

## Open Schools Journal for Open Science

Vol 2, No 1 (2019)

Special Issue Articles from the 1st Greek Student Conference on Research and Science



### Ανάλυση Ιοντικής Δέσμης με Οπισθοσκέδαση Rutherford

*Νίκος Κουβάτσος, Φοίβη Ρουσοχατζάκη, Λαμπρινή Παπασίμπα, Αναστάσιος Λαγογιάννης*

doi: [10.12681/osj.19341](https://doi.org/10.12681/osj.19341)

#### To cite this article:

Κουβάτσος Ν., Ρουσοχατζάκη Φ., Παπασίμπα Λ., & Λαγογιάννης Α. (2019). Ανάλυση Ιοντικής Δέσμης με Οπισθοσκέδαση Rutherford. *Open Schools Journal for Open Science*, 2(1), 86–97. <https://doi.org/10.12681/osj.19341>

# Ανάλυση Ιοντικής Δέσμης με Οπισθοσκέδαση Rutherford (RBS)

Νίκος Κουβάτσος<sup>1</sup>, Φοίβη Ρουσοχατζάκη<sup>1</sup>, Λαμπρινή Παπατοσίμπα<sup>2</sup>,  
Αναστάσιος Λαγογιάννης, Ερευνητής<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Πρότυπο Γενικό Λύκειο Βαρβακειού Σχολής

<sup>2</sup>Πειραματικό Σχολείο Πανεπιστημίου Αθήνας

<sup>3</sup>Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», Αθήνα

## Περίληψη

Στόχος του πειράματος ήταν ο προσδιορισμός της σύστασης άγνωστων δειγμάτων μέσω της ανάλυσης με ιοντικές δέσμες, συγκεκριμένα δευτερίου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για να βομβαρδιστούν τα δείγματα. Η επιταχυνόμενη δέσμη ιόντων δευτερίου προσπίπτει στα προς ανάλυση δείγματα και τα ιόντα σκεδάζονται ελαστικά. Στο κύριο πείραμα χρησιμοποιήθηκε φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford για ανίχνευση βαρέων πυρήνων σε ελαφρά υποστρώματα. Τα στοιχεία των δειγμάτων ταυτοποιήθηκαν με χρήση αρχών διατήρησης ενέργειας και ορμής. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η ενεργός διατομή Rutherford.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένας θάλαμος κενού, συνδεδεμένος με τον επιταχυντή ιόντων. Με την βοήθεια ενός targetholder τοποθετήθηκαν διάφορα δείγματα. Κάποια δείγματα ήταν γνωστά π.χ. χρυσός πάνω σε γυαλί, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και κάποια άγνωστα δείγματα. Μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή συλλέχθηκαν τα φάσματα από τα οπισθοσκεδασμένα ιόντα. Με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης φάσματος υπολογίστηκε η αντιστοιχία καναλιού ψηφιακού σήματος και ενέργειας με βάση τις μετρήσεις σε γνωστά υλικά ώστε να προσδιοριστεί το άγνωστο δείγμα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσδιόρισαν με ακρίβεια το άγνωστο δείγμα Οξείδιο του Νικελίου με Πυρίτιο.

## Λέξεις κλειδιά

ανιχνευτές πυριτίου; οπισθοσκέδαση Rutherford; θάλαμος κενού; επιταχυνόμενα ιόντα δευτερίου; ενεργειακό φάσμα

## Εισαγωγή

Οι βασικές αρχές της φασματοσκοπίας οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy) έχουν τις ρίζες τους στα πειράματα των Rutherford και Geiger - Marsden (1909-1913). Τότε, το επικρατέστερο πρότυπο για την δομή του πυρήνα ήταν αυτό του Thomson, το οποίο θεωρούσε ότι η ύλη και το φορτίο κατανέμονταν συμμετρικά στο άτομο, οπότε η ενεργός διατομή (αναφέρεται εκτενέστερα παρακάτω) της σκέδασης σε μεγάλες γωνίες θα έπρεπε να λαμβάνει μικρές τιμές. Ο Rutherford στα πειράματα του μέτρησε την ενεργό διατομή σε μεγάλες γωνίες και προσδιόρισε ότι αυτή έπαιρνε μεγάλες τιμές, γεγονός που τον οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η ύλη και το φορτίο στο άτομο δεν κατανέμονται ομοιόμορφα, αλλά εντοπίζεται κυρίως στο κέντρο του. Έτσι επικράτησε το πρότυπο του Rutherford.

