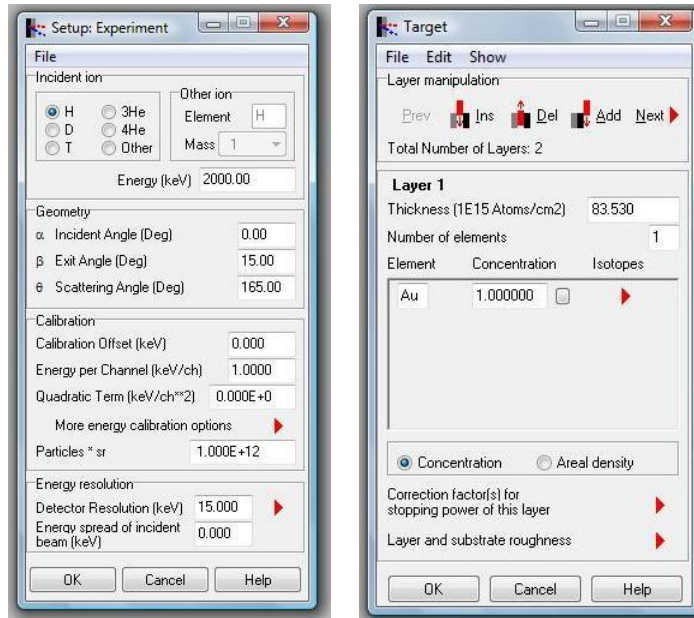
Στο πείραμά μας χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση -όπου υπήρχαν διαθέσιμα- αξιολογημένα πειραματικά δεδομένα από την έκδοση SigmaCalc 2.0. Στις περιπτώσεις που δεν υπήρχαν δεδομένα από το SigmaCalc αναγράφεται η πηγή.

SIMNRA

Οι προσομοιώσεις που χρειάστηκαν για την σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα παρήχθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης SIMNRA [6]. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να ενσωματώσει δεδομένα ενεργών διατομών από πειράματα ή από το SigmaCalc, και με την κατάλληλη εισαγωγή από τον χρήστη, των παραμέτρων του πειράματος να κάνει αναλυτική προσομοίωση του αναμενόμενου φάσματος.

Οι κύριες παράμετροι που εισάγονται από τον χρήστη στο πρόγραμμα είναι οι εξής:

- Το είδος και η ενέργεια της δέσμης
- Η μορφή και η σύνθεση του στόχου
- Η γεωμετρία του πειράματος
- Οι παράμετροι βαθμονόμησης του ανιχνευτή
- Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution) του ανιχνευτή
- Το φορτίο $Q\Omega$ (δηλαδή το πόσα σωματίδια της δέσμης πέφτουν στον στόχο επί την στερεά γωνία ανίχνευσης)



Εικόνα 2.3: Τα πεδία εισαγωγής των παραμέτρων του πειράματος στο SIMNRA

Επίσης όπως αναφέρθηκε το πρόγραμμα μπορεί να λαμβάνει υπόψιν τις επιπτώσεις από τον ενεργειακό διασκεδασμό αλλά και διπλές και πολλαπλές σκεδάσεις (dual and multiple scattering).

2.3 Benchmarking σε Si, Ca και O

Στο συγκεκριμένο πείραμα τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για να γίνει ο έλεγχος αξιοπιστίας των διαφορικών ενεργών διατομών ήταν το πυρίτιο (Si), το ασβέστιο (Ca) και το οξυγόνο (O) με χρήση δέσμης πρωτονίων. Δηλαδή μελετώνται οι αντιδράσεις:

- $\text{Si}(p,p)\text{Si}$
- $\text{Ca}(p,p)\text{Ca}$
- $\text{O}(p,p)\text{O}$

Κοινό χαρακτηριστικό και των τριών στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε τεχνολογικές εφαρμογές και υπήρχε ανάγκη να συμπληρωθεί η βιβλιογραφία με τέτοιου τύπου μετρήσεις. Επίσης οι προσπάθειες που έγιναν στο παρελθόν για να μετρηθεί το πυρίτιο και το οξυγόνο δεν ήταν επιτυχημένες. Τα πρωτόνια επιλέχθηκαν λόγω της δυνατότητας τους να εισχωρούν σε μεγάλο βάθος στο υλικό σε σύγκριση με άλλα βαρύτερα ιόντα (μικρότερη απώλεια ενέργειας).

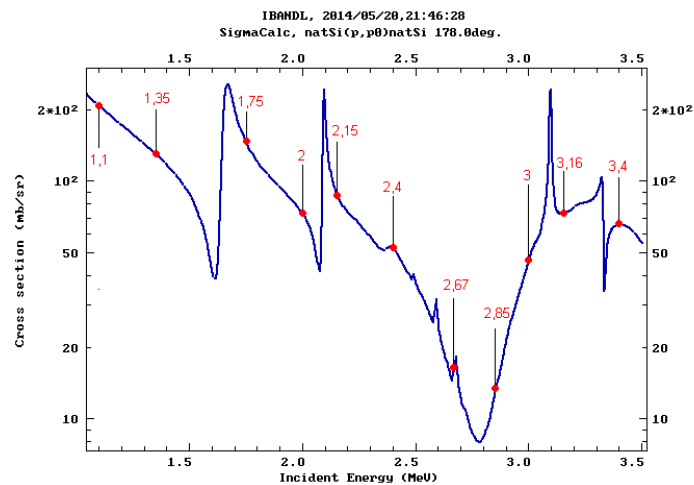
Για να γίνει το πείραμα έπρεπε να επιλεγθούν τα κατάλληλα υλικά για την κατασκευή των στόχων. Στην περίπτωση του πυριτίου προτιμήθηκε Si σε σκόνη η οποία συμπίεστηκε στην πρέσα του εργαστηρίου. Ο λόγος που επιλέχθηκε η σκόνη είναι ότι σε

παλαιότερες απόπειρες που είχαν γίνει με στόχο κρυσταλλικού πυριτίου παρατηρήθηκαν φαινόμενα διαυλισμού (channeling effects). Τελικά και ο στόχος από σκόνη δημιούργησε προβλήματα τα οποία αναλύονται εκτενέστερα στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων. Για το ασβέστιο επιλέχθηκε στόχος από CaCO_3 και για το οξυγόνο στόχος από Nb_2O_5 . Προκειμένου να αποφανθούμε για τις διαφορές στις εκτιμήσεις των ενεργών διατομών είναι απαραίτητο να μπορούμε με ασφάλεια να προσδιορίσουμε το ύψος του φορτίου $Q\Omega$ (Σχέση 1.18). Για αυτό χρειάζεται η ύπαρξη ενός στοιχείου του οποίου τα σκεδαζόμενα πρωτόνια να προέρχονται αποκλειστικά από σκέδαση Rutherford, οπότε να μπορεί να λειτουργεί κάθε φορά ως σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό του $Q\Omega$. Στον στόχο του οξυγόνου τον ρόλο αυτό τον παίζει το νιόβιο του οποίου η ενεργός διατομή είναι Rutherford σε όλη την ενεργειακή περιοχή που μελετάμε. Στις ενώσεις του πυριτίου και του ασβεστίου που χρησιμοποιήσαμε όμως δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο που να μπορεί να λειτουργήσει με αυτόν τον τρόπο. Για τον λόγο αυτό δημιουργήσαμε με εξάχνωση ένα λεπτό στρώμα χρυσού στην επιφάνεια των δύο στόχων. Η ενεργός διατομή του χρυσού είναι Rutherford οπότε γνωρίζοντας το πάχος του μπορεί να κανονικοποιηθεί το $Q\Omega$.

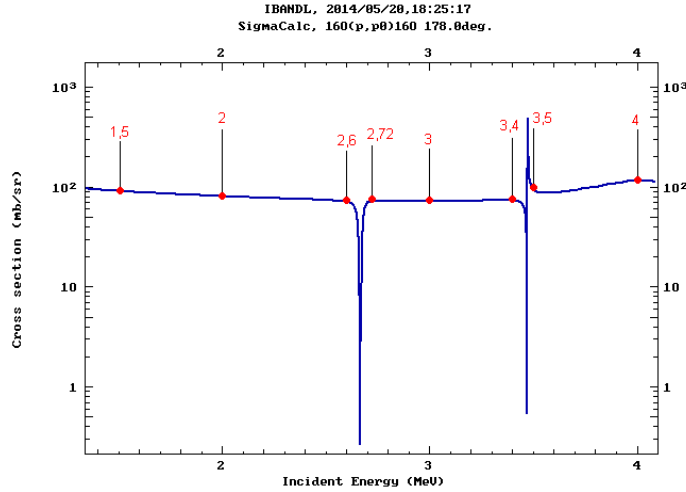
Επιλογή ενεργειών δέσμης

Από την στιγμή που το ζητούμενο στο πείραμα είναι η αξιοπιστία των μετρήσεων σε ενεργές διατομές που αποκλίνουν από την πρόβλεψη του Rutherford, η επιλογή των ενεργειών στις οποίες θα ληφθούν τα φάσματα πρέπει να γίνει κοντά στις ενεργειακές περιοχές με ενδιαφέρον. Αποφασίστηκε σε γενικές γραμμές η επιλογή των σημείων να γίνει πριν και μετά τους συντονισμούς αλλά και σε ενδιάμεσες περιοχές για να “σαρωθεί” επαρκώς όλο το ενεργειακό φάσμα.

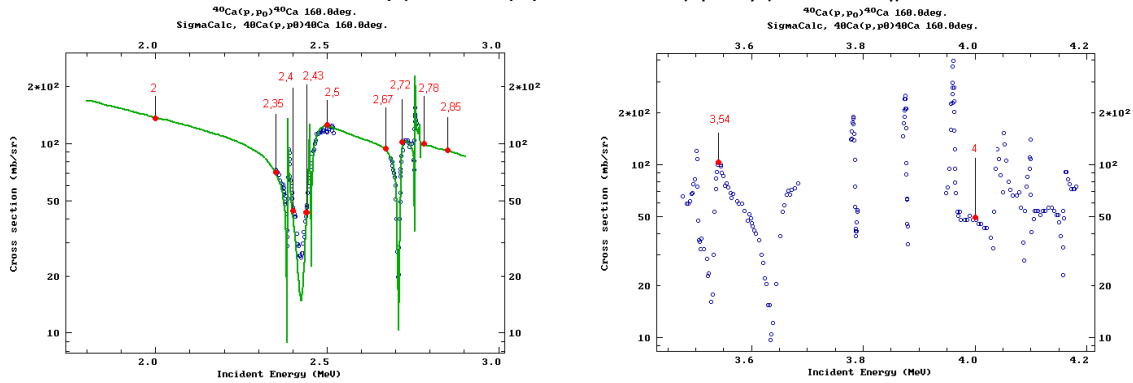
Εξετάζοντας τα δεδομένα που παρέχονται από την διαδικτυακή βιβλιοθήκη IBANDL, εντοπίστηκαν τα σημεία με αυτά τα χαρακτηριστικά (Εικόνες 2.4, 2.5, 2.6).



Εικόνα 2.4: Ενεργός διατομή Si και επιλογή ενεργειακών σημείων



Εικόνα 2.5: Ενεργός διατομή O και επιλογή ενεργειακών σημείων



Εικόνα 2.6: Ενεργός διατομή Ca και επιλογή ενεργειακών σημείων

Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια ομαδοποίησης των σημείων, όπου αυτό ήταν δυνατό, με σκοπό να περιοριστεί ο αριθμός τους. Τελικά καταλήξαμε στις παρακάτω ενέργειες όπως αυτές φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

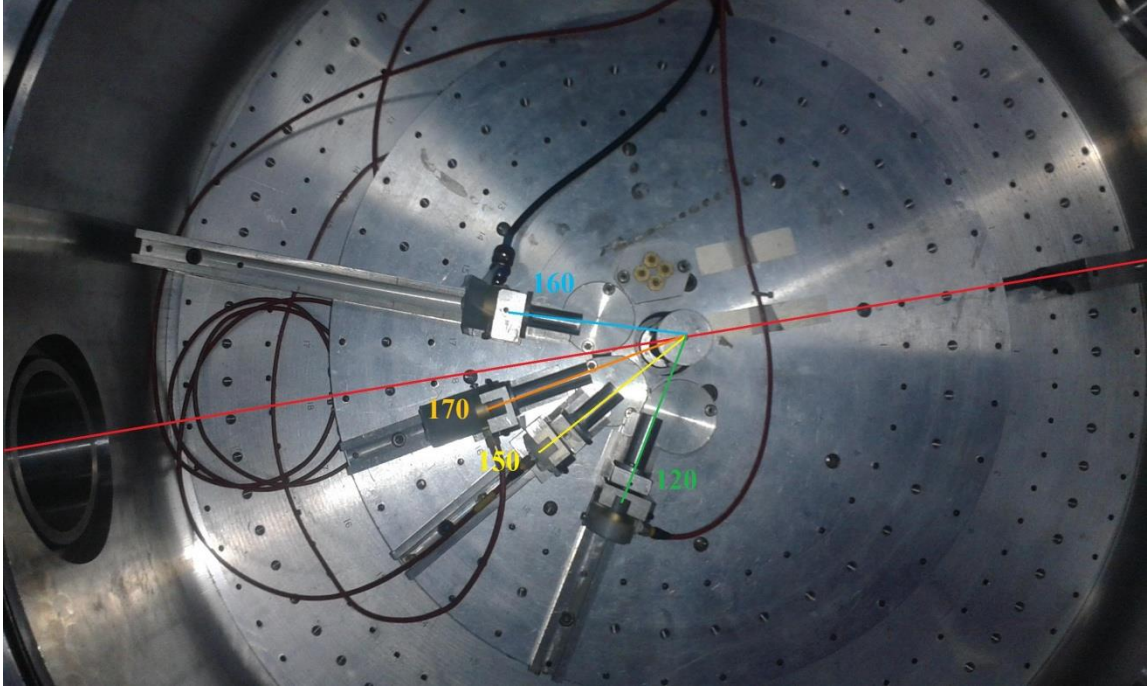
Πίνακας 2.1

Energy (keV)	O	Si	Ca
1100		X (Ruth)	
1500	X	X	
1750		X	X (Ruth)
2000	X	X	X (Ruth)
2150		X	
2350			X
2400		X	X
2430			X
2500			X
2600	X		
2670		X	X
2720	X		X
2780			X
2850		X	X
3000	X	X	X
3160		X	
3400	X	X	
3500	X		
3540			X
3600		X	
4000	X	X	X

Η σήμανση (Ruth) σημαίνει ότι στην συγκεκριμένη ενέργεια η ενεργός διατομή είναι Rutherford. Στο Κεφάλαιο 4 εξηγείται ο λόγος που κατέστησε απαραίτητη τη λήψη φασμάτων Si και Ca σε περιοχή Rutherford.

Επιλογή γωνιών

Η αρχική ιδέα ήταν οι μετρήσεις να γίνουν με τρεις ανιχνευτές σε γωνίες 120°, 150° και 170° διότι με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται ικανοποιητικά η γωνιακή εξάρτηση των ενεργών διατομών. Εξετάζοντας όμως τα δεδομένα που παρέχονται από την IBANDL, διαπιστώθηκε ότι η ενεργός διατομή του ασβεστίου έχει μετρηθεί ως επί το πλείστον στις 160 μοίρες. Τοποθετήθηκε λοιπόν ένας τέταρτος ανιχνευτής σε αυτή την γωνία και μετρήθηκαν και τα τρία στοιχεία σε όλες τις γωνίες (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Τελική επιλογή γωνιών

Κεφάλαιο 3

Πειραματική Διάταξη

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” τον Ιούνιο του 2014. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μέρη της πειραματικής διάταξης.

3.1 Επιταχυντής

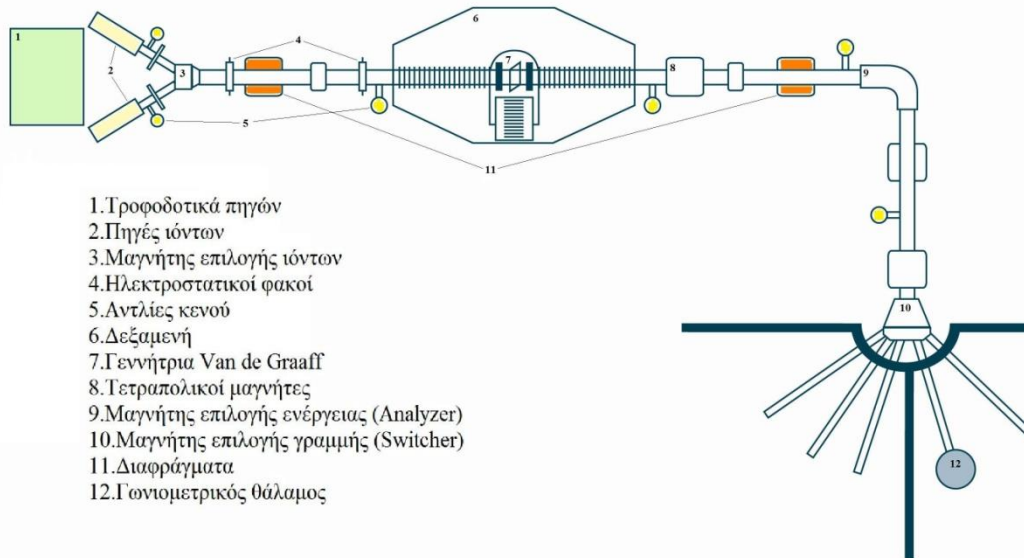
Για την παραγωγή της δέσμης των πρωτονίων χρησιμοποιήθηκε ο επιταχυντής του Ινστιτούτου [7], ο οποίος είναι ηλεκτροστατικός τύπου Tandem Van de Graaff και μπορεί να λειτουργήσει με μέγιστη διαφορά δυναμικού 5,5 MV.



Εικόνα 3.1: Η κεντρική δεξαμενή του επιταχυντή

Ο Επιταχυντής αποτελείται από 3 κύρια τμήματα

- Τις πηγές των ιόντων στην αρχή της γραμμής
- Την ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff η οποία βρίσκεται μέσα στην δεξαμενή του επιταχυντή και η οποία δημιουργεί την διαφορά δυναμικού για την επιτάχυνση των ιόντων.
- Τις 5 πειραματικές γραμμές στο τέλος της διάταξης.



1. Τροφοδοτικά πηγών
2. Πηγές ιόντων
3. Μαγνήτης επιλογής ιόντων
4. Ηλεκτροστατικοί φακοί
5. Αντλίες κενού
6. Δεξαμενή
7. Γεννήτρια Van de Graaff
8. Τετραπολικοί μαγνήτες
9. Μαγνήτης επιλογής ενέργειας (Analyzer)
10. Μαγνήτης επιλογής γραμμής (Switcher)
11. Διαφράγματα
12. Γωνιομετρικός θάλαμος

Εικόνα 3.2: Τα τμήματα του επιταχυντή

Τα ιόντα της δέσμης που παράγονται αρχικά από τις πηγές ιόντων είναι αρνητικά. Στην περίπτωση μας (δέσμη πρωτονίων) έχουμε ανιόντα υδρογόνου τα οποία σε πρώτη φάση επιταχύνθηκαν στον προεπιταχυντικό σωλήνα (μέγιστη ενέργεια 60 keV). Στην συνέχεια δέχθηκαν την κύρια επιτάχυνση λόγω της έλξης τους από την θετική τάση στην δεξαμενή. Πρόκειται ουσιαστικά για μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα η οποία φορτίζεται θετικά μέσω της γεννήτριας Van de Graaff. Στο μέσον της διαδρομής (πρακτικά στο κέντρο της σφαίρας), τα ανιόντα διέρχονται από ένα λεπτό φύλλο άνθρακα το οποίο λειτουργεί ως απογυμνωτής ηλεκτρονίων. Οπότε τελικά προκύπτουν κατιόντα (στην περίπτωση μας πρωτόνια) τα οποία απωθούνται από την ίδια με πριν θετική τάση, δεχόμενα με αυτόν τον τρόπο επιπλέον επιτάχυνση. Έπειτα η δέσμη υποβοηθούμενη από ένα σύστημα μαγνητών και τετραπόλων, όπως φαίνεται στο σχήμα, κατευθύνεται στην επιθυμητή πειραματική γραμμή αφού πρώτα γίνει κατά το μέγιστο δυνατό μονοενεργειακή με την στροφή 90° από τον μαγνήτη επιλογής ενέργειας (analyser).

