

ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΗ RUTHERFORD (RBS)

1ο ΜΑΘΗΤΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ, ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», 2017

Νίκος Κουβάτσος¹ και Φοίβη Ρουσοχατζάκη²

¹Πρότυπο Γενικό Λύκειο Βαρβακείου Σχολής

²Πειραματικό Σχολείο Πανεπιστημίου Αθήνας

Επιβλέπων Ερευνητής: Αναστάσιος Λαγογιάννης¹

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Λαμπρινή Παπατσιμπα²

¹Ερευνητής, Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος»

²Φυσικός, Πειραματικό Σχολείο Πανεπιστημίου Αθήνας

ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

- Φασματοσκοπία Rutherford από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, βασιζόμενη στο τότε νέο πρότυπο Rutherford για την ατομική δομή.
- Θεωρητικό μοντέλο:
 - Κινηματικός παράγοντας
 - Ενεργός διατομή και απώλεια ενέργειας
 - Ερμηνεία φάσματος οπισθοσκέδασης
- Πειραματική διάταξη και πειραματικά αποτελέσματα:
 - Ο επιταχυντής
 - Ανιχνευτές
- Ανάλυση πειραματικών δεδομένων:
 - Βαθμονόμηση φασμάτων
 - Ανάλυση αποτελεσμάτων με προσομοιώσεις SIMNRA
 - Φάσματα γνωστών δειγμάτων
 - Φάσμα αγνώστου δείγματος και ερμηνεία του
- Συμπεράσματα

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ

$$K = \frac{E_1}{E_0} \quad \text{όπου } E_0 \text{ είναι η αρχική ενέργεια προσπίπτοντος ιόντος, } E_1 \text{ η ενέργεια μετά την κρούση.}$$

Εφαρμόζουμε τις αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής (M_1 η μάζα προσπίπτοντος ιόντος, M_2 η μάζα ακίνητου πυρήνα)

$$\frac{1}{2} M_1 u_0^2 = \frac{1}{2} M_1 u_1^2 + \frac{1}{2} M_2 u_2^2$$

$$M_1 u_0 = M_1 u_1 \cos \theta + M_2 u_2 \cos \xi \quad (\text{διεύθυνση πρόσπτωσης})$$

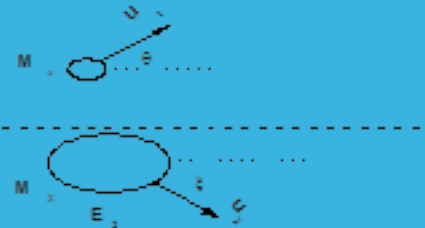
$$0 = M_1 u_1 \sin \theta - M_2 u_2 \sin \xi \quad (\text{κάθετη διεύθυνση})$$

Από τον συνδυασμό αυτών των σχέσεων προκύπτει:

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



ΠΡΙΝ



ΜΕΤΑ

ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενεργός διατομή σ εκφράζει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μια πυρηνική αντίδραση $A(a,b)B$ (αντίδραση όπου σωματίο a σκεδάζεται από πυρήνα A και προκύπτει πυρήνας B και σωματίο b) υπό ορισμένες πειραματικές συνθήκες. Μετρείται σε μονάδες επιφανείας.

R_b : αριθμός σωματίων b που ανιχνεύονται ανά μονάδα χρόνου

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N}$$

I_a : αριθμός σωματίων a που προσπίπτουν στον στόχο A ανά μονάδα χρόνου

N : επιφανειακή πυκνότητα στόχου A (αριθμός πυρήνων ανά μονάδα επιφάνειας)

Ένα φορτισμένο σωματίο κατά τη διαδρομή του μέσα από την ύλη χάνει ενέργεια κυρίως λόγω των αλληλεπιδράσεων του με τα ηλεκτρόνια του στόχου. Η απώλεια ενέργειας $E(x)$ είναι:

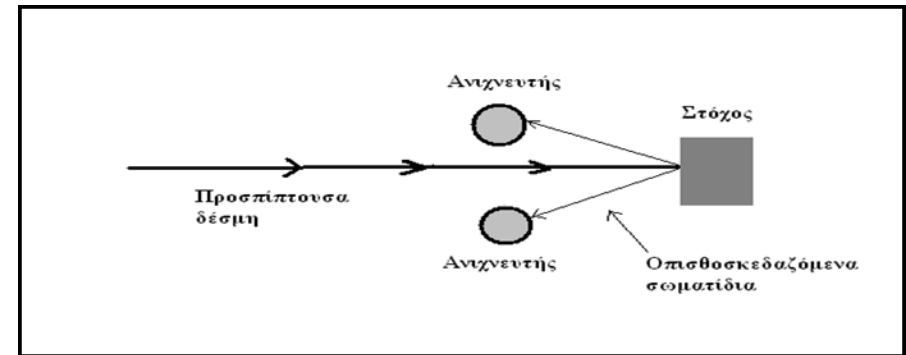
$$E(x) = E_0 - \varepsilon \cdot n \cdot \Delta x$$