Σήμερα η μέθοδος με την οποία ο Rutherford προσδιόριζε την ενεργό διατομή αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την ταυτοποίηση της στοιχειομετρίας λεπτών υμενίων καθώς και της κατανομής της σε διάφορα βάθη. Το γεγονός ότι φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση σωματίων χαμηλής ενέργειας με την ύλη έχουν αναλυθεί εξονυχιστικά επιτρέπει στην φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης να έχει ισχυρή μαθηματική υποστήριξη και να εφαρμόζεται συστηματικά και με επιτυχία σε άμορφα υλικά.

Στα πειράματα αυτά, πυρήνες μάζας  $M_1$  και ενέργειας  $E$  προσπίπτουν στον υπό ανάλυση στόχο και σκεδάζονται ελαστικά. Η ανίχνευση των σκεδαζόμενων «πυρήνων βλημάτων» γίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στις 180ο ως προς την κατεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης. Σε αυτή την περιοχή οι μεταβολές στα φάσματα συναρτήσει του ατομικού αριθμού είναι περισσότερο έντονες. Η βασική αρχή της RBS στηρίζεται στο ότι η γωνία, η ενέργεια και ο αριθμός των προσπιπτόντων σωματιδίων που σκεδάζονται, μπορούν να συσχετισθούν με το είδος, τη θέση και την ποσότητα των ατόμων στο στόχο.

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα φάσματα των εξής δειγμάτων: καθαρό αλουμίνιο, χρυσό πάνω σε γυαλί, κι ένα άγνωστο δείγμα που το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ανέδειξε σε οξειδίο του νικελίου πάνω σε οξειδίο του πυριτίου.

## Θεωρητικό μοντέλο

Κινηματικός παράγοντας

Βλήμα μάζας  $M_a$  και αρχικής ενέργειας  $E_0$  προσκρούει σε ακίνητο πυρήνα-στόχο μάζας  $M_X$ . Η γεωμετρία της ελαστικής σκέδασης πριν και μετά την αντίδραση, φαίνεται στο Σχήμα 1. Κατά τη σκέδαση ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του βλήματος μεταφέρεται στον στόχο. Έτσι το σκεδαζόμενο σωματίδιο απομακρύνεται με ενέργεια  $E_1$  μικρότερη από την αρχική του.

Ορίζουμε τον κινηματικό παράγοντα  $K$  ως το πηλίκο με αριθμητή την κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος σωματίου μετά την ελαστική κρούση και παρονομαστή την αρχική του κινητική ενέργεια: .

Εφαρμόζουμε τις αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής

Αρχή διατήρησης της ενέργειας:

$$\frac{1}{2} M_a u_0^2 = \frac{1}{2} M_a u_1^2 + \frac{1}{2} M_X u_2^2 \quad (1)$$

Διατήρηση της ορμής κατά τη διεύθυνση της αρχικής ταχύτητας του βλήματος

$$M_a u_0 = M_a u_1 \cos q + M_X u_2 \cos x \quad (2)$$

Διατήρηση της ορμής στη κάθετη προς την διεύθυνση της αρχικής ταχύτητας του βλήματος

$$0 = M_a u_1 \sin q - M_X u_2 \sin x \quad (3)$$

**Σχήμα 1:** Πυρήνας  $M_a$  με ταχύτητα  $u_0$  συγκρούεται με ακίνητο πυρήνα μάζας  $M_X$

Συνδυάζοντας τις (1), (2), (3) προκύπτει

$$K = \left\{ \frac{\left[ 1 - \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} + \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \cos \theta}{1 + \left( \frac{M_1}{M_2} \right)} \right\}^2 \quad (4)$$

Από την εξίσωση (4) προκύπτει ότι η ενέργεια του σκεδαζόμενου σωματιδίου εξαρτάται μόνο από τη μάζα του, τη μάζα των ατόμων του στόχου και τη γωνία σκέδασης. Ως εκ τούτου, αν γνωρίζουμε τη μάζα του προσπίπτοντος σωματιδίου και μετρήσουμε τη γωνία σκέδασης, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα των ατόμων του στόχου . (Ασημακόπουλος Παναγιώτης, 2002).