Κάθε γραμμή καταλήγει σε ειδικό θάλαμο για τις ανάγκες του εκάστοτε πειράματος. Το πείραμα μας εκτελέστηκε στον θάλαμο της γραμμής που είναι σημειωμένη στο σχήμα (Εικόνα 3.2). Ο συγκεκριμένος θάλαμος ενδείκνυται για πειράματα RBS-EBS.

Όλα τα τμήματα του επιταχυντή βρίσκονται σε υψηλό κενό (10^{-5} - 10^{-6} Torr).

3.2 Γωνιομετρικός θάλαμος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η πειραματική γραμμή που επιλέχθηκε καταλήγει σε γωνιομετρικό θάλαμο που προσφέρεται για πειράματα οπισθοσκέδασης. Σε στήλη στο κέντρο του θαλάμου που μπορεί να μετακινείται καθέτως και να περιστρέφεται τοποθετήθηκαν οι στόχοι σε θέση κατάλληλη ώστε η δέσμη που εισέρχεται στον χώρο του θαλάμου να συγκρούεται μαζί τους. Υπήρχε χώρος για τους 3 στόχους που

κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες του πειράματος. Επιπλέον στην στήλη είναι εφαρμοσμένος μόνιμα ένας στόχος λείου πυριτίου (polished Si) και ένας παχύς στόχος Au. Περιμετρικά στον θάλαμο τοποθετήθηκαν οι 4 ανιχνευτές πυριτίου στις γωνίες σκέδασης που είχαν αποφασιστεί (120° , 150° , 160° και 170°).

Κατά την διάρκεια του πειράματος ο θάλαμος σκέδασης κλείνει και εφαρμόζεται υψηλό κενό. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν δύο αντλίες κενού, η μία (rotary) είναι για την επίτευξη χαμηλού κενού και η άλλη (turbo) για να φτάσουμε σε υψηλά επίπεδα κενού.



Εικόνα 3.3: Το εσωτερικό του γωνιομετρικού θαλάμου

3.3 Στόχοι

Για την κατασκευή των στόχων χρησιμοποιήθηκε η πρέσα που υπάρχει στο εργαστήριο του Ινστιτούτου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υλικό και των τριών στόχων (CaCO_3 , Si, Nb_2O_5) ήταν αρχικά σε μορφή σκόνης στην οποία ασκήθηκε μεγάλη πίεση (περίπου 7 τόνοι) για αρκετό χρόνο (περίπου 20 λεπτά ο κάθε στόχος), ώστε τελικά να σχηματιστούν οι στόχοι σε μορφή παστίλιας. Υπήρχε η πρόνοια για την αντιμετώπιση πιθανών απροόπτων να κατασκευαστούν 2 στόχοι από κάθε είδος. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν ήταν το ίδιο απλή η κατασκευή όλων των στόχων ανεξαρτήτως υλικού. Ενώ στα CaCO_3 και Nb_2O_5 δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα, δεν ίσχυσε το ίδιο και στην περίπτωση του πυριτίου, οι στόχοι του οποίου ήταν εξαιρετικά εύθραυστοι. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να γίνουν αρκετές αποτυχημένες απόπειρες κατασκευής, πριν καταφέρουμε τελικά να αποκτήσουμε στόχους που να μπορούν να είναι λειτουργικοί για το πείραμα. Για αυτό τον σκοπό αρχικά δοκιμάστηκε η αύξηση της πίεσης και του χρόνου παραμονής στην πρέσα, δίχως όμως το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η κατάσταση βελτιώθηκε όταν επιχειρήθηκε η μείωση της ποσότητας της σκόνης για την κατασκευή κάθε στόχου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι στόχοι που τελικά χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.



Εικόνα 3.4: Κατασκευή στόχου με την πρέσα του εργαστηρίου

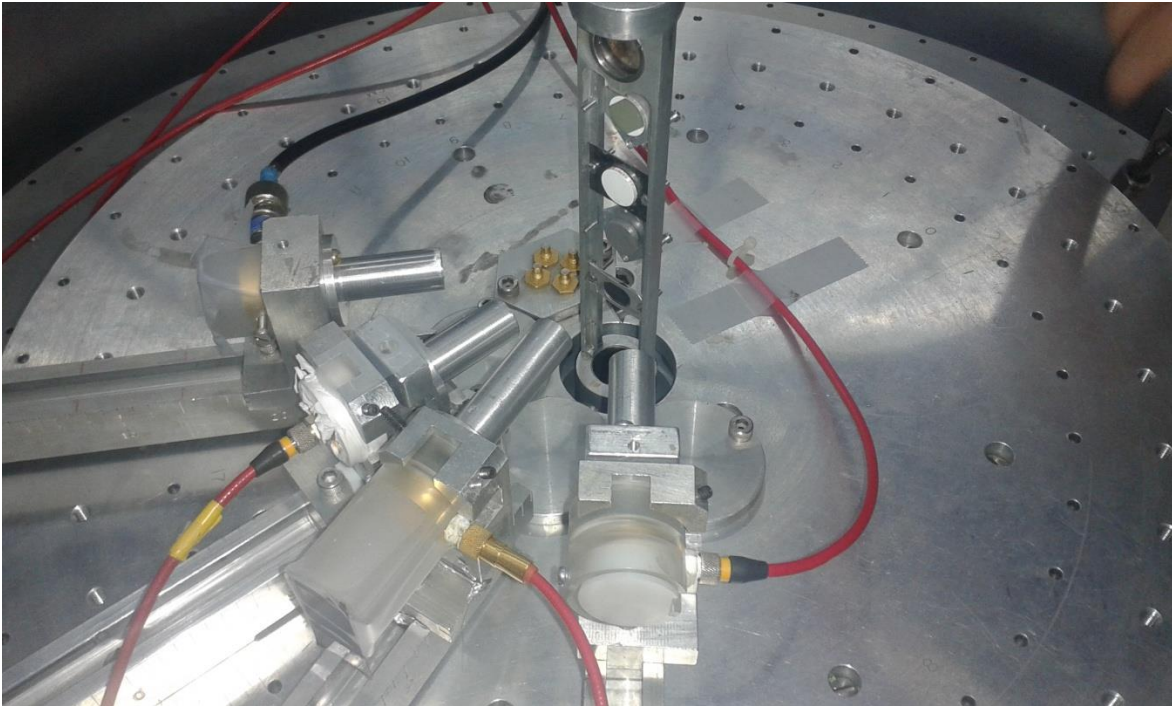
Το λεπτό στρώμα χρυσού στις επιφάνειες των στόχων πυριτίου και ανθρακικού ασβεστίου δημιουργήθηκε με την μέθοδο της εξάχνωσης. Χρησιμοποιήθηκε ο εξαχνωτήρας του εργαστηρίου. Οι στόχοι τοποθετήθηκαν με την προς εξάχνωση επιφάνεια προς τα κάτω σε ύψος περίπου 21 cm από χρυσό μάζας περίπου 70 mg. Μετά από την εφαρμογή υψηλού κενού στον χώρο του εξαχνωτήρα, ζεστάναμε τον χρυσό ώστε να εξαχνωθεί και να δημιουργήσει ένα λεπτό στρώμα στις επιφάνειες των στόχων.



Εικόνα 3.5: Ο θάλαμος του εξαχνωτήρα του εργαστηρίου σε κενό. Επάνω στο πυρακτωμένο μέταλλο βρίσκεται ο χρυσός προς εξάχνωση.

3.4 Ανιχνευτές

Σε όλες τις γωνίες τοποθετήθηκαν ανιχνευτές πυριτίου μεγάλου πάχους (1000 μm). Το πάχος του ανιχνευτή είναι σημαντικό να είναι αρκετό ώστε να σταματούν όλα τα σκεδαζόμενα πρωτόνια και να εναποθέτουν στους ανιχνευτές το σύνολο της ενέργειάς τους. Οι ανιχνευτές βιδώθηκαν στις κατάλληλες θέσεις-γωνίες στην γωνιομετρική βάση του θαλάμου. Μπροστά από την ενεργό επιφάνεια κάθε ανιχνευτή προσαρμόστηκε ορθογώνια μάσκα, ώστε να περιοριστεί η ενεργός περιοχή ανίχνευσης. Προκειμένου να εμποδιστεί η ανίχνευση σωματιδίων που προέρχονται από άλλες αιτίες (όπως η σκέδαση των πρωτονίων από τα τοιχώματα του θαλάμου) μπροστά από τις μάσκες στερεώθηκαν κυλινδρικού σχήματος κατευθυντήρες. Δηλαδή σωληνάκια από αλουμίνιο, τα οποία όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6 παρέχουν στους ανιχνευτές την απαιτούμενη πλάγια θωράκιση. Στους ανιχνευτές εφαρμόστηκε τάση λειτουργίας όπως αυτή έχει οριστεί από τον κατασκευαστή (Από 100 έως 300 V).

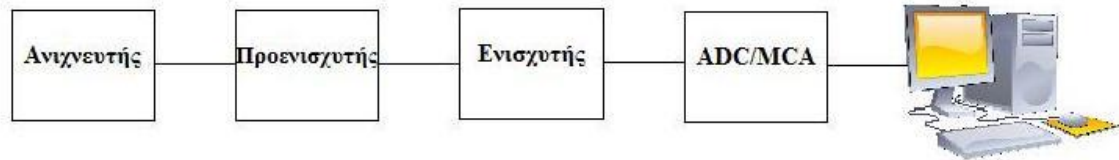


Εικόνα 3.6: Η θέση ανιχνευτών και στόχων στην πειραματική διάταξη

3.5 Ηλεκτρονικά

Το σήμα που λαμβάνει ο ανιχνευτής μετά από ένα γεγονός έχει ύψος ανάλογο της ενέργειας που ανιχνεύεται, όμως είναι πολύ ασθενές και χρειάζεται να διαμορφωθεί κατάλληλα από ένα σύστημα ηλεκτρονικών ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Αρχικά το σήμα ενισχύεται από έναν προενισχυτή (Pre-Amplifier) ώστε να μπορεί να διαχωριστεί από τον θόρυβο. Από την είσοδο bias του προενισχυτή

παρέχεται στον ανιχνευτή και η τάση λειτουργίας του. Έπειτα το σήμα περνάει από έναν ενισχυτή (Amplifier) για περαιτέρω ενίσχυση. Στην συνέχεια μέσω ενός ADC (Analog to Digital Converter) γίνεται μετατροπή σε ψηφιακή μορφή και μέσω ενός MCA (Multi-Channel Analyzer) γίνεται καταχώρησή του σε κατάλληλο κανάλι της μνήμης του υπολογιστή, ανάλογα με το ύψος του.



Εικόνα 3.7: Σχηματικά η ηλεκτρονική διάταξη

Για να είναι έτοιμη η διάταξη των ηλεκτρονικών είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί η ενίσχυση (gain) του ενισχυτή. Αυτό επιτεύχθηκε ακτινοβολώντας με πρωτόνια παχύ χρυσό στα 2000 keV και ρυθμίζοντας το gain από την μονάδα του ενισχυτή φροντίζοντας η άκρη του φάσματος να “πέφτει” περίπου στα μεσαία κανάλια. Τα σκεδαζόμενα πρωτόνια από χρυσό (βαρύ στοιχείο) έχουν ενέργεια κοντινή σε σχέση με την αρχική ενέργεια της δέσμης. Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν επιτυγχάνεται τα φάσματα που θα ληφθούν σε όλες τις ενέργειες (μέγιστη 4000 keV) να συμπεριλαμβάνουν τα σωματίδια από ολόκληρο το ενεργειακό φάσμα.

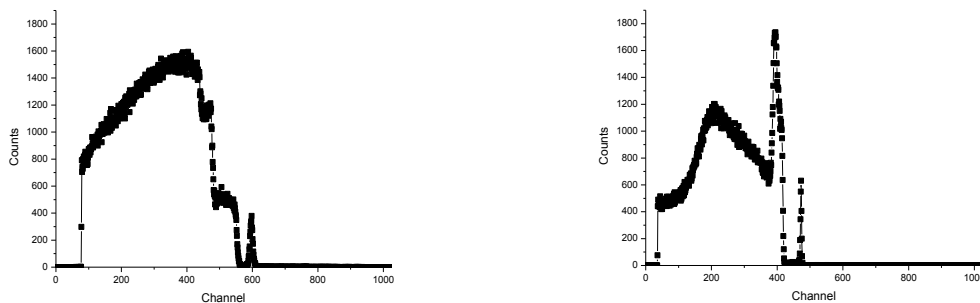
Κεφάλαιο 4

Μέθοδος και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό πρώτα προσδιορίζονται οι παράγοντες που είναι απαραίτητοι για την επεξεργασία των δεδομένων (gain και resolution ανιχνευτών) και που εγγυώνται την αξιοπιστία των μετρήσεων (βαθμονόμηση μηχανής). Στην συνέχεια εξηγείται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε στοιχείο. Αναλύονται επίσης τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και η εύρεση εναλλακτικών λύσεων στις περιπτώσεις που αυτά κρίθηκαν ανυπέρβλητα.

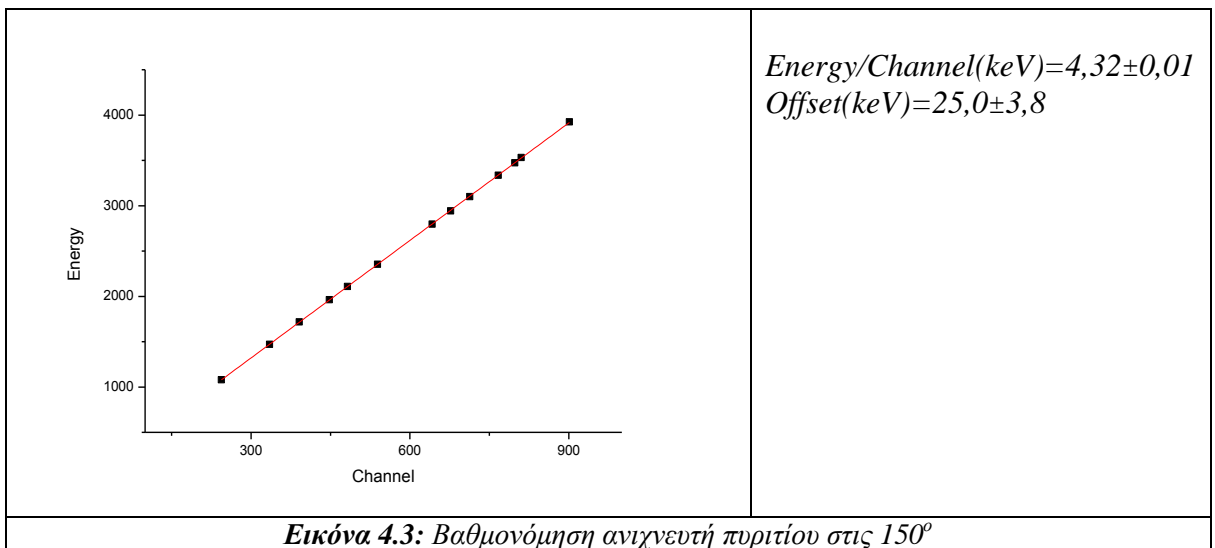
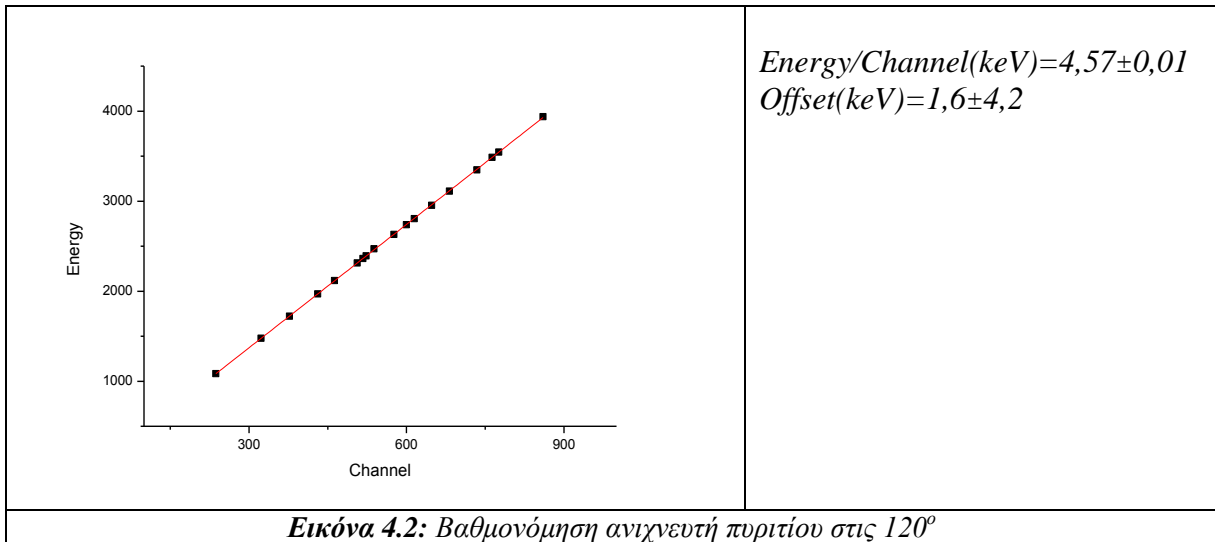
4.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση

