



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών



Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”  
Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής  
Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας

---

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
“Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές”

---

# Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης $^{31}\text{P}(d,d_0)$ για αναλυτικούς σκοπούς

*Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*  
Μπλιγούρα Ναταλία

---

*Επιβλέπων Καθηγητής: Κόκκορης Μιχαήλ*  
*Επιβλέπων Ερευνητής: Λαγογιάννης Αναστάσιος*

Αθήνα, 2019







Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών



Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”  
Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής  
Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας

---

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
“Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές”

---

# Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης $^{31}\text{P}(d,d_0)$ για αναλυτικούς σκοπούς

*Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*  
Μπλιγούρα Ναταλία

---



Σε όλους που είναι δίπλα μου...



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστώ τους Δρα. Μιχαήλ Κόκκορη, καθηγητή του Ε.Μ.Π., και Δρα. Αναστάσιο Λαγογιάννη, ερευνητή Β' του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», επιβλέποντες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, για όσα μου έχουν προσφέρει και διδάξει σε ακαδημαϊκό και ερευνητικό επίπεδο. Επίσης, ευχαριστώ τη Δρα. Ρόζα Ζάννη-Βλαστού, καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., για τις συμβουλές και σημαντικές υποδείξεις της καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρα. Μιχαήλ Αξιώτη, ερευνητή Γ' του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», για τη βοήθεια και την υπομονή του στις ερωτήσεις που του έκανα καθημερινά.

Επιπλέον, ευχαριστώ την Υ.Δ. Ντέμου Ελένη, για τον χρόνο που διέθεσε για να με κατατοπίσει σε πειραματικό επίπεδο αλλά και να με συμβουλέψει σε οποιοδήποτε ζήτημα προέκυπτε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Φυσικά, ευχαριστώ πολύ και το υπόλοιπο ερευνητικό προσωπικό του Ι.Π.Σ.Φ. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» για τη βοήθειά του κατά την εκτέλεση του πειράματος και για ό,τι άλλο προέκυψε στη συνέχεια, καθώς και τα υπόλοιπα άτομα της ομάδας της Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Μ.Π. για τη βοήθειά τους όπου χρειάστηκε.

Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ είναι για τον Κωνσταντίνο Πρεκέτε-Σιγάλα, που όλον αυτό τον καιρό ήταν στο πλευρό μου, με υποστήριζε και με συμβούλευε, αλλά και για τους φίλους μου, Μαρία, Τζόρτζια, Έφη, Βαλεντίνα, Φιλοθέη, Έμμη, Κωνσταντίνε και Δημήτρηδες, που ο καθένας με τον τρόπο του και το ιδιαίτερό τους χιούμορ, με έκαναν να γελάω και να ξεχνάω τις δυσκολίες που προέκυπταν.

Τέλος, το μεγαλύτερο και θερμότερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, Σοφία και Δημήτρη, και στον αδερφό μου Γιώργο, για όσα μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια, για την υποστήριξη και τη βοήθεια στα βήματα που επιλέγω να κάνω.



# Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μετρήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το ισότοπο φώσφορος-31,  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$ , για ενέργειες δέσμης  $E_{d,\text{lab}}=900-2400$  keV με βήμα 10-30 keV και γωνίες ανίχνευσης  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$  και  $170^\circ$  κατάλληλες για μετρήσεις ελαστικής οπισθοσκέδασης.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή, 5.5 MV TN11 TANDEM, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”. Ο στόχος φωσφόρου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα κατασκευάστηκε στο ίδιο εργαστήριο μέσω θερμικής εξάχνωσης και αποτελούνταν από ένα λεπτό υμένιο άνθρακα πάνω στο οποίο εξαχνώθηκε σκόνη κρυστάλλου GaP. Τα σκεδαζόμενα δευτέρια ανιχνεύθηκαν από πέντε ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού (Silicon Surface Barrier - SSB), οι οποίοι βρίσκονταν τοποθετημένοι σε θάλαμο υψηλού κενού του υψηλής ακριβείας γωνιομέτρου. Ο κάθε ανιχνευτής ήταν συνδεδεμένος με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά, δηλαδή με έναν προενισχυτή, έναν ενισχυτή, έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα και τέλος με έναν πολυκαναλικό αναλυτή και τα σήματά όλων των ανιχνευτών καταγράφονταν ταυτόχρονα σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής υπολογίστηκαν μέσω της σχετικής μεθόδου προσδιορισμού διαφορικών ενεργών διατομών με χρήση των τιμών της ενεργού διατομής του γαλλίου που ακολουθούν την σχέση του Rutherford. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής ελέγχθηκαν συγκρίνοντας τα με χρήση παχύτερου στόχου, ο οποίος στην περίπτωση αυτή ήταν ένας λείος κρύσταλλος φυσικού γαλλίου και φωσφόρου-31 (crystal GaP). Τα αποτελέσματα της διαφορικής ενεργού διατομής της αντίδρασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$ , παρουσιάζονται παρακάτω σε πίνακα και γραφήματα.





## Abstract

In the present thesis the differential cross-section values for deuteron elastic scattering from  $^{31}\text{P}$ ,  $^{31}\text{P}(\text{d},\text{d}_0)^{31}\text{P}$ , were measured in the energy range of  $E_{\text{d,lab}}=900\text{-}2400$  keV in steps of 10-30 keV and detection angles  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$  and  $170^\circ$  which are suitable for Elastic Backscattering Spectroscopy (EBS).

The measurements were carried out at the Tandem Accelerator Laboratory of the Institute of Nuclear and Particle Physics (I.N.P.P.), National Center of Scientific Research (N.C.S.R.) “Demokritos” in Athens, using the 5.5 MV TN11 Tandem Accelerator. The target used in the experiment was made at N.C.S.R “Demokritos” using the evaporation technique. A small quantity of high-purity GaP powder was evaporated on thin self-supporting carbon foil, with the  $^{\text{nat}}\text{Ga}(\text{d},\text{d})$  signal being used for normalization purposes. The experimental set-up consisted of five silicon surface barrier (SSB) detectors, placed at the angles between  $130^\circ$  and  $170^\circ$  (in steps of  $10^\circ$ ) in a high-precision goniometer, along with the corresponding electronics.

The differential cross-section values for  $^{31}\text{P}(\text{d},\text{d}_0)$  were determined by using the relative measurement technique, utilising the differential cross-section values of gallium that follow the Rutherford’s formula. The obtained differential cross-section datasets were benchmarked against a polished GaP crystal and the deviations from the corresponding ones using Rutherford’s formula will be discussed and analyzed. The results of the present work are presented both in tabulated and graphical form.



# Περιεχόμενα

## Ευχαριστίες

## Περίληψη

## Abstract

### 1 Εισαγωγή

- 1.1 Σκοπός
- 1.2 Τεχνικές ανάλυσης
  - 1.2.1 Φασματοσκοπία RBS
  - 1.2.2 Φασματοσκοπία EBS
  - 1.2.3 Ανάλυση ERDA
  - 1.2.4 Ανάλυση NRA
  - 1.2.5 Φασματοσκοπία PIGE
- 1.3 Ανάλυση κατά βάθος στο  $^{31}\text{P}$
- 1.4. Φασματοσκοπία από παχύ στόχο
  - 1.4.1 Απώλεια ενέργειας και ισχύς ανάσχεσης
  - 1.4.2 Ενεργειακός και χωρικός διασκεδασμός

### 2 Πειραματική Διάταξη

- 2.1 Επιταχυντής
- 2.2 Πειραματική γραμμή
- 2.3 Ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου
- 2.4 Ηλεκτρονική διάταξη
- 2.5 Κατασκευή στόχων

### 3 Πειραματική Ανάλυση

- 3.1 Υπολογισμός διαφορικής ενεργού διατομής
  - 3.1.1 Σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών
  - 3.1.2 Υπολογισμός ενεργού διατομής γαλλίου κατά Rutherford
- 3.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή
- 3.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση μονάδων ADC
- 3.4 Πάχος στόχου
- 3.5 Εμβαδομέτρηση κορυφών

### 4 Αποτελέσματα

- 4.1 Αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής
- 4.2 Έλεγχος αξιοπιστίας

## **5 Συμπεράσματα - Προοπτικές**

- 5.1 Συμπεράσματα
- 5.2 Προοπτικές



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

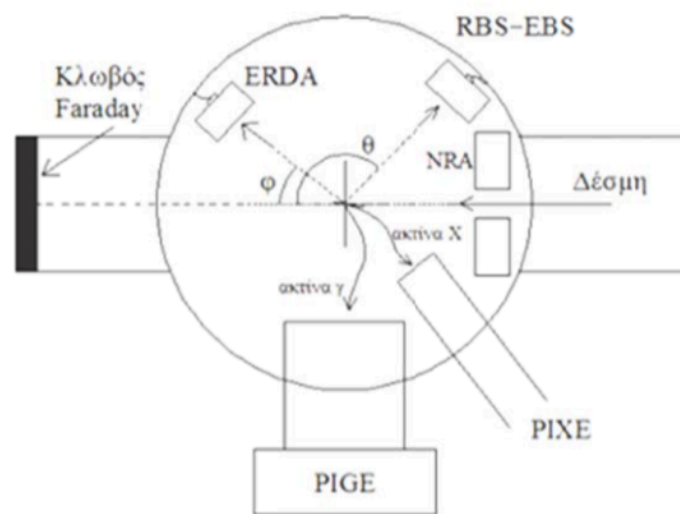
### 1.1 Σκοπός

Ο φωσφόρος είναι ένα ελαφρύ χημικό στοιχείο, απαραίτητο για τη ζωή, και εξαιρετικά δραστικό, γι' αυτό δεν συναντάται ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση αλλά μόνο σε μορφή ενώσεων. Έχει 23 γνωστά ισότοπα, που κυμαίνονται από  $^{24}\text{P}$  ως  $^{46}\text{P}$ , με μοναδικό σταθερό ισότοπο σε αφθονία 100%, το  $^{31}\text{P}$ . Συνήθως βρίσκεται στη μορφή φωσφορικών αλάτων, των οποίων οι χρήσεις περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την παραγωγή λιπασμάτων, απορρυπαντικών και φυτοφαρμάκων. Τα παραπάνω είδη, όμως, θεωρούνται βασικές πηγές εμπλουτισμού του φωσφόρου κυρίως στα υδρόβια οικοσυστήματα με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε ευτροφισμό [1]. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια γίνονται μελέτες για τη συγκέντρωση και την κατανομή σε βάθος του φωσφόρου στα διάφορα οικοσυστήματα. Επιπλέον, ο φωσφόρος είναι ένα σημαντικό συστατικό στην παραγωγή μετάλλων. Έχουν γίνει μελέτες για την επίδραση του φωσφόρου στις μηχανικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες διαφορετικών μετάλλων, όπως στο χάλυβα για αύξηση της αντοχής του [2] και σε ανοξειδωτο ατσάλι [3]. Μια ακόμα εφαρμογή του φωσφόρου συναντάται στην παραγωγή ημιαγωγών, κυρίως σε ολοκληρωμένα κυκλώματα ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση [4]. Έτσι, ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός του φωσφόρου σε μήτρα διαφόρων ελαφρών στοιχείων είναι σημαντική σε πολλές τεχνολογικές, ιατρικές, αρχαιολογικές και περιβαλλοντικές μελέτες.

Για τον ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό και την κατανομή σε βάθος της συγκέντρωσης του φωσφόρου-31, μπορούν να εφαρμοστούν αρκετές τεχνικές ανάλυσης IBA (Ion Beam Analysis - Ανάλυση με χρήση Ιοντικών Δεσμών). Οι ιοντικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της κατανομής σε βάθος της συγκέντρωσης ενός ισότοπου είναι οι εξής: Φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy - RBS), Φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης (Elastic Backscattering Spectroscopy - EBS), Ανάλυση μέσω ανίχνευσης του ελαστικά ανακρουόμενου πυρήνα (Elastic Recoil Detection Analysis - ERDA), Ανάλυση μέσω πυρηνικής αντίδρασης (Nuclear reaction analysis - NRA) και Φασματοσκοπία ακτίνων-γ επαγόμενων από σωματίδια (Particle Induced Gamma-ray Emission - PIGE) αν υπάρχουν λεπτοί ισχυροί και απομονωμένοι συντονισμοί. Οι τεχνικές αυτές έχουν ως κύριο πλεονέκτημα ότι είναι μη καταστρεπτικές και ανάλογα με την αντίδραση που μελετάται είναι απαραίτητος και ο προσδιορισμός των αντίστοιχων τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής.

## 1.2 Τεχνικές ανάλυσης

Η Ανάλυση με χρήση ιοντικών δεσμών (Ion Beam Analysis - IBA) βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των φορτισμένων σωματιδίων της δέσμης και του στόχου, τόσο σε ατομικό όσο και σε πυρηνικό επίπεδο. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται με υψηλή ταχύτητα και προσπίπτει στο υπό μελέτη υλικό, αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια και τους πυρήνες των ατόμων του, επιβραδύνει και αποκλίνει από την αρχική του τροχιά. Αυτό οδηγεί σε εκπομπή σωματιδίων ή ακτινοβολιών, των οποίων η ενέργεια είναι χαρακτηριστική των στοιχείων που αποτελούν το υπό μελέτη δείγμα.



**Εικόνα 1.1.** Σχηματική απεικόνιση των πυρηνικών τεχνικών και της πειραματικής διάταξης, ανάλογα με την αλληλεπίδραση και το προϊόν ανίχνευσης.

### 1.2.1 Τεχνική RBS

Η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης Rutherford χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις ανίχνευσης βαρύ πυρήνα ( $Z > 60$ ) σε ελαφρύ υπόστρωμα, ακόμα και αν βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση. Σκέδαση Rutherford είναι η ελαστική σκέδαση των πυρήνων της δέσμης από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα του στόχου, δηλαδή κατά την τεχνική αυτή ανιχνεύονται οι οπισθοσκεδαζόμενοι πυρήνες της δέσμης λόγω ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων με τον πυρήνα του στόχου και πραγματοποιείται κυρίως για ενέργειες δέσμης μικρότερες από το φράγμα δυναμικού του συστήματος βλήματος-στόχου.

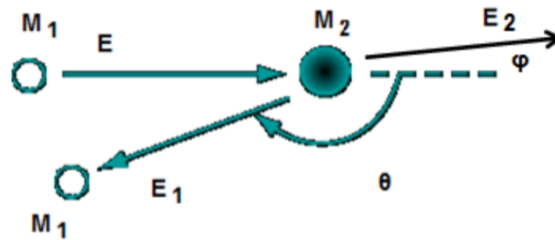
Με τον όρο ελαστική ορίζεται η σκέδαση, στην οποία διατηρείται η κινητική ενέργεια στο σύστημα βλήματος και στόχου. Η τελική ενέργεια ( $E_1$ ) του προσπίπτοντος σωματιδίου είναι μικρότερη από την αρχική ( $E_0$ ) του κατά ένα παράγοντα  $K$ , που ονομάζεται παράγοντας κινηματικής (kinematic factor):

$$K = \frac{E_1}{E_0} \quad (1)$$

Ο παράγοντας κινηματικής δίνεται από την σχέση [7]:

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

Όπου  $\theta$  είναι η γωνία σκέδασης του προσπίπτοντος σωματιδίου στο σύστημα του εργαστηρίου,  $M_1$  και  $M_2$  οι μάζες του προσπίπτοντος σωματιδίου και του στόχου, αντίστοιχα.



**Εικόνα 1.2.** Σχηματική απεικόνιση της κινηματικής της ελαστικής σκέδασης.

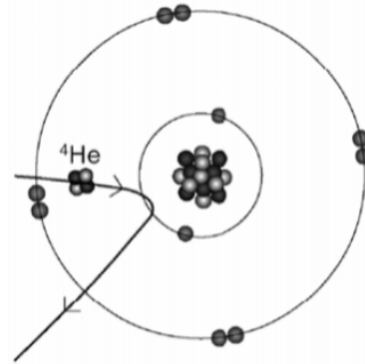
Η παραπάνω σχέση προσδιορίζει την ενέργεια του σκεδαζόμενου σωματιδίου για οποιαδήποτε γωνία στο σύστημα του εργαστηρίου αλλά δεν δίνει την πιθανότητα παρατήρησης ενός τέτοιου γεγονότος. Η πιθανότητα προσδιορίζεται από την διαφορική ενεργό διατομή ( $d\sigma/d\Omega$ ). Η διαφορική ενεργός διατομή προσδιορίζεται από τον τύπο του Rutherford [7] και είναι ανάλογη του τετραγώνου του ατομικού αριθμού του πυρήνα του στόχου.

$$\left( \frac{d\sigma_R}{d\Omega} \right)_{E,\theta} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \cdot \frac{4}{\sin^4\theta} \cdot \frac{\{ [1 - ((\frac{M_1}{M_2}) \sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}} + \cos\theta \}^2}{[1 - ((\frac{M_1}{M_2}) \sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Όπου  $Z_1, Z_2$  οι ατομικοί αριθμοί του προσπίπτοντος σωματιδίου και του στόχου,  $M_1, M_2$  οι μάζες τους και  $E$  η ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου.



Η σχέση (3) προσδιορίζεται στο σύστημα του εργαστηρίου. Η τεχνική της οπισθοσκέδασης Rutherford δε μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση ελαφρών στοιχείων στις τυπικές ενέργειες δέσμης των τεχνικών IBA λόγω αποκλίσεων από την αναλυτική σχέση (3) εξαιτίας δημιουργίας του σύνθετου πυρήνα, οπότε είναι απαραίτητη η γνώση πειραματικά προσδιορισμένων διαφορικών ενεργών διατομών.



**Εικόνα 1.3.** Σκέδαση Rutherford σωματιδίων  $^4\text{He}$  από τον υπό μελέτη πυρήνα.

Στη μέθοδο RBS υπάρχει προτίμηση στις γωνίες που πλησιάζουν τις  $180^\circ$  διότι υπάρχει καλύτερη διακριτική ικανότητα παρόλο που έχουμε χαμηλή στατιστική λόγω μείωσης της διαφορικής ενεργού διατομής. Με την τεχνική αυτή μπορούμε να προσδιορίσουμε την στοιχειακή και σε βάθος ανάλυση στόχων, πάχους από nm έως μερικά  $\mu\text{m}$  από την επιφάνεια.

### 1.2.2 Τεχνική EBS

Η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης (Elastic Non-Rutherford Backscattering Spectroscopy) είναι μια γενίκευση της μεθόδου RBS και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που υπάρχουν αποκλίσεις από τη θεωρία της σκέδασης Rutherford. Μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι δεν υπάρχει αναλυτικός και ενιαίος μαθηματικός τύπος για τον υπολογισμό των ενεργών διατομών αλλά πρέπει να πραγματοποιηθούν μελέτες για κάθε περίπτωση βλήματος-στόχου, σε συγκεκριμένες ενέργειες και γωνίες.

### 1.2.3 Τεχνική ERDA

Στη φασματοσκοπία ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) ανιχνεύονται οι ανακρουόμενοι πυρήνες του στόχου και είναι κατάλληλη για ανίχνευση ελαφρών στοιχείων καθώς χρησιμοποιείται συνήθως δέσμη βαρέων ιόντων. Δηλαδή, η μάζα των πυρήνων της δέσμης πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από αυτή των υπό μελέτη πυρήνων του στόχου ώστε οι πυρήνες να σκεδαστούν εκτός του στόχου.

Είναι κατάλληλη για προσδιορισμό κατανομής βάθους (depth-profile) του στόχου και εύρεση συγκεντρώσεων πολλών στοιχείων για λεπτά επιφανειακά στρώματα, καθώς μπορεί να συνδυαστεί με φασματοσκοπία RBS.

#### 1.2.4 Τεχνική NRA

Η τεχνική NRA βασίζεται στην ανίχνευση των προϊόντων των πυρηνικών αντιδράσεων μεταξύ της δέσμης και του στόχου και είναι ακριβής για τον ποσοτικό προσδιορισμό του βάθους των ελαφρών στοιχείων σε πολύπλοκες μήτρες. Έχει το προτέρημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί στην ίδια πειραματική διάταξη με τις προηγούμενες τεχνικές ελαστικής σκέδασης. Τα προϊόντα της αντίδρασης είναι συνήθως μεγαλύτερης ενέργειας σε σχέση με τα ελαστικά σκεδαζόμενα σωματίδια της δέσμης ( $Q > 0$ ). Τα ελαστικά σκεδαζόμενα σωματίδια είναι καλά διαχωρισμένα στο φάσμα από τα προϊόντα της αντίδρασης, τα οποία εμφανίζονται σε περιοχή υψηλών ενεργειών όπου δεν υπάρχει υπόβαθρο. Στην περίπτωση που η ενέργεια δέσμης είναι μικρότερη του φράγματος δυναμικού Coulomb είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν πυρηνικές αντιδράσεις μέσω φαινόμενου σήραγγας, συνεπώς με σημαντικά μικρότερη πιθανότητα.

Παρ' όλα τα θετικά σημεία, υπάρχουν και μειονεκτήματα στην τεχνική αυτή. Η ενεργός διατομή είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, πολύ μικρότερη από αυτή της ελαστικής σκέδασης, άρα οι μετρήσεις χρειάζονται παραπάνω χρόνο ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική. Όμως, ειδικά στην περίπτωση ισχυρά εξώθερμων αντιδράσεων η μεγάλη ενέργεια των προϊόντων της αντίδρασης καθιστά την τεχνική αυτή κατάλληλη για ανίχνευση και μελέτη στοιχείων.