Ενεργός διατομή

Το μέγεθος της ενεργού διατομής  $\sigma$  εκφράζει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μια πυρηνική αντίδραση υπό ορισμένες πειραματικές συνθήκες όπου σωματίο  $\alpha$  σκεδάζεται από πυρήνα  $A$  και προκύπτει πυρήνας  $B$  και σωματίο  $b$  ή συμβολικά  $A + \alpha \rightarrow B + b$ . Η ενεργός διατομή δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{R_b}{I_\alpha N}$$

Όπου  $R_b$  ο αριθμός των σωματίων  $b$  που ανιχνεύονται ανά μονάδα χρόνου,  $I_\alpha$  ο αριθμός σωματίων  $\alpha$  που προσπίπτουν στον στόχο  $A$  ανά μονάδα χρόνου και  $N$  η επιφανειακή πυκνότητα του στόχου  $A$  (αριθμός πυρήνων ανά μονάδα επιφάνειας).

Η ενεργός διατομή μετριέται σε μονάδες επιφανείας:  $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ .

Απώλεια ενέργειας

Ένα φορτισμένο σωματίο κατά τη διαδρομή του μέσα από την ύλη χάνει ενέργεια κυρίως λόγω των αλληλεπιδράσεων του με τα ηλεκτρόνια του στόχου. Όσο περισσότερο διεισδύει το σωματίο μέσα στο υλικό (όσο περισσότερο παχύ είναι το υλικό), τόσο περισσότερες αλληλεπιδράσεις θα έχει λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων. Η απώλεια ενέργειας του σωματίου δίνεται από τον τύπο:

$$E(x) = E_0 - \varepsilon \cdot n \cdot \Delta x \quad (5)$$

όπου  $E_0$  η αρχική ενέργεια του σωματίου,  $n$  η πυκνότητα των ατόμων,  $\Delta x$  το μήκος διείσδυσης και  $\varepsilon$  η ενεργός διατομή απώλειας ενέργειας η οποία δίνεται από τον τύπο:

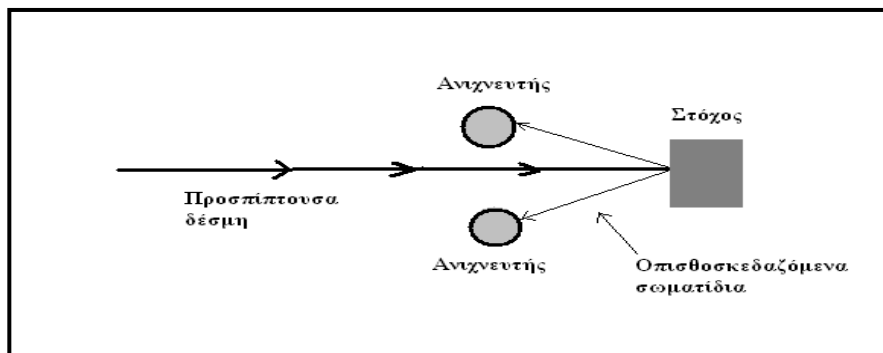
$$\varepsilon = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right) \quad (6)$$

όπου  $\varepsilon$  η ειδική απώλεια ενέργειας. Το σωματίο χάνει περαιτέρω ενέργεια και κατά την έξοδο του από τον στόχο.

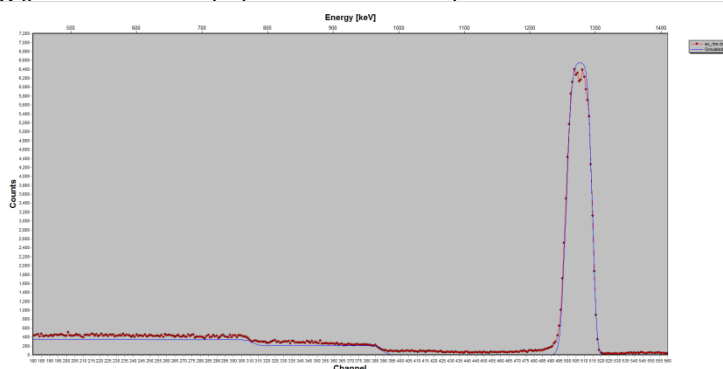
Ερμηνεία φάσματος οπισθοσκέδασης

Όπως φαίνεται από το σχήμα, η κορυφή είναι πεπλατυσμένη με συνέπεια την εμφάνιση ενός πλατώ, το μήκος του οποίου εξαρτάται από την απώλεια ενέργειας των ιόντων της δέσμης μέσα στο υλικό και παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πάχος του στόχου. Το ύψος της καμπύλης του

φάσματος σχετίζεται με το πλήθος των ατόμων του συγκεκριμένου στοιχείου του στόχου και επιτρέπει τον προσδιορισμό της στοιχειομετρίας του. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός στοιχείου του στόχου, τόσο υψηλότερες είναι οι ενέργειες στις οποίες εμφανίζεται το στοιχείο αυτό και τόσο μεγαλύτερο είναι το yield(αριθμός σκεδαζόμενων σωματιδίων).