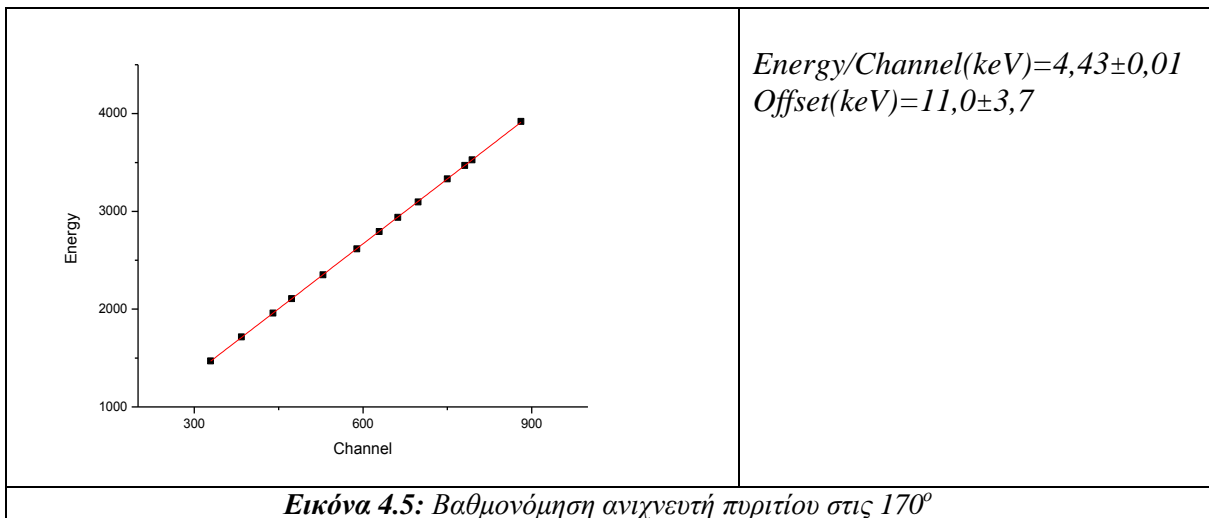
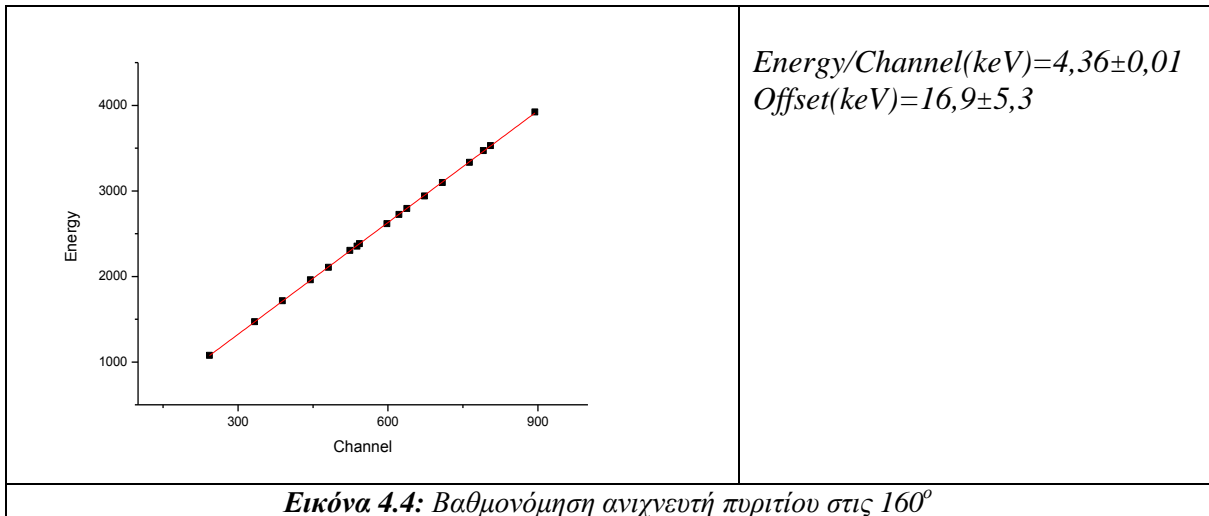
Στα φάσματα που ελήφθησαν τα σήματα από τους ανιχνευτές είναι καταχωρημένα σε κανάλια. Είναι απαραίτητο να βρεθεί η αντιστοιχία των καναλιών με την ενέργεια σε κάθε φάσμα. Τα κανάλια συνδέονται με τις αντίστοιχες ενέργειες σωματιδίων με γραμμικό τρόπο. Η ενεργειακή βαθμονόμηση πρέπει να γίνει κατά περίπτωση σε κάθε ανιχνευτή, καθώς η ρύθμιση της ενίσχυσης έγινε ξεχωριστά. Υπενθυμίζεται ότι η ενίσχυση ρυθμίστηκε ακτινοβολώντας χρυσό με πρωτόνια ενέργειας 2 MeV. Από την στιγμή που δεν υπήρξε κάποια σχετική αλλοίωση κατά την διάρκεια του πειράματος η βαθμονόμηση θα θεωρηθεί ίδια για όλα τα φάσματα που ελήφθησαν από κάθε ανιχνευτή. Για να γίνει η ενεργειακή βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν οι κορυφές του χρυσού από τα φάσματα που ελήφθησαν ακτινοβολώντας τους στόχους CaCO_3 και Si . Δηλαδή αντιστοιχήθηκαν τα κανάλια στα οποία βρίσκονται οι κορυφές με τις ενέργειες που από την θεωρία αναμενόταν να βρίσκονται.



Εικόνα 4.1: Αριστερά βλέπουμε φάσμα από στόχο CaCO_3 ($2670 \text{ keV}-160^\circ$) και δεξιά από στόχο Si ($2150 \text{ keV}-120^\circ$). Είναι εμφανείς οι κορυφές που οφείλονται στο λεπτό στρώμα Au και με βάση τις οποίες έγινε η αντιστοίχιση για την βαθμονόμηση των ανιχνευτών.

Έπειτα με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίστηκαν (με χρήση του προγράμματος Origin) οι αριθμοί a (Energy per channel) και b (Offset) της γραμμικής εξάρτησης $y=ax+b$ για κάθε ανιχνευτή. Ακολουθεί παράθεση των αποτελεσμάτων.

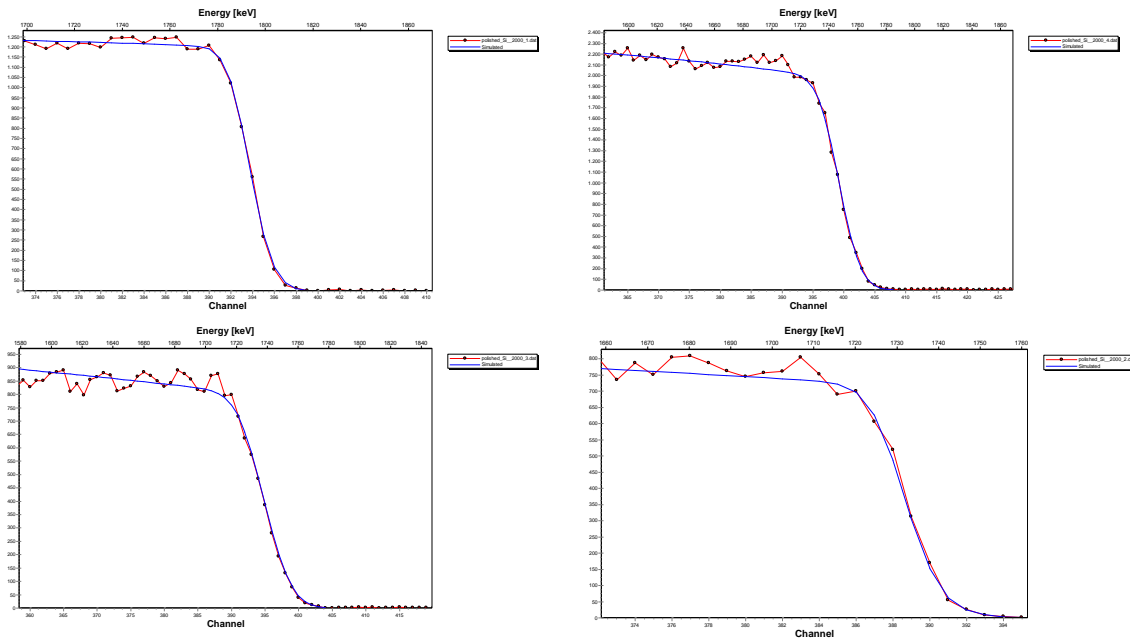




4.2 Προσδιορισμός της διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών

Για την εύρεση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας (resolution) των τεσσάρων ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν μετρήσεις ακτινοβολώντας τον στόχο λείου Si σε ενέργεια 2000 keV. Λόγω της λείας επιφάνειας του συγκεκριμένου στόχου στην μορφή των φασμάτων αυτών δεν συνεισφέρει η επιφανειακή τραχύτητα (roughness) οπότε μπορεί να προσδιοριστεί η resolution με αξιοπιστία. Αυτό γίνεται συγκρίνοντας τα πειραματικά φάσματα με τα αντίστοιχα προσομοιωμένα και μεταβάλλοντας κατάλληλα την resolution στο SIMNRA μέχρι να συμπέσουν οι άκρες των φασμάτων (οι οποίες αντιστοιχούν σε πρωτόνια που έχουν σκεδαστεί από την επιφάνεια του στόχου και που

σε μη λείους στόχους εμφανίζονται “φαγωμένες/διαβρωμένες” λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας).



Εικόνα 4.6: Τα φάσματα από στόχο λείου Si με την βοήθεια των οποίων υπολογίστηκε η resolution του κάθε ανιχνευτή. Με κόκκινο είναι σημειωμένα τα πειραματικά αποτελέσματα και με μπλε η προσομοίωση του SIMNRA. Έγινε προσπάθεια μεταβάλλοντας την resolution στην προσομοίωση, η μπλε γραμμή να πέσει ακριβώς πάνω στα πειραματικά σημεία.

Οι παράμετροι που καθορίστηκαν χαρακτηρίζουν τα φάσματα που ελήφθησαν σε κάθε γωνία και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως κατά την διάρκεια της επεξεργασίας (ως πληροφορίες για την προσομοίωση στο SIMNRA). Τα παραπάνω στοιχεία συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα συνοδευόμενα από επιπλέον πληροφορίες για τον κάθε ανιχνευτή.

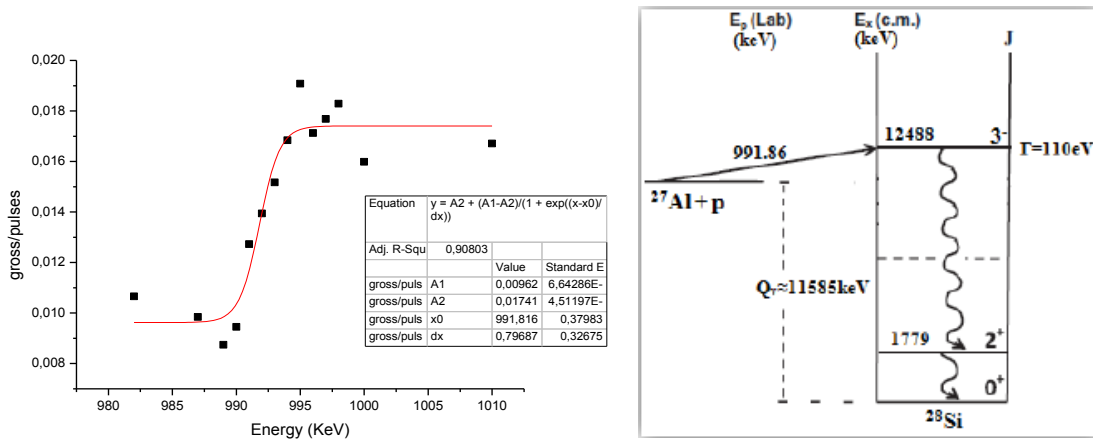
Πίνακας 4.1

Γωνία	Όνομα Ανιχνευτή	Πάχος (μm)	Τάση Λειτουργίας (V)	Energy/Channel (keV)	Offset (kev)	Resolution (keV)
120°	047-B	1000	140	4,57±0,01	1,6±4,2	17
150°	21-593D	1000	100	4,32±0,01	25,0±3,8	27
160°	794A	1000	150	4,36±0,01	16,9±5,3	32
170°	128E	1000	300	4,43±0,01	11,0±3,7	15

4.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή

Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ενέργεια της δέσμης. Τόσο για την αξιοπιστία του πειράματος γενικά, όσο και επειδή μελετήσαμε γεγονότα πολύ πυκνά στο ενεργειακό φάσμα, στα οποία λίγα keV διαφορά μπορεί να έχουν μεγάλη σημασία για τα συμπεράσματα που θα προκύψουν. Η ενέργεια της δέσμης του επιταχυντή ρυθμίζεται από τον μαγνήτη επιλογής ενέργειας (analyser). Είναι πιθανόν όμως να υπάρχει μια μικρή απόκλιση ανάμεσα στην ενέργεια που αναμένει ο χειριστής του μηχανήματος και την πραγματική ενέργεια της δέσμης. Για να διαπιστώσουμε λοιπόν αν υπάρχει απόκλιση κάναμε ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή με την βοήθεια του συντονισμού του αλουμινίου στα 991,86 keV.

Για ενέργεια πρωτονίων $E_p=991,86$ keV στο σύστημα του εργαστηρίου η αντίδραση $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ παρουσιάζει έναν πολύ λεπτό συντονισμό και εκπέμπει με μεγάλη πιθανότητα ακτίνες γ ενέργειας $E_\gamma=1779$ keV. Ακτινοβολώντας αλουμίνιο και μεταβάλλοντας την ενέργεια με μικρό βήμα στην συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή είναι δυνατόν να εντοπιστεί η ακριβής θέση του συντονισμού, συνεπώς και η μετατόπιση της ενέργειας της δέσμης. Μετά το πέρας των μετρήσεων που πάρθηκαν για το πείραμα, σαρώσαμε την περιοχή από 1000 keV έως 982 keV και εντοπίσαμε τον συντονισμό πάρα πολύ κοντά στην προβλεπόμενη τιμή, δηλαδή στα 991,816 keV. Η αβεβαιότητα στην ενέργεια (ripple της μηχανής) προσδιορίστηκε από το 25% έως το 75% της ανόδου (Εικόνα 4.7) και είναι 1,75 keV δηλαδή 0,18%. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, αποφασίστηκε τελικά να μην αλλάξουμε τις σημειωμένες ενέργειες δέσμης του πειράματος (Εικόνα 4.7). Για την ανίχνευση των ακτίνων γ της αντίδρασης, χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής γερμανίου υψηλής καθαρότητας.



Εικόνα 4.7: Αριστερά το διάγραμμα για την εύρεση της θέσης του συντονισμού. Αυτή έγινε σαρώνοντας την ενεργειακή περιοχή 980 έως 1000 keV και σημειώνοντας το ολοκλήρωμα της κορυφής της ακτίνας γ της αντίδρασης κάθε φορά. Η θέση του συντονισμού δίνεται από το μέσον της ανόδου (x_0). Δεξιά το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ [8].

4.4 Μέθοδος και αποτελέσματα

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος για τα τρία στοιχεία αφού προηγουμένως εξηγηθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η αρχή θα γίνει με το οξυγόνο καθώς δεν δημιουργήθηκαν προβλήματα και η διαδικασία είναι απλούστερη. Ακολούθως θα παρουσιαστεί το ασβέστιο και το πυρίτιο.

A. Οξυγόνο

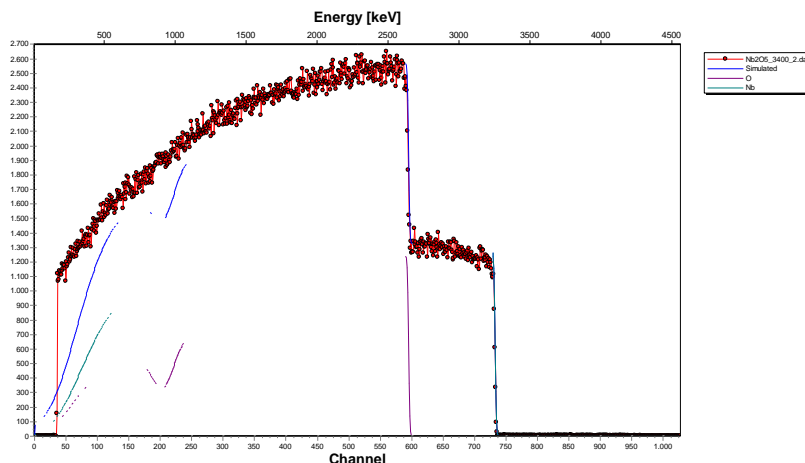
Διαδικασία

Το Οξυγόνο μελετήθηκε ακτινοβολώντας στόχο Nb_2O_5 με δέσμη πρωτονίων από 1500 έως 4000 keV. Βάσει της διαδικασίας επιλογής των ενεργειών ακτινοβολήσης που έχει εξηγηθεί για το οξυγόνο επιλέχθηκαν οι ενέργειες 1500, 2000, 2600, 2720, 3000, 3400, 3500, 4000 keV.

Υπενθυμίζεται ότι στόχος ενός πειράματος benchmarking κάποιου στοιχείου είναι να συγκριθούν οι ενεργές διατομές που έχουν προσδιοριστεί με πειραματικά φάσματα από οπισθοσκέδαση από παχύ στόχο. Αυτό επιτυγχάνεται με την σύγκριση του ολοκληρώματος της προσομοίωσης (που χρησιμοποιεί δεδομένα από μετρημένες ενεργές διατομές) με το αντίστοιχο ολοκλήρωμα του πειραματικού φάσματος με τρόπο κατάλληλο ώστε να μπορούμε να αποφανθούμε ότι το δεύτερο οφείλεται σε σωματίδια που έχουν σκεδαστεί αποκλειστικά από το στοιχείο που μας ενδιαφέρει.

Το νιόβιο (Nb) έχει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των φασμάτων. Η ενεργός διατομή του συγκεκριμένου βαρέος στοιχείου ($A=93$) οφείλεται σε σκέδαση Rutherford σε όλη την ενεργειακή περιοχή που μελετούμε, οπότε μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται κάθε φορά ως σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό του φορτίου $Q\Omega$. Κάτι απαραίτητο προκειμένου να “κλειδώσουν” όλοι οι παράγοντες που διαμορφώνουν την προσομοίωση και να μπορέσει ύστερα να γίνει η σύγκριση των ολοκληρωμάτων του οξυγόνου με αξιοπιστία. Για δέσμη πρωτονίων σε στόχο Nb_2O_5 το μοντέλο Ziegler-Biersack-Littmark που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του stopping power στην προσομοίωση έχει ακρίβεια 5% [9].

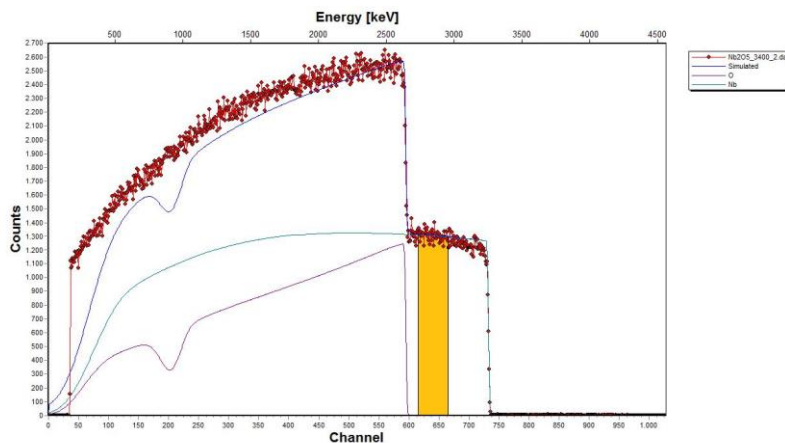
Για να γίνουν κατανοητά τα παραπάνω ακολουθεί παράθεση της διαδικασίας σε βήματα. Για τις ανάγκες της παρουσίασης αυτής θα χρησιμοποιηθεί σαν παράδειγμα η επεξεργασία που έγινε στο φάσμα στα 3400 keV στις 170° (Εικόνα 4.7). Είναι φανερό ότι στα φάσματα από τον συγκεκριμένο στόχο τα στοιχεία διακρίνονται μεταξύ τους. Το πρώτο “σκαλοπάτι” οφείλεται στο νιόβιο ενώ το δεύτερο στο οξυγόνο. Η προσομοίωση των πειραματικών φασμάτων έγινε με τον κώδικα SIMNRA [6].



Εικόνα 4.7: Πειραματικό φάσμα Nb_2O_5 στα 3400 keV στις 170°

Τα βήματα της διαδικασίας αναλυτικά είναι τα εξής.