#### 1.2.5 Τεχνική PIGE

Η τεχνική PIGE στηρίζεται στη φασματοσκοπία των ακτίνων- $\gamma$  που εκπέμπονται από τους διεγερμένους πυρήνες, οι οποίοι δημιουργούνται κατά την ακτινοβολήση του στόχου με τη δέσμη ιόντων. Η αρχή λειτουργίας της αλληλεπίδρασης του βλήματος με τον στόχο είναι ο σχηματισμός ενός σύνθετου πυρήνα σε μία διεγερμένη κατάσταση, από την οποία αποδιεγείρεται, μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, με την εκπομπή ακτίνας- $\gamma$ . Οι ακτίνες- $\gamma$  που εκπέμπονται είναι χαρακτηριστικές κάθε πυρήνα και ανιχνεύονται με ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe) και καταγράφονται στο φάσμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις και για συγκεκριμένες ενέργειες δέσμης η εκπομπή των ακτίνων- $\gamma$  από τον πυρήνα εμφανίζει ισχυρούς συντονισμούς με μικρό εύρος, της τάξης των eV-keV. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου συντονιστικής PIGE (resonant-PIGE) και οι συντονισμοί αξιοποιούνται προκειμένου να γίνει προσδιορισμός συγκέντρωσης του υπό μελέτη στοιχείου κατά βάθος.

Η συγκεκριμένη τεχνική είναι η πιο ακριβής για τον προσδιορισμό της κατανομής της συγκέντρωσης κατά βάθος ορισμένων ισοτόπων (π.χ.  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ) σε ένα στόχο, καθώς οι συντονισμοί (p,γ) είναι αρκετά λεπτοί και ισχυροί ώστε η διακριτική ικανότητα κατά βάθος να φτάνει σε μερικές δεκάδες nm, δεν έχει όμως γενική εφαρμογή. Ακόμα απαιτείται γνώση της ενεργού διατομής των αντιδράσεων, της ενέργειας και του εύρους του συντονισμού αλλά και των ακτίνων-γ που εκπέμπονται από τις διεγερμένες στάθμες. Τέλος, υπάρχουν περιορισμοί λόγω απόδοσης και διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών HPGe καθώς στα ληφθέντα φάσματα υπάρχει συνήθως υψηλό υπόβαθρο σε σχέση με τα φάσματα των φορτισμένων σωματιδίων.

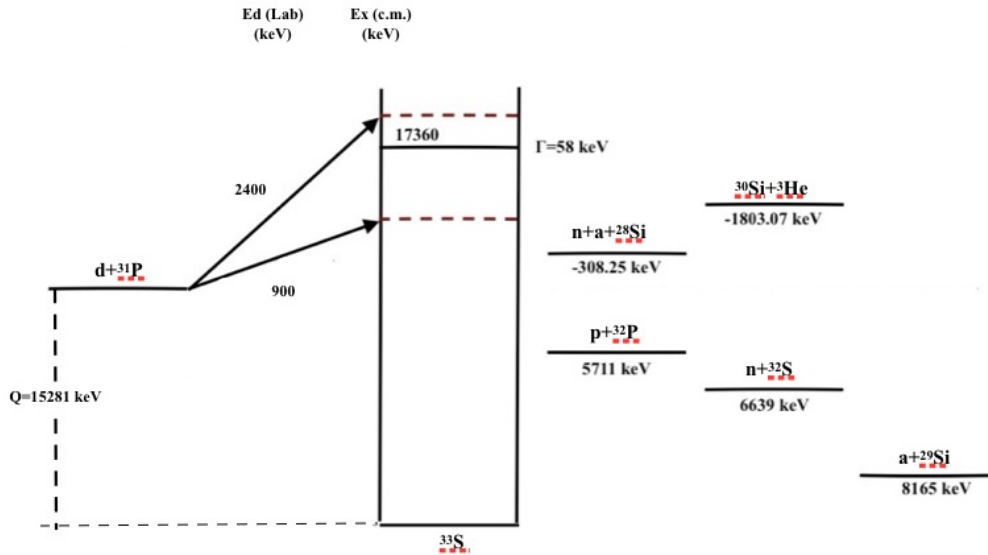
### 1.3 Ανάλυση κατά βάθος στο $^{31}\text{P}$

Ανάλογα με το υλικό που θέλουμε να αναλύσουμε, το στοιχείο που θέλουμε να ποσοτικοποιήσουμε και το βάθος στο οποίο αναμένεται να είναι, επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος. Η ανάλυση στόχων με χρήση φορτισμένων σωματιδίων κρίνεται καταλληλότερη για τον προσδιορισμό της στοιχειομετρίας ενός στόχου κατά βάθος με ταυτόχρονη μελέτη όλων των στοιχείων που τον αποτελούν. Η επιλογή της κατάλληλης δέσμης φορτισμένων σωματιδίων, το εύρος ενεργειών της και το προϊόν της αλληλεπίδρασης ορίζει την μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί. Αρκετές από τις παραπάνω τεχνικές IBA που αναφέρθηκαν μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τον ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό και τη κατανομή σε βάθος της συγκέντρωσης του φωσφόρου. Συνήθως προτιμάται ο συνδυασμός περισσότερων από μια τεχνικών για καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές RBS/EBS, NRA και ERDA είναι οι καταλληλότερες για ανάλυση κατά βάθος. Η τεχνική ERDA είναι κατάλληλη για τη μελέτη  $^{31}\text{P}$  αλλά σε επιφανειακά στρώματα. Επίσης, η τεχνική p-EBS λόγω ύπαρξης αξιολογημένων (evaluated and benchmarked) δεδομένων διαφορετικών ενεργών διατομών στη διεθνή βιβλιογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του  $^{31}\text{P}$  ( $^{31}\text{P}(p,p_0)^{31}\text{P}$ ). Για χαμηλές ενέργειες δέσμης πρωτονίων, κάτω από 1200 keV, η διαφορετική ενεργός διατομή μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά μέσω της σχέσης του Rutherford καθώς από τα evaluated δεδομένα φαίνεται ότι ακολουθούν σκέδαση Rutherford. Όμως, λόγω της ισχύος ανασχεσης τα χαμηλής ενέργειας πρωτόνια δεν εισχωρούν σε μεγάλο βάθος στο στόχο με αποτέλεσμα να μην έχουμε αρκετή πληροφορία της κατανομής σε βάθος της συγκέντρωσης του φωσφόρου. Αντίθετα, για υψηλές ενέργειες δέσμης, τα πρωτόνια εισχωρούν σε μεγαλύτερο βάθος στο στόχο και υπάρχει απόκλιση από την Rutherford περίπου 8%-17%. Όμως, παρατηρείται επικάλυψη κορυφών λόγω μείωσης της διακριτικής ικανότητας, η οποία καλυτερεύει με επιλογή βαρύτερης δέσμης. Για την περίπτωση του  $^{31}\text{P}$  η πιο κατάλληλη τεχνική είναι η NRA, σε συνδυασμό με την EBS, λόγω ταυτόχρονης μελέτης πυρηνικών αντιδράσεων και ελαστικών σκεδάσεων, αντίστοιχα. Ανάλογα με το είδος της δέσμης έχουμε συγκεκριμένες αντιδράσεις. Οι περισσότερο μελετημένες είναι οι αντιδράσεις  $^{31}\text{P}(p,a_0)^{28}\text{S}$  με  $Q=1916.31$  keV και  $^{31}\text{P}(a,p_0)^{34}\text{S}$  με  $Q=637.09$  keV, όμως το χαμηλό τους Q-value θεωρείται μειονέκτημα για τη μελέτη του φωσφόρου.

Αντίθετα, με χρήση δέσμης δευτερίων, τεχνική d-NRA, οι κορυφές που εμφανίζονται στο φάσμα είναι υψηλής ενέργειας και απομονωμένες, οπότε το φάσμα δεν έχει υπόβαθρο. Η τεχνική d-NRA φαίνεται η πιο κατάλληλη τεχνική για την ανάλυση του φωσφόρου σε πολύπλοκες μήτρες, κυρίως μέσω της ταυτόχρονης μελέτης των αντιδράσεων  $^{31}\text{P}(d,p_0)^{32}\text{P}$  με  $Q=5711.08$  keV και  $^{31}\text{P}(d,\alpha_0)^{29}\text{Si}$  με  $Q=8165.34$  keV. Λόγω των υψηλών Q-value, οι κορυφές στο φάσμα είναι απομονωμένες χωρίς καθόλου υπόβαθρο και δίνεται η δυνατότητα μελέτης των ελαφρών στοιχείων στο υπό μελέτη δείγμα. Ωστόσο, η πλήρης εφαρμογή της d-NRA, με ταυτόχρονη εφαρμογή της EBS, συνήθως παρεμποδίζεται από τη σημαντική έλλειψη των σχετικών δεδομένων d-EBS διαφορικής ενεργού διατομής στη βιβλιογραφία.

Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων, η IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [5], η οποία περιέχει ενεργές διατομές για πυρηνικές αντιδράσεις είτε μετρημένες πειραματικά μέσω των τεχνικών IBA είτε αξιολογημένες (evaluated) μέσω του προγράμματος SigmaCalc [6], το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον Δρ. A. Gurbich. Η αξιολόγηση των ενεργών διατομών είναι μια δυναμική διαδικασία, η οποία εξαρτάται ισχυρά από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των πειραματικών δεδομένων για μεγάλο εύρος ενεργειών και γωνιών. Επομένως, η δημιουργία της IBANDL έχει συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη των EBS αξιολογημένων δεδομένων. Στη περίπτωση του φωσφόρου-31, υπάρχει παντελής έλλειψη δεδομένων στην IBANDL για την τεχνική d-EBS και η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη σχετική μέτρηση.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης  $d+^{31}\text{P}$  και περιλαμβάνει τον σχηματισμένο σύνθετο πυρήνα  $^{33}\text{S}$ . Στο εύρος ενεργειών όπου διεγείρουμε το σύνθετο πυρήνα, βάσει της βιβλιογραφίας, υπάρχει μια διεγερμένη στάθμη ενέργειας  $E_x^*=17.360$  keV και εύρους  $\Gamma=58$  keV που αντιστοιχεί σε ενέργεια δέσμης δευτερίων  $E_{d,\text{Lab}}=2213.13$  keV. Το ενεργειακό εύρος κυμαίνεται από 900 keV ως 2400 keV και το ενεργειακό βήμα είναι μεταβλητό από 10 keV ως 30 keV. Το φράγμα δυναμικού Coulomb για δέσμη δευτερίων που προσπίπτει σε στόχο φωσφόρου-31 υπολογίστηκε, κατά προσέγγιση, ότι είναι ίσο με 3.9 MeV. Άρα, καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων, βρισκόμαστε κάτω από το φράγμα δυναμικού Coulomb, με αποτέλεσμα οι πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα να οφείλονται στο φαινόμενο σήραγγας.



**Εικόνα 1.4.** Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$ .

## 1.4. Φασματοσκοπία από παχύ στόχο

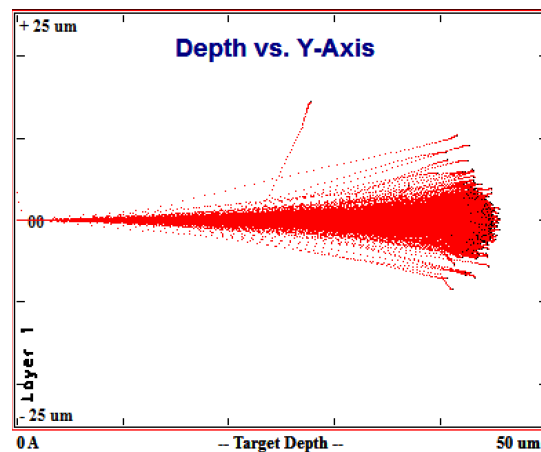
Στο πείραμα ακτινοβολήθηκε και παχύς στόχος, κρύσταλλος GaP, με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής. Είναι χρήσιμο λοιπόν να αναφερθούν τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης με το στόχο και διαμορφώνουν το φάσμα [7].

### 1.4.1 Απώλεια ενέργειας και ισχύς ανάσχεσης

Τα σωματίδια της δέσμης καθώς εισχωρούν στο υλικό χάνουν ενέργεια, λόγω των αλληλεπιδράσεων με το ηλεκτρονιακό νέφος του πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα σωματίδια να έχουν μικρότερη ενέργεια από την αρχική ενέργεια της δέσμης πριν σκεδαστούν από τον πυρήνα. Η απώλεια ενέργειας συνεχίζεται καθώς τα σκεδαζόμενα σωματίδια εξέρχονται από τον στόχο μετά από πιθανή οπισθοσκέδαση. Επομένως, η τελική ενέργεια των ανιχνευόμενων σωματιδίων εξαρτάται και από το βάθος του υλικού στο οποίο πραγματοποιήθηκε η αντίδραση. Η ισχύς ανάσχεσης (stopping power) ενός υλικού για συγκεκριμένο τύπο σωματιδίου δέσμης ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου ως προς την απόσταση που διήνυσε στο υλικό.

$$S = \left( \frac{dE}{dx} \right) \quad (3)$$

Για παράδειγμα, για δέσμη δευτερίων ενέργειας 2400 keV υπολογίστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος SRIM [8] η μέση εμβέλεια των ιόντων της δέσμης μέσα σε παχύ στόχο πυριτίου και προσομοιώθηκε το βάθος που τα ιόντα χάνουν όλη τους την ενέργεια και σταματάνε μέσα στο σε αυτόν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Για την μεγαλύτερη ενέργεια δέσμης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, τα ιόντα σταματούν σε βάθος  $\sim 47$   $\mu\text{m}$ . Αυτή η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με σκοπό να ελεγχθεί το αν το πάχος των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν στο πειράματα ήταν κατάλληλο και αποδείχθηκε ότι τα 500  $\mu\text{m}$  είναι υπεραρκετά ώστε να σταματήσουν τα σωματίδια σε κάθε περίπτωση.



**Εικόνα 1.5.** Προσομοίωση πορείας δέσμης σε παχύ στόχο πυριτίου για  $E_{d,Lab} = 2400$  keV

## 1.4.2 Ενεργειακός και χωρικός διασκεδασμός

Η επιβράδυνση των ιόντων της δέσμης καθώς εισέρχονται βαθύτερα στο υλικό συνοδεύεται από μια προοδευτική διασπορά της ενεργειακής και χωρικής τους κατανομής (energy straggling and lateral straggling, αντίστοιχα). Έτσι, όμοια σωματίδια με την ίδια αρχική ταχύτητα δεν έχουν την ίδια ενέργεια όταν διανύσουν μια απόσταση  $\Delta x$  εντός του ομοιογενούς υλικού.

Στις τεχνικές IBA, ο διασκεδασμός αλλοιώνει τις μετρημένες ενεργειακές κατανομές και τους συντονισμούς, με αποτέλεσμα να εμποδίζει την ανάλυση του υλικού κατά βάθος και να μπαίνει όριο στην ακρίβεια με την οποία μπορούν να προσδιοριστούν οι απώλειες ενέργειας άρα και τα βάθη, με φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης. Επιπλέον, περιορίζεται η ικανότητα για τον προσδιορισμό των μαζών των πυρήνων του στόχου σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια, λόγω του ότι η δέσμη είναι ακόμα λιγότερο μονοενεργειακή. Επομένως, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπ' όψιν το μέγεθος της συνεισφοράς της ενεργειακής και χωρικής διασποράς της δέσμης στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

# Κεφάλαιο 2

## Πειραματική Διάταξη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κυριότερα σημεία της πειραματικής διάταξης, από την κύρια υποδομή του εργαστηρίου όπως ο επιταχυντής και η πειραματική γραμμή, ως τα πιο ειδικά μέρη της διάταξης, όπως οι ανιχνευτές και οι στόχοι.

### 2.1 Επιταχυντής

Οι μετρήσεις του πειράματος πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή, 5.5 MV TN11 TANDEM, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”. Ο επιταχυντής στηρίζεται στη λειτουργία της γεννήτριας Van de Graaf, η οποία βρίσκεται μέσα στην δεξαμενή στο κέντρο της γραμμής και δίνει στα ιόντα την κύρια επιτάχυνση. Μέσα στη δεξαμενή βρίσκεται μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα, η οποία φορτίζεται στο υψηλότερο δυναμικό (ως 5.5 MV) από έναν κατακόρυφο μάντα που μεταφέρει σε αυτή, μέσω περιστροφικής κίνησης, θετικά φορτία.



**Εικόνα 2.1.** Επιταχυντής Tandem του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”

Επιπλέον, βασικά μέρη του επιταχυντή αποτελούν οι πηγές ιόντων, που βρίσκονται στην αρχή της γραμμής, κατάλληλοι μαγνήτες για κατεύθυνση και εστίαση της δέσμης και οι πέντε πειραματικές γραμμές στις οποίες καταλήγει. Συγκεκριμένα, στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η πηγή πλάσματος (duoplasmatron source), από την οποία παράγονται αρνητικά ιόντα. Στη συνέχεια, εισέρχονται στον προεπιταχυντικό σωλήνα, όπου αποκτούν επιτάχυνση, για να εισέλθουν, ύστερα από εστίαση μέσω ενός συστήματος ηλεκτροστατικού φακού (gridded box lens), στη δεξαμενή (tank). Εκεί έλκονται από το ομοιόμορφα κατανομημένο θετικό φορτίο της σφαίρας και διέρχονται μέσα από ένα λεπτό υμένιο άνθρακα, το οποίο υπάρχει πιθανότητα να απογυμνώσει από ηλεκτρόνια τα αρνητικά ιόντα μετατρέποντάς τα σε θετικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα πλέον θετικά ιόντα να απωθούνται από την σφαίρα και να αποκτούν περαιτέρω επιτάχυνση. Τα ιόντα που εξέρχονται από τον επιταχυντή εστιάζονται από τετραπολικούς μαγνήτες και συνεχίζουν την πορεία τους μέσα στη γραμμή. Στο τέλος αυτής, υπάρχει ένας ηλεκτρομαγνήτης που στρέφει τα ιόντα κατά  $90^\circ$  και ονομάζεται μαγνήτης επιλογής ενέργειας (μαγνήτης ανάλυσης- analyser). Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη ρυθμίζεται με μεγάλη ακρίβεια ώστε να στρέφονται κατά  $90^\circ$  μόνο τα ιόντα με την επιθυμητή ενέργεια. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί μια σχετικά μονοενεργειακή δέσμη. Τέλος, η δέσμη των ιόντων με την επιθυμητή ενέργεια πλέον, οδηγείται μέσω του μαγνήτη επιλογής γραμμής (switcher) στην κατάλληλη πειραματική γραμμή. Κάθε γραμμή έχει διαφορετική γεωμετρία και διάταξη, που εξυπηρετεί κάθε πείραμα ανάλογα με τις ανάγκες και τον σκοπό του.

## 2.2 Πειραματική γραμμή

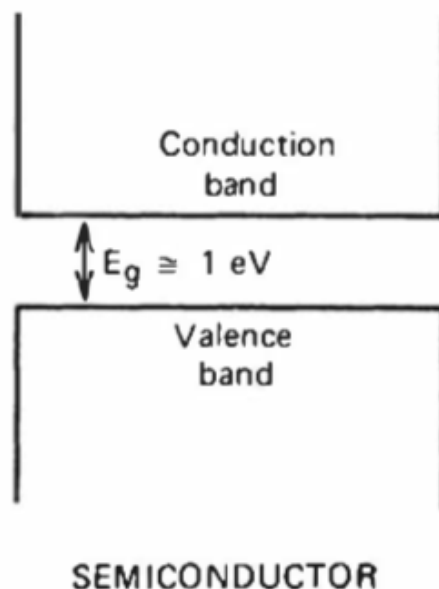
Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε η πειραματική γραμμή στο τέλος της οποίας βρίσκεται ένας θάλαμος σκέδασης διαμέτρου 70 cm. Ο θάλαμος αυτός βρίσκεται σε υψηλό κενό, της τάξης των  $10^{-6}$  Torr, καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος, μέσω δύο αντλιών, μιας περιστροφικής αντλίας λαδιού (rotary) για την επίτευξη προ-κενού και μιας στροβιλομοριακής αντλίας (turbo) για το υψηλό κενό. Πριν την είσοδο του θαλάμου έχει τοποθετηθεί ένα σετ κατευθυντήρων (ένας scatterer και ένας anti-scatterer) με σκοπό την ευθυγράμμιση και τον περιορισμό του μεγέθους της δέσμης. Ουσιαστικά είναι δύο οπές με διάμετρο 2 mm η πρώτη και 2.5 mm η δεύτερη και είναι τοποθετημένες σε απόσταση  $\sim 3$  cm μεταξύ τους. Στο κέντρο του θαλάμου τοποθετούνται σε ειδική βάση οι στόχοι κάθετα στον άξονα της δέσμης, ενώ οι ανιχνευτές τοποθετούνται στις επιθυμητές γωνίες στην υψηλής ακρίβειας γωνιομετρική τράπεζα που υπάρχει μέσα στον θάλαμο (Εικόνα 2.4).