Σχήμα 1: Τυπικό πείραμα οπισθοσκέδασης



Παράδειγμα ενεργειακού φάσματος βαρέως υλικού σε ελαφρύ υπόστρωμα.

## Πειραματική διάταξη και πειραματικά αποτελέσματα

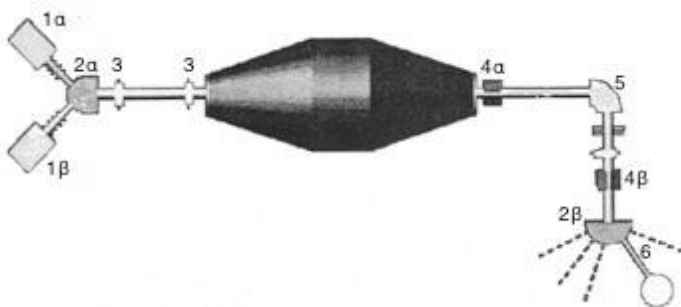
### Ο επιταχυντής

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον επιταχυντή τύπου Van de Graaf Tandem μέγιστης διαφοράς δυναμικού 5.5 MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».

Στο Σχήμα 2 παριστάνεται ο επιταχυντής ο οποίος αποτελείται από ένα σύστημα δυο πηγών ιόντων: την πηγή Sputter (1α) για την παραγωγή των βαρέων ιόντων όπως 12C και 16O και την πηγή duoplasmatron (1β) για την παραγωγή ελαφρών ιόντων όπως 1H και 2H, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα για την παραγωγή της δέσμης δευτερίων. Και οι δυο πηγές παράγουν αρνητικά ιόντα. Στην πηγή duoplasmatron υπάρχει ένας κύλινδρος, ο οποίος

περιβάλλεται από ένα πηνίο, τοποθετημένο ομοαξονικά ως προς τον κύλινδρο. Ο κύλινδρος γεμίζει με το αέριο του στοιχείου που πρόκειται να επιταχυνθεί. Στη μια πλευρά του σωλήνα, βρίσκεται η άνοδος, η οποία διαθέτει μια μικρή οπή (<math><0.5\text{mm}</math>) ενώ μετά την άνοδο τοποθετείται ένα ηλεκτρόδιο εξαγωγής. Από την άλλη πλευρά του σωλήνα βρίσκεται το ηλεκτρόδιο καθόδου, το οποίο αποτελείται από πλατίνα επικαλυμμένη με ανθρακικό βάριο (Φωτεινού Βαρβάρα, 2007).

Κατά την διέλευση ρεύματος μερικών δεκάδων Ampere από το ηλεκτρόδιο καθόδου, προκαλείται εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνειά του, τα οποία συγκρούονται με τα μόρια του αέρα και δημιουργούν ένα βολταϊκό τόξο λίγων Ampere.



**Σχήμα 2:** Σχηματική αναπαράσταση της επιταχυντικής διάταξης

Η χαμηλή πίεση του αερίου σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία που δημιουργεί το τόξο, δημιουργούν την κατάσταση πλάσματος, που συγκρατείται πλησίον της οπής εξαγωγής λόγω του πεδίου του πηνίου. Τα περιφερειακά αρνητικά ιόντα του πλάσματος έλκονται από το ηλεκτρόδιο εξαγωγής, καθώς είναι φορτισμένο σε θετική τάση (+20kV), οδηγούνται σε ένα ηλεκτροστατικό φακό, εστιάζονται και στη συνέχεια οδηγούνται στον προεπιταχυντικό σωλήνα όπου και υφίστανται την πρώτη επιτάχυνση των 60kV. Στη συνέχεια τα αρνητικά ιόντα οδηγούνται στον πρώτο μαγνήτη απόκλισης (2α), όπου τα επιθυμητά αρνητικά ιόντα διαχωρίζονται ανάλογα με την μάζα τους και στρέφονται κατά 30ο προκειμένου να εισέλθουν στην κεντρική γραμμή μεταφοράς. Έπειτα, και αφού η δέσμη περάσει μέσα από δυο φακούς εστίασης (3), εισέρχεται σε ηλεκτρικό πεδίο με θετικό (ελκτικό) δυναμικό (ως 5 MV) από τη γεννήτρια του επιταχυντή Van de Graaf και διέρχεται από τη δεξαμενή του επιταχυντή.