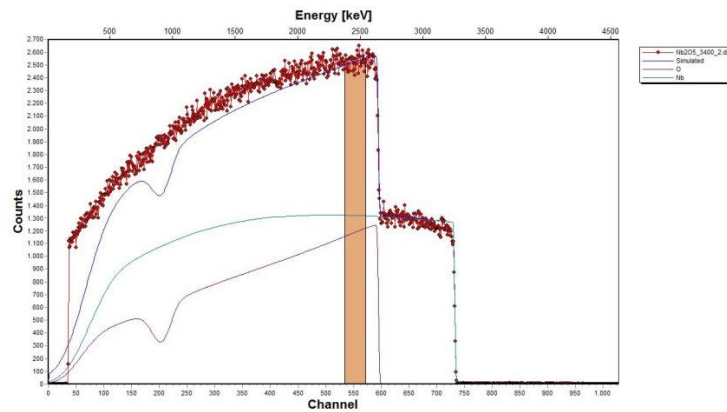
1. Επιλέγουμε ένα ικανοποιητικό εύρος στο πλατό του νιοβίου (συνήθως 30-40 κανάλια) στο οποίο εξισώνουμε το ολοκλήρωμα των πειραματικών δεδομένων με το ολοκλήρωμα της προσομοίωσης μεταβάλλοντας κατάλληλα το φορτίο QΩ. Προσέχουμε ώστε η περιοχή του νιοβίου που θα επιλεγεί να μη περιλαμβάνει τα ακραία κανάλια που είναι “φαγωμένα/διαβρωμένα” λόγω της επιφανειακής τραχύτητας (Εικόνα 4.8). Στην διαδικασία αυτή ρυθμίζουμε το SIMNRA ώστε να λαμβάνει υπόψιν τα φαινόμενα dual και multiple scattering.



Εικόνα 4.8: “Παράθυρο” του νιοβίου στο οποίο έγινε η προσαρμογή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση (3400 keV- 170°) είναι από το κανάλι 615 έως το 665

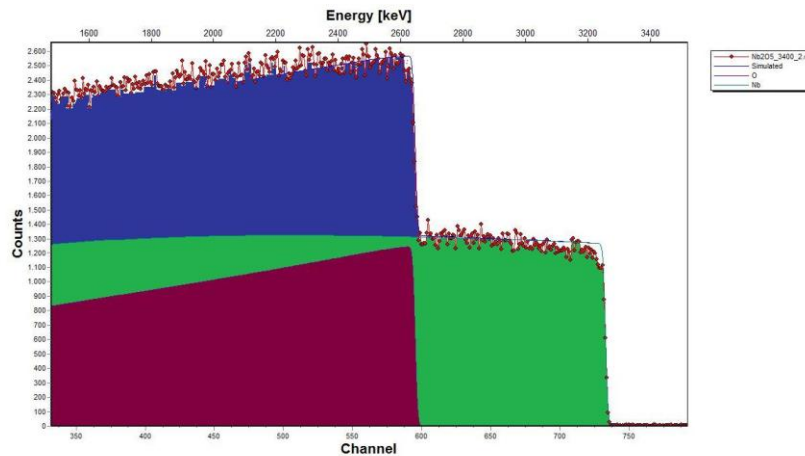
2. Αφού πλέον έχει ρυθμιστεί το φορτίο επιλέγουμε παράθυρο στην περιοχή του οξυγόνου. Αυτό γίνεται χωρίς το εύρος να ξεπερνάει τα 250 keV από την άκρη του σκαλοπατιού (Εικόνα 4.9), καθώς η αβεβαιότητα στην απώλεια ενέργειας

λόγω του ενεργειακού διασκεδασμού αυξάνεται για πρωτόνια που έχουν σκεδαστεί σε περιοχές του στόχου σε μεγαλύτερη απόσταση από την επιφάνεια.



Εικόνα 4.9: Το παράθυρο του οξυγόνου στο οποίο γίνεται η σύγκριση των ενεργών διατομών.

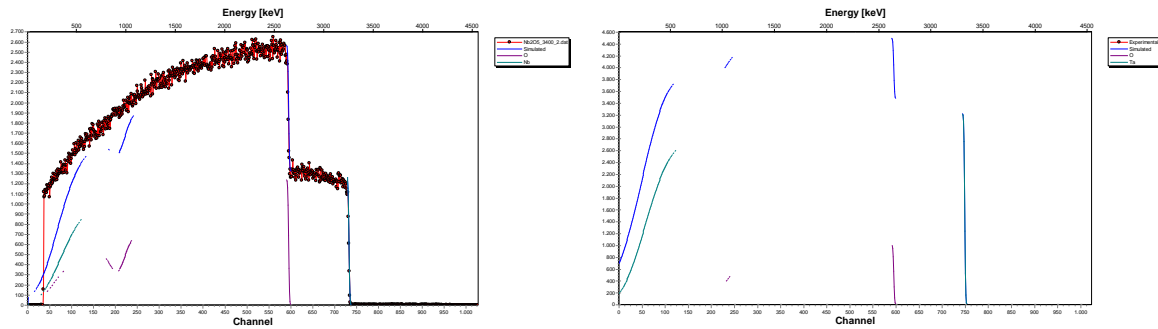
3. Εντός των ορίων του επιλεγμένου παραθύρου συγκρίνουμε το ολοκλήρωμα των πειραματικών δεδομένων (αφού πρώτα αφαιρεθεί το ολοκλήρωμα του προσομοιωμένου νιοβίου) με το ολοκλήρωμα του προσομοιωμένου οξυγόνου. Θεωρούμε δηλαδή ότι, αφού τα πρωτόνια σκεδάζονται από το νιόβιο αποκλειστικά με σκέδαση Rutherford, η προσομοίωση του νιοβίου είναι ακριβής. Οπότε εάν αφαιρεθεί αυτή η ποσότητα από το πειραματικό φάσμα αυτό που μένει είναι το “πειραματικό οξυγόνο”.



Εικόνα 4.10: Η σύγκριση των ολοκληρωμάτων τελικά γίνεται ανάμεσα στην μπλε $O(exp)$ και την μωβ $O(sim)$ περιοχή

Γίνεται τώρα εμφανής ένας ακόμα λόγος που επιλέχθηκε το Nb και όχι κάποιο άλλο βαρύ στοιχείο (πχ ταντάλιο). Το νιόβιο έχει $Z=41$ που σε συνδυασμό με την αναλογία της σύνθεσης του στόχου (2 Nb προς 5 O) δημιουργεί φάσματα στα οποία η συνεισφορά σκεδαζόμενων σωματιδίων από τα δύο στοιχεία είναι συγκρίσιμη. Οπότε η αφαίρεση που

περιγράφεται στο βήμα 3 μπορεί να γίνει χωρίς προβλήματα και με περιορισμένο σφάλμα (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Σύγκριση φάσματος από στόχο Nb_2O_5 με προσομοίωση φάσματος από στόχο Ta_2O_5 σε ίδιες συνθήκες ενέργειας και γεωμετρίας ($3400\text{ keV}-170^\circ$). Είναι φανερή η διαφορά στο πλήθος των πρωτονίων που προέρχονται από σκέδαση με το βαρύ στοιχείο σε κάθε περίπτωση. ($Z_{Nb}=41$, $Z_{Ta}=73$)

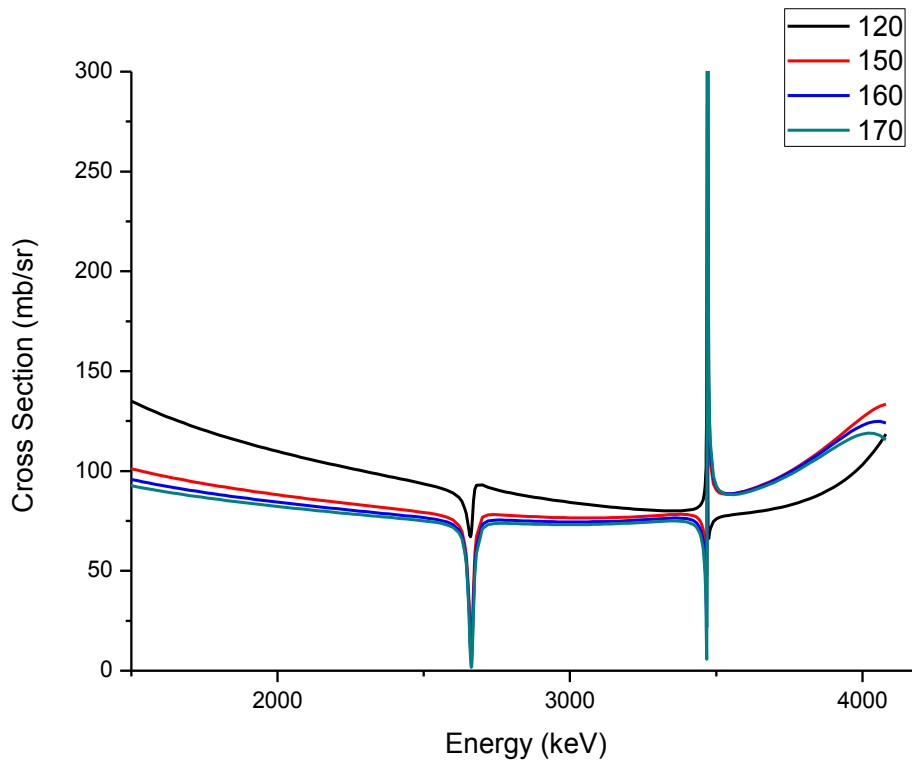
Αποτελέσματα

Παρατηρώντας τις υπάρχουσες μετρήσεις ενεργών διατομών ως συνάρτηση της ενέργειας της δέσμης πρωτονίων (Εικόνα 4.12) βλέπουμε ότι στις ενέργειες που εξετάζονται στο πείραμα (1000-4000 keV) εμφανίζονται δύο συντονισμοί. Αυτό σημαίνει ότι (βάσει και του τρόπου με τον οποίον έγινε οι επιλογή των ενεργειακών βημάτων) οι συντονισμοί αποτυπώνονται καλύτερα στις ενέργειες δέσμης που βρίσκονται αμέσως μετά (2720, 3500 keV).

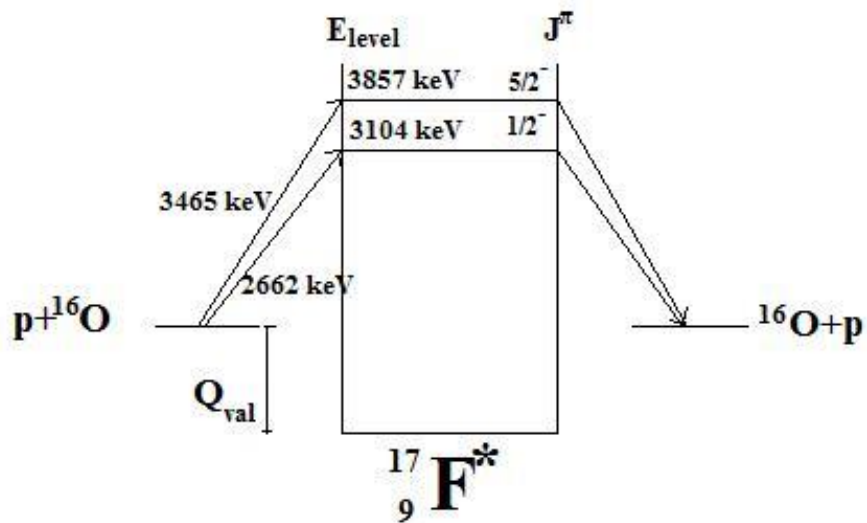
Οι συντονισμοί οφείλονται στην ελαστική αντίδραση σχηματισμού σύνθετου πυρήνα φθορίου (compound nucleus)



Οι συντονισμοί του οξυγόνου εμφανίζονται για ενέργειες δέσμης $E_p=2662\text{ keV}$ και 3465 keV (σύστημα εργαστηρίου). Οι συγκεκριμένες ενέργειες οδηγούν στις διεγερμένες ενεργειακές καταστάσεις του φθορίου όπως φαίνονται στο ενεργειακό διάγραμμα της Εικόνας 4.13.



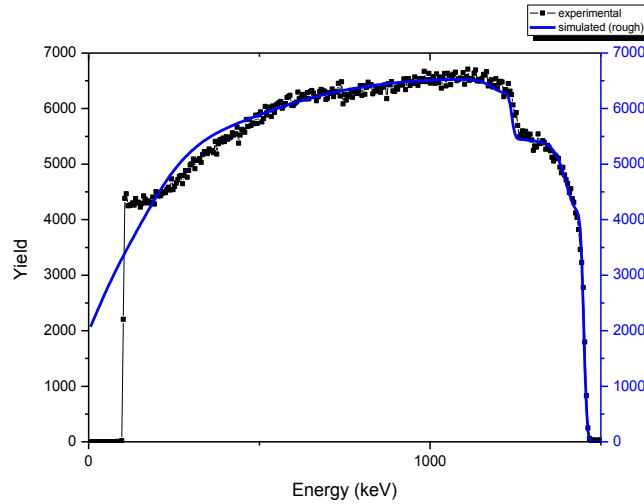
Εικόνα 4.12: Ενεργός διατομή του οξυγόνου (ελαστική σκέδαση πρωτονίων) σε γωνίες σκέδασης 120°, 150°, 160°, 170° συναρτήσει της ενέργειας δέσμης (evaluated data from SigmaCalc 2.0)



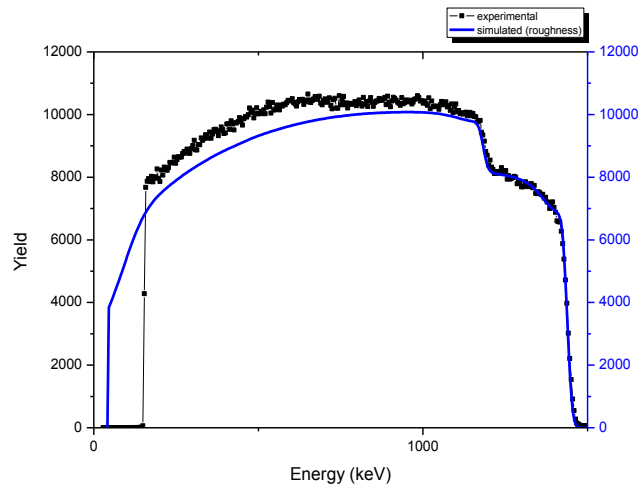
Εικόνα 4.13: Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $O(p,p)$

Ακολουθεί παράθεση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν για το οξυγόνο (Εικόνες 4.14 έως 4.45). Τα φάσματα που παρουσιάζονται εδώ έχουν περάσει από κώδικα ο οποίος ενσωμάτωσε στα προσομοιωμένα δεδομένα τις συνέπειες που οφείλονται στην επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας.

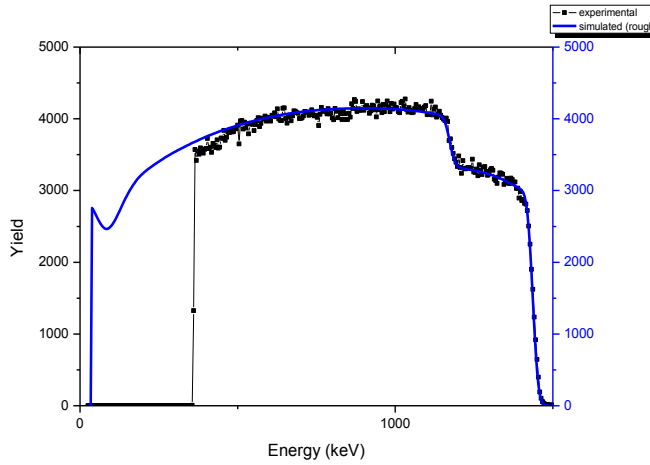
Ενέργεια: 1500 keV



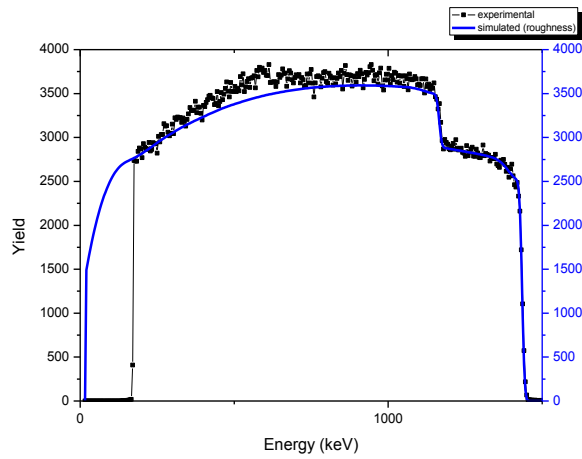
Εικόνα 4.14: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.15: Γωνία σκέδασης 150°

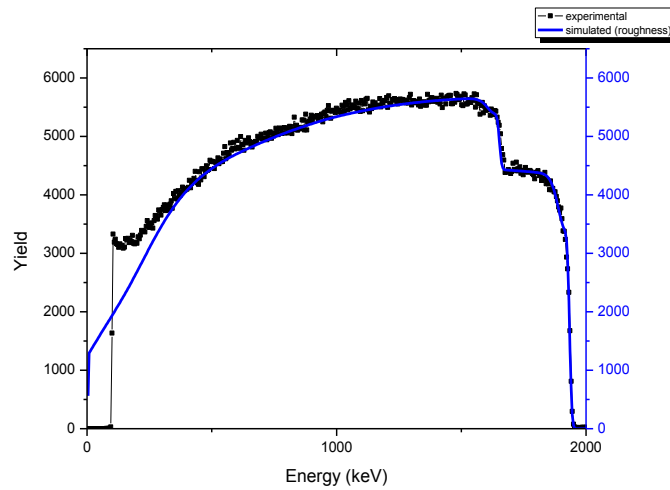


Εικόνα 4.16: Γωνία σκέδασης 160°

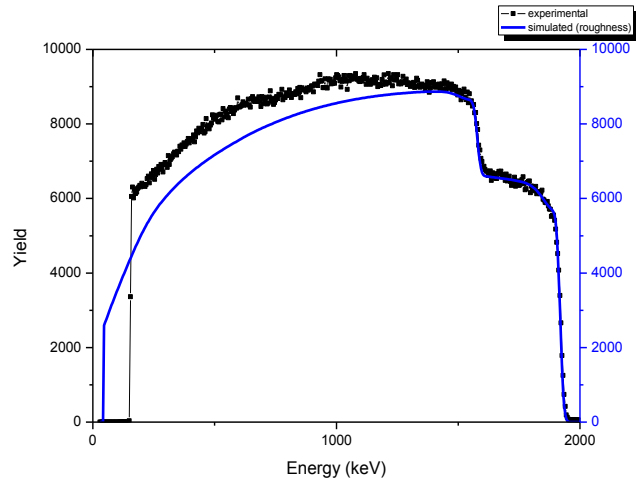


Εικόνα 4.17: Γωνία σκέδασης 170°

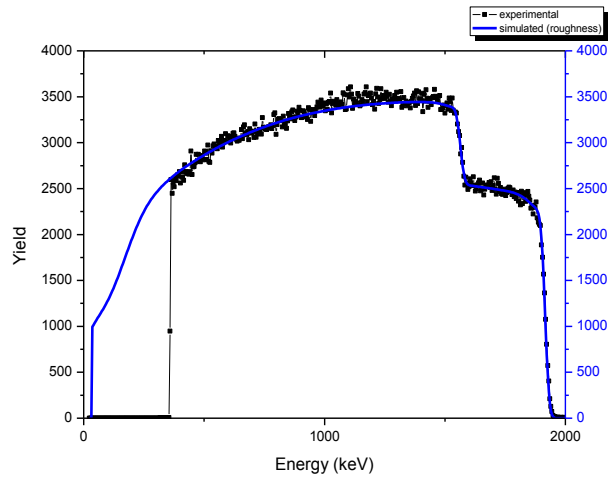
Ενέργεια: 2000 keV



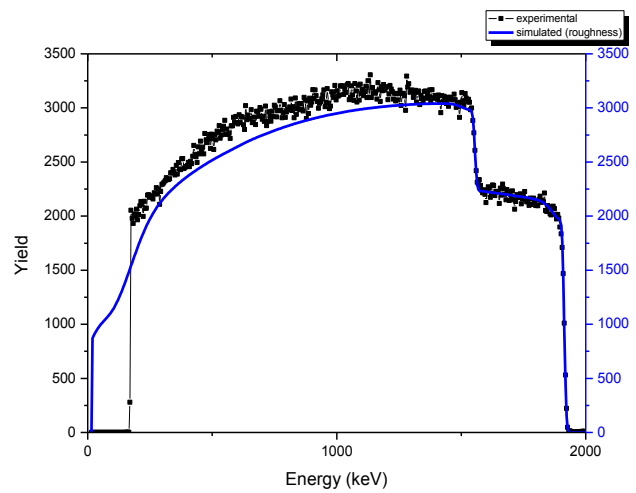
Εικόνα 4.18: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.19: Γωνία σκέδασης 150°