## 2.3 Ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου

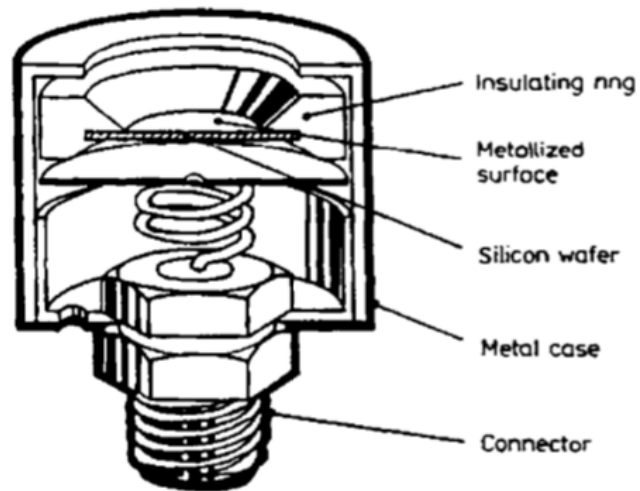
Το ανιχνευτικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από έξι ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού (Silicon Surface Barrier - SSB). Οι ανιχνευτές SSB (Εικόνα 2.3) είναι ημιαγωγοί και ο τρόπος λειτουργίας τους περιγράφεται παρακάτω. Κάθε κρυσταλλικό υλικό έχει χαρακτηριστικό περιοδικό πλέγμα, στο οποίο οφείλονται οι ιδιότητες του κρυστάλλου. Το περιοδικό πλέγμα καθορίζει επιτρεπόμενες ενεργειακές ζώνες (energy bands) για τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν μέσα σε αυτό το στερεό. Οι ενεργειακές ζώνες χωρίζονται στη ζώνη σθένους (valence band), που είναι η χαμηλότερη ενεργειακά ζώνη και αντιστοιχεί στα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας τα οποία είναι δεσμευμένα σε συγκεκριμένες θέσεις του πλέγματος μέσα στον κρύσταλλο, στο “απαγορευμένο” ενεργειακό κενό (“forbidden” energy gap), που ουσιαστικά είναι μια περιοχή στην οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμα ενεργειακά επίπεδα και στη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band), που είναι η υψηλότερη ενεργειακά ζώνη και αντιστοιχεί στα ηλεκτρόνια τα οποία είναι ελεύθερα να κυκλοφορούν μέσα στον κρύσταλλο και συμβάλλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. [9]

Η περιγραφή των ενεργειακών ζωνών φαίνονται στο παρακάτω απλουστευμένο διάγραμμα της Εικόνας 2.2. Ανάλογα με το υλικό ποικίλει το ενεργειακό εύρος (περιοχή απογύμνωσης-bandgap) ανάμεσα στις δύο ενεργειακές ζώνες.



**Εικόνα 2.2.** Σχηματική απεικόνιση ενεργειακών ζωνών για ημιαγωγούς [10]

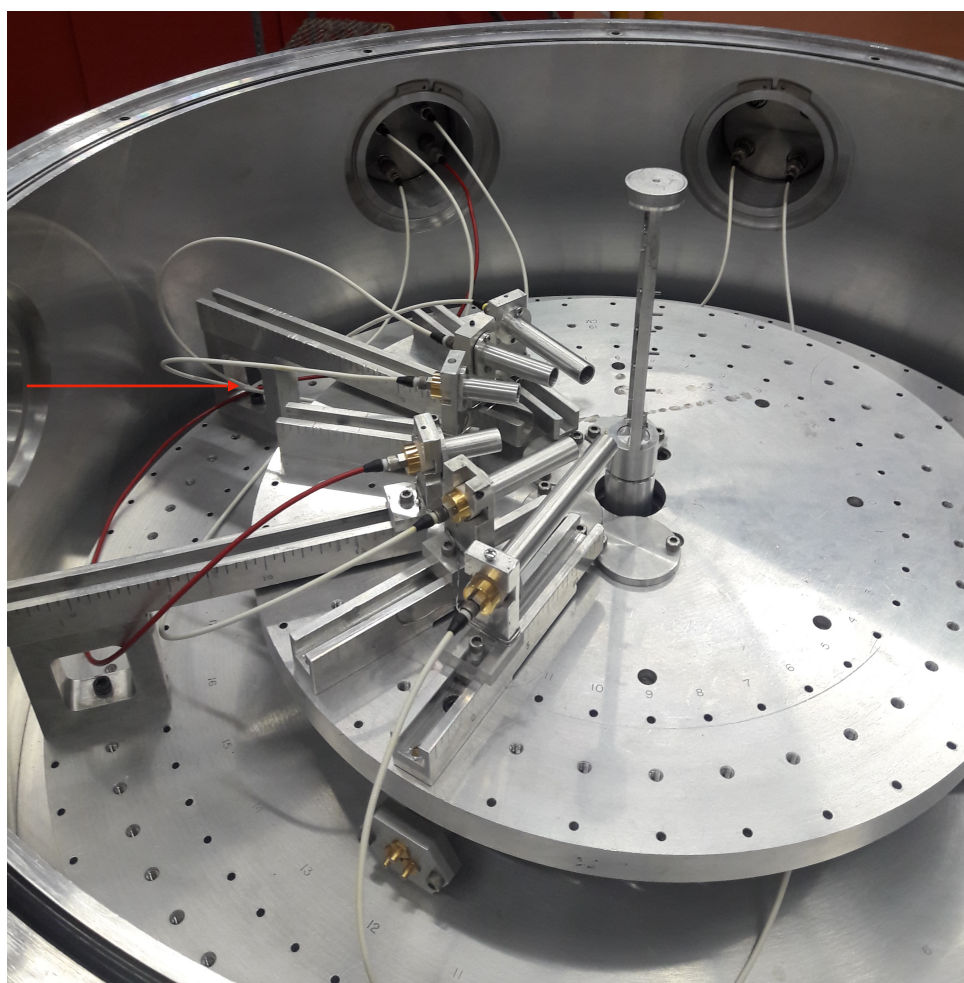
Ο τρόπος λειτουργίας των ημιαγωγών ως ανιχνευτών είναι ως εξής: ένα φορτισμένο σωματίδιο που διασχίζει τον ημιαγωγό αλληλεπιδρά με ορισμένα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους, τα οποία αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να διασχίσουν την περιοχή απογύμνωσης (ενεργός όγκος κρυστάλλου) και να εισέλθουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Η διέγερση αυτή δημιουργεί στη ζώνη σθένους μια οπή (hole). Έτσι δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Το πλήθος των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών είναι ανάλογο της ενέργειας του φορτισμένου σωματιδίου, καθώς διασχίζοντας τον ημιαγωγό παράγει πληθώρα τέτοιων ζευγών κατά μήκος και γύρω της πορείας του. Η οπή αντιπροσωπεύει το καθαρό θετικό φορτίο και λόγω του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου τείνει να κινηθεί αντίθετα του ηλεκτρονίου. Η κίνηση αυτή των δύο αντίθετων φορτίων συμβάλλει στην παρατηρούμενη αγωγιμότητα του υλικού. Εφαρμόζοντας στον ημιαγωγό ηλεκτρικό πεδίο έχουμε τον διαχωρισμό του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής προς αντίθετη κατεύθυνση αλλά παράλληλα με το εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρεύματος. Έτσι το σήμα που παράγεται από τον ανιχνευτή είναι ανάλογο της ενέργειας του σωματιδίου και μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών συλλέγεται, ψηφιοποιείται και παρουσιάζεται ως φάσμα στην οθόνη του Η/Υ.



**Εικόνα 2.3.** Σχηματική απεικόνιση ανιχνευτή πυριτίου επιφανειακού φραγμού. [10]

Ένα μειονέκτημα των ανιχνευτών πυριτίου επιφανειακού φραγμού είναι η ευαισθησία τους στο φως καθώς η λεπτή επικάλυψη χρυσού που υπάρχει είναι ανεπαρκής για να σταματήσει το φως του περιβάλλοντος και επειδή τα ορατά μήκη κύματος έχουν ενέργεια από 2 έως 4 eV λαμβάνονται από τον ανιχνευτή ως σήμα. Για τον λόγο αυτό οι ανιχνευτές θα πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε σκοτεινό θάλαμο. Επιπλέον, είναι ευαίσθητοι στην επιφανειακή μόλυνση οπότε η τοποθέτησή τους γίνεται με μεγάλη προσοχή και μεριμνάζεται η αποφυγή εμφάνισης λαδιών από τις αντλίες κενού [10].

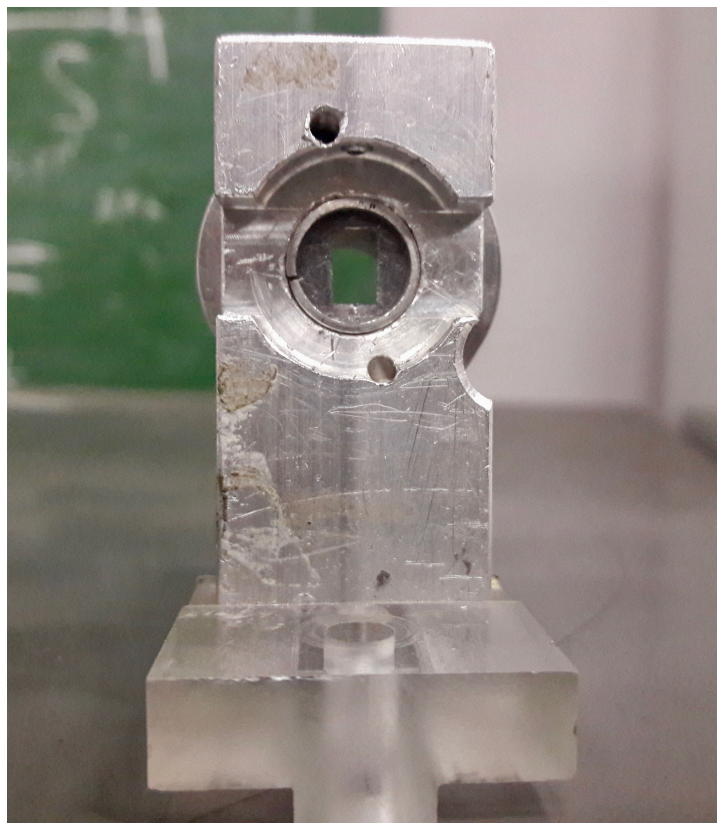
Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν έξι ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού, το πάχος των οποίων ήταν 500  $\mu\text{m}$ , με αποτέλεσμα τα δευτέρια της δέσμης να αφήνουν όλη τους την ενέργεια μέσα σε αυτούς (Εικόνα 1.5). Η διακριτική τους ικανότητα (resolution), η οποία έχει προσδιοριστεί στο παρελθόν μέσω λείου στόχου πυριτίου και δέσμης πρωτονίων σε τρεις διαφορετικές τιμές ενέργειας, είναι περίπου 13 keV. Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν στο θάλαμο πάνω στη γωνιομετρική τράπεζα με την βοήθεια κατάλληλων βάσεων σε γωνίες  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $170^\circ$  και σε απόσταση  $\sim 12\text{-}16$  cm από την βάση των στόχων (Εικόνα 2.4.), ενώ ο καθένας ήταν συνδεδεμένος με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά όπως παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο (Ενότητα 2.4). Τα φάσματα καταγράφονταν ταυτόχρονα και από τους έξι ανιχνευτές για κάθε ενέργεια δευτερίων.



**Εικόνα 2.4.** Το εσωτερικό του θαλάμου σκέδασης με τους έξι ανιχνευτές στις επιθυμητές γωνίες συνδεδεμένους με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά. Οι στόχοι βρίσκονται στο κέντρο του θαλάμου και είναι κάθετα τοποθετημένοι στη διεύθυνση της δέσμης που απεικονίζεται με το κόκκινο βέλος.

Το παράθυρο των ανιχνευτών έχει διάμετρο  $\sim 1$  cm, γεγονός που αυξάνει την γωνιακή αβεβαιότητα. Η απομάκρυνση των ανιχνευτών από τον στόχο οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της γωνιακής αβεβαιότητας αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και την χρονική διάρκεια της κάθε μέτρησης για την απόκτηση γεγονότων επαρκούς στατιστικής καθώς μειώνεται η στερεά γωνία μεταξύ στόχου και ανιχνευτή. Οπότε αντί να απομακρύνουμε τους ανιχνευτές από τον στόχο, για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στην αζιμουθιακή κατανομή ( $\sim \pm 1^\circ$ ) των ανιχνευόμενων σωματιδίων, μπροστά από κάθε ανιχνευτή τοποθετήθηκε ορθογώνια κάθετη σχισμή (slits), διαστάσεων  $\sim 4 \times 8$  mm<sup>2</sup>. Έτσι περιορίστηκε η ενεργός περιοχή ανίχνευσης έχοντας όμως στατιστικά επαρκή καταγραφόμενα γεγονότα σε κάθε ανιχνευτή (σχετικό σφάλμα  $\sim 1-2$  %) (Εικόνα 2.5.).

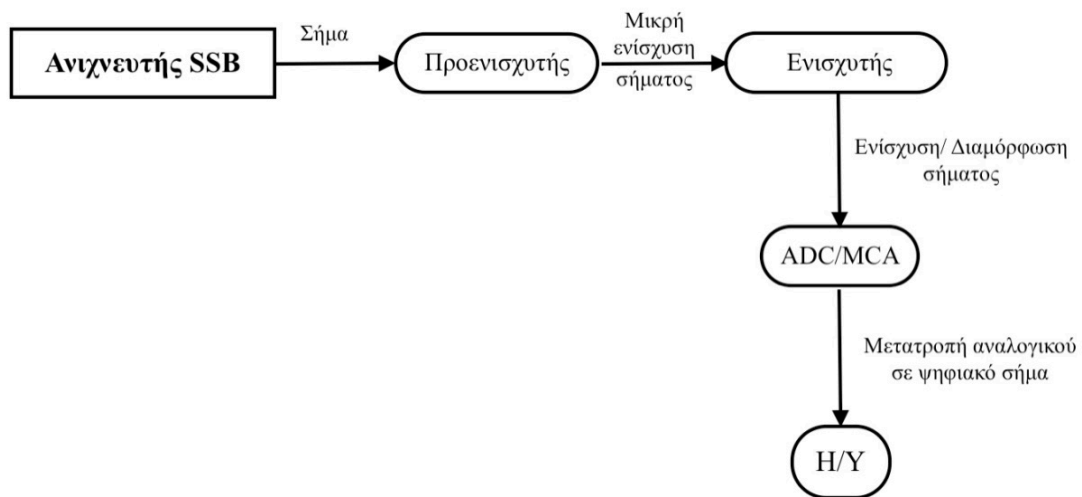
Ένα ακόμα φαινόμενο που επηρεάζει τις μετρήσεις είναι η καταγραφή ελαστικά σκεδαζόμενων σωματιδίων από τα τοιχώματα του θαλάμου και τον κλωβό Faraday (Faraday cup) στο τέλος της πειραματικής γραμμής, τα οποία συνεισφέρουν στο υπόβαθρο των κορυφών του φάσματος. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου τοποθετήθηκαν μπροστά από κάθε ανιχνευτή μικροί σωλήνες αλουμινίου, μήκους  $\sim 2-5$  cm και διαμέτρου  $\sim 1$  cm, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.



**Εικόνα 2.5.** Κάθετες σχισμές μπροστά από το παράθυρο του ανιχνευτή.

## 2.4 Ηλεκτρονική διάταξη

Κάθε ανιχνευτής παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με την ενέργεια του ανιχνευόμενου σωματιδίου. Το παραγόμενο σήμα διαμορφώνεται ηλεκτρονικά, όπως περιγράφεται από την σχηματική απεικόνιση της Εικόνας 2.6, για να πάρει την τελική μορφή του, η οποία είναι η μορφή ενός φάσματος. Αρχικά, το σήμα κερδίζει μια μικρή ενίσχυση από τον προενισχυτή (preamplifier), ο οποίος είναι συνδεδεμένος άμεσα με τον ανιχνευτή. Κατόπιν το σήμα ενισχύεται και διαμορφώνεται από τον ενισχυτή (amplifier). Πριν την καταγραφή των σημάτων, κάθε ανιχνευτής συνδέεται με παλμογράφο ώστε να γίνει βελτιστοποίηση του χρόνου μηδενισμού του παλμού (pole zero). Τέλος, το σήμα εισάγεται σε έναν Αναλογικό-Ψηφιακό Μετατροπέα (Analog-to-Digital Converter, ADC) για την μετατροπή του από αναλογικό σε ψηφιακό και έναν Πολυκαναλικό Αναλυτή (MultiChannel Analyzer, MCA) για την καταγραφή των παλμών στα κανάλια βάσει της ενέργειάς τους.



**Εικόνα 2.6.** Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρονικής διάταξης.

## 2.5 Κατασκευή στόχων

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα κατασκευάστηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”, μέσω θερμικής εξάχνωσης. Αρχικά, ένα μικρό κομμάτι κρυστάλλου Γαλλίου-Φωσφόρου μετατράπηκε σε σκόνη, η οποία εξάχνώθηκε πάνω σε ένα λεπτό υμένιο άνθρακα.

Το υπόστρωμα άνθρακα κατασκευάστηκε με χρήση του electrongun, όπου μια ηλεκτρική αντίσταση παράγει ηλεκτρόνια κατά τη θέρμανση της, τα οποία εκτρέπονται και προσπίπτουν πάνω σε μια παστίλια άνθρακα μέσω κατάλληλου μαγνητικού πεδίου. Κατά την πρόσκρουση των ηλεκτρονίων στη παστίλια απελευθερώνονται άτομα άνθρακα (sputtering), τα οποία επικάθονται σε ένα γυάλινο πλακίδιο επικαλυμμένο από τη μια πλευρά με ένα λεπτό στρώμα σαπουνιού (μειωτή επιφανειακής τάσης), με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα επίστρωμα άνθρακα. Τα γυάλινα πλακίδια βυθίζονται στο νερό ώστε να διαλυθεί το σαπούνι και το λεπτό υμένιο άνθρακα να αποκολληθεί από αυτά. Πάνω στο επίστρωμα άνθρακα, αφού τοποθετηθεί σε κατάλληλη ορθογώνια βάση με μια οπή στο κέντρο, πραγματοποιείται η εξάχνωση της σκόνης GaP. Η επιλογή του άνθρακα ως υπόστρωμα έγινε λόγω μηχανικής αντοχής.

Το στρώμα του GaP, όπως αναφέρθηκε, κατασκευάστηκε με την τεχνική της εξάχνωσης. Ο εξάχνωτήρας του εργαστηρίου φαίνεται στην Εικόνα 2.7 και είναι μια διάταξη που αποτελείται από ένα θάλαμο, μέσα στον οποίο δημιουργείται υψηλό κενό ( $\sim 10^{-6}$ - $10^{-7}$  Torr). Είναι σημαντικό ο θάλαμος πριν από κάθε χρήση να καθαρίζεται ώστε να αποφεύγεται η επιμόλυνση του στόχου που κατασκευάζεται. Η σκόνη του κρυστάλλου GaP τοποθετήθηκε σε μια ειδική κοιλότητα που είχε κατασκευαστεί σε ένα έλασμα τανταλίου, από το οποίο διήλθε ρεύμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Το ρεύμα αυξήθηκε σταδιακά έως ότου γίνει η εξάχνωση του υλικού. Το εξάχνωμένο υλικό επικάθισε στο λεπτό υμένιο άνθρακα, το οποίο είναι τοποθετημένο σε απόσταση περίπου 15 cm από το έλασμα του τανταλίου. Το Γάλλιο που υπάρχει στο στόχο, χρησιμοποιήθηκε για λόγους κανονικοποίησης του φορτίου της δέσμης. Εκτός από τον λεπτό στόχο, στο θάλαμο της πειραματικής γραμμής τοποθετήθηκε και ένας παχύς στόχος, ένα κομμάτι γυαλισμένου κρυστάλλου GaP, για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των διαφορετικών ενεργών διατομών που υπολογίστηκαν (benchmarking).





**Εικόνα 2.7.** Εξαχνωτήρας εργαστηρίου για την παρασκευή των στόχων.

Για το προσδιορισμό της μάζας  $m$  του υλικού που πρόκειται να εξαχνωθεί, υποθέτουμε ότι η εναπόθεση του υλικού γίνεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια  $S$  ενός ημισφαιρίου με κέντρο την κοιλότητα στο έλασμα του τανταλίου και χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση (4).

$$m = 2\pi \cdot R^2 \cdot \lambda \quad (4)$$

όπου  $R$  η ακτίνα του ημισφαιρίου με κέντρο την κοιλότητα στο έλασμα του τανταλίου και  $\lambda$  η επιφανειακή πυκνότητα ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) του υλικού που εξαχνώνεται. Η επιφανειακή πυκνότητα ( $\lambda$ ) υπολογίζεται με τη προϋπόθεση ότι η απώλεια της ενέργειας της δέσμης στο εσωτερικό του στόχου να μην υπερβαίνει τα 10 keV.

# Κεφάλαιο 3

## Πειραματική Ανάλυση

### 3.1 Υπολογισμός διαφορικής ενεργού διατομής

Όπως αναφέρθηκε, στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης δευτερίων σε  $^{31}\text{P}$  ( $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$ ) με σκοπό τον εμπλουτισμό της διεθνούς βιβλιογραφίας και την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων είτε για ερευνητικούς σκοπούς είτε σε τομείς της βιομηχανίας στην ανάλυση και μελέτη του  $^{31}\text{P}$ . Το ενεργειακό εύρος της δέσμης δευτερίων στο σύστημα του εργαστηρίου κυμαίνεται από 900 keV έως 2.4 MeV, με ενεργειακό βήμα μεταξύ των μετρήσεων 10-30 keV και οι γωνίες σκέδασης είναι  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$  και  $170^\circ$ .