E_0 : αρχική ενέργεια σωματίου, n : πυκνότητα ατόμων, Δx : μήκος διείσδυσης

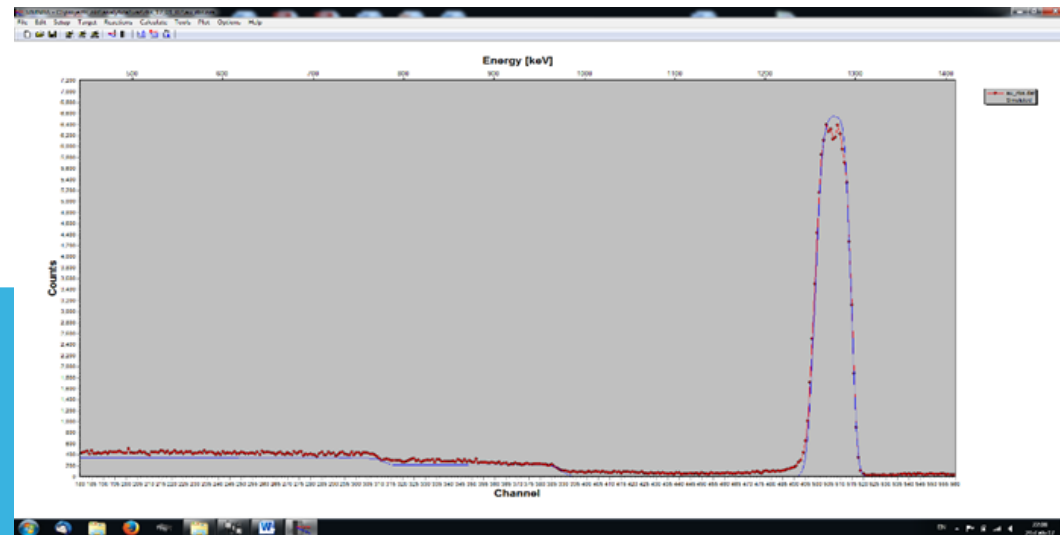
ε : ενεργός διατομή απώλειας ενέργειας, δίδεται από τη σχέση: $\varepsilon = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)$

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΗΣ

- Προσπίπτοντα ιόντα οπισθοσκεδάζονται και ανιχνεύονται από τους ανιχνευτές.
- Κορυφή φάσματος φαίνεται τραβηγμένη ώστε να παρατηρείται πλατώ, το μήκος του οποίου εξαρτάται από την απώλεια ενέργειας των ιόντων μέσα στο υλικό και παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πάχος του στόχου.
- Ύψος φάσματος σχετίζεται με το πλήθος των ατόμων του συγκεκριμένου στοιχείου του στόχου, επιτρέπει προσδιορισμό της στοιχειομετρίας του στόχου.
- 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 σωματίων).