Κατόπιν, επειδή τα ιόντα στο κέντρο του επιταχυντή διέρχονται από ένα λεπτό υμένιο άνθρακα, μετατρέπονται σε θετικά, καθώς το υμένιο λειτουργεί ως απογυμνωτής ηλεκτρονίων. Η θετική πλέον δέσμη των ιόντων απωθείται από το θετικό δυναμικό της γεννήτριας και επιταχύνεται για δεύτερη φορά στο σωλήνα επιτάχυνσης υψηλής ενέργειας. Στη συνέχεια η δέσμη διέρχεται μέσα από ηλεκτρομαγνητικά τετράπολα (4α) προκειμένου να εστιαστεί και οδηγείται στον

μαγνήτη ανάλυσης (5), όπου γίνεται η τελική επιλογή των ιόντων βάσει της επιθυμητής ενέργειας και στρέφεται κατά  $90^\circ$ . Η ακρίβεια της ενέργειας της δέσμης δευτερίων που χρησιμοποιήθηκε για το παρόν πείραμα ήταν 2 keV.

#### Ανιχνευτές

Για να ανιχνευθούν τα εκπεμπόμενα σωματίδια χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής πυριτίου επιφανειακού φραγμού, που τοποθετήθηκε σε σταθερή γωνία  $170^\circ$ . Οι ανιχνευτές αυτού του τύπου περιλαμβάνουν έναν κρύσταλλο πυριτίου τύπου n (όπου κύριος φορέας φορτίου είναι τα ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια του οποίου σχηματίζονται παγίδες ηλεκτρονίων στις οποίες ο κύριος φορέας φορτίου είναι οι οπές και συμπεριφέρονται ως ένα υλικό τύπου p. Η επαφή αυτή p-n σχηματίζει μια περιοχή ανισομερούς κατανομής φορτίου που ονομάζεται ζώνη απογύμνωσης.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο εισέλθει στην περιοχή αυτή αλληλεπιδρά με τα άτομα του πυριτίου τα ιονίζει και σχηματίζει ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων κατά μήκος της τροχιάς του. Με αυτό το τρόπο το σωματίδιο χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του και στην περίπτωση που οι γεωμετρικές διαστάσεις του ανιχνευτή είναι αρκετά μεγάλες και χάνει όλη την ενέργειά του. Τα ηλεκτρόνια συλλέγονται μέσω μιας διαφοράς δυναμικού στα άκρα του ανιχνευτή. Το συλλεχθέν αυτό φορτίο δίνει ένα παλμό με ύψος ανάλογο με την απώλεια ενέργειας του προσπίπτοντος σωματιδίου. Η απόδοση ενός ανιχνευτή πυριτίου επιφανειακού φραγμού είναι 100%.

Η μέτρηση της γωνίας ανίχνευσης έγινε με τη βοήθεια γωνιόμετρου ακριβείας τοποθετημένο σε θάλαμο υψηλού κενού, προκειμένου να επιτευχθεί ακριβής γωνιακή τοποθέτηση του ανιχνευτή ως προς το στόχο. Στο κέντρο του γωνιακού θαλάμου βρίσκεται βάση με την κατάλληλη υποδοχή για την τοποθέτηση των δειγμάτων που πρόκειται να βομβαρδιστούν και η οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένη. Το κενό δημιουργήθηκε με δυο αντλίες κενού. Και οι δυο αντλίες είναι τουρμπομοριακές για την αποφυγή της μόλυνσης του κενού από υδρογονάνθρακες οι οποίοι εναποτίθενται επάνω στο στόχο και αυξάνουν το πάχος του δημιουργώντας δυσκολίες στη μέτρηση της ενεργού διατομής.