#### 3.1.1 Σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών

Η διαφορική ενεργός διατομή  $(d\sigma/d\Omega)_{E,\theta}$  μιας αντίδρασης αντιπροσωπεύει την πιθανότητα τα σωματίδια της δέσμης με ενέργεια  $E$  να σκεδαστούν από τους πυρήνες-στόχο σε μια γωνία  $\theta$ . Ο προσδιορισμός των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$  μέσω απόλυτης μέτρησης δίνεται από την παρακάτω σχέση (5):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta} = \frac{Y_{E,\theta}}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N} \quad (5)$$

Όλοι οι όροι της παραπάνω εξίσωσης μπορούν να μετρηθούν πειραματικά υπολογίζοντας έτσι την άγνωστη διαφορική ενεργό διατομή. Πιο συγκεκριμένα:

- $Y$  είναι ο αριθμός των ανιχνευόμενων σωματιδίων μετά την σκέδασή τους στο φάσμα του ισότοπου που μελετάται ( $^{31}\text{P}$ ) και προκύπτει αναλύοντας τα φάσματα όπως περιγράφεται παρακάτω
- $\varepsilon$  εκφράζει την απόδοση του ανιχνευτή, που στην περίπτωση των ανιχνευτών πυριτίου επιφανειακού φραγμού είναι μονάδα
- $Q$  είναι ο αριθμός των πυρήνων της δέσμης που προσπίπτουν σε κάθε μέτρηση στο στόχο
- $\Omega$  είναι η στερεά γωνία μεταξύ του στόχου και του ανιχνευτή (sr)
- $N$  εκφράζει το πάχος του στόχου σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας (atoms/cm<sup>2</sup>) και ο τρόπος προσδιορισμού του περιγράφεται σε παρακάτω ενότητα



Ο συντελεστής  $Q\Omega$  είναι γενικά δύσκολο να μετρηθεί με επιθυμητή ακρίβεια. Καθώς για τον προσδιορισμό του φορτίου σε μια απόλυτη μέτρηση πρέπει να μετρηθεί το φορτίο που συλλέγεται στο στόχο και στο κλωβό Faraday (Faraday cup), ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος πίσω από τον στόχο. Αθροίζοντας τα δύο αυτά φορτία προσδιορίζεται το συνολικό φορτίο που προσπίπτει στο στόχο. Όμως, λόγω μεγάλης απόστασης του στόχου και του Faraday cup (~125 cm), η μέτρηση του φορτίου καθίσταται ανακριβής και σε συνδυασμό με την στερεά γωνία εισάγεται στα αποτελέσματα ένα σημαντικό σφάλμα. Επομένως, για την αποφυγή του σφάλματος που προκύπτει από τον προσδιορισμό του γινομένου του φορτίου στο στόχο με την στερεά γωνία, χρησιμοποιήθηκε η σχετική μέθοδος για τον προσδιορισμό των διαφορικών ενεργών διατομών, δηλαδή με τη βοήθεια του γαλλίου που περιέχεται στο στόχο, έγινε απαλοιφή του γινομένου  $Q\Omega$ , όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια [11]. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή, οι ελαστικές διαφορικές ενεργές διατομές του φωσφόρου-31 προσδιορίζονται ως προς τις ελαστικές διαφορικές ενεργές διατομές του γαλλίου, οι οποίες προσδιορίζονται από την σχέση του Rutherford (3) και επομένως υπολογίζονται αναλυτικά χωρίς επιπλέον σφάλμα. Η σχετική μέθοδος προσδιορισμού των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών πραγματοποιείται από τις παρακάτω δυο σχέσεις (6), (7):

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{E,\theta}^{31P} = \frac{Y_{31P}}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N_{31P}} \quad (6)$$

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{E,\theta}^{natGa} = \frac{Y_{natGa}}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N_{natGa}} \quad (7)$$

Διαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις κατά μέλη, προκύπτει η τελική σχέση (8) για τον προσδιορισμό των διαφορικών ενεργών διατομών:

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{E,\theta}^{31P} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{E,\theta}^{natGa} \cdot \left( \frac{Y_{31P}}{Y_{natGa}} \right) \cdot \left( \frac{N_{natGa}}{N_{31P}} \right) \quad (8)$$

Επομένως, ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών πραγματοποιείται μέσω του προσδιορισμού των τριών όρων της σχέσης (8) και οι οποίοι αναλύονται στις παρακάτω ενότητες.

### 3.1.2 Υπολογισμός ενεργού διατομής γαλλίου κατά Rutherford

Ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής του γαλλίου γίνεται αναλυτικά μέσω της σχέσης του Rutherford [12], η οποία στο σύστημα του εργαστηρίου είναι η εξής:

$$\left(\frac{d\sigma_R}{d\Omega}\right)_{E,\Theta} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right)^2 \cdot \frac{4}{\sin^4\theta} \cdot \frac{\{[1 - ((\frac{M_1}{M_2})\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}} + \cos\theta\}^2}{[1 - ((\frac{M_1}{M_2})\sin\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

όπου ένα σωματίδιο με ατομικό αριθμό  $Z_1$ , μάζας  $M_1$  και ενέργειας  $E$  σκεδάζεται από πυρήνα με ατομικό αριθμό  $Z_2$ , μάζας  $M_2$  υπό γωνία  $\theta$ , όπως περιγράφεται στην παράγραφο 1.2.1. Από τη σχέση αυτή υπολογίζονται οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής του γαλλίου για κάθε συνδυασμό ενέργειας και γωνίας, καθώς το γάλλιο ακολουθεί τη σκέδαση Rutherford λόγω του μεγάλου ατομικού του αριθμού και της χαμηλής ενέργειας των δευτερίων της δέσμης. Παρόλα αυτά, στην παραπάνω σχέση πρέπει να εισαχθεί ένας διορθωτικός παράγοντας λόγω του φαινομένου θωράκισης του φορτίου (screening). Το φαινόμενο της θωράκισης του φορτίου συμβαίνει λόγω έλξης μεταξύ ηλεκτρονίων και πυρήνων και ορίζεται ως η μείωση του πυρηνικού φορτίου σε ένα νέφος ηλεκτρονίων εξαιτίας της διαφοράς στις ελκτικές δυνάμεις ανάμεσα στα ηλεκτρόνια του ατόμου. Στη σκέδαση Rutherford η διόρθωση του screening τροποποιεί την απόσβεση του δυναμικού Coulomb ανάμεσα στο προσπίπτον σωματίδιο και τον πυρήνα σε μεγάλες αποστάσεις. Για ελαφρείς πυρήνες η διόρθωση είναι αμελητέα. Αντίθετα, στους βαρείς πυρήνες η στοιβάδα  $K$  βρίσκεται πιο κοντά στο πυρήνα και το ενεργό φορτίο μειώνεται. Ο διορθωτικός παράγοντας που χρησιμοποιήθηκε για το γάλλιο, που είναι βαρύν πυρήνας, δίνεται από την παρακάτω σχέση [7]:

$$F = \frac{\sigma}{\sigma_R} = 1 - \frac{0.049 \cdot Z_1 \cdot Z_2^{\frac{4}{3}}}{E_{cm}} \quad (10)$$

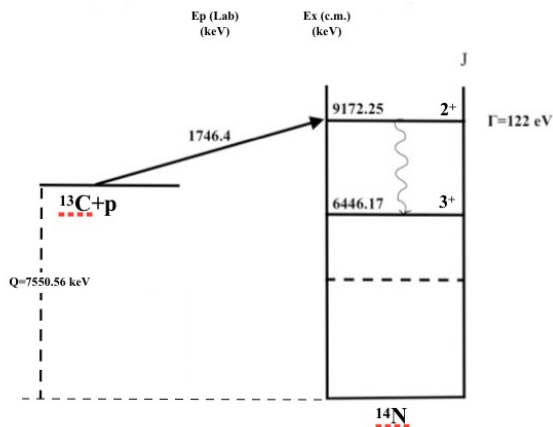
Οπότε, οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών του γαλλίου για όλες τις ενέργειες δέσμης και γωνίες που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από την παρακάτω σχέση (11). Επειδή η σχέση αυτή είναι αναλυτική, οι τιμές δεν έχουν σφάλμα.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\Theta}^{Ga} = F \cdot \left(\frac{d\sigma_R}{d\Omega}\right)_{E,\Theta}^{Ga} \quad (11)$$

### 3.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή

Προτού προσδιοριστούν οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής, είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της ενέργειας της δέσμης, δηλαδή της ενέργειας των δευτερίων που προσέκρουσαν στο στόχο σε κάθε μέτρηση. Η ενέργεια της δέσμης του επιταχυντή ρυθμίζεται από τον χειριστή μέσω ενός μαγνήτη επιλογής ενέργειας (Analyser). Ανάλογα με το φορτίο, τη μάζα και την ταχύτητα του επιθυμητού ιόντος, μεταβάλλεται κατάλληλα το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη επιλογής ενέργειας μέσω αλλαγής του ρεύματός του ώστε να στραφούν κατά 90° δεξιά. Επειδή η μέτρηση αυτού του μαγνητικού πεδίου δεν μπορεί να γίνει ακριβώς στο κέντρο του επιταχυντικού σωλήνα, η πραγματική ενέργεια της δέσμης διαφέρει κατά μερικά keV από την ονομαστική της ενέργεια. Επιπλέον, λόγω του βρόχου υστέρησης υπάρχει συνήθως μια παραμένουσα μαγνήτιση, η οποία προστίθεται στο ρυθμιζόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι παράγοντες αυτοί έχουν σαν αποτέλεσμα η ενέργεια της δέσμης να έχει απόκλιση (offset) από την αναμενόμενη ενέργεια. Επίσης, η δέσμη δευτερίων δεν είναι μονοενεργειακή αλλά παρουσιάζει μια κανονική κατανομή (Gaussian) γύρω από την επιθυμητή ενέργεια (ripple), η οποία εξαρτάται από το άνοιγμα των σχισμών ανάλυσης (analyzing slits) που βρίσκονται αμέσως μετά τον analyzer magnet. Επομένως, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός τόσο της κεντρικής τιμής της κατανομής της ενέργειας δέσμης, όσο και το εύρος της.

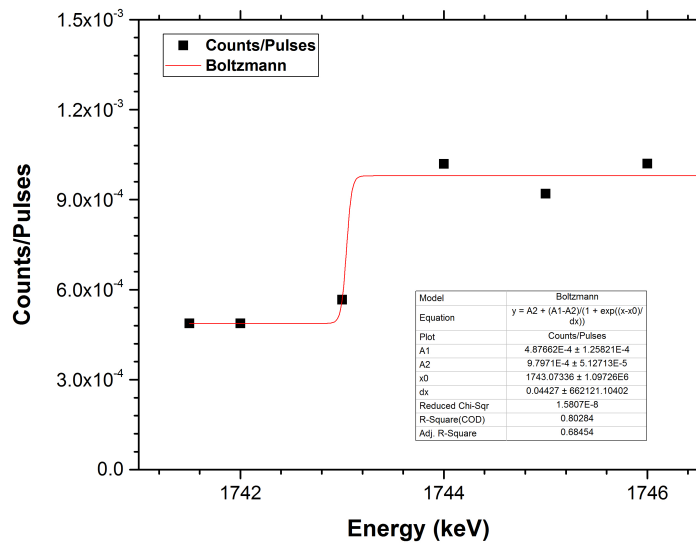
Για τον λόγο αυτό πραγματοποιείται ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή (accelerator calibration) πριν αρχίσει το πείραμα. Ο συνηθέστερος τρόπος είναι με χρήση λεπτών συντονισμών ακτίνων-γ. Στον παρόν πείραμα, χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ , δηλαδή ακτινοβολήθηκε ένας στόχος άνθρακα με δέσμη πρωτονίων και καταγράφηκαν τα φάσματα για ενέργειες επιταχυντή από 1742 ως 1769 keV, με βήμα 1 keV. Το ενεργειακό αυτό εύρος επιλέχθηκε ώστε να εντοπιστεί ο συντονισμός της παραπάνω αντίδρασης στην ενέργεια  $(1747.6 \pm 0.9)$  keV. Η ακτίνα-γ που ανιχνεύεται έχει ενέργεια  $E_\gamma=2725.79$  keV και προκύπτει από την αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα  $^{14}\text{N}$  από την διεγερμένη στάθμη με ενέργεια  $E_{\text{level}}=9172.25$  keV ( $\Gamma=122$  eV) στη διεγερμένη στάθμη με ενέργεια  $E_{\text{level}}=6446.17$  keV. Η ανίχνευση των ακτίνων-γ έγινε από έναν ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe). Παρακάτω παρουσιάζεται το ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης αυτής (Εικόνα 3.1).



**Εικόνα 3.1.** Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ .

Από την ανάλυση των μετρήσεων προέκυψε το παρακάτω γράφημα (Εικόνα 3.2), όπου φαίνεται ότι ο συντονισμός είναι περίπου στην ενέργεια 1743 keV. Το σημείο του συντονισμού είναι στο μέσο της ανόδου της καμπύλης και η καμπύλη αυτή αποτελεί προσαρμογή των πειραματικών σημείων με μία συνάρτηση Boltzmann στο πρόγραμμα Origin, που υπολογίζει αυτόματα το  $x_0$  που είναι η επιθυμητή ενέργεια. Άρα, υπάρχει μετατόπιση (offset) της ενέργειας του επιταχυντή κατά  $\sim 3.4$  keV, δηλαδή αποδείχτηκε ότι η ενέργεια της δέσμης ήταν 3.4 keV μικρότερη από την ονομαστική της τιμή. Από την προσαρμογή προκύπτει επίσης το εύρος της κατανομής της δέσμης (ripple), μέσω της διαφοράς των ενεργειών στις οποίες αντιστοιχεί το 12% και 88% της διαφοράς του ελαχίστου από το μέγιστο, να είναι  $\sim 0.2$  keV, αριθμός μη ρεαλιστικός δεδομένου ότι η απόσταση των σχισμών ανάλυσης ήταν 150 mm, οπότε θα ήταν αναμενόμενο ένα ripple περίπου 2-3 keV. Επομένως, η πραγματική ενέργεια της δέσμης είναι:

$$E_{beam} = (E_{nom} + offset) \pm ripple \quad (12)$$

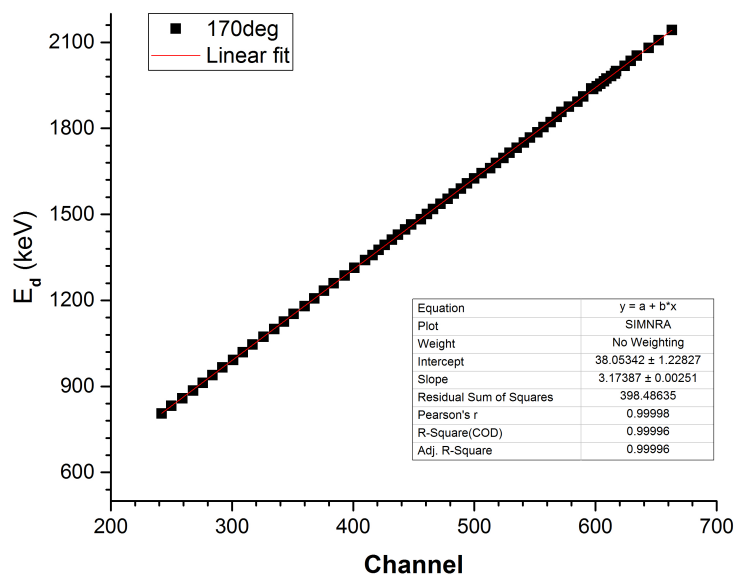


**Εικόνα 3.2.** Βαθμονόμηση επιταχυντή με την αντίδραση  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ .

### 3.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση μονάδων ADC

Ένα ακόμα απαραίτητο βήμα πριν την έναρξη του πειράματος είναι η ενεργειακή βαθμονόμηση των μονάδων μετατροπής σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC - Analog to Digital Converter) ώστε να γίνει αντιστοίχιση των καναλιών σε ενέργειες. Από την κινηματική της σκέδασης γνωρίζουμε την ενέργεια που θα έχει ένα δευτέριο γνωστής ενέργειας που θα σκεδαστεί από την επιφάνεια του στόχου GaP σε μια συγκεκριμένη γωνία. Επομένως από τα φάσματα είναι διακριτό σε ποιο κανάλι αντιστοιχεί η κάθε ενέργεια της μέτρησης. Το κανάλι αυτό αντιστοιχεί στη μέση της ανόδου της κορυφής του γαλλίου, που αποτελεί την κορυφή “αναφοράς” καθώς το γάλλιο είναι επιφανειακό στοιχείο και η κορυφή του έχει καλή στατιστική.

Τα φάσματα αναλύθηκαν με το πρόγραμμα SpectrW [13] για κάθε ενέργεια δευτερίων και γωνία σκέδασης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η γραφική παράσταση ενέργειας συναρτήσει καναλιών και προσαρμόστηκε (fit) με ευθεία ( $y=a+bx$ ). Προσδιορίστηκε η κλίση της ευθείας  $b$ , η οποία αντιστοιχεί στο λόγο ενέργειας προς κανάλι (keV/channel) και ο σταθερός όρος  $a$  της προσαρμογής που αντιστοιχεί στη μετατόπιση (offset) των φασμάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση ενέργειας συναρτήσει καναλιών με την προσαρμογή για την γωνία σκέδασης  $170^\circ$  (Εικόνα 3.3). Ομοίως έγινε για όλες τις γωνίες σκέδασης ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες παράμετροι.



**Εικόνα 3.3.** Γραφική παράσταση ενεργειακής βαθμονόμησης του ADC για τον ανιχνευτή στις  $170^\circ$ .

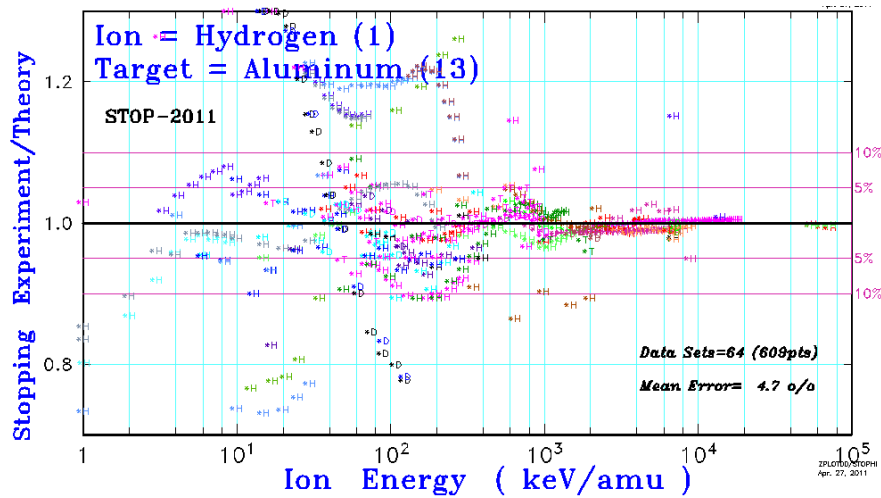
### 3.4 Πάχος στόχου

Ένας απαραίτητος όρος για τον υπολογισμό των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών του φωσφόρου-31 είναι ο λόγος των παχών του γαλλίου προς το φώσφορο-31 ( $\text{Na}^{\text{nat}}_{\text{Ga}} : \text{Na}^{31}_{\text{P}}$ ), όπως φαίνεται από την σχέση (8) στην ενότητα 3.1.1. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με δέσμη πρωτονίων σε πέντε διαφορετικές ενέργειες ( $E_{p,\text{Lab}} = 1.05, 1.1, 1.2, 1.36, 1.43$  MeV) επιλεγμένες με κριτήριο να βρίσκονται μακριά από συντονισμούς ώστε να μην υπάρχουν απότομες αυξομειώσεις στη διαφορική ενεργό διατομή.

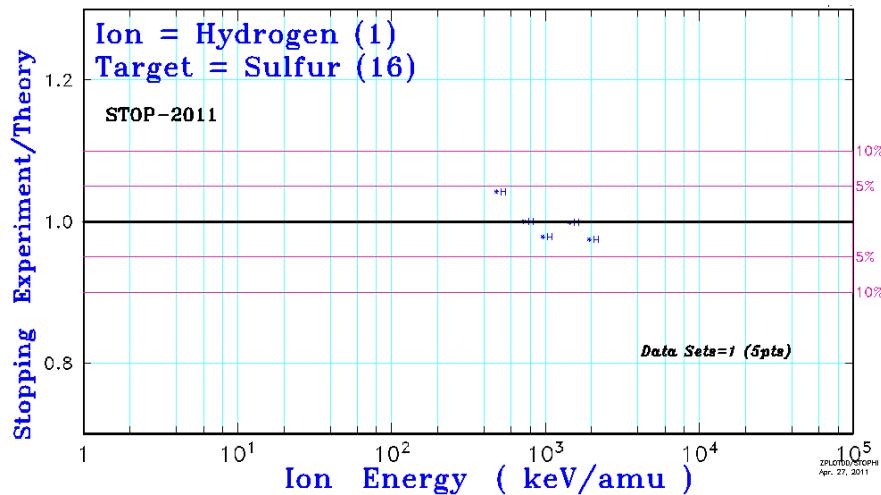
Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό του λόγου ήταν απαραίτητη η ανάλυση του στόχου μέσω μιας διαδικασίας που βασίζεται στη χρήση του προγράμματος SIMNRA v. 6.94 [14] και των πειραματικών φασμάτων. Μέσω του προγράμματος SIMNRA πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση των αντιδράσεων της δέσμης πρωτονίων στον στόχο. Ο στόχος προσομοιώνεται βάση θεωρητικής μελέτης, ανάλογα με τον τρόπο που έχει κατασκευαστεί (μέσω εξάχνωσης) και των στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Δηλαδή, περιγράφονται κατά προσέγγιση τα κατάλληλα στρώματα με όλα τα στοιχεία σε διαφορετική αναλογία το καθένα. Πέρα από τη σύσταση του στόχου, για τη λειτουργία του προγράμματος είναι απαραίτητη και η εισαγωγή ορισμένων παραμέτρων. Στο πρόγραμμα ορίζουμε το είδος της δέσμης και την ενέργεια της, τη γωνία σκέδασης, τη βαθμονόμηση (calibration offset), το λόγο ενέργειας προς κανάλια (keV/channel), το φορτίο που προσπίπτει στο στόχο (particles\*sr) και τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή (detector resolution). Ας σημειωθεί εδώ ότι η ενέργεια που ορίζεται στο πρόγραμμα SIMNRA για την προσομοίωση κάποιας ακτινοβολήσης είναι αυτή που υπολογίζεται μετά το accelerator calibration. Την μετέπειτα απώλεια της ενέργειας ( $E_{\text{loss}}$ ) στο μέσο του στόχου την υπολογίζει το ίδιο το πρόγραμμα. Επίσης, δίνεται η επιλογή γνωστών τιμών διαφορικών ενεργών διατομών από την βιβλιογραφία για όλες τις αντιδράσεις και σκεδάσεις που εμφανίζονται σε κάθε πειραματικό φάσμα. Για το γάλλιο επιλέχθηκαν οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης που ακολουθούν την εξίσωση Rutherford, όπως εξηγείται στην παράγραφο 3.1.2. Για τα υπόλοιπα στοιχεία που υπάρχουν στο στόχο, όπως ο φώσφορος-31, ο άνθρακας, το οξυγόνο και το άζωτο, οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης που χρησιμοποιήθηκαν είναι μετρημένες και αξιολογημένες (evaluated) από το SigmaCalc [6]. Επιπλέον, ο κώδικας του προγράμματος SIMNRA μπορεί να συμπεριλάβει και επιπλέον παραμέτρους, όπως φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (multiple scattering), φαινόμενα διπλής σκέδασης (dual scattering), δυνατότητα επιλογής δεδομένων για την ισχύ ανάσχεσης (stopping power), και διάφορα μοντέλα για τον διασκεδασμό (straggling). Ωστόσο, στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκαν το μοντέλο ZBL (Ziegler-Biersack-Littmark) [15] για την ισχύ ανάσχεσης και το μοντέλο των Chu και Yang για τον διασκεδασμό [15], [16]. Στην ιστοσελίδα για τον υπολογισμό της εμβέλειας ιόντων στην ύλη (SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter) παρουσιάζεται η μέση απόκλιση ανάμεσα στα μοντέλα του SRIM και στα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα για την ισχύ ανάσχεσης, όμως παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για το γάλλιο και τον φώσφορο (ιστοσελίδα του SRIM, <https://www.srim.org>) [8].