Τυπικό πείραμα οπισθοσκέδασης



Παράδειγμα ενεργειακού φάσματος βαρέως υλικού σε ελαφρύ υπόστρωμα

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

Ο ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ

- Χρησιμοποιήθηκε επιταχυντής τύπου Van der Graaf Tandem, μέγιστης διαφοράς δυναμικού 5.5 MV, του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».
- Δυο πηγές αρνητικών ιόντων: Sputter (1α) για παραγωγή των βαρέων ιόντων όπως ^{12}C και ^{16}O και duoplasmatron (1β) για παραγωγή ελαφρών ιόντων όπως ^1H και ^2H , χρήση της οποίας έγινε στο παρόν πείραμα για την παραγωγή δέσμης δευτερονίων.
- Αέριο σε χαμηλή πίεση στην πηγή 1β μετατρέπεται σε πλάσμα μέσω υψηλής θερμοκρασίας βολταϊκού τόξου που δημιουργείται από διέλευση ρεύματος από το ηλεκτρόδιο καθόδου. Το πλάσμα συγκρατείται κοντά σε οπή εξαγωγής ανόδου από πεδίο πηνίου. Το ηλεκτρόδιο εξαγωγής σε θετική τάση έλκει ιόντα, που οδηγούνται σε μαγνήτη απόκλισης (2α), σε δύο φακούς εστίασης (3) και, λόγω θετικού ελκτικού δυναμικού 5 MV της γεννήτριας, στην δεξαμενή του επιταχυντή.
- Τα ιόντα μετατρέπονται σε θετικά διερχόμενα από υμένιο άνθρακα, οπότε απωθούνται από το δυναμικό της γεννήτριας και επιταχύνονται πάλι. Η δέσμη διέρχεται από ηλεκτρομαγνητικά τετράπολα 4α, εστιάζεται και οδηγείται στον μαγνήτη ανάλυσης (5), όπου στρέφεται κατά 90° και γίνεται η τελική επιλογή των ιόντων βάσει της επιθυμητής ενέργειας, με ακρίβεια 2 keV.



ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ – ΤΥΠΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

- Χρήση ανιχνευτών πυριτίου επιφανειακού φραγμού, σε σταθερή γωνία 170° ως προς το στόχο, μετρημένη με γωνιόμετρο ακριβείας σε θάλαμο υψηλού κενού. Αποτελούνται από κρύσταλλο πυριτίου τύπου n με επιφάνεια τύπου p λόγω παγίδων ηλεκτρονίων, οπότε σχηματίζεται επαφή p-n.
- Δύο τουρμπομοριακές αντλίες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κενού στον θάλαμο του ανιχνευτή, μία περιστροφική που λειτουργεί αρχικά για δημιουργία προκενού και μία αντλία διαχύσεως που τίθεται μετά σε λειτουργία για δημιουργία υψηλού κενού (10^{-6} Torr).
- Η ακτινοβόληση του στόχου και η ανίχνευση των εκπεμπόμενων σωματιδίων έγινε υπό υψηλό κενό στο θάλαμο σκέδασης. Η δέσμη δευτερονίων οδηγείται μέσω 2 διαφραγμάτων τανταλίου πάνω στα δείγματα η βάση των οποίων ρυθμίζεται με μοτέρ. Έτσι η δέσμη κατευθύνεται στο επιθυμητό σημείο.
- Φορτισμένα σωματίδια διέρχονται από την ζώνη απογύμνωσης της επαφής p-n και ιονίζουν άτομα πυριτίου, σχηματίζοντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών κατά μήκος των τροχιών τους. Τα σωματίδια έτσι χάνουν μέρος ή και όλη την ενέργειά τους.

ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

- Τα παραγόμενα, από την διέλευση ιονισμένων σωματιδίων, ηλεκτρόνια συλλέγονται με εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στα άκρα του ανιχνευτή. Το συλλεχθέν φορτίο δίνει παλμό με ύψος ανάλογο με την απώλεια ενέργειας του προσπίπτοντος σωματιδίου.
- Η απόδοση ενός ανιχνευτή πυριτίου επιφανειακού φραγμού είναι 100%.
- Το συλλεγόμενο από τον ανιχνευτή φορτίο περνά από προενισχυτή, που αυξάνει τον λόγο σήματος προς θόρυβο, και μετά από ενισχυτή, όπου γίνεται ενίσχυση και διαμόρφωση του σήματος και αποκοπή θορύβων μέσω φίλτρων συχνοτήτων.
- Το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω μετατροπέα (ADC), που ανάλογα με το ύψος του παλμού το καταχωρεί σε ένα κανάλι του πολυκαναλικού αναλυτή (MCA).
- Το ψηφιακό σήμα πηγαίνει στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου παρουσιάζεται με την μορφή ενεργειακού φάσματος των εκπεμπόμενων σωματιδίων.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΩΝ

- Το αρχικό φάσμα που λαμβάνουμε από τον Η/Υ κατά την μέτρηση περιέχει τον αριθμό των γεγονότων συναρτήσει των καναλιών, και όχι της ενέργειας, 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 ενεργειών των σκεδαζόμενων σωματιδίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή, γι' αυτό και αυτό πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε ανιχνευτή, 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, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