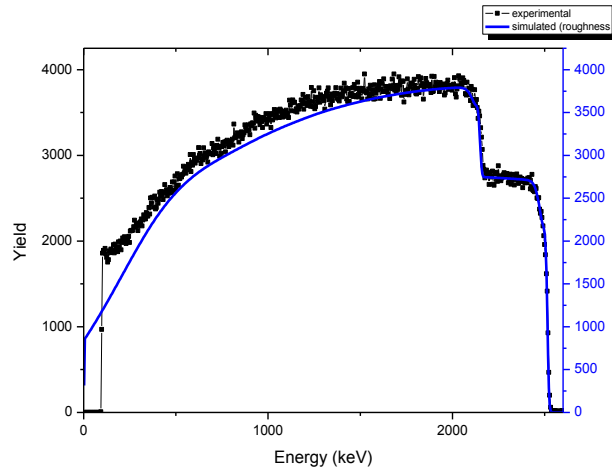


Εικόνα 4.20: Γωνία σκέδασης 160°

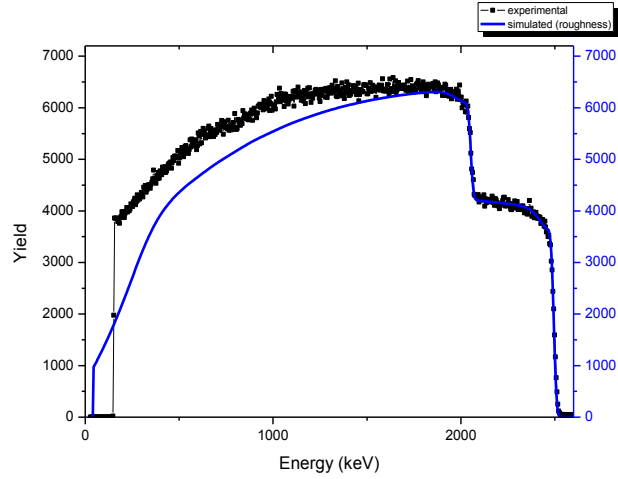


Εικόνα 4.21: Γωνία σκέδασης 170°

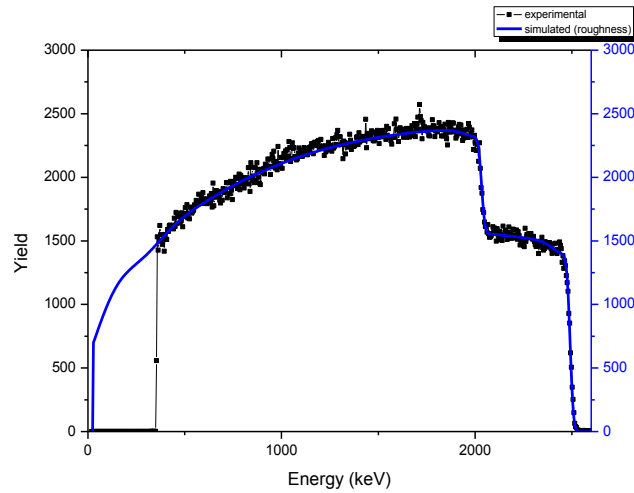
Ενέργεια: 2600 keV



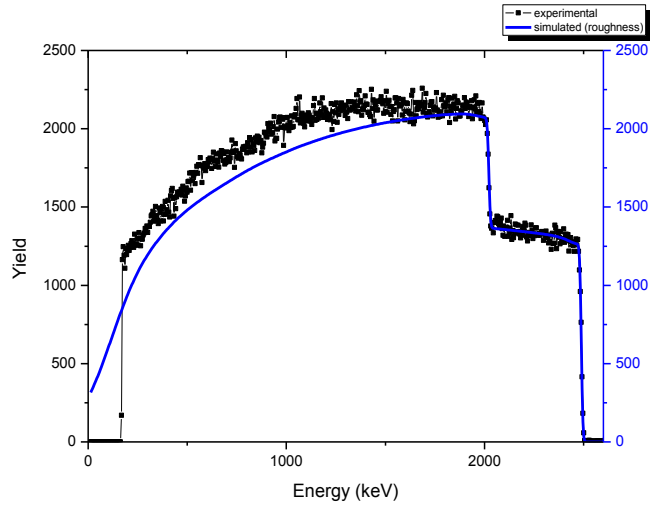
Εικόνα 4.22: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.23: Γωνία σκέδασης 150°

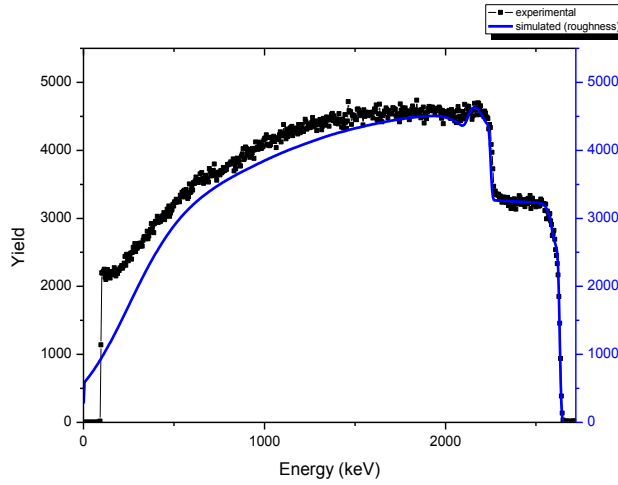


Εικόνα 4.24: Γωνία σκέδασης 160°

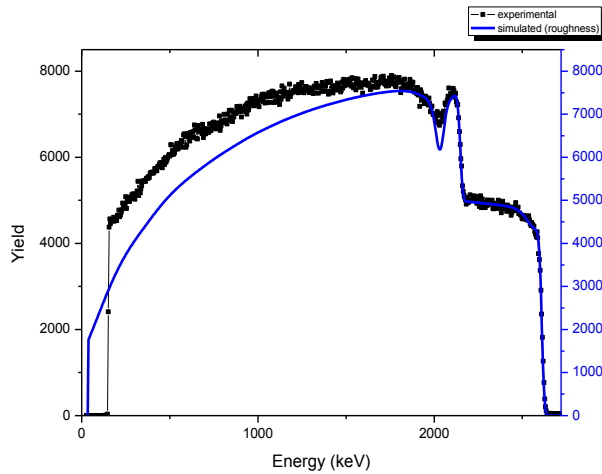


Εικόνα 4.25: Γωνία σκέδασης 170°

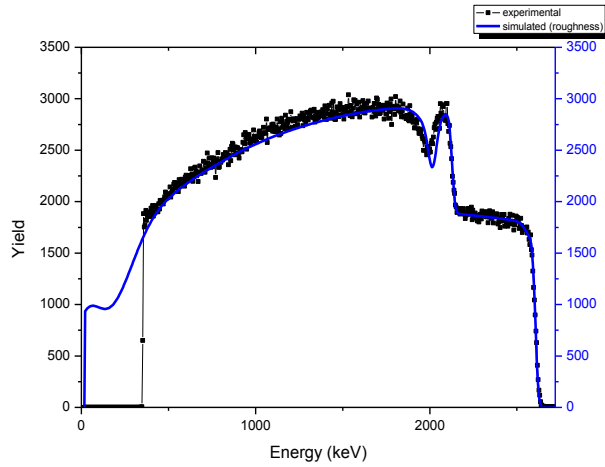
Ενέργεια: 2720 keV



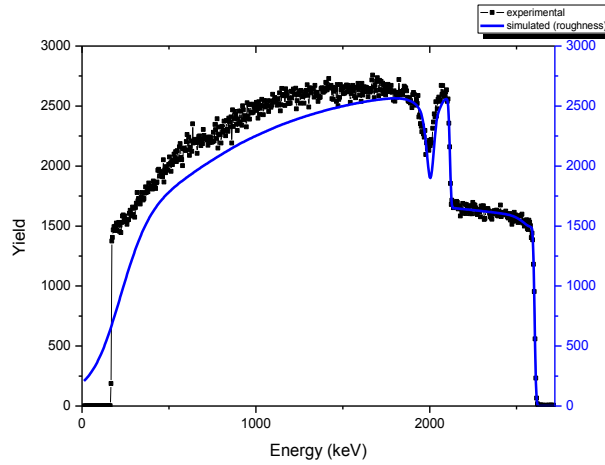
Εικόνα 4.26: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.27: Γωνία σκέδασης 150°

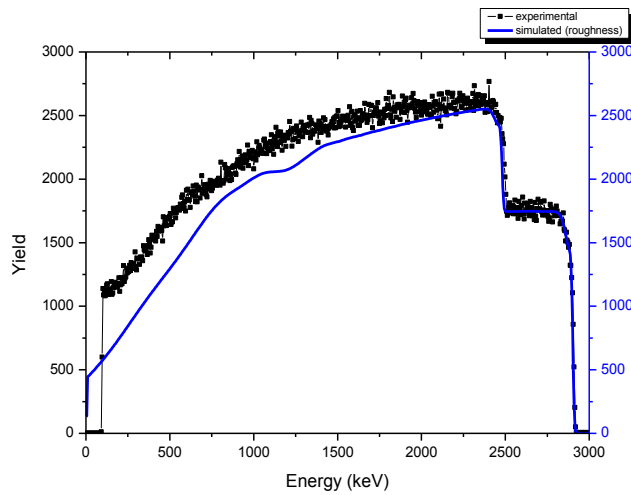


Εικόνα 4.28: Γωνία σκέδασης 160°

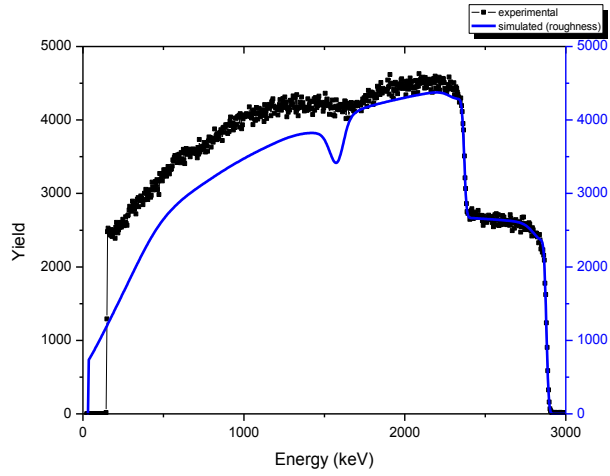


Εικόνα 4.29: Γωνία σκέδασης 170°

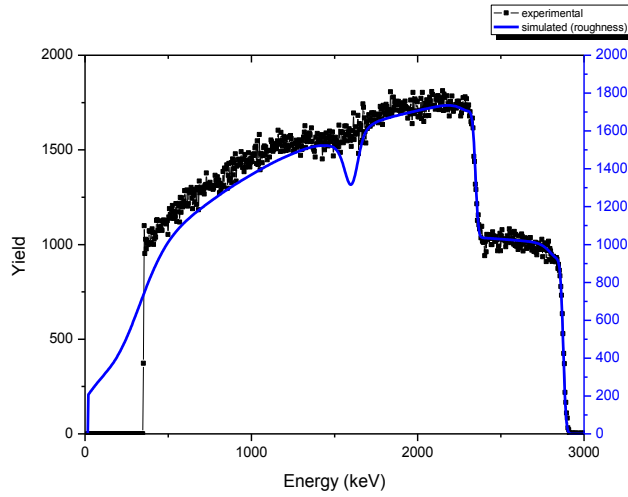
Ενέργεια: 3000 keV



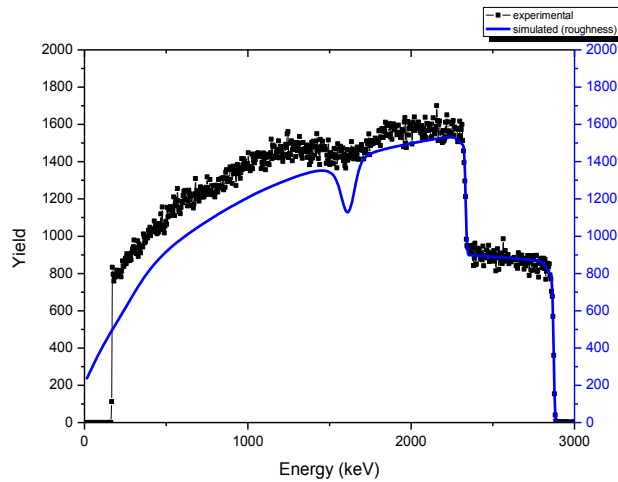
Εικόνα 4.30: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.31: Γωνία σκέδασης 150°

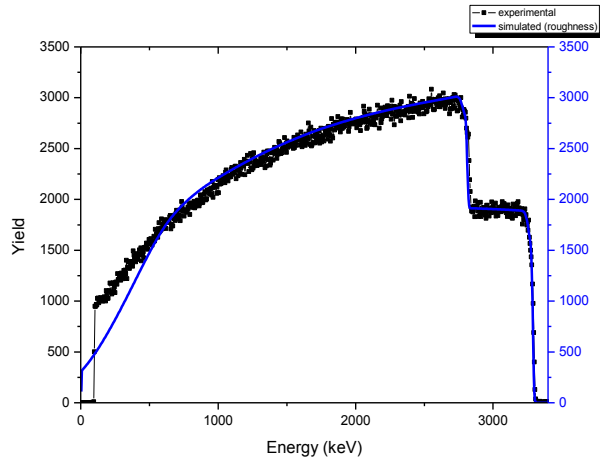


Εικόνα 4.32: Γωνία σκέδασης 160°

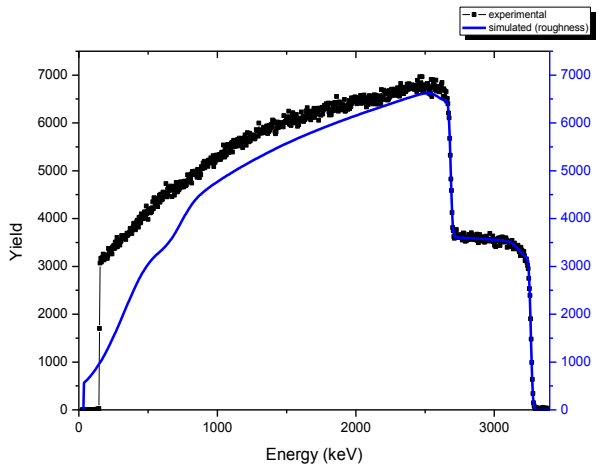


Εικόνα 4.33: Γωνία σκέδασης 170°

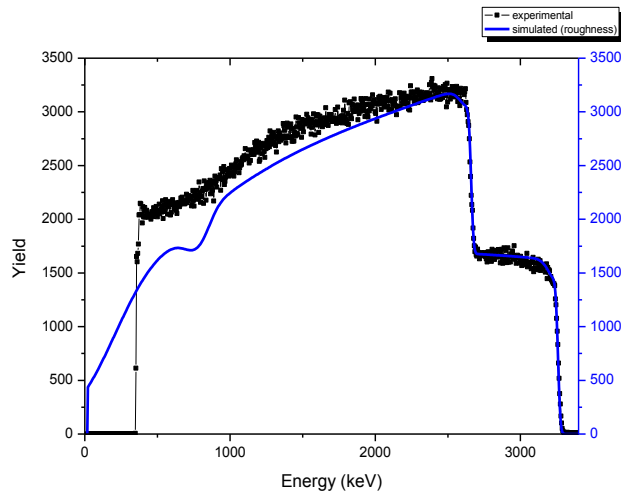
Ενέργεια: 3400 keV



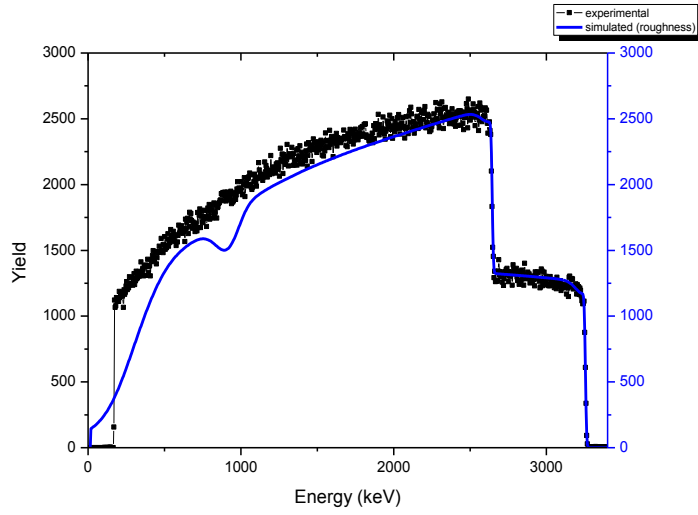
Εικόνα 4.34: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.35: Γωνία σκέδασης 150°