Για να έχουμε μια αίσθηση για την ακρίβεια του υπολογισμού της ισχύος ανάσχεσης ελέγχουμε τα γειτονικά στοιχεία του φωσφόρου-31 και του γαλλίου. Προκύπτει ότι για το φώσφορο-31 για το εύρος ενεργειών που μελετάμε είναι κάτω από 5% ενώ για το γάλλιο έχουμε ένα εύρος ~5-6%. Παρακάτω παρατίθενται τα γειτονικά στοιχεία από τα οποία έγινε μια εκτίμηση για τις αποκλίσεις της ισχύος ανάσχεσης με δέσμη πρωτονίων.

α)

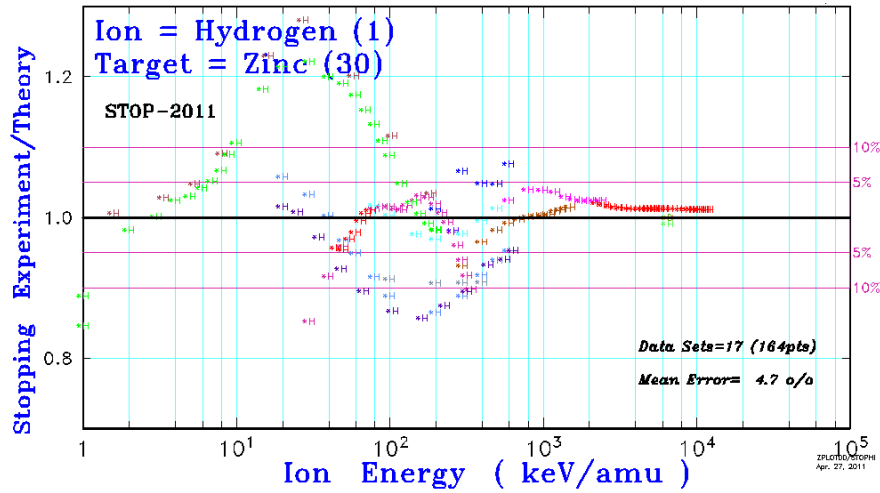


β)

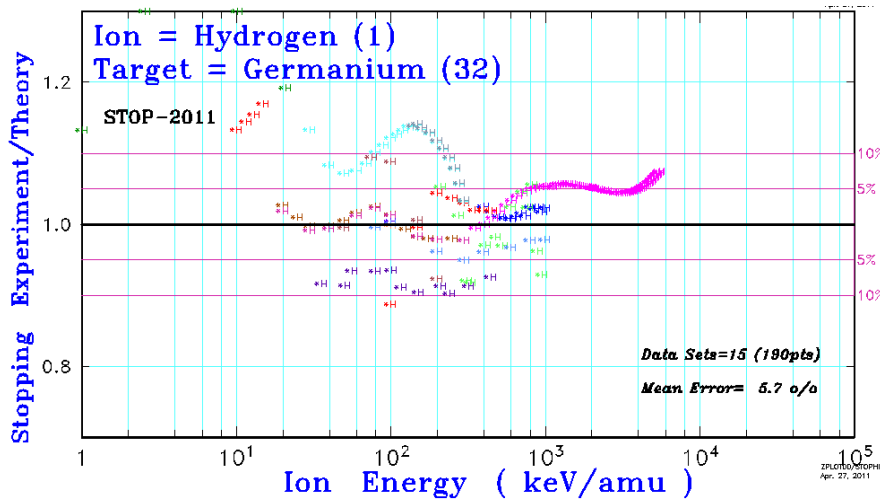


**Εικόνα 3.4(α-β).** Γειτονικά στοιχεία του φωσφόρου-31 από τα οποία προκύπτει η μέση απόκλιση για την ισχύ ανάσχεσης και κατ' επέκταση μια εκτίμηση για το συστηματικό σφάλμα στο πάχος του στόχου.

α)



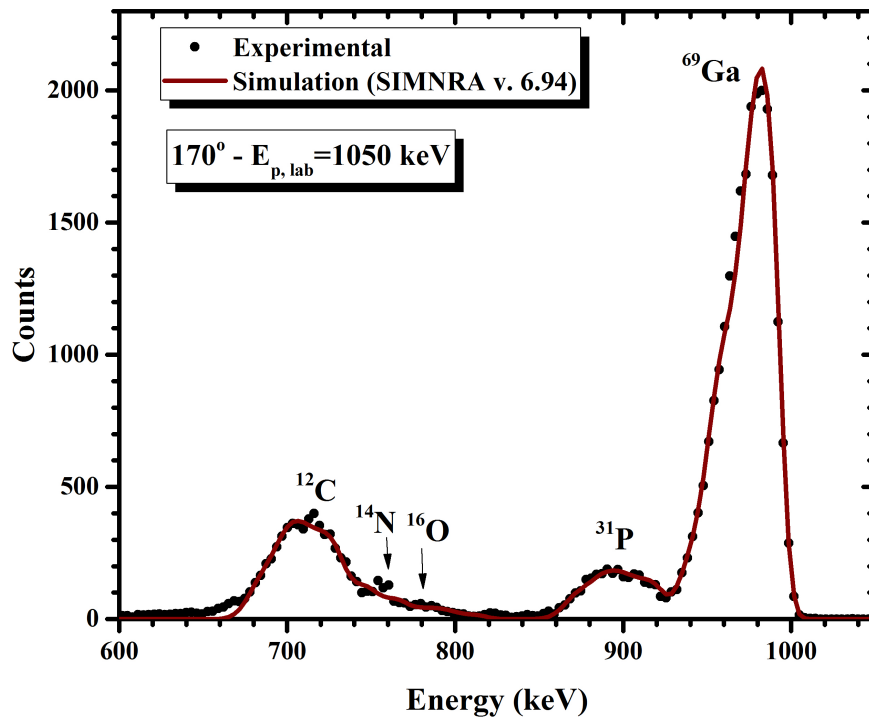
β)



**Εικόνα 3.5(α-β).** Γειτονικά στοιχεία του γαλλίου από τα οποία προκύπτει η μέση απόκλιση για την ισχύ ανάσχεσης και κατ' επέκταση μια εκτίμηση για το συστηματικό σφάλμα στο πάχος του στόχου.

Για την εύρεση λοιπόν του λόγου, εφόσον εισήχθησαν οι κατάλληλες παράμετροι, η ποσότητα του γαλλίου στο στόχο διατηρήθηκε σταθερή ενώ κάθε φορά μεταβαλλόταν η ποσότητα του φωσφόρου και το φορτίο, έως ότου το προσομοιωμένο φάσμα να βρίσκεται σε συμφωνία με το πειραματικό. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για τις γωνίες  $150^\circ$  σε ενέργειες πρωτονίων 1.36 MeV και 1.43 MeV, διότι στις υπόλοιπες ενέργειες παρατηρήθηκε επικάλυψη των κορυφών, και  $160^\circ, 170^\circ$  και στις πέντε ενέργειες πρωτονίων. Επομένως, η τελική τιμή προκύπτει από τον μέσο όρο αυτών των δώδεκα τιμών και ισούται με:  $\frac{N_{natGa}}{N_{31P}} = (2.00 \pm 0.08)$ , δηλαδή το σχετικό σφάλμα είναι  $\sim 4\%$ .





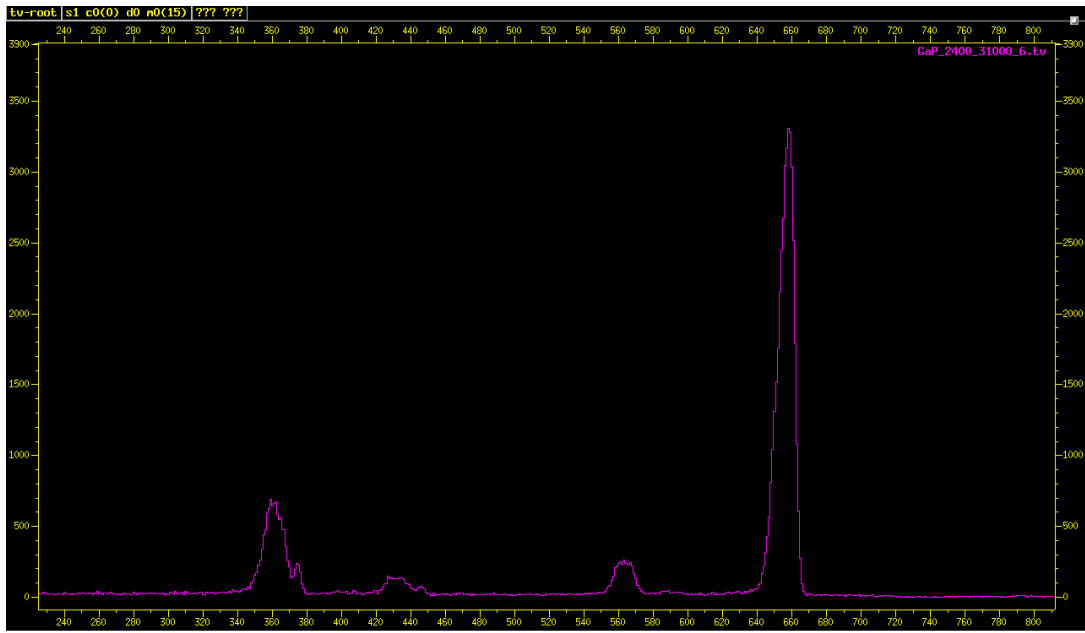
**Εικόνα 3.6.** Πειραματικό και προσομοιωμένο φάσμα με χρήση του προγράμματος SIMNRA με δέσμη πρωτονίων ενέργειας  $E_p=1050$  keV και σε γωνία σκέδασης  $\theta=170^\circ$ , μαζί με την αναγνώριση κορυφών.

### 3.5 Εμβαδομέτρηση κορυφών

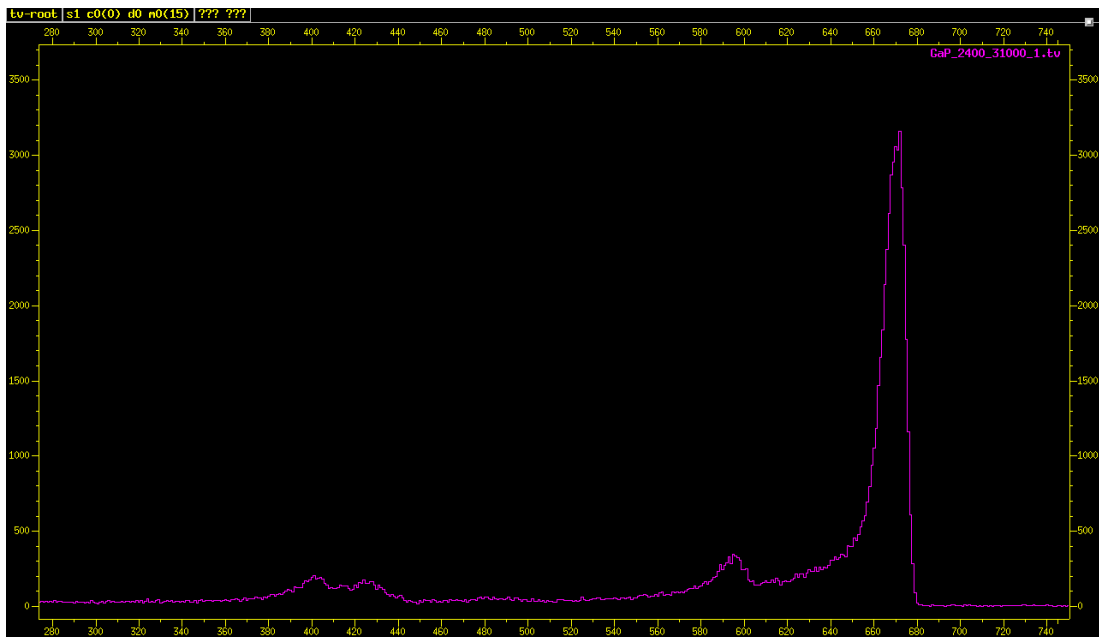
Ο υπολογισμός του αριθμού των γεγονότων κάθε κορυφής του φάσματος που μελετάται, αντιστοιχεί στο εμβαδόν κάτω από την κορυφή αυτή. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει με χρήση διάφορων προγραμμάτων ανάλυσης φασμάτων. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα SPECTRW [13] και TV [17], και οι διαφορές δεν ξεπέρασαν το 1%. Με SPECTRW αναλύθηκαν τα φάσματα για την ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή και τα φάσματα για το πάχος του στόχου, ενώ με TV αναλύθηκαν τα φάσματα δευτερίων για εύρος ενεργειών από 900 keV ως 2400 keV και σε όλες τις γωνίες σκέδασης.

Αφού έγινε ταυτοποίηση των κορυφών του φάσματος, κάθε κορυφή ολοκληρώθηκε με ταυτόχρονη αφαίρεση του υποβάθρου (background). Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις από τον ανιχνευτή στη γωνία σκέδασης  $120^\circ$  απορρίφθηκαν από την ανάλυση λόγω αδυναμίας ολοκλήρωσης (integration) των κορυφών του γαλλίου και του φωσφόρου-31 εξαιτίας μεγάλης αλληλοεπικάλυψης ανάμεσα στις κορυφές της ελαστικής σκέδασης. Επιπλέον, η ανάλυση των μετρήσεων για την γωνία  $130^\circ$  σταμάτησε στην ενέργεια  $E_d=1200$  keV για τον ίδιο λόγο. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα δευτερίων όπως φαίνεται από το πρόγραμμα TV στην ίδια ενέργεια δευτερίων  $E_d=2400$  keV για γωνία σκέδασης  $170^\circ$  (Εικόνα 3.7) και για γωνία σκέδασης  $120^\circ$  (Εικόνα 3.8) στην οποία φαίνεται η επικάλυψη των κορυφών.

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε δεν αποτελείται μόνο από γάλλιο και φώσφορο αλλά και από άνθρακα, οξυγόνο και άζωτο. Όπως γίνεται εμφανές και στις παρακάτω εικόνες, στα φάσματα είναι ορατές πέντε τουλάχιστον κορυφές που μπορεί να οφείλονται είτε σε ελαστική σκέδαση από άλλα ελαφρά στοιχεία, είτε σε αντιδράσεις. Η κορυφή του άνθρακα προέρχεται από το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για στήριξη της σκόνης GaP ενώ το οξυγόνο και το άζωτο που δεν υπήρχαν εξαρχής στο στόχο προέρχονται από την διαδικασία παρασκευής του στόχου. Η κορυφή του αζώτου προέρχεται ενδεχομένως από τον τρόπο παρασκευής του υμενίου άνθρακα και από το σαπούνι που χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία ενώ το οξυγόνο εισέρχεται στο στόχο κατά την διαδικασία της εξάχνωσης. Ανάλογα με τον πυρήνα σκέδασης των σωματιδίων της δέσμης, τα σωματίδια εισέρχονται στους ανιχνευτές με διαφορετική ενέργεια και η ενέργεια αυτή προκύπτει από τη κινηματική κάθε αντίδρασης. Επομένως, βάσει αυτής της ενέργειας αναγνωρίζεται κάθε κορυφή στο φάσμα από ποιο στοιχείο προέρχεται και για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα catkin [18]. Μετά την αναγνώριση των κορυφών, με το πρόγραμμα SIMNRA προσομοιώνεται το φάσμα με σκοπό να ελεγχθεί κατά πόσον οι κορυφές που εμφανίζονται είναι λόγω ελαστικής σκέδασης ή κάποιας πυρηνικής αντίδρασης. Οι τιμές που προέκυψαν από τις ολοκληρώσεις των κορυφών είχαν σχετικό σφάλμα  $\sim 2.5\%$

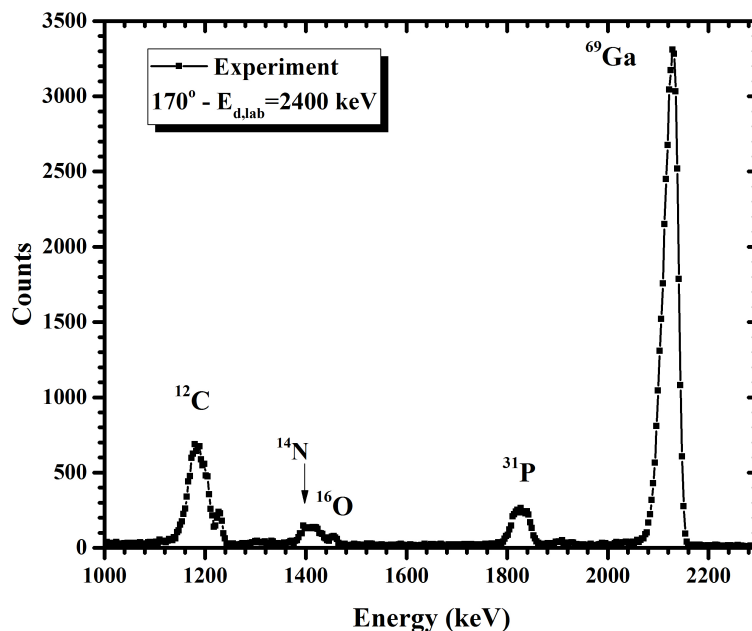


**Εικόνα 3.7.** Πειραματικό φάσμα δευτερίων μέσω του προγράμματος TV για  $E_d=2400$  keV και  $\theta=170^\circ$



**Εικόνα 3.8.** Πειραματικό φάσμα δευτερίων μέσω του προγράμματος TV για  $E_d=2400$  keV και  $\theta=120^\circ$

Ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τις ολοκληρώσεις των κορυφών του φάσματος είναι ο τρόπος που επιλέγεται το υπόβαθρο (background). Η αβεβαιότητα που εισέρχεται από την ολοκλήρωση των κορυφών αποτελεί συστηματικό σφάλμα. Σε πολλά φάσματα, κυρίως σε χαμηλές ενέργειες και μπροστά γωνίες ( $140^\circ$ ,  $130^\circ$ ), παρατηρήσαμε να δημιουργούνται “ουρές” αριστερά των κορυφών. Υποθέσαμε ότι οφείλεται στον τρόπο κατασκευής του στόχου και όχι στα ηλεκτρονικά. Παρόλα αυτά, υπήρχε μεγάλη αβεβαιότητα στα κανάλια που τελειώνει η κύρια κορυφή του φωσφόρου και αν υπήρχε εισχώρηση της κορυφής του γαλλίου στον φώσφορο. Για αυτό τον λόγο σταμάτησε και η ολοκλήρωση της γωνίας  $\theta=130^\circ$  στην ενέργεια 1200 keV και απορρίφθηκε εντελώς η γωνία  $\theta=120^\circ$ , καθώς η αβεβαιότητα έφτανε έως και 30%. Επομένως, το υπόβαθρο επιλέχθηκε σε όλα τα φάσματα κοντά σχετικά στις κορυφές ώστε να υπάρχει συνέπεια και το φαινόμενο να ελαχιστοποιείται, καθώς τα σημεία του υποβάθρου επιλέγονταν σε όλα τα φάσματα πριν την κορυφή του φωσφόρου και μετά του γαλλίου. Το συστηματικό σφάλμα εκτιμήθηκε για δύο ακραίες περιπτώσεις γωνιών ( $130^\circ$  και  $170^\circ$ ) σε χαμηλές και υψηλές ενέργειες δέσμης. Για τη γωνία  $\theta=170^\circ$  στις χαμηλές ενέργειες έχουμε μια αβεβαιότητα της τάξης του 3% ενώ στις υψηλές δεν ξεπερνούσε το 1% και αυτό οφείλεται στο ότι οι κορυφές ήταν αρκετά απομακρυσμένες και χωρίς “ουρές”, όπως φαίνεται από την εικόνα 3.9. Για τη γωνία  $\theta=130^\circ$  στις χαμηλές ενέργειες η αβεβαιότητα φτάνει  $\sim 12\%$  για την κορυφή του φωσφόρου, ενώ για την κορυφή του γαλλίου δεν ξεπερνάει το 2% καθώς έχει πολλά γεγονότα. Σε μεγαλύτερες ενέργειες δέσμης η αβεβαιότητα πέφτει στο  $\sim 8\%$  για το φώσφορο, ενώ στο γάλλιο είναι αμελητέα.