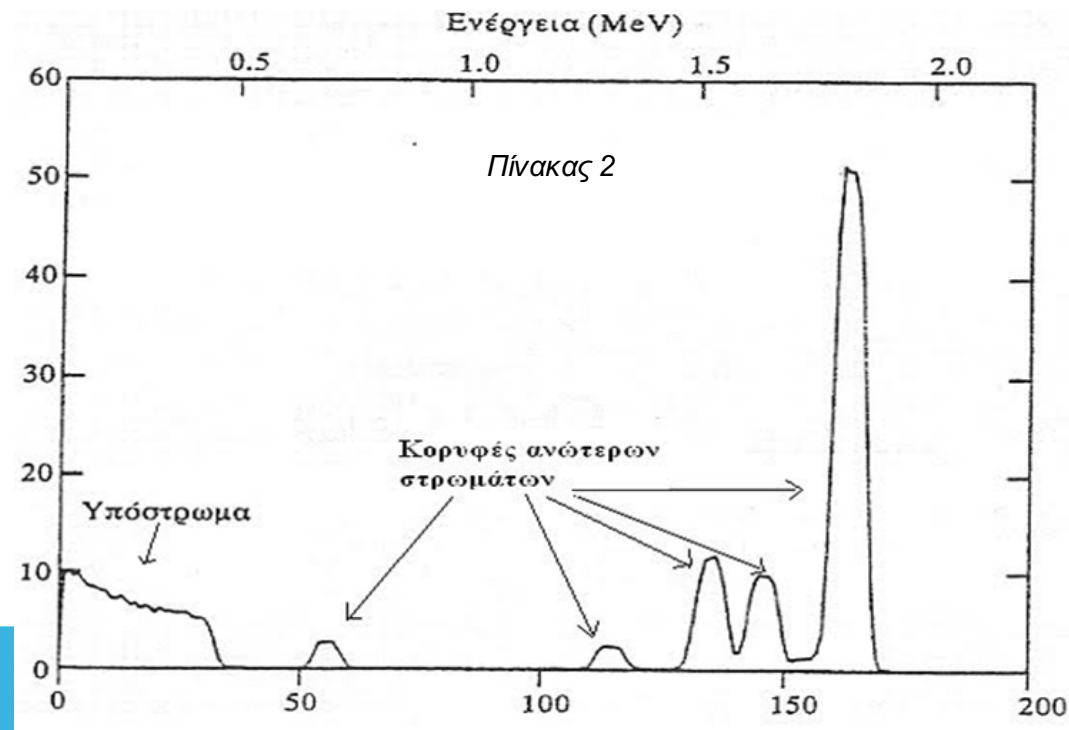
Ανιχνευτής (μπίρες)	KeV/channel	KeV
170°	9.06	-9.1

Αντιστοιχία καναλιών ενέργειας για βαθμονόμηση φασμάτων

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

- Ανάλυση με χρήση του προγράμματος προσομοιώσεων SIMNRA, όπου αρχικά έγινε η βαθμονόμηση του φάσματος και η αναγνώριση των παρατηρούμενων κορυφών.
- Χρήση διαφόρων στόχων με παχύ υπόστρωμα (μικρού ατομικού αριθμού Z) και λεπτά υμένια (μεγαλύτερου Z) πάνω σ' αυτό.

- Μορφή φάσματος για την περίπτωση που η διαφορά μάζας μεταξύ των στοιχείων στο υπόστρωμα και στα υμένια είναι μικρή.
- Συνεχές μέρος του φάσματος προέρχεται από το υπόστρωμα.
- Οι μεμονωμένες κορυφές αντιστοιχούν στα διαφορετικά στοιχεία των λεπτών υμενίων.