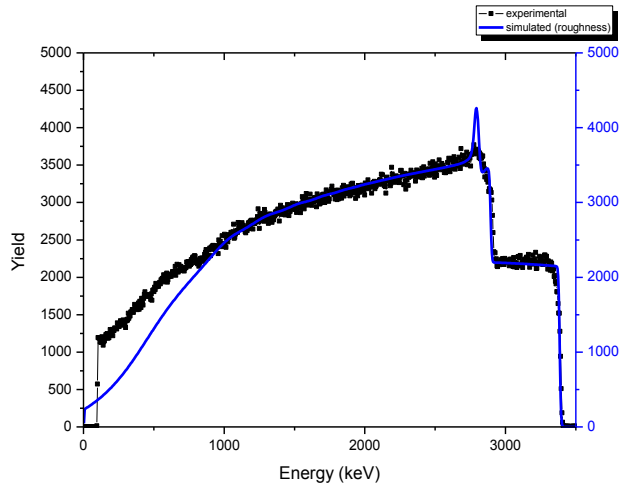


Εικόνα 4.36: Γωνία σκέδασης 160°

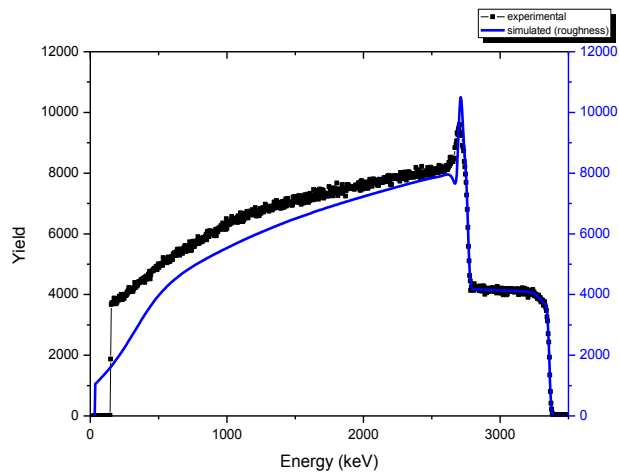


Εικόνα 4.37: Γωνία σκέδασης 170°

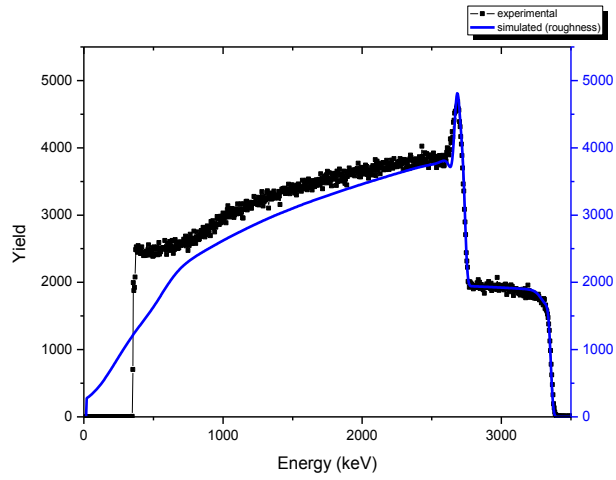
Ενέργεια: 3500 keV



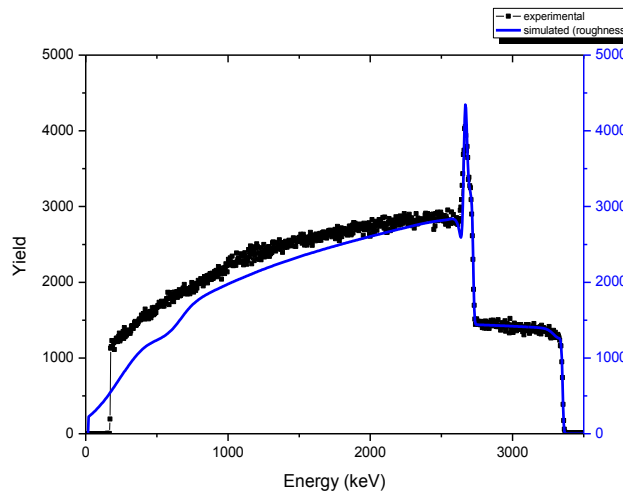
Εικόνα 4.38: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.39: Γωνία σκέδασης 150°

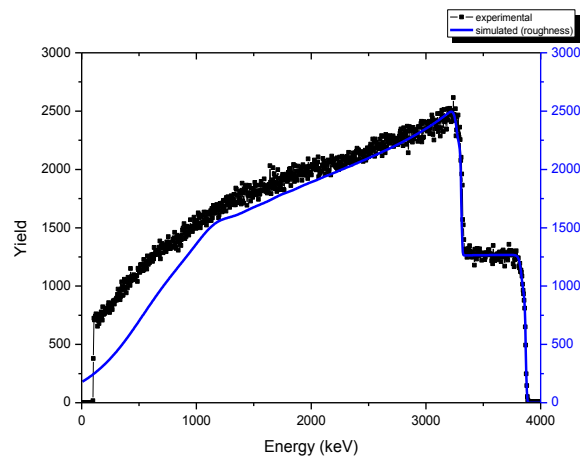


Εικόνα 4.40: Γωνία σκέδασης 160°

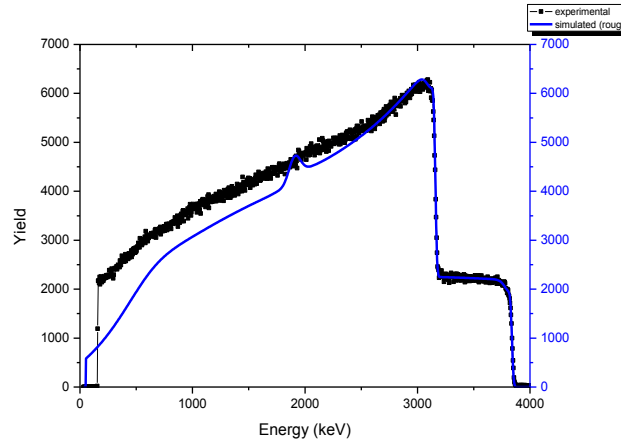


Εικόνα 4.41: Γωνία σκέδασης 170°

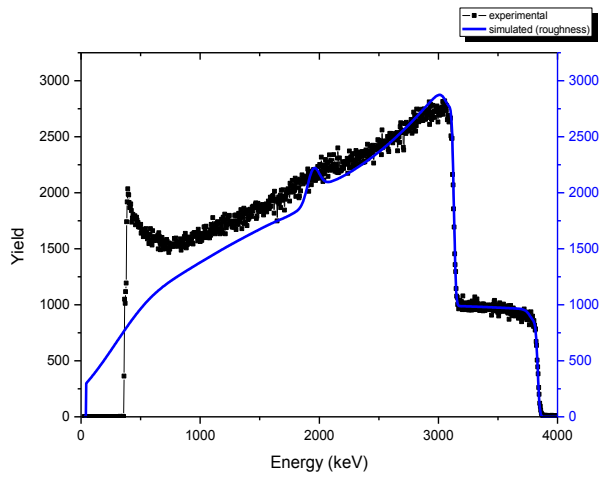
Ενέργεια: 4000 keV



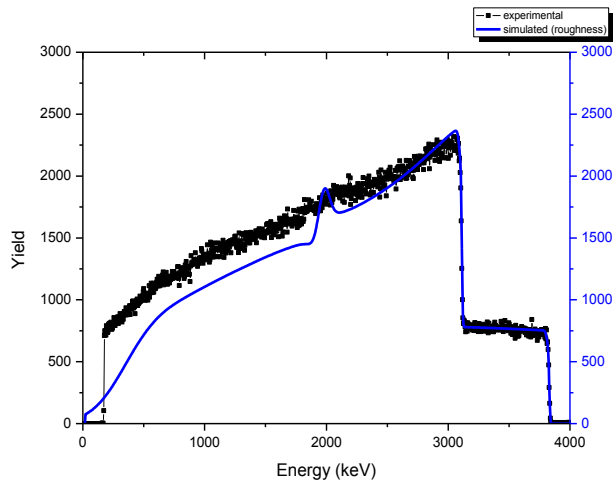
Εικόνα 4.42: Γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.43: Γωνία σκέδασης 150°



Εικόνα 4.44: Γωνία σκέδασης 160°



Εικόνα 4.45: Γωνία σκέδασης 170°

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 4.2 καταγράφονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του πειραματικού οξυγόνου με αυτό από την προσομοίωση που προέκυψαν με την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Η σύγκριση στα φάσματα που περιγράφουν τους συντονισμούς (σημειωμένα με μπλε) έγινε αποκλειστικά στην περιοχή του συντονισμού ώστε να μην υπάρχει συνεισφορά από non-resonant περιοχές.

Πίνακας 4.2

Ενέργεια (keV)	120°	150°	160°	170°
1500	-5,2	-15,5	-3,2	-13,7
2000	1,6	-7,5	-3,0	-7,1
2600	-3,2	-3,5	-0,8	-6,2
2720	-8,1	-13,5	-2,3	-11,0
3000	-8,8	-7,4	-2,5	-8,4
3400	3,1	-5,3	-2,4	-1,0
3500	17,8	-3,8	-3,2	-3,8
4000	1,5	2,0	4,4	3,9

Οι διαφορές δίδονται σε ποσοστά επί τοις εκατό. Το πρόσημο δείχνει ποια από τις δύο συγκρινόμενες ποσότητες είναι μεγαλύτερη. Το (+) σημαίνει ότι το ολοκλήρωμα της προσομοίωσης είναι μεγαλύτερο από το πειραματικό, οπότε η ενεργός διατομή έχει υπερεκτιμηθεί. Το (-) σημαίνει ότι συμβαίνει το αντίθετο. Οι ενεργές διατομές που χρησιμοποιεί η προσομοίωση προέρχονται από evaluated data από το λογισμικό SigmaCalc 2.0 αφού για την αντίδραση O(p,p)O παρέχονται τέτοια δεδομένα σε ολόκληρο το ενεργειακό εύρος που μελετούμε.

Περιοχές εκτός συντονισμών

Παρατηρούμε στον Πίνακα 4.2 ότι σε γωνία σκέδασης 160° τα συγκρινόμενα ολοκληρώματα έχουν μικρές διαφορές (μικρότερες από 5%) οπότε οι non-resonant περιοχές περιγράφονται καλά από τα evaluated data για όλες της ενέργειες δέσμης. Στις υπόλοιπες γωνίες σκέδασης παρατηρούνται μεγάλες διαφορές σε ορισμένες ενέργειες (ειδικά σε ενέργεια δέσμης 3000 keV οι αποκλίσεις αγγίζουν το 9%) και εκεί χρειάζεται διόρθωση των υπάρχοντων δεδομένων.

Γενικά στα φάσματα παρατηρούμε ότι στις γωνίες 150° και 170° έχουμε μεγάλη απόκλιση των καμπύλων σε ενεργειακό βάθος αντίθετα από τα φάσματα των 120° και 160°. Αυτό δεν αποτυπώνεται στην σύγκριση του Πίνακα 4.2 καθώς αυτή έγινε για περιοχές κοντά στην επιφάνεια με εξαίρεση την σύγκριση στις χαμηλές ενέργειες (κυρίως στα 1500 keV και λιγότερο στα 2000 keV) που αυτή η διαφορά ξεκινάει από την επιφάνεια οπότε στην σύγκριση του πίνακα είναι εμφανείς σαφώς μεγαλύτερες διαφορές.

Συντονισμοί

Οι ενέργειες δέσμης με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι στα 2720 και στα 3500 keV καθώς τα φάσματα σε αυτές τις ενεργειακές περιοχές περιγράφουν τους δύο συντονισμούς. Στον πίνακα των διαφορών φαίνεται ότι οι αποκλίσεις σε αυτές τις ενέργειες είναι μεγαλύτερες λόγω των διαφορών στο ύψος των συντονισμών.

Συγκεκριμένα ο πρώτος συντονισμός που αναμένεται για ενέργεια πρωτονίων 2662 keV στο σύστημα του εργαστηρίου (Εικόνες 4.26 έως 4.27) εμφανίζεται ελαφρώς μετατοπισμένος (υπολογίστηκε μετατόπιση προς τα δεξιά των μεγίστων/ελαχίστων της προσομοίωσης της τάξης των 15 keV) σε όλες τις γωνίες. Επίσης στα φάσματα του πειράματός μας το ελάχιστο δεν είναι τόσο έντονο όσο περιγράφεται από τα evaluated data. Ειδικά στις 120° το βύθισμα είναι ελάχιστο. Η διαφορά στο βάθος φαίνεται καθαρά στην σύγκριση του Πίνακα 4.2 για γωνίες σκέδασης 120°, 150° και 170°. Προτείνεται τελικά διόρθωση των evaluated data τόσο ως προς την θέση όσο και ως προς το βάθος του ελαχίστου.

Ο συντονισμός που αναμένεται σε ενέργεια 3465 keV (Εικόνες 4.38 έως 4.41) είναι εμφανώς υπερεκτιμημένος από τα υπάρχοντα δεδομένα κυρίως σε μικρές γωνίες σκέδασης (μεγάλη διαφορά ύψους στις 120° η οποία αποτυπώνεται έντονα στην σύγκριση του πίνακα). Το αρχικό βύθισμα που αναμένεται στις γωνίες 150°, 160° και 170° (εμφανές και στο διάγραμμα που δείχνει την γωνιακή εξάρτηση της ενεργού διατομής στην Εικόνα 4.12) δεν εμφανίζεται καθόλου αλλά αυτό μάλλον οφείλεται στο ότι είναι πολύ λεπτό. Τελικά χρειάζεται διόρθωση του ύψους του μεγίστου σε μικρές γωνίες.

B. Πυρίτιο-Ασβέστιο

Το πείραμα αντιμετώπισε προβλήματα τόσο στο benchmarking του πυριτίου όσο και σε αυτό του ασβεστίου. Αρχικά εξηγείται εν συντομία πιο ήταν το σχέδιο για την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών των στοιχείων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα προβλήματα που εμφανίστηκαν και τέλος αναφέρονται οι τρόποι που επιχειρήθηκαν για τον περιορισμό τους και την εξαγωγή φυσικών συμπερασμάτων όπου αυτό ήταν δυνατόν.

Η σημασία του χρυσού και η εύρεση του πάχους του

Η μεγάλη διαφορά στην διαδικασία σε σχέση με την περίπτωση του οξυγόνου έγκειται στην απουσία βαρέος στοιχείου, ικανού να παίζει ρόλο ανάλογο με αυτόν του νιοβίου. Για τον λόγο αυτό ήταν ιδιαίτερος σημαντική η προσθήκη λεπτού στρώματος χρυσού στην επιφάνεια των στόχων (η ενεργός διατομή του είναι αποκλειστικά Rutherford). Από εκεί και πέρα η μέθοδος είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση. Με την εξίσωση των ολοκληρωμάτων (πειραματικού και προσομοίωσης) των κορυφών του χρυσού

υπολογίζεται το $Q\Omega$. Στην συνέχεια αρκεί η σύγκριση των ολοκληρωμάτων των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν (πυρίτιο και ασβέστιο).

Η βασική παράμετρος που λείπει για τον καθορισμό του $Q\Omega$ είναι το πάχος του χρυσού. Για να βρεθεί αυτό υπάρχουν δύο τρόποι.

1. Με μέτρηση XRF, η οποία έχει σφάλμα της τάξης του 10%, οπότε μπορεί να προσδιοριστεί σε γενικές γραμμές το που κυμαίνεται το πάχος αλλά όχι με αρκετή ακρίβεια που απαιτείται για την σωστή διενέργεια του πειράματος.
2. Ο δεύτερος τρόπος απαιτεί την λήψη φασμάτων σε ενεργειακή περιοχή στην οποία η ενεργός διατομή κάποιου άλλου στοιχείου του στόχου εκτός από τον χρυσό, να είναι Rutherford. Θα εξηγηθεί αναλυτικά στην συνέχεια.

Πριν την διενέργεια του πειράματος οι στόχοι CaCO_3 και Si δόθηκαν στο εργαστήριο του Δημόκριτου για μέτρηση XRF. Τα αποτελέσματά της φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

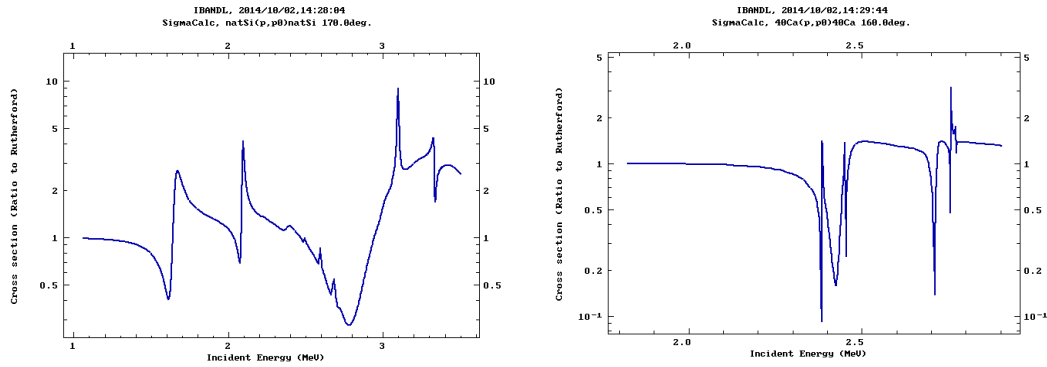
Πίνακας 4.3

Στόχος	Πάχος Au ($\times 10^{15}$ atoms/cm ²)
Si (κύριος)	82,95
Si (backup)	49,53
CaCO ₃ (κύριος)	78,94
CaCO ₃ (backup)	83,53

Κατά την διάρκεια του πειράματος και λόγω ενός ατυχήματος καταστράφηκαν οι στόχοι Si και CaCO_3 , οπότε χρησιμοποιήθηκαν οι αναπληρωματικοί στόχοι (backup). Τελικά στις ενέργειες δέσμης από 4000 keV έως και 3400 keV οι στόχοι ήταν οι αρχικοί (κύριοι), ενώ από τα 3160 keV και κάτω ήταν οι δεύτεροι (backup). Για τον λόγο αυτό κατέστη αδύνατος ο υπολογισμός του πάχους για τους αρχικούς στόχους. Αποφασίστηκε συνεπώς σε αυτούς να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από την μέτρηση XRF.

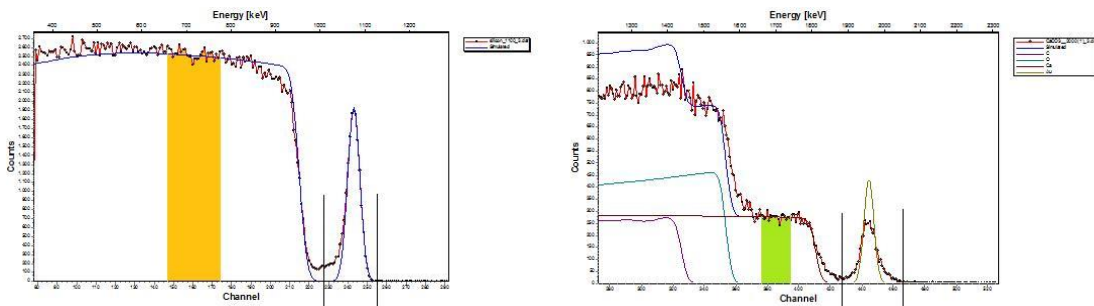
Τα βήματα για τον υπολογισμό του πάχους με τον δεύτερο τρόπο είναι τα εξής:

1. Λήψη φασμάτων σε ενέργεια στην οποία η ενεργός διατομή του υπό εξέταση στοιχείου (Si και Ca) είναι Rutherford. Στην Εικόνα 4.46 είναι εμφανές ότι κάτι τέτοιο συμβαίνει για ενέργεια δέσμης <1100 keV στο Si και <2000 keV στο Ca.



Εικόνα 4.46: Η εξάρτηση της πειραματικής ενεργού διατομής (διαιρεμένη με την Rutherford) του Si (αριστερά) και του Ca (δεξιά) από την ενέργεια. Όταν ο λόγος ισούται με 1 σημαίνει ότι η ενεργός διατομή δεν αποκλίνει από την πρόβλεψη Rutherford. (evaluated data from SigmaCalc 2.0)

2. Προσδιορισμός του φορτίου QΩ με βάση τα πλάτο στο Si και στο Ca.
3. Διαμόρφωση του πάχους του χρυσού ώστε να εξισωθεί το ολοκλήρωμα της κορυφής του πειραματικού χρυσού με την κορυφή από την προσομοίωση.
4. Το πάχος που προσδιορίζεται με αυτόν τον τρόπο εισάγεται ως το πάχος του χρυσού στις προσομοιώσεις όλων των φασμάτων. Σε κάθε φάσμα δηλαδή μεταβάλλουμε αυτή την φορά το φορτίο QΩ ώστε να εξισωθούν τα ολοκληρώματα των κορυφών του χρυσού.