**Εικόνα 3.9.** Τυπικό φάσμα δευτερίων ενέργειας  $E_d=2400$  keV και  $\theta=170^\circ$  μαζί με την αναγνώριση κορυφών.

# Κεφάλαιο 4

## Αποτελέσματα

### 4.1 Αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής

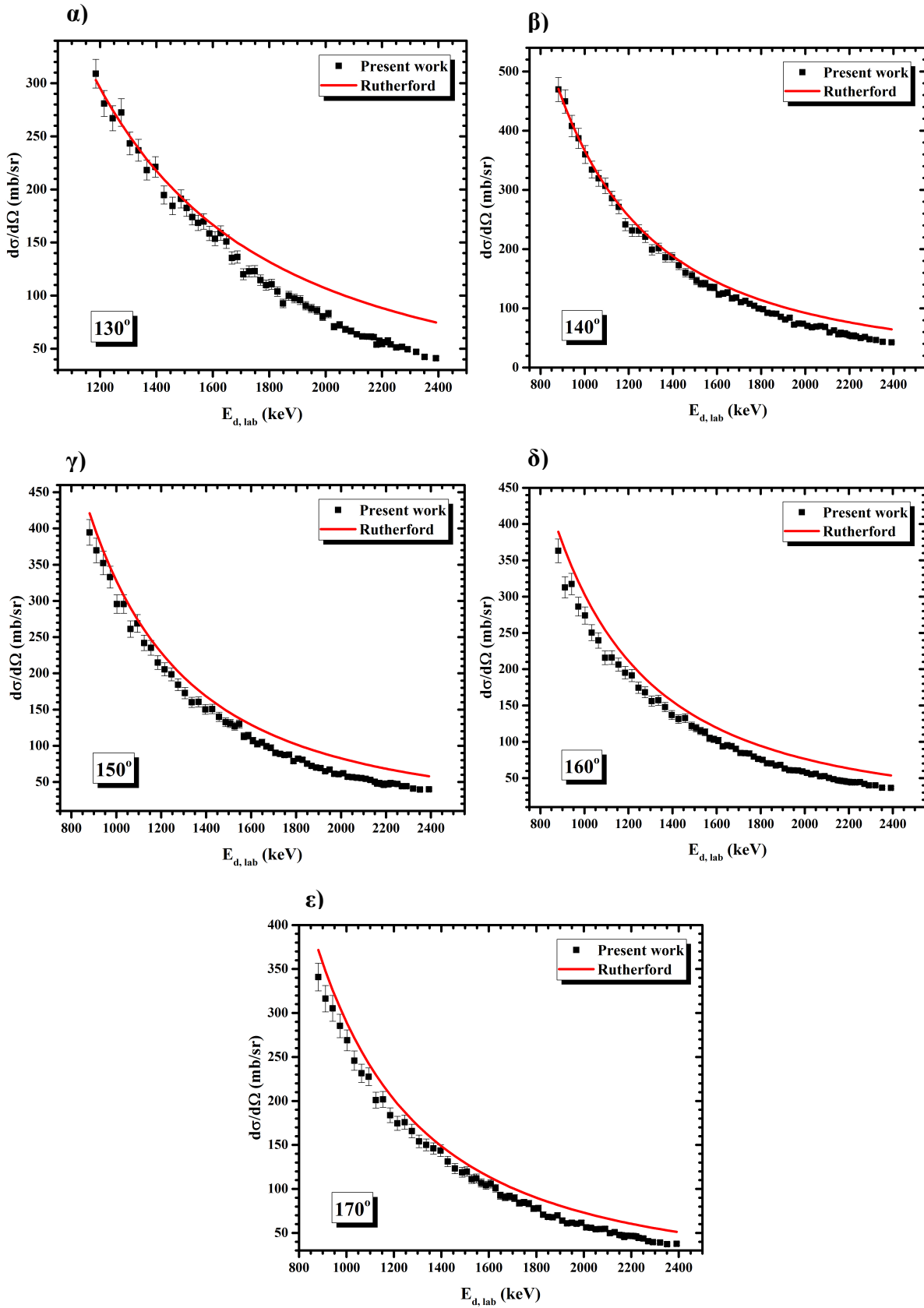
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από φώσφορο-31 όπως προσδιορίστηκαν από τον υπολογισμό των όρων της σχέσης (8) στην ενότητα 3.1.1. Η ελαστική σκέδαση  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$  μελετήθηκε σε γωνίες  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$  και  $170^\circ$  και σε ενεργειακό εύρος από 900 keV ως 2400 keV με βήμα 10-30 keV. Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1.), για κάθε γωνία σκέδασης και ενέργεια δέσμης, μαζί με τα σφάλματά τους. Τα σφάλματα αυτά είναι στατιστικά και οφείλονται στο σφάλμα του πλήθους των γεγονότων κάθε κορυφής και στο σφάλμα μέσης τιμής της μέτρησης του πάχους του στόχου και υπολογίστηκαν με χρήση του τύπου διάδοσης σφαλμάτων. Το σχετικό στατιστικό σφάλμα δεν υπερβαίνει σε καμιά περίπτωση το 5% και οφείλεται κυρίως στην αβεβαιότητα που προκύπτει από τον προσδιορισμό του λόγου των παχών. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίστηκαν τα σφάλματα φαίνεται παρακάτω (13). Εκτός από το στατιστικό σφάλμα υπάρχει και το συστηματικό, το οποίο λόγω σύμβασης δεν περιλαμβάνεται στις αναγραφόμενες τιμές του πίνακα και από την προσέγγιση για το προσδιορισμό του πάχους του στόχου προκύπτει ότι δεν υπερβαίνει το 5% και για το φώσφορο-31 και για το γάλλιο. Στον Πίνακα 4.1 οι τιμές της ενέργειας που παρουσιάζονται είναι η ενέργεια που είχε το δευτέριο στο μέσο του πάχους του στόχου μαζί με το σφάλμα της, καθώς η τελική ενέργεια δίνεται από  $E_{final} = E_{beam} - E_{loss}$ . Η απώλεια ενέργειας υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SIM-NRA αφού πρώτα έγινε η διόρθωση στην αρχική ενέργεια (ονομαστική τιμή) της δέσμης. Η διόρθωση στην ενέργεια της δέσμης προέκυψε από την ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή και ισούται με +3.4 keV. Επιπλέον, οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής παριστάνονται γραφικά μαζί με τα σφάλματά τους και την αντίστοιχη ενεργό διατομή Rutherfordστis (Εικόνες 4.1(α-ε)).

$$\delta\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta Y_{31P}}{Y_{31P}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y_{natGa}}{Y_{natGa}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\left(\frac{N_{natGa}}{N_{31P}}\right)}{\left(\frac{N_{natGa}}{N_{31P}}\right)}\right)^2} \quad (13)$$

**Πίνακας 4.1.**

E <sub>d</sub> (keV)	δE <sub>d</sub> (keV)	(σ+δσ) (mb/sr)									
		130°		140°		150°		160°		170°	
882	6	-	-	469	20	395	18	363	16	341	16
912	6	-	-	449	20	370	17	313	15	316	15
942	6	-	-	408	18	352	16	317	15	305	15
973	6	-	-	387	17	333	15	286	13	285	13
1003	6	-	-	360	15	296	13	274	12	269	12
1033	6	-	-	334	14	296	13	251	11	246	11
1064	6	-	-	320	14	261	11	240	10	231	10
1094	6	-	-	307	13	269	12	216	9	228	10
1124	6	-	-	286	12	242	10	216	9	201	9
1154	6	-	-	271	12	235	10	206	9	202	9
1185	6	309	13	241	10	215	9	195	9	184	8
1215	6	281	12	231	10	206	9	191	8	175	8
1245	6	267	12	231	10	199	9	174	8	176	8
1276	6	298	13	221	10	184	8	168	8	166	8
1306	6	243	11	199	9	173	8	156	7	154	7
1336	6	237	10	201	9	160	7	157	7	150	7
1366	6	218	9	186	8	161	7	148	6	146	6
1396	6	221	10	186	8	150	7	137	6	143	7
1427	6	195	8	173	7	151	7	131	6	131	6
1457	6	184	8	160	7	140	6	132	6	123	6
1487	6	191	9	156	7	132	6	122	6	119	6
1507	6	183	8	146	6	131	6	119	5	120	5
1527	6	174	7	141	6	127	5	115	5	111	5
1547	6	169	7	142	6	130	6	113	5	112	5
1568	6	170	7	136	6	113	5	105	5	107	5
1588	6	159	7	135	6	114	5	103	4	104	5
1608	6	154	7	124	5	107	5	102	4	106	5
1628	6	159	7	125	5	103	4	94	4	101	4
1648	6	151	6	127	5	105	4	95	4	92	4
1668	6	136	6	117	5	99	4	94	4	91	4
1687	6	136	6	118	5	97	4	90	4	91	4
1708	6	120	5	111	5	90	4	84	4	90	4
1729	6	123	5	113	5	89	4	84	4	84	4
1749	6	123	5	108	5	87	4	84	4	85	4
1769	6	115	5	104	4	88	4	79	3	83	4

1789	6	110	5	100	4	79	3	76	3	78	3
1809	6	111	5	99	4	82	4	75	3	78	3
1829	6	104	4	92	4	81	4	70	3	71	3
1849	6	93	4	91	4	75	3	70	3	68	3
1869	6	100	4	91	4	72	3	67	3	68	3
1889	6	97	4	86	4	70	3	68	3	70	3
1910	6	96	4	81	3	69	3	63	3	64	3
1930	6	90	4	84	4	65	3	61	3	61	3
1950	6	88	4	72	3	67	3	61	3	62	3
1970	6	86	4	74	3	61	3	60	3	60	3
1990	6	80	3	74	3	61	3	59	3	62	3
2010	6	83	4	70	3	62	3	57	3	56	3
2030	6	71	3	68	3	57	3	55,1	2,5	56	3
2050	6	73	3	69	3	56,8	2,5	55,8	2,5	54,1	2,5
2070	6	68	3	70	3	55,8	2,5	52,4	2,3	54,4	2,5
2090	6	67	3	68	3	55,5	2,5	52,6	2,3	55	3
2110	6	64	3	59	3	54,5	2,4	50,3	2,2	49,8	2,3
2131	6	62	3	63	3	52,8	2,3	48,5	2,1	50,8	2,3
2151	6	61	3	56,0	2,4	50,2	2,2	46,9	2,0	47,6	2,1
2161	6	61	3	58,9	2,5	47,7	2,1	46,5	2,0	47,2	2,1
2171	6	61	3	56,4	2,4	48,5	2,1	46,0	2,0	45,4	2,0
2181	6	53,8	2,4	57,9	2,5	47,3	2,1	45,8	2,0	46,9	2,1
2191	6	57,5	2,5	55,8	2,4	46,1	2,0	44,9	2,0	46,7	2,1
2201	6	54,4	2,3	54,1	2,3	47,7	2,0	44,6	1,9	46,5	2,0
2211	6	56,2	2,4	52,9	2,2	46,8	2,0	43,9	1,9	46,3	2,1
2221	6	57,7	2,5	54,3	2,3	48,5	2,1	44,4	1,9	46,0	2,1
2231	6	54,1	2,4	52,8	2,3	47,7	2,1	43,9	1,9	44,3	2,0
2251	6	51,2	2,2	50,0	2,1	47,1	2,0	44,3	1,9	43,7	1,9
2271	6	51,9	2,2	51,8	2,2	44,2	1,9	42,1	1,8	40,5	1,8
2291	6	49,5	2,1	47,9	2,0	44,2	1,9	39,8	1,7	39,4	1,8
2321	6	47,0	2,0	46,5	2,0	40,8	1,8	40,0	1,7	39,1	1,8
2351	6	42,3	1,9	43,5	1,9	39,6	1,7	36,7	1,6	37,2	1,7
2392	6	41,0	1,8	42,5	1,8	39,8	1,7	36,5	1,6	37,6	1,7

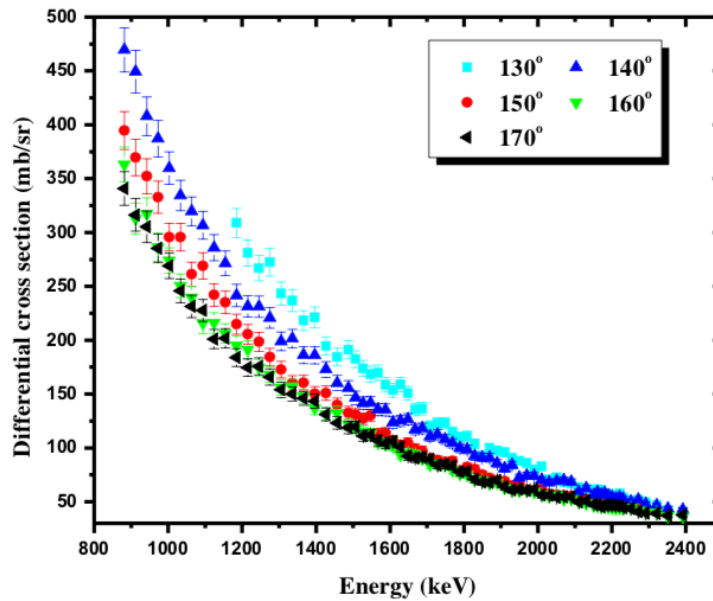


**Εικόνα 4.1(α-ε).** Τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης δευτερίων σε φώσφορο-31, μετρημένες σε γωνίες σκέδασης 130°, 140°, 150°, 160°, 170° και εύρος



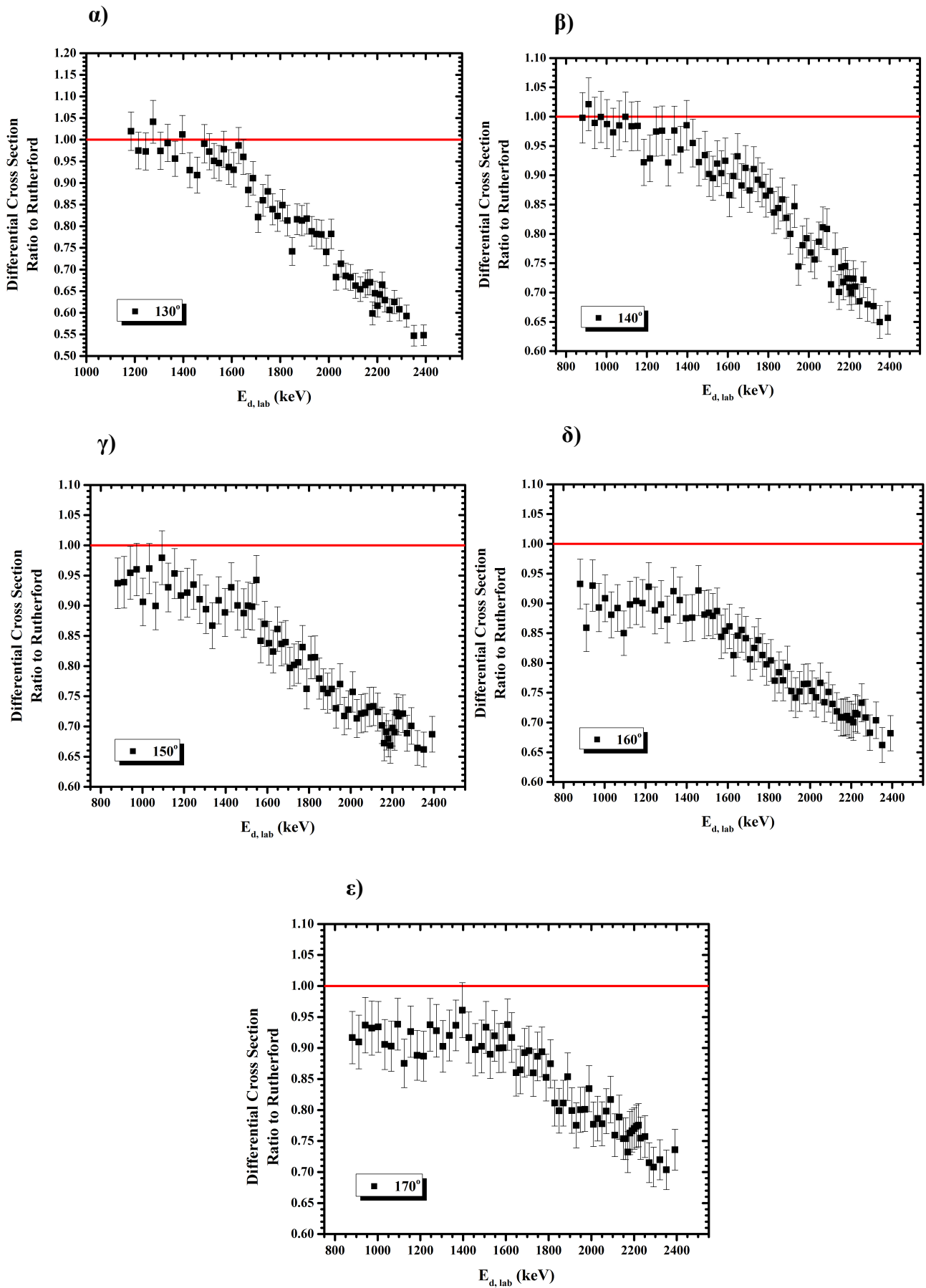
ενεργειών δέσμης  $E_{d,lab}=900-2400$  keV, συμπεριλαμβανομένων των σφαλμάτων και των τιμών υπολογισμένων από την εξίσωση Rutherford (κόκκινη γραμμή) για σκοπούς σύγκρισης.

Από την Εικόνα 4.1(α-ε) παρατηρούμε ότι οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής του φωσφόρου-31 έχουν απόκλιση από τις τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής αν ακολουθούσε τη σκέδαση Rutherford.



**Εικόνα 4.2.** Γωνιακή κατανομή των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$ .

Για να γίνει εμφανής η απόκλιση αυτή, παρακάτω στην Εικόνα 4.3(α-ε) παρουσιάζονται οι λόγοι των τιμών της ενεργού διατομής ως προς την ενεργό διατομή Rutherford. Από τις εικόνες παρατηρούμε μια απροσδόκητη απόκλιση από την σκέδαση Rutherford για τις πίσω γωνίες, κυρίως στις  $170^\circ$  και  $160^\circ$ , στις χαμηλές ενέργειες ενώ όσο μικραίνει η γωνία (μπροστά γωνίες) πλησιάζουμε την σκέδαση Rutherford. Επίσης, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης, σε όλες τις γωνίες, αυξάνεται η απόκλιση από τη σκέδαση Rutherford ως και 45%.



**Εικόνα 4.3(α-ε).** Λόγος των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$  ως προς τις αντίστοιχες τιμές υπολογιζόμενες από την εξίσωση του Rutherford.

## 4.2 Έλεγχος αξιοπιστίας

Ο έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) των διαφορικών ενεργών διατομών για την ελαστική σκέδαση  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$  είναι μια διαδικασία που ακολουθείται ώστε να ελεγχθεί η ορθότητα των τιμών αυτών, στις συγκεκριμένες γωνίες σκέδασης. Πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας παχύ ομοιόμορφο στόχο του υπό μελέτη στοιχείου, στην περίπτωση αυτή ακτινοβολήθηκε ένας λείος κρύσταλλος GaP. Οι μετρήσεις στον παχύ στόχο πραγματοποιήθηκαν για ενέργειες δέσμης δευτερίων  $E_{d,\text{Lab}} = 1110, 1320, 1500, 1640, 1820, 2060$  και  $2300$  keV με βήμα περίπου 200 keV.

Η διαδικασία που ακολουθείται βασίζεται στη σύγκριση του πειραματικού φάσματος της ελαστικής σκέδασης με το αντίστοιχο προσομοιωμένο και η μεθοδολογία αυτή απαιτεί την προσομοίωση των πειραματικών συνθηκών, όσο το δυνατόν ακριβέστερα. Επομένως, προσδιορίζοντας και υπολογίζοντας τους παράγοντες που επηρεάζουν το αντίστοιχο φάσμα, οι διαφορές που μπορεί να προκύψουν από την τελική σύγκριση των φασμάτων, δηλαδή οι διαφορές ανάμεσα στο προσομοιωμένο και το πειραματικό φάσμα, αποδίδονται στην διαφορική ενεργό διατομή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Η προσομοίωση φάσματος παχύ στόχου έγινε με το πρόγραμμα SIMNRA [14] και βασίζεται σε δεδομένα παλαιότερων μετρήσεων, που για την συγκεκριμένη ελαστική σκέδαση δεν υπάρχουν, ή από δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών που εισάγονται από το χρήστη, ή από θεωρητικά δεδομένα που είναι βασισμένα είτε σε αναλυτικούς υπολογισμούς μέσω του τύπου της σκέδασης Rutherford, είτε στη θεωρία R-matrix [19],[20] με προσαρμογή σε προϋπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις (evaluated data). Τα δεδομένα αυτά είναι διαθέσιμα προς χρήση από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα μέσω της βιβλιοθήκης IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) [15] υπό την αιγίδα της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (IAEA - International Atomic Energy Agency).