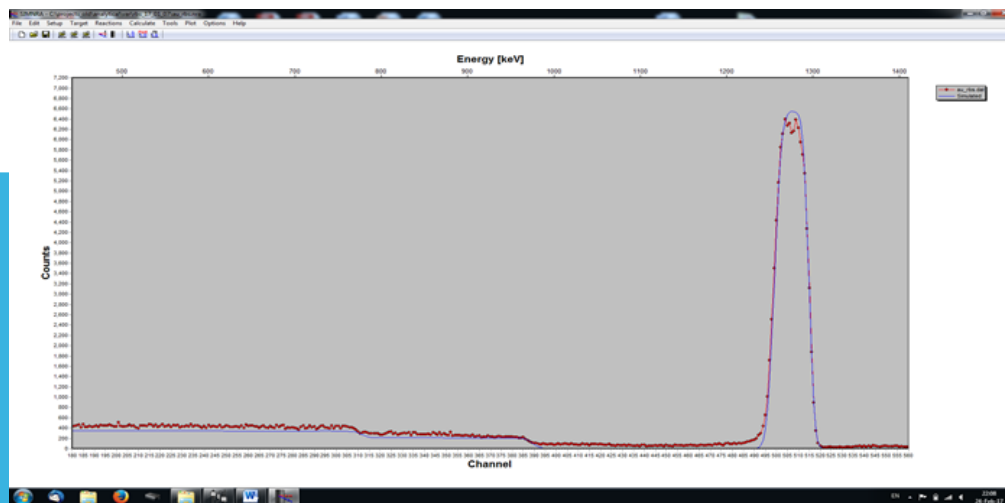
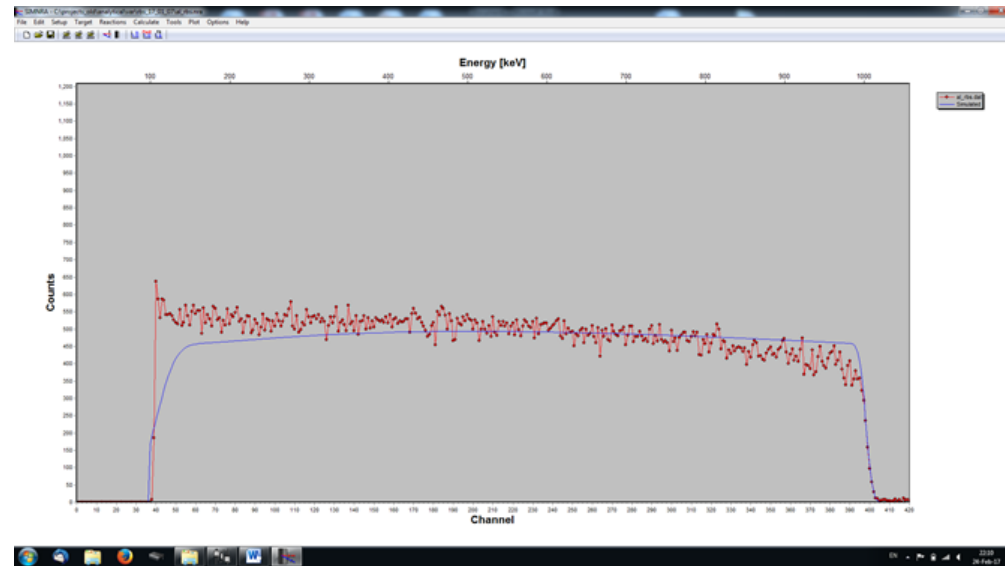
Φορτίο*Στερεά Γωνία (Q*Ω)	Resolution ανιχνευτή	Γωνία Ανίχνευσης	Ενέργεια Δέσμης	Δείγμα
6,40* 10 ⁹	18 keV	170°	1350 keV	Al