Εικόνα 4.47: Εύρεση πάχους Au. Αριστερά Si (1100keV-160°)-δεξιά CaCO₃ (2000keV-160°)

Με τον τρόπο αυτό (Εικόνα 4.47) στην περίπτωση του Si υπολογίστηκε ότι το πάχος 57×10^{15} atoms/cm² αναπαράγει αρκετά καλά τα φάσματα όλων των γωνιών. Για τον στόχο CaCO₃ από την άλλη διαπιστώθηκε ότι η τιμή της μέτρησης XRF ($83,53 \times 10^{15}$ atoms/cm²) επαληθεύει σε ικανοποιητικό βαθμό την εξίσωση των ολοκληρωμάτων στα φάσματα οπότε και χρησιμοποιήθηκε τελικά.

Ακολουθούν συνοπτικά οι τελικές τιμές του πάχους χρυσού που αποφασίστηκαν για κάθε στόχο και χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία.

Πίνακας 4.4

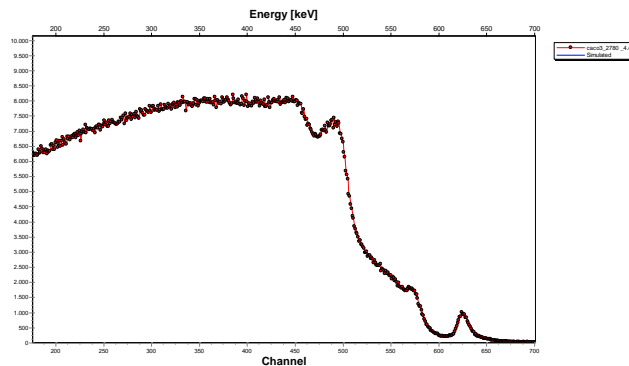
	<3400keV	≥3400keV
Si	$57,00 \times 10^{15}$ atoms/cm ²	$82,95 \times 10^{15}$ atoms/cm ²
CaCO ₃	$83,53 \times 10^{15}$ atoms/cm ²	$78,94 \times 10^{15}$ atoms/cm ²

Προβλήματα που παρουσιάστηκαν

Εξηγήθηκε προηγουμένως γιατί η απώλεια των αρχικών στόχων δημιούργησε πρόβλημα στην εκτίμηση του πάχους του χρυσού. Δυστυχώς αυτή δεν ήταν ούτε η μοναδική δυσκολία που προέκυψε ούτε η σημαντικότερη. Σε αυτή την ενότητα αναλύονται δύο σημαντικοί παράγοντες που δυσχέραναν την ανάλυση των αποτελεσμάτων και κατέστησαν πολύ δύσκολη την επίτευξη του αρχικού στόχου.

Φθορισμός του στόχου CaCO₃

Κατά την διάρκεια του πειράματος ο στόχος CaCO₃ παρουσίασε φθορισμό. Σε ενέργειες από 3000 keV και κάτω εξέπεμπε φως που είχε σαν αποτέλεσμα να αλλοιώνει σημαντικά την διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών. Η αλλοίωση διαρκούσε όσο ο στόχος ακτινοβολούνταν. Όταν σταματούσαμε την δέσμη οι ανιχνευτές επανέρχονταν σταδιακά στην πρότερη κατάσταση. Το πρόβλημα δεν ήταν το ίδιο έντονο σε όλους τους ανιχνευτές. Ο 047-B (120°) και ο 794A (160°) δεν είχαν τόσο μεγάλες επιπτώσεις, σε αντίθεση με τους 128E (170°) και 21-593D (150°), από τα φάσματα των οποίων ήταν αδύνατον να εξαχθούν συμπεράσματα. Στην Εικόνα 4.48 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα φάσμα που λήφθηκε στις 150° για να γίνει κατανοητός ο λόγος που δεν μπορούσε να συνεχιστεί η ανάλυση.

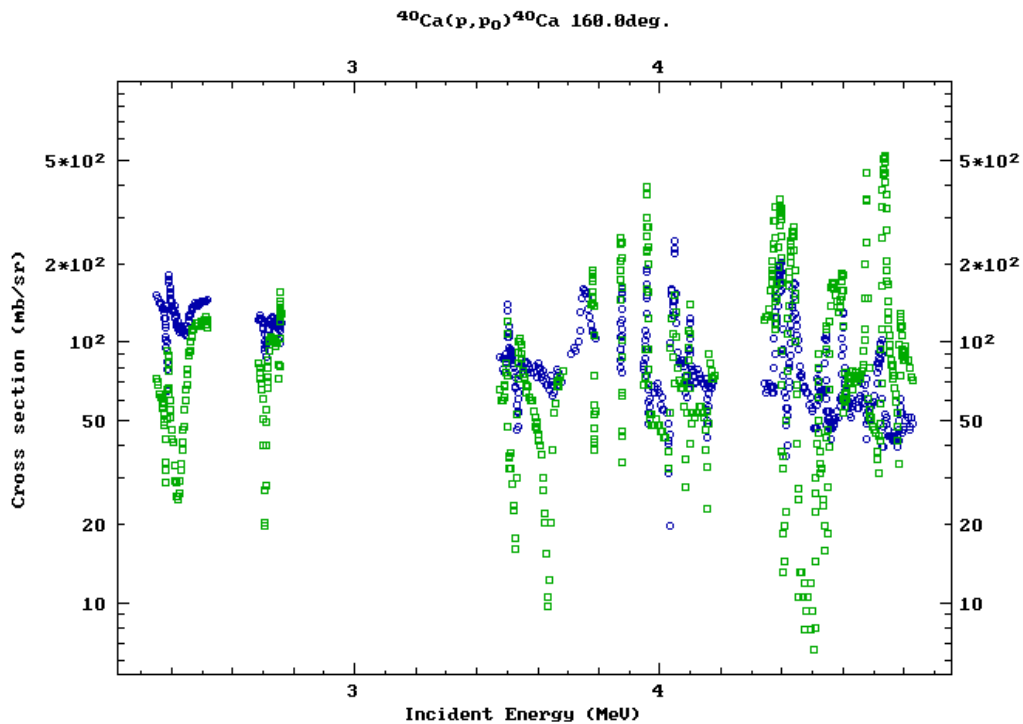


Εικόνα 4.48: Πειραματικό φάσμα CaCO₃ στα 2780 keV σε γωνία σκέδασης 150°

Κρίθηκε επίσης ότι αν και τα φάσματα στους ανιχνευτές στις 120° και 160° είναι καλύτερα, οι επιπτώσεις του φθορισμού τα έχουν επηρεάσει αρκετά ώστε να μην μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα. Ειδικά σε μια δουλειά όπως το benchmarking που η ουσία της βρίσκεται στην μέγιστη δυνατή ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων από την πραγματικότητα προκειμένου να μπορεί να γίνει αξιολόγηση και διόρθωση παλαιότερων πειραματικών δεδομένων.

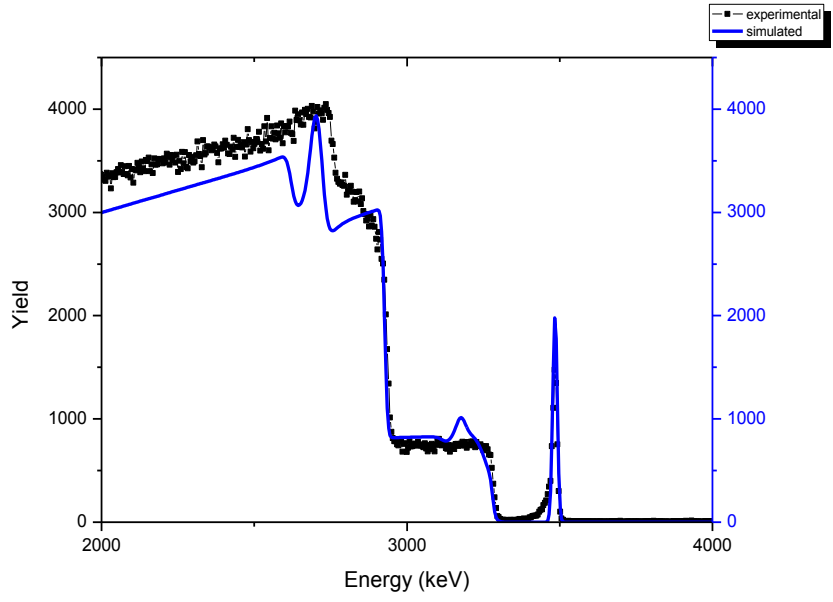
Όπως αναφέρθηκε η αλλοίωση των φασμάτων λόγω φθορισμού εμφανίστηκε σε ενέργειες δέσμης πρωτονίων μέχρι 3000 keV. Θα μπορούσε λοιπόν θεωρητικά να γίνει το benchmarking του ασβεστίου σε ενέργειες δέσμης μεγαλύτερες από αυτή. Στην προσπάθεια για κάτι τέτοιο πρέπει να ξεπεραστούν δύο επιπλέον προβλήματα.

1. Στα 3400 keV άλλαξε ο στόχος οπότε σε μεγαλύτερες ενέργειες η μόνη διαθέσιμη μέτρηση του πάχους του χρυσού είναι η XRF (σφάλμα 10%).
2. Σε ενέργειες μεγαλύτερες από 2900 keV δεν παρέχονται evaluated data από το SigmaCalc 2.0. Τα μόνα αποτελέσματα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία [4] είναι οι μετρήσεις του E. Koltay et al. (1975) στις $124,1^\circ$ και 160° .

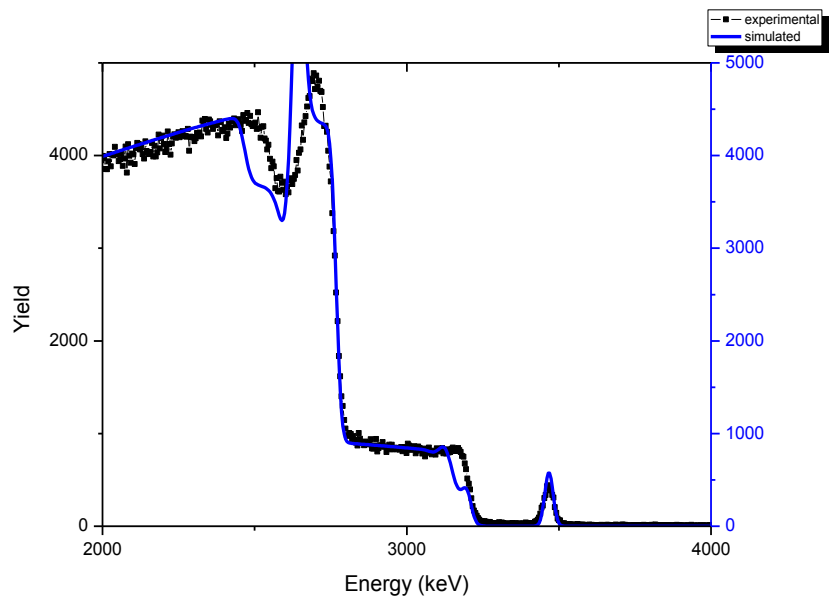


Εικόνα 4.49: Δεδομένα E. Koltay (1975) στις $124,1^\circ$ (μπλε) και 160° (πράσινο)

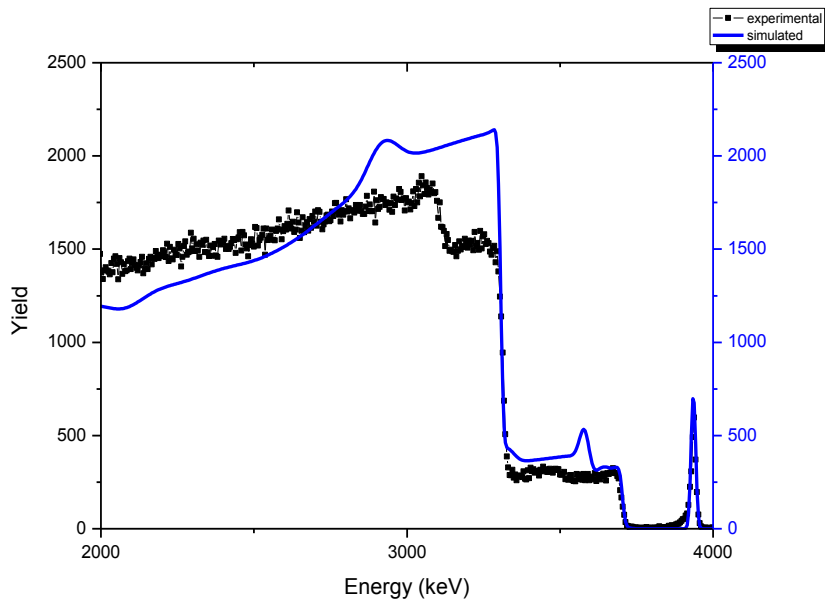
Λόγω της έντονης γωνιακής εξάρτησης που διαφαίνεται στην Εικόνα 4.49 μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο τα φάσματα στις γωνίες 120° και 160° για benchmarking. Επίσης λόγω του μεγάλου σφάλματος που εμπεριέχει μια τέτοια σύγκριση (λόγω της αβεβαιότητας 10% του πάχους Au) τα συμπεράσματα μπορούν να βγουν κυρίως ποιοτικά, δηλαδή σε ότι αφορά την μορφή των μεταβολών της ενεργού διατομής συναρτήσει της ενέργειας.



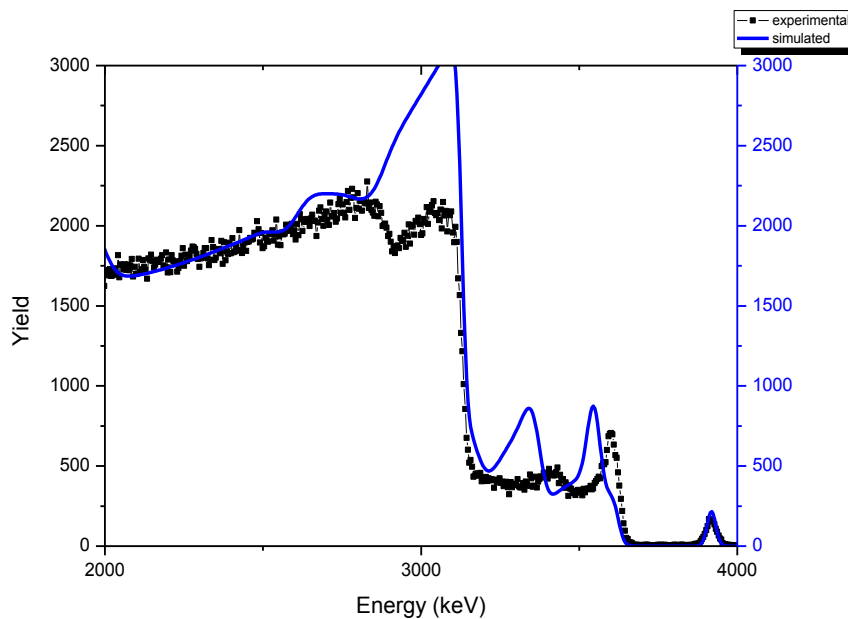
Εικόνα 4.50: Ενέργεια 3540 keV, γωνία σκέδασης 120°



Εικόνα 4.51: Ενέργεια 3540 keV, γωνία σκέδασης 160°



Εικόνα 4.52: Ενέργεια 4000 keV, γωνία σκέδασης 120°

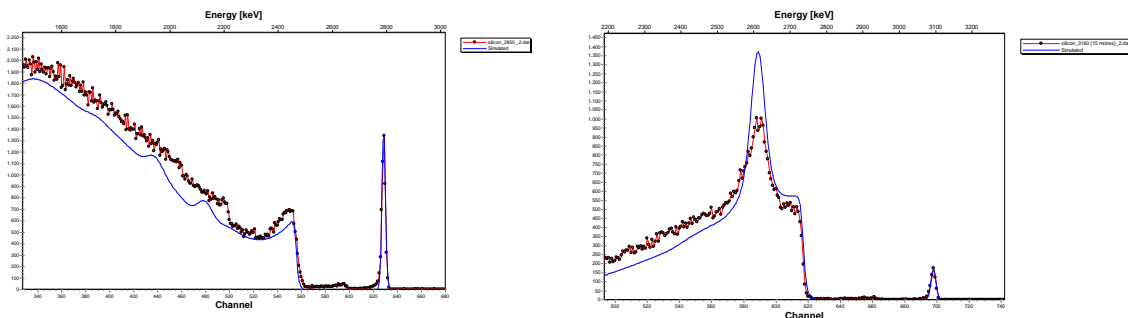


Εικόνα 4.53: Ενέργεια 4000 keV, γωνία σκέδασης 160°

Παρατηρούμε ότι η ποιοτική συμπεριφορά της ενεργού διατομής διαφέρει από την πρόβλεψη των μετρήσεων του Koltay στις 120°. Οι συντονισμοί εμφανίζονται στο πειραματικό μας φάσμα πολύ λιγότερο έντονοι από ότι στο φάσμα της προσομοίωσης. Στις 160° βλέπουμε ότι οι συντονισμοί είναι πιο ομαλοί, αλλά έχουν επίσης μια μετατόπιση. Το βύθισμα της προσομοίωσης στα 3540 keV που δεν καταγράφεται στα πειραματικά δεδομένα οφείλεται λογικά σε αυτό, σε αναλογία με την εμφανή μετατόπιση στα 4000 keV.

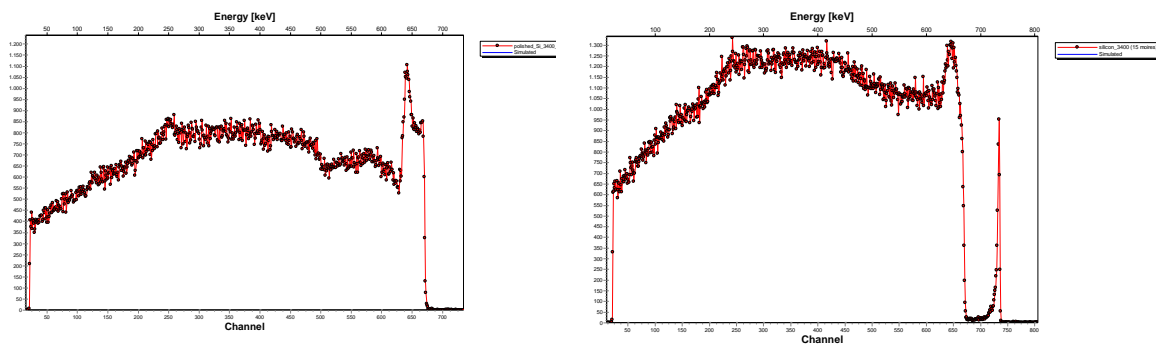
Εσωτερική τραχύτητα στον στόχο Si

Έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι επιλέχθηκε η κατασκευή παστίλιας από σκόνη πυριτίου καθώς σε προηγούμενες μετρήσεις που είχαν γίνει σε στόχο κρυσταλλικού πυριτίου εμφανίστηκαν φαινόμενα διαλισμού (channeling effects). Όμως και η συγκεκριμένη επιλογή αποδείχτηκε ανεπαρκής. Τα φάσματα που ελήφθησαν από τον στόχο Si εμφάνισαν λιγότερο έντονες κορυφές και διακυμάνσεις από το αναμενόμενο στους συντονισμούς και γενικά μια εξομάλυνση των μεταβολών (Εικόνα 4.54). Αυτό θα λέγαμε ότι οφείλεται σε ένα είδος εσωτερικής τραχύτητας, μη ομοιογένειας δηλαδή του στόχου λόγω των κόκκων της σκόνης.