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των μετρήσεων εξαρτάται από το φάσμα του παχέος στόχου, το οποίο είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων της δέσμης με τα άτομα του στόχου και η αλληλεπίδραση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι ο ενεργειακός και χωρικός διασκεδασμός (energy and lateral straggling), η απώλεια ενέργειας (energy loss) και η ισχύς ανάσχεσης (stopping power). Όσον αφορά την ισχύ ανάσχεσης και τον υπολογισμό της επίδρασης του διασκεδασμού, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση ήταν του SRIM και των Chu και Young, αντίστοιχα. Όμως, σε μεγάλο ενεργειακό βάθος διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο των Chu και Young έχει σημαντική απόκλιση από την πραγματικότητα [8]. Επομένως, θεωρείται ότι η σύγκριση είναι αξιόπιστη σε ενεργειακό βάθος μέχρι 250 keV από την επιφάνεια και ότι για μεγαλύτερο βάθος η αβεβαιότητα μεγαλώνει και τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα ως προς τον έλεγχο των διαφορικών ενεργών διατομών [21].

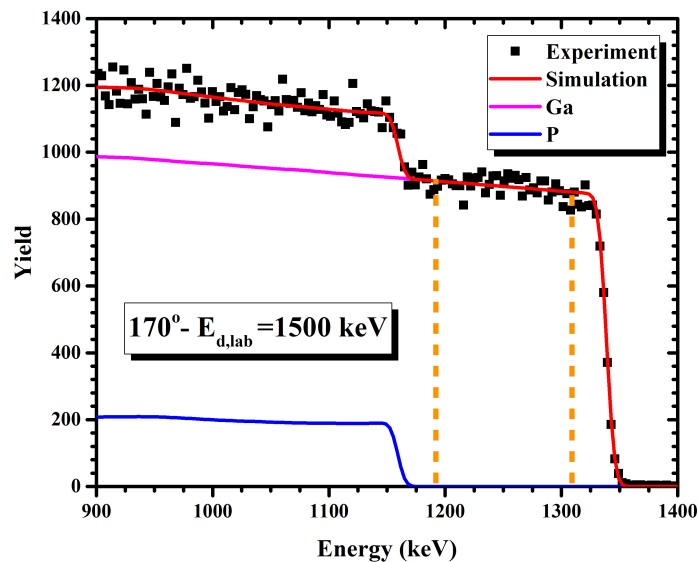
Να σημειωθεί ότι από τις παραπάνω ενέργειες δέσμης δευτερίων χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι 1110 keV, 1500 keV, 1640 keV και 1820 keV, καθώς στις υπόλοιπες παρατηρήθηκαν φαινόμενα διαυλισμού (channeling effects). Πρόκειται για την πιθανότητα διέλευσης ενός ιόντος ανάμεσα στα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου σε περιοχές ελαττωμένης ηλεκτρονιακής πυκνότητας, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται στο σωματίδιο να κινηθεί πολύ βαθύτερα από το αναμενόμενο. Αυτό θα

διορθωνόταν αν κατά την μέτρηση δινόταν μια ελαφριά κλίση στον στόχο της τάξης των  $7^{\circ}$ - $10^{\circ}$  ώστε το ατομικό πλέγμα να φαινόταν “άμορφο” στα ιόντα της δέσμης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των φασμάτων του παχέος στόχου GaP είναι ίδια για όλες τις ενέργειες δευτερίων και γωνίες σκέδασης και αποτελείται από τα εξής βήματα:

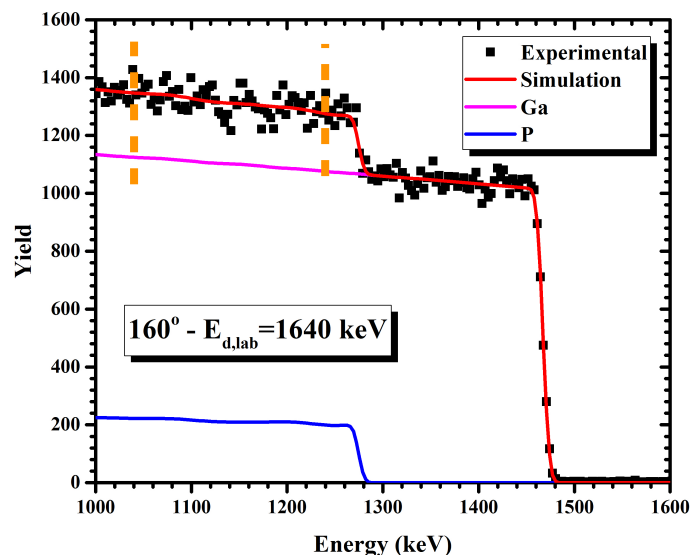
1. Στο πρόγραμμα SIMNRA ανοίγουμε ένα πειραματικό φάσμα παχέος στόχου και συμπληρώνουμε όλες τις απαραίτητες παραμέτρους της πειραματικής διάταξης (experimental setup) για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Οι παράμετροι αυτές είναι το είδος του ιόντος, η ενέργεια δέσμης, η γωνία σκέδασης, η ενεργειακή βαθμονόμηση, η απόκλιση, η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή και το φορτίο. Επιπλέον κατασκευάζουμε τον στόχο που στην περίπτωση αυτή είναι άπειρου πάχους και αποτελείται μόνο από γάλλιο και φώσφορο σε στοιχειομετρική αναλογία 1:1, καθώς είχαμε κρύσταλλο GaP. Τέλος, επιλέγονται όλες οι διαθέσιμες αντιδράσεις. Για τη περίπτωση του γαλλίου επιλέγεται η σκέδαση Rutherford. Για τον φώσφορο, αρχικά επιλέχθηκαν οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής στην περίπτωση που ακολουθούσε σκέδαση Rutherford, ώστε να γίνει σύγκριση του πειραματικού με το προσομοιωμένο φάσμα της Rutherford και στη συνέχεια έγινε έλεγχος των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους στην περίπτωση του παχέος στόχου. Οι τιμές με τις καταγραφόμενες διαφορές για τις δυο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.2 και Πίνακας 4.3)

Για τον προσδιορισμό του φορτίου σημαντικό ρόλο έχει το γάλλιο, καθώς όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η ενεργός του διατομή οφείλεται σε σκέδαση Rutherford σε όλη την ενεργειακή περιοχή που μελετάται και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό του φορτίου  $Q\Omega$ , σύμφωνα με την σχέση (7). Επομένως, επιλέγεται στο πλατό του γαλλίου ένα εύρος καναλιών, στο οποίο εξισώνεται το ολοκλήρωμα των πειραματικών δεδομένων με το ολοκλήρωμα της προσομοίωσης μεταβάλλοντας το φορτίο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.4). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε συνδυασμό γωνίας και ενέργειας.



**Εικόνα 4.4.** “Παράθυρο” (πορτοκαλί διακεκομμένες) στο πλατό του γαλλίου για  $E_{d,Lab}=1500$  keV και  $\theta=170^\circ$ .

- Επιλέγεται ένα παράθυρο στη περιοχή του φωσφόρου, το οποίο κάθε φορά υπολογίζεται διαιρώντας το ενεργειακό βήμα μεταξύ δύο μετρήσεων στο παχύ στόχο με τον λόγο ενέργειας προς κανάλια (keV/channel) ώστε να προκύψουν τα κανάλια του παραθύρου. Σε κάθε γωνία στην ίδια ενέργεια έχουμε διαφορετικά κανάλια ολοκλήρωσης διότι αλλάζει ο λόγος ενέργειας προς κανάλια. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.5) παρουσιάζεται ως παράδειγμα και φαίνεται το επιλεγμένο παράθυρο στο φώσφορο-31.



**Εικόνα 4.5.** “Παράθυρο” (πορτοκαλί διακεκομμένες) στο πλατό του φωσφόρου το οποίο δεν ξεπερνά τα 200 keV.

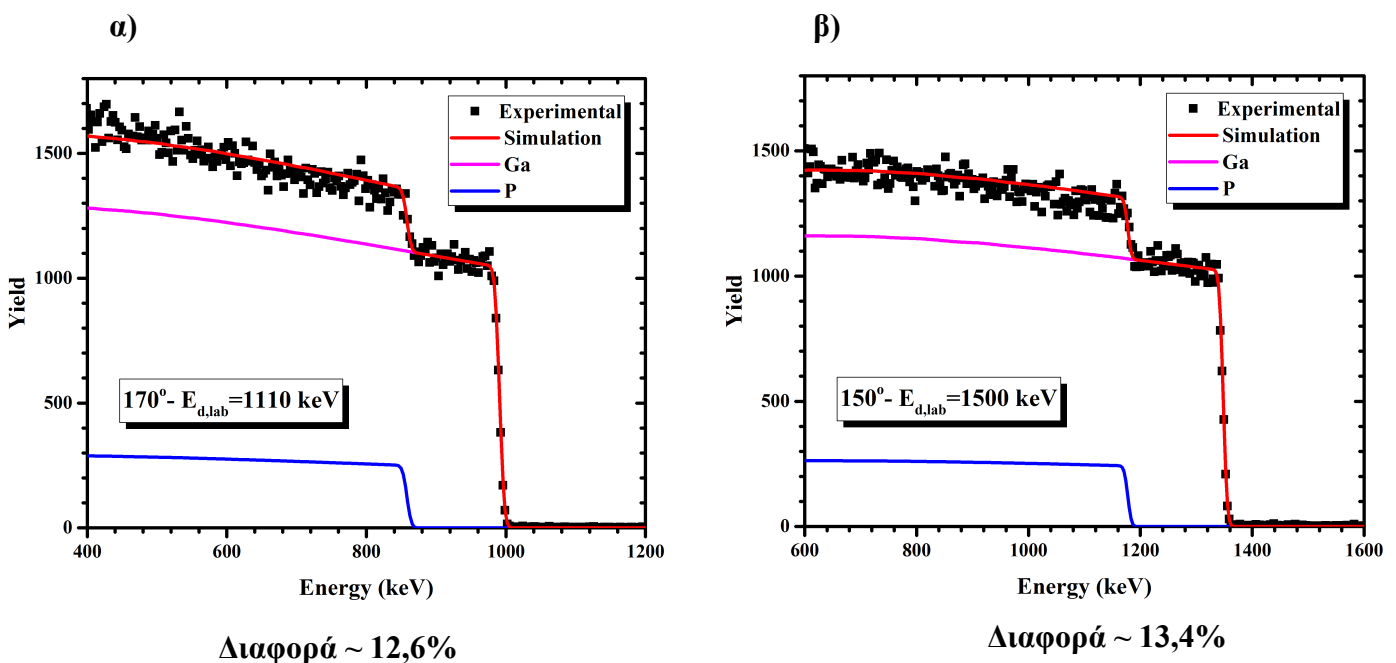
3. Εντός των ορίων του επιλεγμένου παραθύρου του φωσφόρου συγκρίνουμε το ολοκλήρωμα των πειραματικών δεδομένων με το ολοκλήρωμα του προσομοιωμένου φωσφόρου, αφού πρώτα από το πειραματικό φάσμα αφαιρεθεί το ολοκλήρωμα του προσομοιωμένου γαλλίου. Τα δευτέρια σκεδάζονται από το γάλλιο με σκέδαση Rutherford άρα η προσομοίωση είναι ακριβής. Οπότε, αφαιρώντας αυτή την ποσότητα από το συνολικό πειραματικό φάσμα αυτό που μένει ως αποτέλεσμα είναι το πειραματικό φάσμα του φωσφόρου.

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2. καταγράφονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ του πειραματικού φωσφόρου με την προσομοίωση στην περίπτωση της σκέδασης Rutherford. Οι διαφορές δίνονται σε ποσοστά επί τοις εκατό (%).

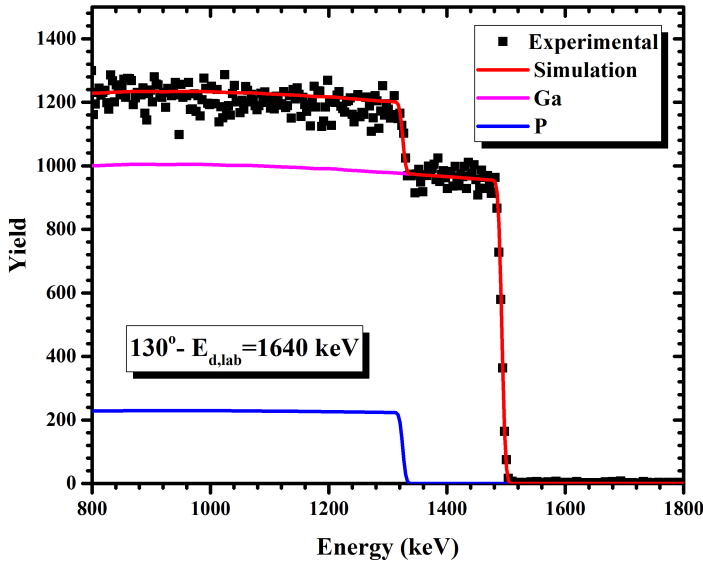
**Πίνακας 4.2.** Σύγκριση φασμάτων πειραματικού  $^{31}\text{P}$  με την προσομοίωση στην περίπτωση της σκέδασης Rutherford

Ενέργεια (keV)	130°	140°	150°	160°	170°
1110	6,0	7,7	12,7	10,2	12,6
1500	8,6	6,9	13,4	9,7	8,8
1640	10,4	4,4	12,5	15,4	8,0
1820	11,9	12,2	17,2	17,4	12,5

Παρακάτω (Εικόνες 4.6(α-δ)) παρουσιάζονται γραφήματα σε τέσσερις διαφορετικές γωνίες και ενέργειες που πραγματοποιήθηκε η τεχνική benchmarking ώστε να γίνει σύγκριση του πειραματικού φάσματος με την προσομοίωση της σκέδασης Rutherford

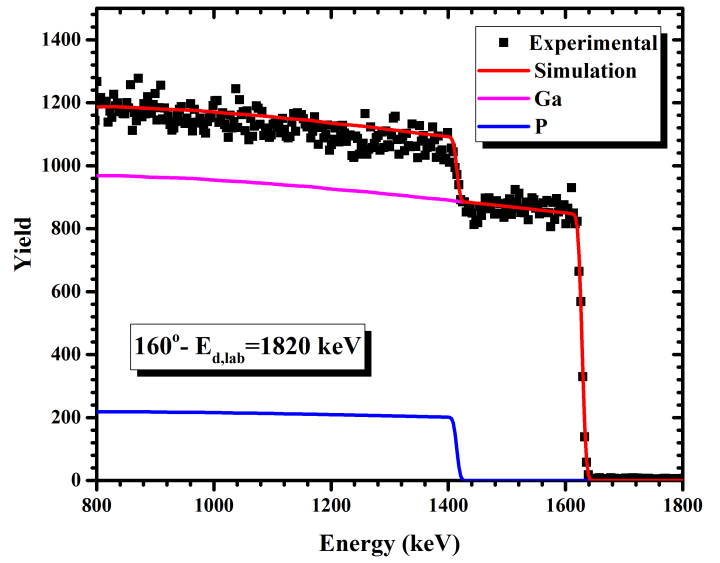


γ)



Διαφορά ~ 10,4%

δ)



Διαφορά ~ 17,4%

**Εικόνα 4.6 (α-δ).** Γραφήματα benchmarking με τη προσομοίωση της σκέδασης Rutherford σε τέσσερις διαφορετικές ενέργειες και γωνίες.

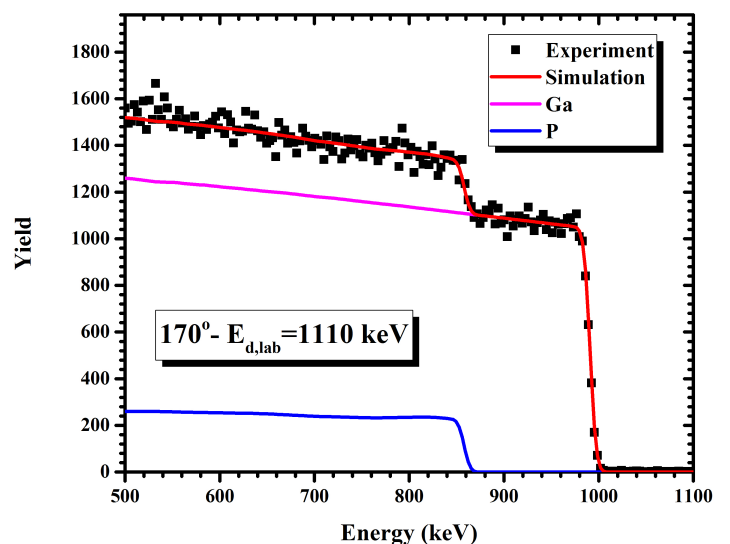
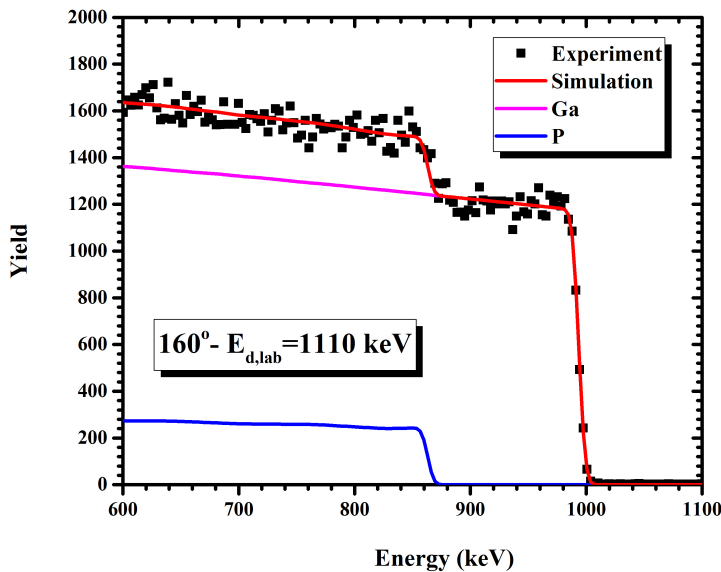
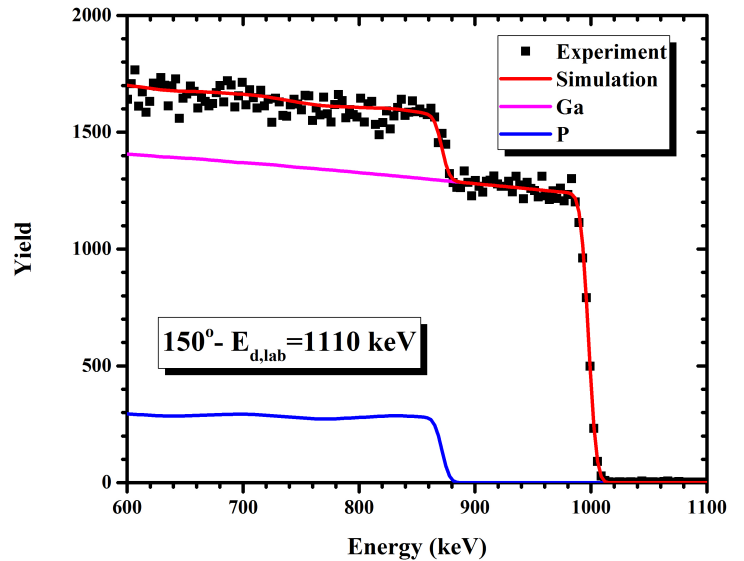
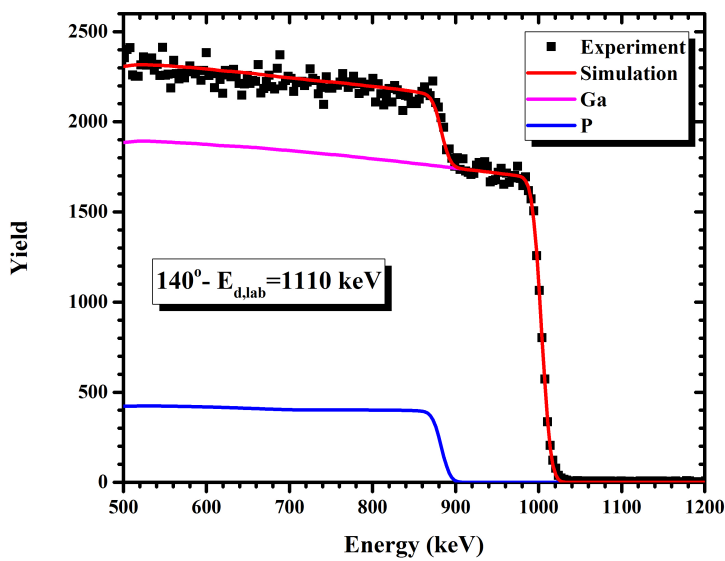
Στον παρακάτω Πίνακα 4.3. καταγράφονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ του πειραματικού φωσφόρου με την προσομοίωση για τις τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής που προέκυψαν από την μελέτη της ελαστικής σκέδασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$  στη παρούσα εργασία.

**Πίνακας 4.3.** Σύγκριση φασμάτων πειραματικού  $^{31}\text{P}$  με την προσομοίωση για τις τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής που προέκυψαν από την μελέτη της ελαστικής σκέδασης  $^{31}\text{P}(d,d_0)^{31}\text{P}$  στη παρούσα εργασία.