Τιμές παραμέτρων προσομοίωσης SIMNRA για το δείγμα αλουμινίου

ΦΑΣΜΑΤΑ ΓΝΩΣΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

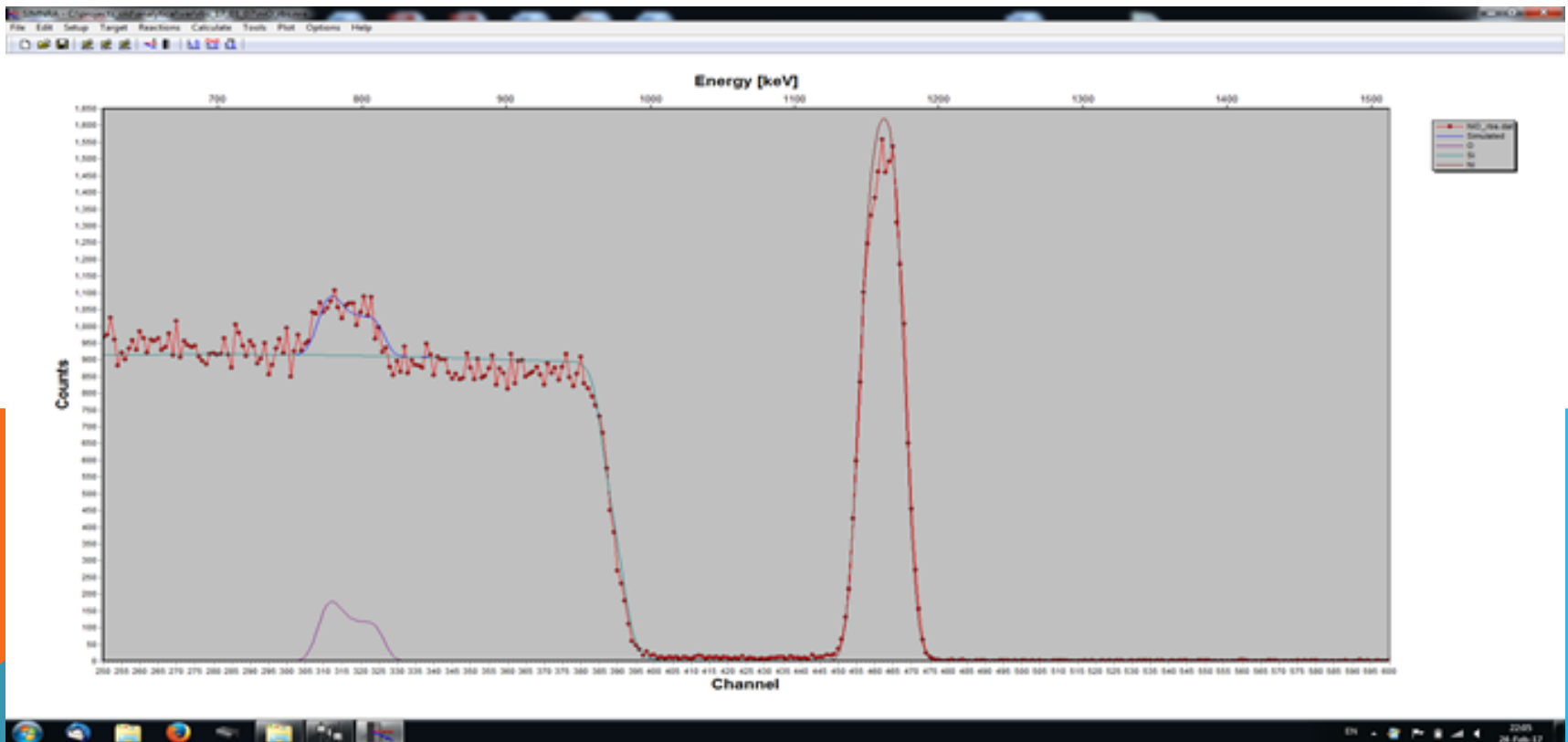
➤ Δείγμα 1: Αλουμίνιο άπειρου πάχους:
Το πάχος του αλουμινίου είναι φαινομενικά άπειρο σε ατομικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό στο ενεργειακό φάσμα του δείγματος αλουμινίου δεν παρατηρούνται κορυφές, καθώς τα επιταχυμένα δευτερόνια δεν οπισθοσκεδάζονται. Η ενέργεια των πυρήνων δευτερίου έχει απορροφηθεί.

➤ Δείγμα 2: Χρυσός πάνω σε γυαλί:
Το πάχος του στρώματος χρυσού στο δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι πολύ λεπτό, πάχους μερικών ατόμων. Για τον λόγο αυτό, παρατηρείται μεγάλο πλήθος γεγονότων (δευτερόνια που οπισθοσκεδάζονται) που δίνουν την μεγάλη κορυφή που αντιστοιχεί στον χρυσό στο ενεργειακό φάσμα. Επειδή η δεύτερη στρώση είναι οξειδίο του πυριτίου (SiO_2 /γυαλί) δεν παρατηρούμε περαιτέρω κορυφή στο υπόστρωμα, που είναι όπως στην περίπτωση του αλουμινίου (φαινομενικά άπειρο σε ατομικό επίπεδο).



ΦΑΣΜΑ ΑΓΝΩΣΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ - ΕΡΜΗΝΕΙΑ

- Με τη χρήση του λογισμικού SIMNRA, προχωρήσαμε στην ανάλυση του αγνώστου δείγματος. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης έδειξε πως το δείγμα αποτελείται από οξείδιο του νικελίου πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου.
- Στην περίπτωση του δείγματος οξειδίου του νικελίου επί πυριτίου παρατηρούμε ότι στο φάσμα, εκτός από την κορυφή που εμφανίζεται λόγω του νικελίου, εμφανίζεται και μια κορυφή πάνω από το συνεχές φάσμα του υποστρώματος, η οποία αντιστοιχεί στην παρουσία οξυγόνου.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης 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 συγκέντρωσής του στο δείγμα 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 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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε 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 έγιναν τα πειράματα στα οποία βασίστηκε η εργασία αυτή τον Σεπτέμβριο 2016.

Ευχαριστούμε για την προσοχή σας!