#### Περιγραφή Στόχου

Στον δειγματοφορέα τοποθετήθηκαν τα εξής δείγματα: Quartz, ένα δείγμα 1: καθαρό Al, δείγμα 2 : χρυσός πάνω σε γυαλί ( πρώτη στρώση Au δεύτερη στρώση SiO<sub>2</sub> ), και δείγμα 3: άγνωστο (σε εμάς) δείγμα. Η δέσμη των δευτερίων μέσα από 2 διαφράγματα τανταλίου, οδηγήθηκε πάνω στα δείγματα και κάθε φορά με την βοήθεια μοτέρ που ρύθμιζαν την οριζόντια και κατακόρυφη θέση της βάσης κατευθύναμε στην πορεία της δέσμης το αντίστοιχο δείγμα.

#### Ηλεκτρονική διάταξη



Με την βοήθεια ηλεκτρονικής διάταξης, από το συλλεγόμενο φορτίο στον ανιχνευτή λαμβάνουμε την τελική μορφή του φάσματος. Το φορτίο που συλλέγεται από τον ανιχνευτή περνάει από έναν προενισχυτή, ο οποίος δίνει μια αρχική ενίσχυση στο σήμα του ανιχνευτή με σκοπό την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Στη συνέχεια στον ενισχυτή πραγματοποιείται η κύρια ενίσχυση του σήματος, η αποκοπή θορύβων μέσω φίλτρων συχνοτήτων και η διαμόρφωση του σήματος. Το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω ενός μετατροπέα (ADC), ο οποίος ανάλογα με το ύψος του παλμού το καταχωρεί σε ένα από τα κανάλια του πολυκαναλικού αναλυτή (MCA). Το ψηφιακό σήμα καταλήγει στον Η/Υ όπου και παρουσιάζεται με την μορφή ενεργειακού φάσματος των εκπεμπόμενων σωματιδίων.

## Συμπεράσματα

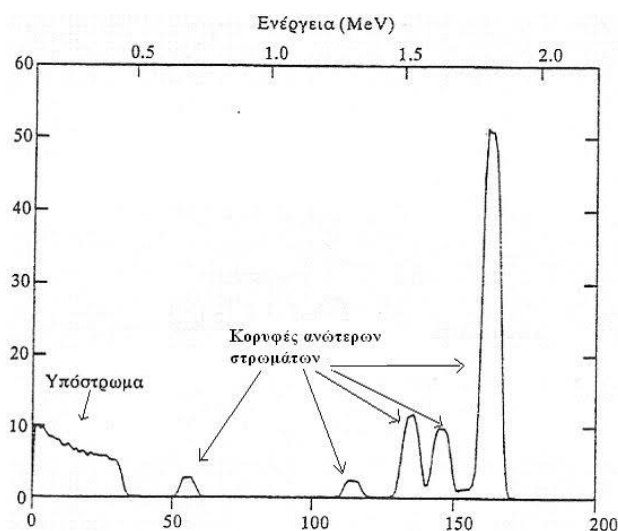
### Βαθμονόμηση φασμάτων

Το αρχικό φάσμα που λαμβάνουμε από τον Η/Υ κατά την μέτρηση περιέχει τον αριθμό των γεγονότων συναρτήσει των καναλιών, καθώς τα γεγονότα που ανιχνεύονται, καταγράφονται από τον πολυκαναλικό αναλυτή σε ένα από τα κανάλια ανάλογα με το ύψος του παλμού. Η ανάγκη να αναγνωριστούν οι κορυφές του φάσματος, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί μόνο βάσει της ενέργειάς τους μας οδηγεί στην ενεργειακή βαθμονόμηση των φασμάτων.

Για το λόγο αυτό αρχικά υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος catkin οι αναμενόμενες τιμές των σκεδαζόμενων σωματιδίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή και γι' αυτό πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά, από τη στιγμή που ο καθένας κάλυπτε μια συγκεκριμένη γωνία. Στη συνέχεια θεωρώντας ως σημεία βαθμονόμησης τις κορυφές των αντιδράσεων που ήταν περισσότερο ευδιάκριτες βρέθηκε η αντιστοιχία των καναλιών ενέργειας.

### Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η ανάλυση έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης SIMNRA όπου αρχικά έγινε βαθμονόμηση του συλλεχθέντος φάσματος και αναγνώριση των παρατηρούμενων κορυφών



Σχήμα 3: Φάσμα

Στην πιο απλή περίπτωση ο στόχος αποτελείται από ένα παχύ στρώμα στο πίσω μέρος (μικρού Z) και από πάνω υπάρχουν λεπτά στρώματα διαφορετικών στοιχείων (μεγαλύτερου Z). Εάν οι πυρήνες του υποστρώματος και των άλλων στρωμάτων δεν έχουν μεγάλη διαφορά μάζας το φάσμα θα παρουσιάσει ένα συνεχές, το οποίο θα προέρχεται από το υπόστρωμα και άλλες μεμονωμένες κορυφές από τα στοιχεία των λεπτών στρωμάτων (σχήμα 3).