Εικόνα 4.54: Φάσματα Si στις 170° σε ενέργειες 2850 keV (αριστερά) και 3160 keV (δεξιά).

Η σύγκριση των φασμάτων που ελήφθησαν από την παστίλια Si, με τα φάσματα που πήραμε ακτινοβολώντας τον στόχο λείου Si, δείχνουν ότι αυτές οι διαφορές στην μορφή προκαλούνται όντως από την επιλογή του υλικού και δεν οφείλονται σε λάθος εκτίμηση των ενεργών διατομών (Εικόνα 4.55).

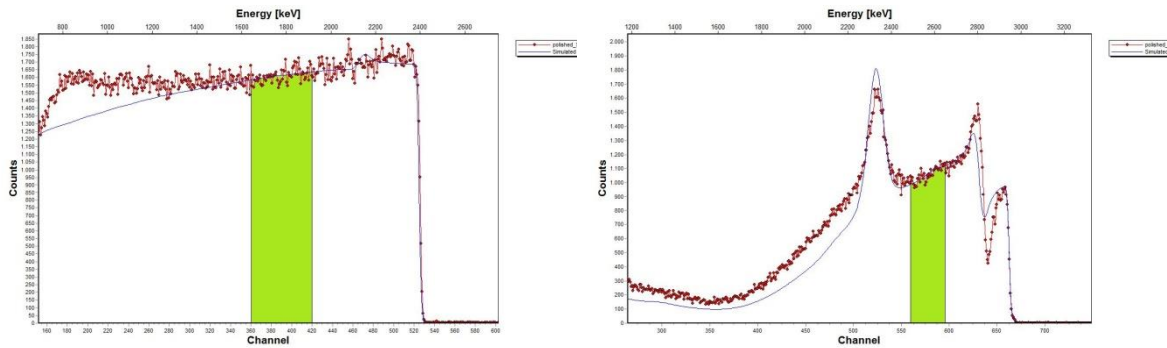


Εικόνα 4.55: Πειραματικά φάσματα ($3400 \text{ keV}-120^\circ$) από στόχο polished Si (αριστερά) και από παστίλια (δεξιά). Είναι εμφανής η εξομάλυνση των διακυμάνσεων στην δεύτερη περίπτωση.

Είναι λοιπόν αδύνατη η επίτευξη του αρχικού πειραματικού στόχου. Εναλλακτικά αποφασίστηκε να γίνει μία ποιοτική σύγκριση της συμπεριφοράς των ενεργών διατομών βασισμένη σε φάσματα που ελήφθησαν από ακτινοβόληση λείου Si. Δεν μπορούν βέβαια να βγουν αξιόπιστα συμπεράσματα για την ποσοτική συμπεριφορά, καθώς στον στόχο λείου Si δεν υπάρχει στοιχείο για την κανονικοποίηση του φορτίου (όπως ο Au στην

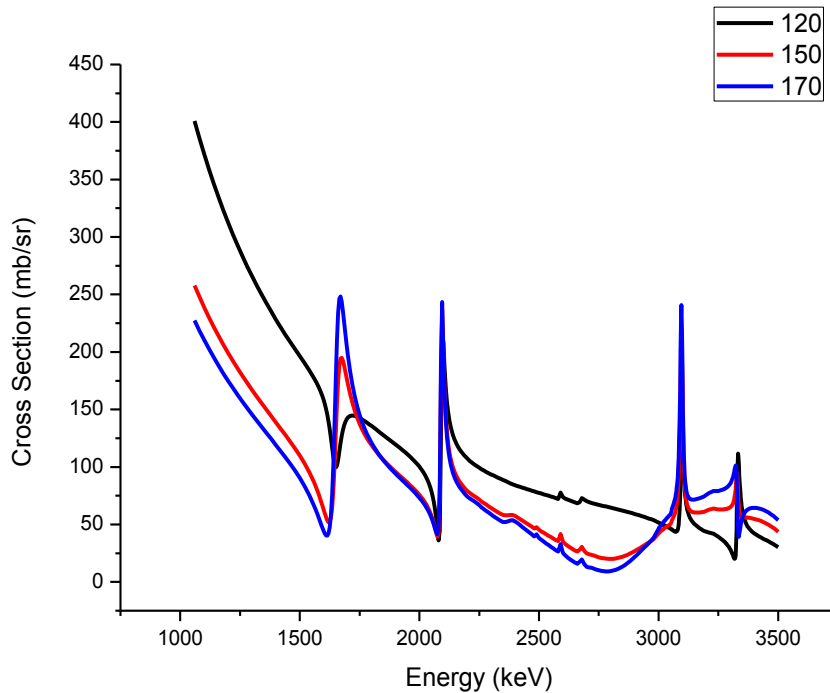
παστίλια). Φάσματα λείου Si ελήφθησαν σε ενέργειες 2000 keV, 2670 keV, 2850 keV και 3400 keV.

Η μέθοδος για να επιτευχθεί η σύγκριση είναι η ρύθμιση του φορτίου με την εξίσωση των ολοκληρωμάτων σε κάποιο πλατό του πυριτίου (προφανώς σε μη Rutherford περιοχή αλλά όχι πάνω σε συντονισμό).



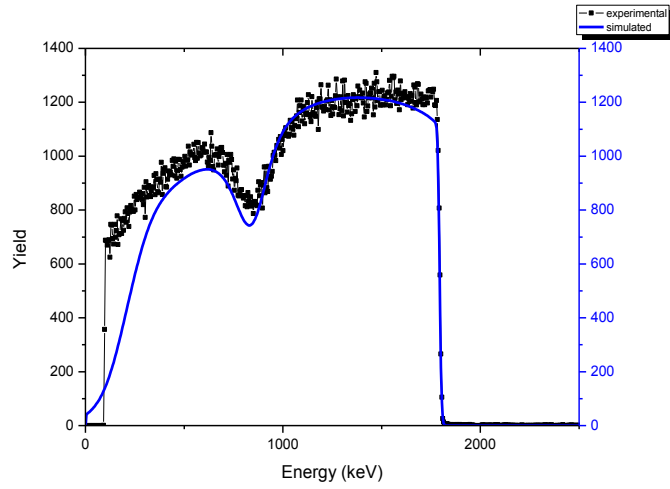
Εικόνα 4.56: Εξίσωση ολοκληρωμάτων στα πλατό του πυριτίου. Αριστερά φάσμα στα 2670 keV, 120°. Δεξιά φάσμα στα 3400 keV, 170°

Στην Εικόνα 4.57 είναι εμφανής η μεγάλη γωνιακή εξάρτηση της ενεργού διατομής του πυριτίου. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται εδώ τα φάσματα σε γωνίες 120° και 170°.

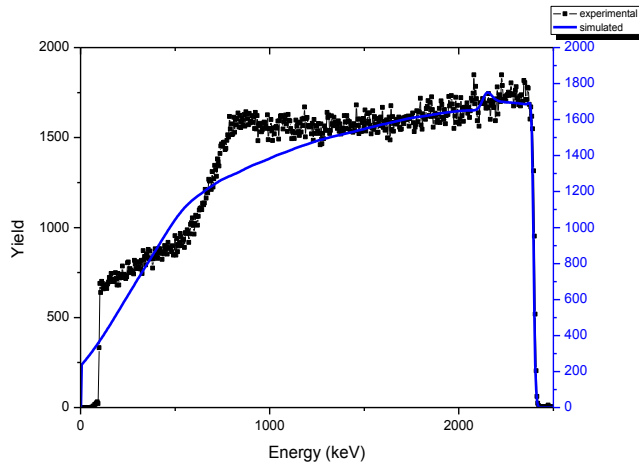


Εικόνα 4.57: Διαφορική ενεργός διατομή του Si συναρτήσει της ενέργειας σε γωνίες 120°, 150°, 170° (Evaluated data from SigmaCalc 2.0)

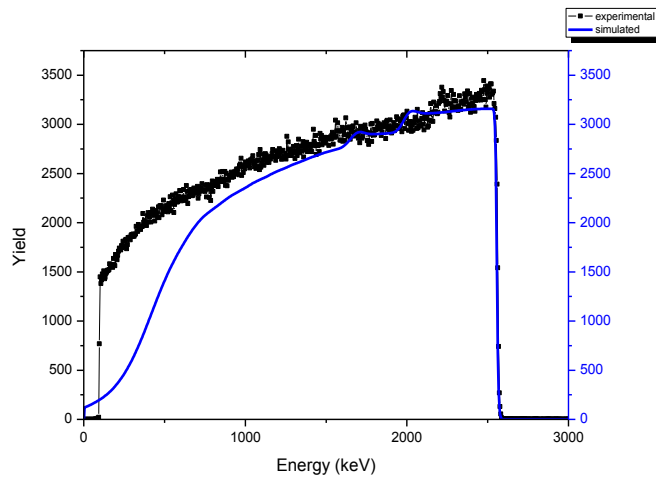
Γωνία σκέδασης 120°



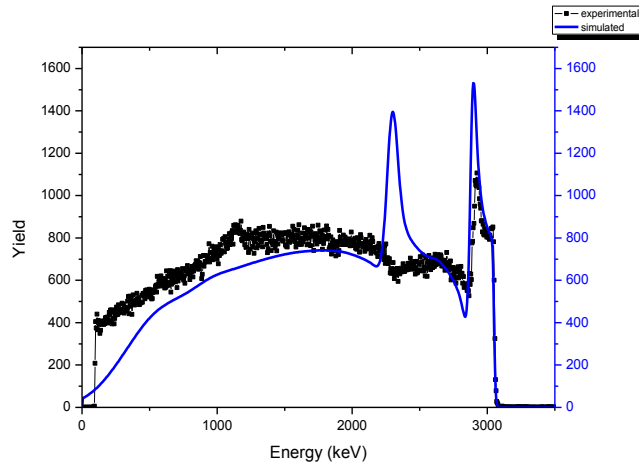
Εικόνα 4.58: Ενέργεια 2000 keV



Εικόνα 4.59: Ενέργεια 2670 keV

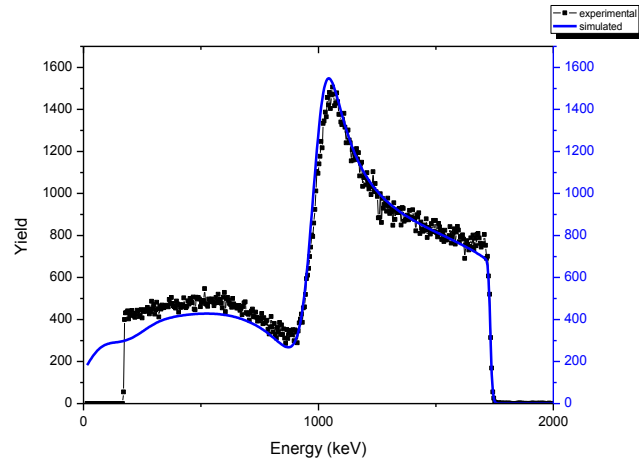


Εικόνα 4.60: Ενέργεια 2850 keV

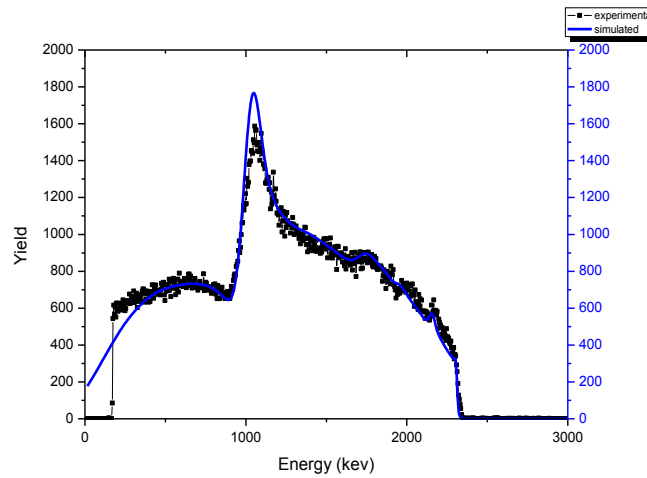


Εικόνα 4.61: Ενέργεια 3400 keV

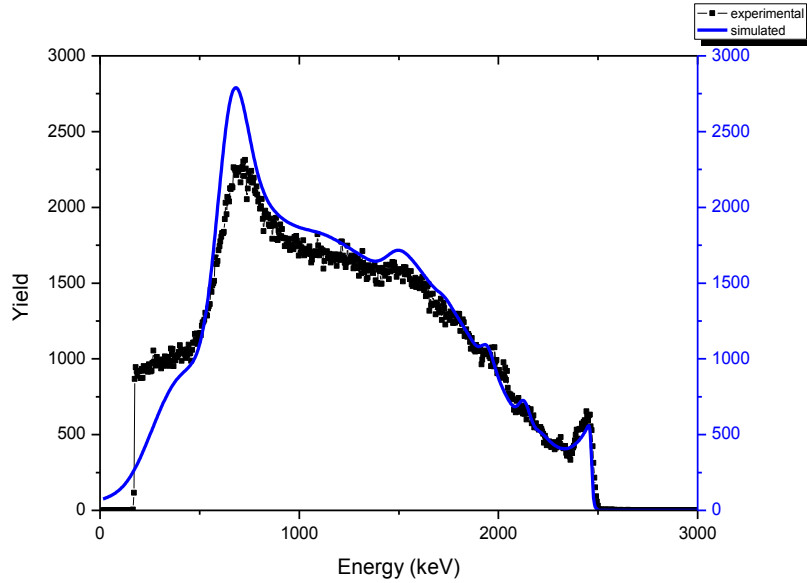
Γωνία σκέδασης 170°



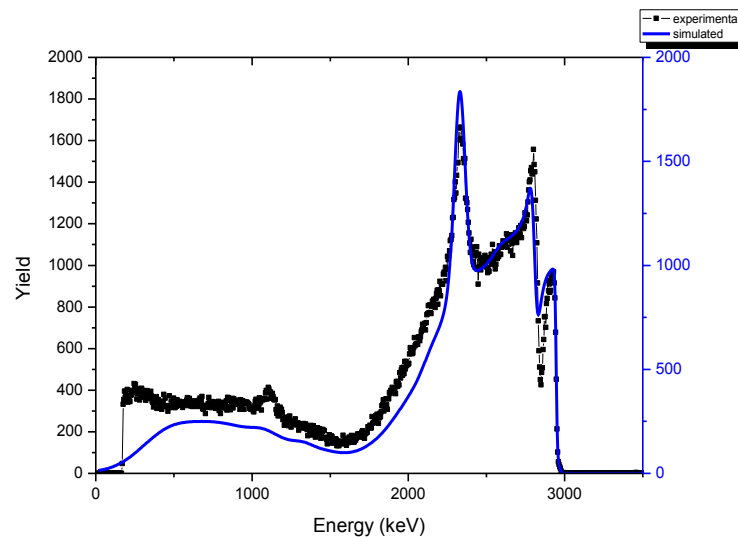
Εικόνα 4.62: Ενέργεια 2000 keV



Εικόνα 4.63: Ενέργεια 2670 keV



Εικόνα 4.64: Ενέργεια 2850 keV



Εικόνα 4.65: Ενέργεια 3400 keV

Από το φάσμα των 3400 keV στις 120° (Εικόνα 4.61) φαίνεται ότι στα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα οι συντονισμοί της περιοχής 2500-3000 keV είναι υπερτιμημένοι. Κάτι τέτοιο συμβαίνει και για τον συντονισμό κοντά στα 3000 keV στις 170° (Εικόνα 4.65) όμως γενικά οι πειραματικές μετρήσεις στις 170° ανταποκρίνονται καλύτερα στην πραγματικότητα αφού η μορφή της ενεργού διατομής είναι αρκετά κοντινή με τα αποτελέσματά από το πείραμα μας.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και προοπτικές

Στην παρούσα εργασία έγινε συστηματική προσπάθεια για να ελεγχθεί η ορθότητα των ενεργών διατομών των ελαστικών σκεδάσεων $^{nat}\text{Si}(p,p) \ ^{nat}\text{Si}$, $^{nat}\text{O}(p,p) \ ^{nat}\text{O}$ και $^{nat}\text{Ca}(p,p) \ ^{nat}\text{Ca}$ που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, σε ενέργειες από 1 έως 4 MeV και σε γωνίες σκέδασης 120° , 150° , 160° και 170° . Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν παχείς στόχοι. Στην περίπτωση του πυριτίου χρησιμοποιήθηκε παστίλια που κατασκευάστηκε από σκόνη πυριτίου, για το οξυγόνο επιλέχθηκε παστίλια Nb_2O_5 και για το ασβέστιο παστίλια CaCO_3 . Στις επιφάνειες των στόχων Si και CaCO_3 δημιουργήθηκε λεπτό στρώμα χρυσού με την μέθοδο της εξάχνωσης.

Είδαμε ότι για το οξυγόνο έγινε μια καλή δουλειά η οποία πιστεύουμε ότι θα συμπληρώσει αποτελεσματικά την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα χρειάζονται διορθώσεις στην ένταση και στην θέση των δύο συντονισμών αλλά και σε ορισμένες non-resonant περιοχές.

Αντίθετα για το ασβέστιο και το πυρίτιο παρά την προσπάθεια και τις προσδοκίες δεν κατέστη τελικά δυνατόν να γίνει μια αξιόπιστη αξιολόγηση των μετρημένων ενεργών διατομών. Αυτό συνέβη διότι ο φθορισμός του CaCO_3 και η εσωτερική τραχύτητα του Si αλλοίωσαν τα αποτελέσματα.

Συνιστάται στο μέλλον να ξαναγίνουν μετρήσεις για το benchmarking αυτών των δύο στοιχείων. Πρέπει βέβαια προηγουμένως να βρεθούν τρόποι για την επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στο πείραμά μας. Για τον σκοπό αυτό προτείνεται για την περίπτωση του πυριτίου η μέτρηση σε στόχο ανεστραμμένου κρυσταλλικού πυριτίου (ώστε να αποφευχθούν τα channeling effects). Για το ασβέστιο είναι απαραίτητο να βρεθεί στόχος που δεν παρουσιάζει φθορισμό.

Βιβλιογραφία

- [1] K.S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons, 1988
- [2] W.-K. Chu, J.W. Mayer, M.A. Nicolet, Backscattering Spectrometry, Academic Press Inc, 1978
- [3] V. Paneta, J.L. Colaux, A.F.Gurbich, C.Jeynes, M. Kokkoris, Benchmarking experiments for the proton backscattering on ^{23}Na , ^{31}P and $^{\text{nat}}\text{S}$ up to 3.5 MeV, Nucl. Instr. Meth. B 328 (2014) 1-7
- [4] www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm
- [5] www.surreyibc.ac.uk/sigmacalc/
- [6] M. Mayer, SIMNRA User's Guide, Report IPP 9/113, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany, 1997
- [7] Μ. Διακάκη, Ο επιταχυντής Van de Graaff TANDEM του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” – Εγχειρίδιο εισαγωγή στις βασικές έννοιες λειτουργίας του επιταχυντή
- [8] Κ. Πρεκετές, Μελέτη της αντίδρασης $^{32}\text{S}(p,p'\gamma)^{32}\text{S}$ στο ενεργειακό εύρος 3-4 MeV, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ 2012
- [9] <http://www.srim.org/>
- [10] Y. Wang, M. Nastasi, Handbook of Modern Ion Beam Analysis, Materials Research Society, 2010
- [11] A. Numela, Non-Rutherford elastic cross sections for materials analysis, University of Helsinki 2001
- [12] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, 2000
- [13] Β. Πανέτα, Μελέτη του συστήματος $p+^{12}\text{C}$ για ενέργειες πρωτονίων μέχρι 7 MeV, Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ 2012