Ενέργεια (keV)	130°	140°	150°	160°	170°
1110	-	5,4	6,2	3,9	3,7
1500	2,6	0,3	3,8	-2,0	-0,5
1640	5,5	-6,6	-4,0	-0,7	-1,1
1820	-4,6	0,1	-3,6	-2,1	-0,5

Οι διαφορές δίνονται σε ποσοστά επί τοις εκατό (%). Επίσης, το πρόσημο δείχνει ποια από τις δύο συγκρινόμενες ποσότητες είναι μεγαλύτερη. Το θετικό πρόσημο (+) σημαίνει ότι το ολοκλήρωμα της προσομοίωσης είναι μεγαλύτερο από το πειραματικό, οπότε η ενεργός διατομή είναι υπερεκτιμημένη, ενώ με αρνητικό πρόσημο (-) σημαίνει ότι το ολοκλήρωμα της προσομοίωσης είναι μικρότερο από το πειραματικό και επομένως η ενεργός διατομή έχει υποεκτιμηθεί. Παρ' όλα αυτά, παρατηρούμε ότι υπάρχει καλή συμφωνία με το πειραματικό φάσμα, καθώς οι διαφορές δεν υπερβαίνουν το 7%. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα για κάθε γωνία και ενέργεια που πραγματοποιήθηκε η τεχνική benchmarking για τον έλεγχο των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής (Εικόνες 4.7-4.10)

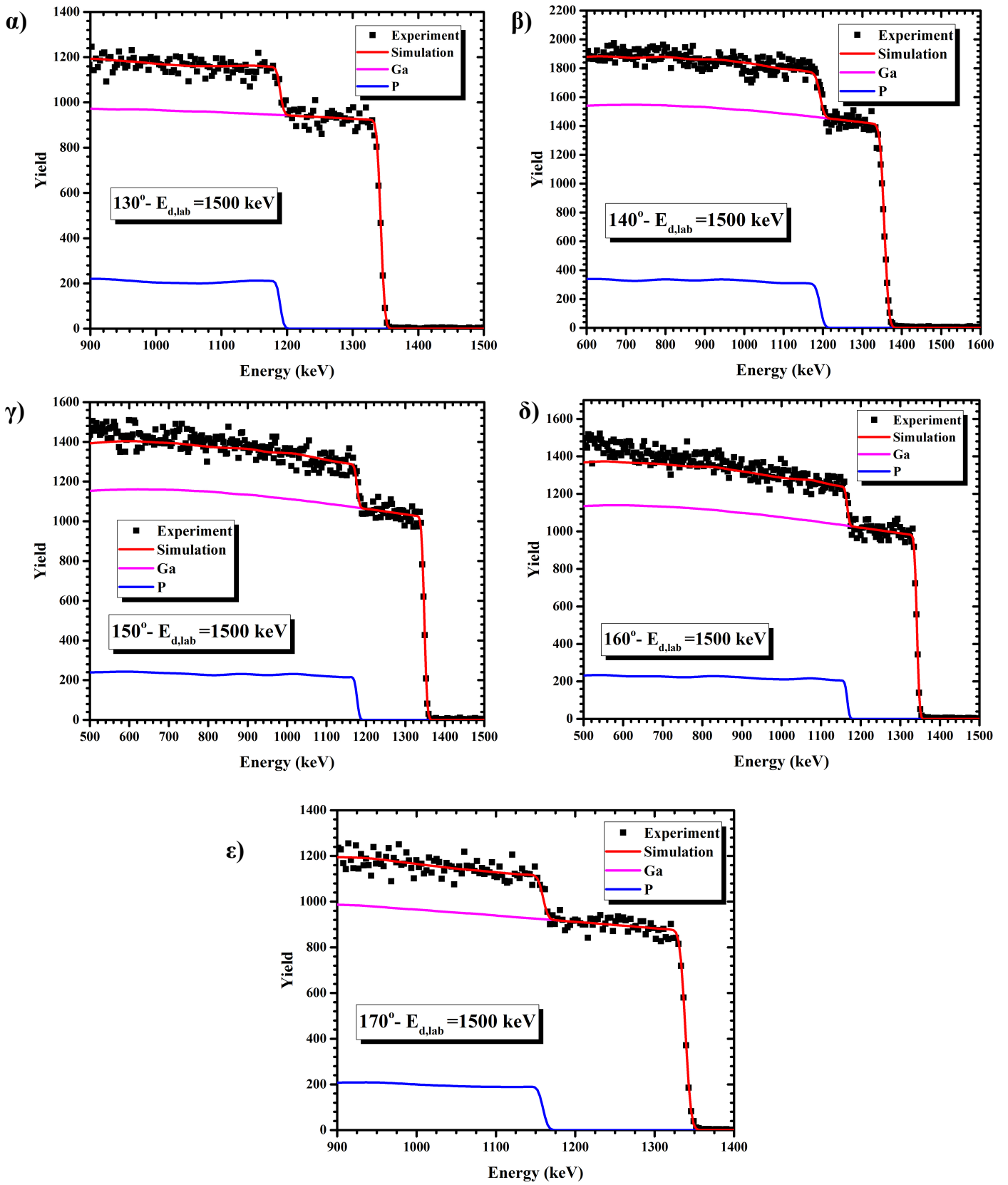
- $E_{d,Lab}=1110$  keV



Εικόνα 4.7 (α-δ). Έλεγχος αξιοπιστίας για  $E_{d,Lab}=1110$  keV.

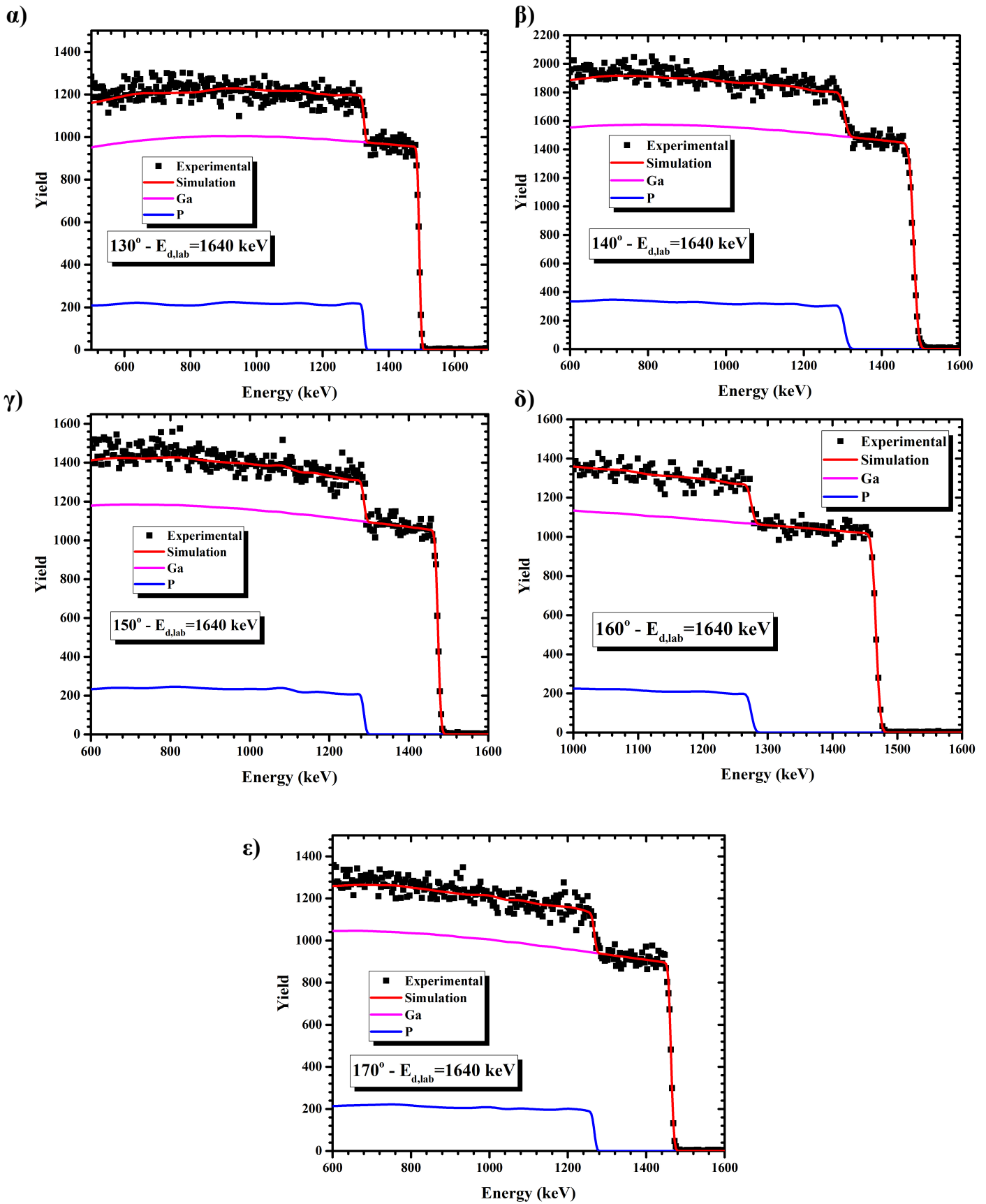


•  $E_{d,Lab}=1500$  keV



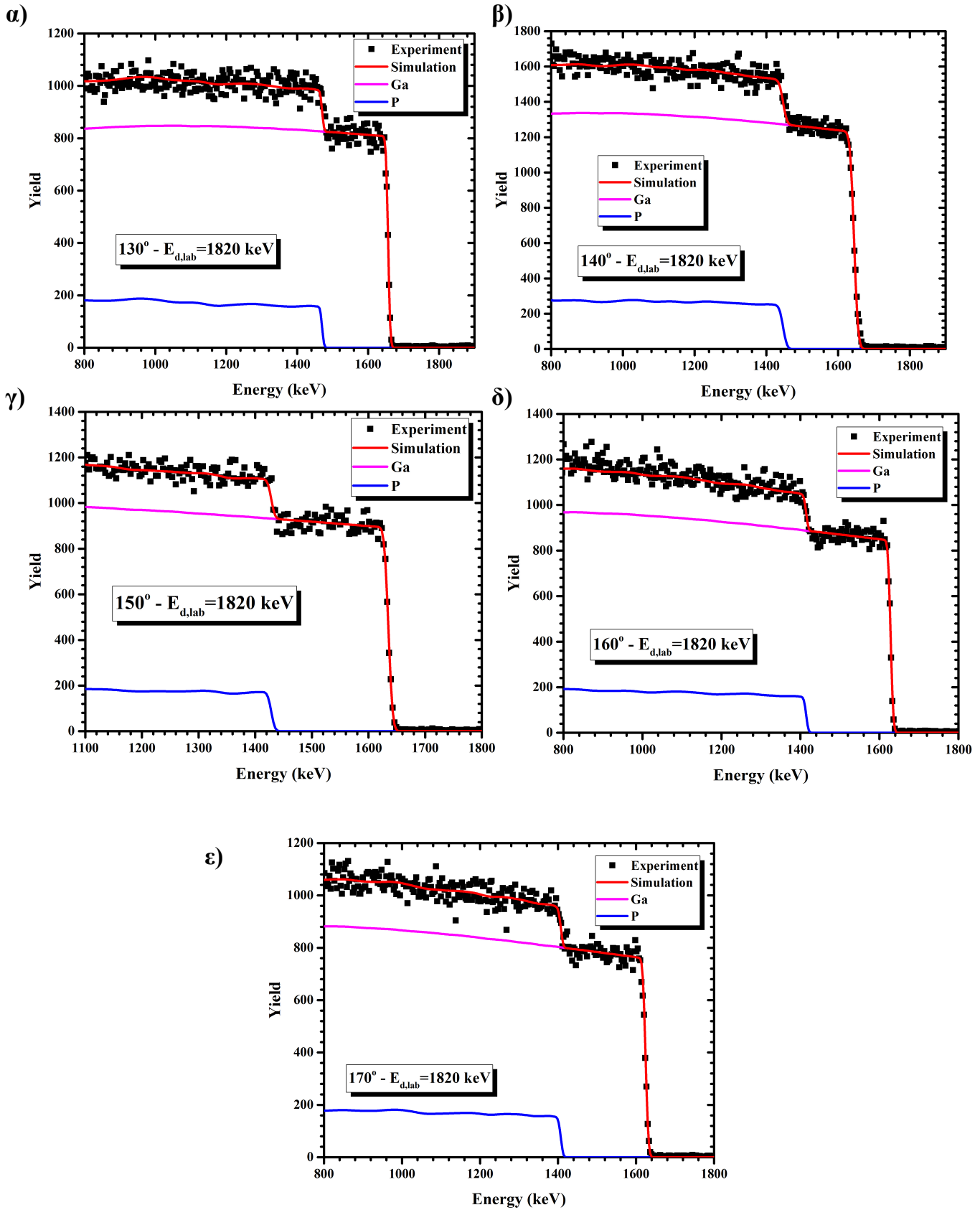
Εικόνα 4.8(α-ε). Έλεγχος αξιοπιστίας για  $E_{d,Lab}=1500$  keV και σε όλες τις γωνίες.

•  $E_{d,Lab}=1640$  keV



Εικόνα 4.9(α-ε). Έλεγχος αξιοπιστίας για  $E_{d,Lab}=1640$  keV και σε όλες τις γωνίες.

•  $E_{d,Lab}=1820$  keV



Εικόνα 4.10(α-ε). Έλεγχος αξιοπιστίας για  $E_{d,Lab}=1820$  keV και σε όλες τις γωνίες .

# Κεφάλαιο 5

## Συμπεράσματα - Προοπτικές

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το μοναδικό φυσικό ισότοπο του φωσφόρου,  $^{31}\text{P}(\text{d},\text{d}_0)^{31}\text{P}$ , για ενέργειες δέσμης δευτερίων  $E_{\text{d,Lab}}=900\text{-}2400$  keV με βήμα 10-30 keV και γωνίες ανίχνευσης  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$  και  $170^\circ$  με γωνιακό βήμα  $10^\circ$ . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή 5.5 MV TN11 TANDEM, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”.

Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες εμφανίζουν αποκλίσεις από την σκέδαση Rutherford σχεδόν σε όλο το ενεργειακό εύρος μελέτης. Συγκεκριμένα, για χαμηλές ενέργειες δευτερίων και σχετικά εμπρόσθιες γωνίες, δηλαδή  $130^\circ$  και  $140^\circ$ , οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής ισούνται, εντός σφάλματος, με την σκέδαση Rutherford. Αντίθετα, στις ακραίες γωνίες οπισθοσκέδασης, δηλαδή  $150^\circ$ ,  $160^\circ$  και  $170^\circ$ , παρατηρείται απόκλιση των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής από αυτές της Rutherford. Όμως για υψηλότερες ενέργειες δέσμης δευτερίων παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από την Rutherford σε όλες τις γωνίες ανίχνευσης που σε ορισμένες περιπτώσεις πλησιάζει το 45%.

Από παλαιότερες μελέτες ελαφρών στοιχείων μέσω ελαστικής σκέδασης με δέσμη δευτερίων θα περίμενε κανείς ότι στις χαμηλές ενέργειες δευτερίων οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής θα ακολουθούσαν την σκέδαση Rutherford, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του  $^{28}\text{Si}$  [22]. Η σύγκριση γίνεται διότι η αντίδραση  $^{28}\text{Si}(\text{d},\text{d})^{28}\text{Si}$  έχει τιμή δυναμικού φράγματος Coulomb (Coulomb barrier), κατά προσέγγιση όπως υπολογίστηκε από το πρόγραμμα catkin [18], να ισούται με 3.7 MeV, τα οποία είναι συγκρίσιμα με τις τιμές του φωσφόρου, αν και ο φώσφορος-31 είναι περιττός-άρτιος πυρήνας και όχι άρτιος-άρτιος όπως το πυρίτιο-28 και ίσως εκεί να οφείλονται οι παρατηρούμενες διαφορές.

Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν μέσω της τεχνικής benchmarking, για την οποία ακτινοβολήθηκε με δέσμη δευτερίων ένας παχύς στόχος, κρύσταλλος GaP. Υστέρα από σύγκριση προέκυψε καλή συμφωνία με τα πειραματικά φάσματα, με κάτω από 7% απόκλιση. Παρ' όλα αυτά, χρειάζεται περαιτέρω εξέταση ώστε να δοθεί η κατάλληλη εξήγηση για τη συμπεριφορά. Όπως φαίνεται και από το ενεργειακό διάγραμμα του φωσφόρου-31 (Ενότητα 1.3), από τα διαθέσιμα δεδομένα φασματοσκοπίας, στον σύνθετο πυρήνα που δημιουργείται,  $^{33}\text{S}$ , εμφανίζεται μια διεγερμένη στάθμη στο εύρος ενεργειών που μελετάται, με ενέργεια  $E_x^*=17.360$  keV με εύρος  $\Gamma=58$  keV, το οποίο διεγείρεται με δέσμη δευτερίων ενέργειας  $E_{\text{d,Lab}}=2213.13$  keV. Σε αυτή την περιοχή ενεργειών χρησιμοποιήθηκε το μικρότερο ενεργειακό βήμα, 10 keV, ώστε να μελετήσουμε το συγκεκριμένο ενεργειακό επίπεδο. Τα αποτελέσματα όμως δεν παρουσίασαν κάποια ένδειξη συντονισμού.

## 5.2 Προοπτικές

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία είναι σημαντικά καθώς θα εμπλουτίσουν τη βάση δεδομένων IBANDL [5] με τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης  $^{31}\text{P}(\text{d},\text{d}_0)^{31}\text{P}$  για το συγκεκριμένο εύρος ενεργειών, καθώς είναι η πρώτη μελέτη που πραγματοποιείται στον  $^{31}\text{P}$  με τη τεχνική d-EBS. Επιπλέον, τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα και κατάλληλα για αναλυτικούς σκοπούς. Είναι εφικτό πλέον να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη εκτέλεση των τεχνικών d-NRA και d-EBS στο φώσφορο-31 με σκοπό τη μελέτη της ελαστικής σκέδασης δευτερίων από το φώσφορο αλλά και τη μελέτη αντιδράσεων  $^{31}\text{P}(\text{d},\text{p}_x)$  και  $^{31}\text{P}(\text{d},\alpha_x)$  με στόχο τον ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό της κατανομής του κατά βάθος.

Τέλος, στα μελλοντικά σχέδια είναι η ολοκλήρωση της μελέτης των ελαφρών στοιχείων όπως είναι το  $^{27}\text{Al}$  (μοναδικό φυσικό ισότοπο του Al) αλλά και το  $^{10,11}\text{B}$  που είναι τα σταθερά ισότοπα του φυσικού βορίου (~19.9% και ~80.1% αντίστοιχα).

# Αναφορές

- [1] C. P. Mainstone, and W. Parr "Phosphorus in rivers—ecology and management." *Science of the total environment* 282 (2002): 25-47.
- [2] A. P. da Rocha Santos, et al. "Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus." *Journal of Materials Research and Technology* 7.3 (2018): 331-336.
- [3] C. A. D. Rodrigues, et al. "Effect of phosphorus content on the mechanical, microstructure and corrosion properties of supermartensitic stainless steel." *Materials Science and Engineering: A* 650 (2016): 75-83.
- [4] D. S. Walsh, and B. L. Doyle "Simultaneous nuclear reaction analyses of boron and phosphorus in thin borophosphosilicate glass films using ( $\alpha$ , p) reactions." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 161 (2000): 629-634.
- [5] <https://www-nds.iaea.org/exfor/iband1.htm>
- [6] <http://www-nds.iaea.org/sigmaCalc/>
- [7] W. K. Chu, and J. W. Mayer. "MA Nicolet in: Backscattering Spectrometry." Education Academic, New York (1978).
- [8] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, and J. P. Biersack. "SRIM—The stopping and range of ions in matter (2010)", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268.11-12 (2010): 1818-1823.
- [9] G. F. Knoll, "Radiation detection and measurement", John Wiley & Sons, (2010).
- [10] W. R. Leo, "Techniques for nuclear and particle physics experiments, 1994." Springer-Verlag 39: 41-44.
- [11] N. Patronis, et al. "Study of  $^{nat}\text{Mg}$  (d,  $d_0$ ) reaction at detector angles between 90 and 170, for the energy range  $E_{d,lab}=1660-1990$  keV." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 337 (2014): 97-101.

- [12] M. Nastasi, J. W. Mayer, and Y. Wang. "Ion beam analysis: fundamentals and applications" CRC Press, (2014).
- [13] C. A. Kalfas, M. Axiotis, and C. Tsabaris "SPECTRW: a software package for nuclear and atomic spectroscopy." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 830 (2016): 265-274.
- [14] M. Mayer, "SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA." AIP Conference Proceedings. Vol. 475. No. 1. AIP, (1999).
- [15] J. W. Mayer, and E. Rimini, "Ion beam handbook for material analysis" Elsevier, (2012).
- [16] Q. Yang, D. J. O'Connor, and Z. Wang "Empirical formulae for energy loss straggling of ions in matter", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 61.2 (1991): 149-155.
- [17] J. Theuerkauf, et al. "TV Analysis Code" University of Cologne (2000).
- [18] W. N. Catford, "Catkin, v. 2.01 c the relativistic kinematics program." Technical report,(2004).
- [19] E. Vogt, "R-Matrix Theory", Triumph
- [20] E. Vogt, "Improving R-matrix estimates of astrophysical S-factors" Physics Letters B 389.4 (1996): 637-641.
- [21] V. Paneta, et al. "Benchmarking experiments for the proton backscattering on  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{31}\text{P}$  and  $^{\text{nat}}\text{S}$  up to 3.5 MeV" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 328 (2014): 1-7.
- [22] E. Ntemou, et al. "Differential cross-section measurements for deuteron elastic scattering on  $^{\text{nat}}\text{Si}$  for elastic backscattering purposes." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (2018).