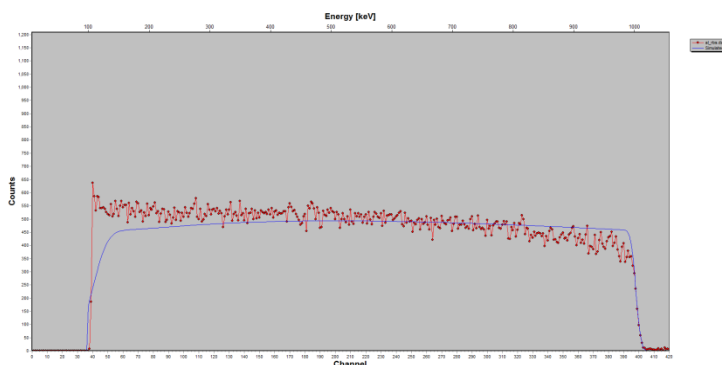
Με τη βοήθεια αυτού του προγράμματος, ξεκίνησε η προσομοίωση στον απλό στόχο του αλουμίνιο (Al), χρησιμοποιώντας τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα 1 (φορτίο, resolution του ανιχνευτή, φορτίο, γωνία ανίχνευσης, ενέργεια δέσμης κτλ.)

Φορτίο*Στερεά Γωνία (Q*Ω)	Resolution ανιχνευτή	Γωνία Ανίχνευσης	Ενέργεια Δέσμης	Δείγμα
$6,40 \cdot 10^9$	18 keV	170°	1350 keV	Al

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν :

Δείγμα 1: Αλουμίνιο απείρου πάχους

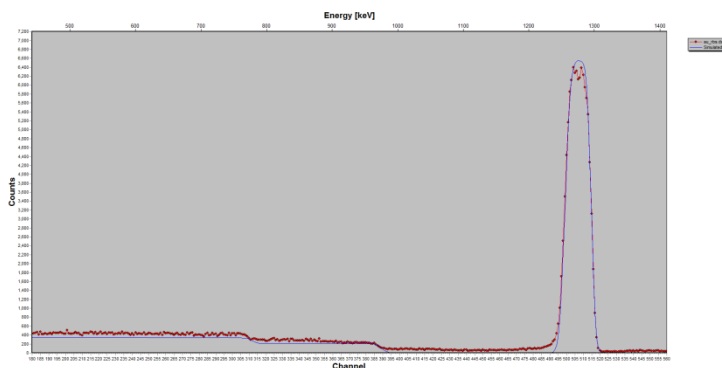
Το πάχος του αλουμινίου είναι φαινομενικά άπειρο σε ατομικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό στο ενεργειακό φάσμα του αλουμινίου δεν παρατηρούνται κορυφές καθώς οι πυρήνες του δευτερίου δεν οπισθοσκεδάζονται. Όλη η ενέργεια των πυρήνων δευτερίου έχει απορροφηθεί.



Σχήμα 4: Φάσμα Al

Δείγμα 2: Χρυσός πάνω σε γυαλί

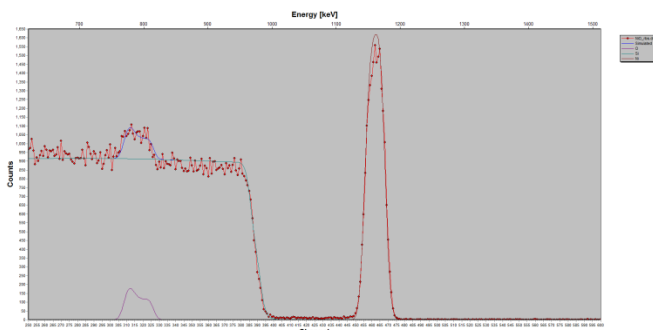
Το πάχος του χρυσού είναι πολύ λεπτό καθώς στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτό στρώμα χρυσού πάχους μερικών ατόμων. Για τον λόγο αυτό, παρατηρείται μεγάλο πλήθος γεγονότων (δευτέρια που οπισθοσκεδάζονται) που συγκεντρώνονται στην μεγάλη κορυφή στο ενεργειακό φάσμα του χρυσού. Επειδή η δεύτερη στρώση είναι οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$  /γυαλί) δεν παρατηρούμε περαιτέρω κορυφή στο υπόστρωμα όπως στην περίπτωση του αλουμινίου (φαινομενικά άπειρο σε ατομικό επίπεδο).



Σχήμα 5: Χρυσός πάνω σε γυαλί

Δείγμα 4: Άγνωστο

Έχοντας πλέον εξοικειωθεί με τη χρήση του λογισμικού SIMNRA, αποφασίσαμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση του άγνωστου δείγματος. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης ανέδειξε το δείγμα οξείδιο του νικελίου πάνω σε πυρίτιο. Στην περίπτωση του οξειδίου του νικελίου παρατηρούμε ότι στο φάσμα εκτός από την κορυφή που εμφανίζεται για το νικέλιο, εμφανίζεται και μια κορυφή πάνω στο υπόστρωμα η οποία ανταποκρίνεται στην κορυφή του οξυγόνου.



Σχήμα 6: Οξείδιο του νικελίου πάνω σε πυρίτιο

## Συμπεράσματα

Η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης κατά Rutherford είναι ένα ισχυρότατο μέσο καθορισμού της στοιχειομετρίας, της δομής, του πάχους και της συγκέντρωσης ιχνοστοιχείων σε επιφανειακά στρώματα και λεπτά δείγματα. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της είναι:

- δίνει την δυνατότητα για μη καταστροφική ανίχνευση ενός στοιχείου και για προσδιορισμό της κατά βάθος συγκέντρωσης του με μεγάλη ακρίβεια
- η ενεργός διατομή της αντίδρασης είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια και υπολογίζεται αναλυτικά από βασικές αρχές.
- μπορούν να ανιχνευθούν βαρείς πυρήνες οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα σε ελαφρούς πυρήνες, ακόμα και αν η συγκέντρωσή τους είναι πολύ μικρή, αφού όπως φαίνεται στο τύπο 2.4 η ενεργός διατομή της σκέδασης Rutherford αυξάνεται με το τετράγωνο του ατομικού αριθμού του πυρήνα.
- δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την ανίχνευση ελαφρών στοιχείων μέσα σε δείγμα από βαρύτερα στοιχεία.
- είναι ακατάλληλη για την ανάλυση υλικών τα οποία αποτελούνται από στοιχεία με πολύ κοντινούς μαζικούς αριθμούς, διότι οι κορυφές που προέρχονται από τα στοιχεία αυτά μπορεί να αλληλεπικαλύπτονται ή να ξεχωρίζουν με δυσκολία.

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» που διοργάνωσε

τη δράση «Δόκιμοι Ερευνητές – Μια εμπειρία ζωής» στο πλαίσιο της οποίας εκπονήθηκε η παραπάνω εργασία το Σεπτέμβριο 2016.

### Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Ασημακόπουλος Π.Α., Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, Ιωάννινα, (2002).
- [2] Προβατάς Γεώργιος, Διπλωματική εργασία: « Μετρήσεις διαφορικών ενεργών διατομών της αντίδρασης  $^{32}\text{S}(d,p)^{33}\text{S}$  με σκοπό τη μελέτη υλικών με μεθόδους πυρηνικών αντιδράσεων (NRA) », ΕΜΠ (ΣΕΜΦΕ), ΑΘΗΝΑ 2010.
- [3] Φωτεινού Βαρβάρα, Διπλωματική εργασία : 'Απόλυτη μέτρηση των διαφορικών ενεργών διατομών των πυρηνικών αντιδράσεων  $^{10}\text{B}(d,p)^{11}\text{B}$  και  $^{10}\text{B}(d,\alpha)^8\text{Be}$  σε γωνίες σκέδασης από  $135^\circ$  έως  $170^\circ$ ', ΕΜΠ (ΣΕΜΦΕ), ΑΘΗΝΑ 2007
- [4] Ρακόπουλος Βασίλειος, Μεταπτυχιακή εργασία : 'Μελέτη των ενεργών διατομών των αντιδράσεων  $^{19}\text{F}(d,p)^{20}\text{F}$  και  $^{19}\text{F}(d,\alpha)^{17}\text{O}$  ,ΕΜΠ (ΣΕΜΦΕ)