



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών
Επιστημών
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών



DEMOKRITOS

Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"

Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής
Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
"ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ"

**Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής
σκέδασης $^{nat}Si(p, p_0)^{nat}Si$ για αναλυτικούς σκοπούς**

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία
Δημητρακόπουλος Νικόλαος

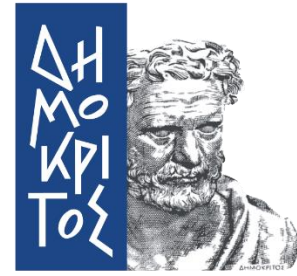
Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Κόκκορης Μιχαήλ

Αθήνα, Ιούνιος 2020



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS**

SCHOOL OF APPLIED MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCI-
ENCES
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING



DEMOKRITOS

N.C.S.R. DEMOKRITOS

INSTITUTE OF NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS
INSTITUTE OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY

GRADUATE STUDIES PROGRAM
PHYSICS AND TECHNOLOGICAL APPLICATIONS

Measurements of differential cross-sections for proton elastic scattering on ^{nat}Si in the framework of the EBS (Elastic Backscattering Spectroscopy) technique

MASTER THESIS
NIKOS DIMITRAKOPOULOS

SUPERVISOR: PROFESSOR DR. MICHAEL KOKKORIS

ATHENS, MARCH 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρα. Μιχάλη Κόκκορη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. και ακαδημαϊκό υπεύθυνο της παρούσας εργασίας, για την αμέριστη εμπιστοσύνη και την συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την ομότιμη καθηγήτρια Δρα. Ροζα Βλαστού για τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές της.

Ευχαριστώ τους Δρα. Αναστάσιο Λαγογιάννη και Δρα. Μιχάλη Αξιώτη, όπως επίσης και όλο το προσωπικό του Ι.Π.Σ.Φ. του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε “Δημόκριτος” για τη βοήθεια τους σε όποιο πρόβλημα και αν παρουσιάστηκε κατά την παραμονή μου εκεί.

Ακόμα ένα Ευχαριστώ σε όλα τα μέλη της ομάδας πυρηνικής φυσικής του Ε.Μ.Π. για την διάθεση τους να βοηθήσουν όποτε και αν τους ζητήθηκε και ιδιαίτερα στον Υ.Δ. Φώτη Μαραγκό, του οποίου η βοήθεια κατά την προετοιμασία και τη διάρκεια του πειράματος ήταν πολύτιμη.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για τη στήριξη τους καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

- 1.1 Σκοπός
- 1.2 Προφίλομετρία πυριτίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Πειραματικά στοιχεία

- 2.1 Επιταχυντής
- 2.2 Ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (SSB)
- 2.3 Θάλαμος σκέδασης
- 2.4 Στόχοι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματική ανάλυση

- 3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή
- 3.2 Ενεργειακή Βαθμονόμηση ADC/MCA
- 3.3 Προσδιορισμός της διαφορικής ενεργού διατομής
 - 3.3.1 Σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών
 - 3.3.2 Υπολογισμός ενεργού διατομής του χρυσού κατά Rutherford
 - 3.3.3 Ολοκλήρωση κορυφών
 - 3.3.4 Υπολογισμός λόγου παχών $\left(\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}\right)$
 - 3.3.5 Υπολογισμός ενέργειας δέσμης E, E'

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Αποτελέσματα & Έλεγχος αξιοπιστίας (Benchmarking)

- 3.1 Αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής
- 3.1 Έλεγχος αξιοπιστίας Benchmarking

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα & προοπτικές

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από φυσικό πυρίτιο $^{nat}\text{Si}(p,p_0) \text{ } ^{nat}\text{Si}$, για ενέργειες δέσμης 3-5 MeV, σε έξι γωνίες σκέδασης και συγκεκριμένα για γωνίες από 120° έως 170° με βήμα 10° . Επιπλέον έγινε πείραμα benchmarking προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των διαφορικών ενεργών διατομών που προέκυψαν.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή TANDEM 5.5 MV, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”. Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της διαφορικής ενεργού διατομής ήταν υπέρλεπτο υμένιο νιτριδίου του πυριτίου (silicon nitrite) Si_3N_4 , στο οποίο είχε εξαχνωθεί ένα λεπτό στρώμα χρυσού. Η θερμική εξάχνωση του χρυσού πραγματοποιήθηκε για κανονικοποίηση του φορτίου/στερεάς γωνίας, καθώς χρησιμοποιήθηκε η σχετική μέθοδος προσδιορισμού των ενεργών διατομών. Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται την διαφορική ενεργό διατομή του χρυσού που στο υπό μελέτη ενεργειακό εύρος ακολουθεί την σχέση του Rutherford και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Ο στόχος του πειράματος benchmarking ήταν ένα δισκίο πυριτίου (silicon wafer), το οποίο ακτινοβολήθηκε από την τραχιά του πλευρά για να αποφευχθούν φαινόμενα channeling. Ακόμα, και σε αυτόν τον στόχο έγινε εξάχνωση χρυσού για κανονικοποίηση του φορτίου και της στερεάς γωνίας. Η αναπαραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα προσομοίωσης SIMNRA.

Τέλος, παρουσιάζονται γραφικά και σε πίνακα οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών για τις έξι γωνίες οπισθοσκέδασης, όπως επίσης και τα φάσματα προσομοίωσης του πειράματος benchmarking. Ακόμα σχολιάζεται η ισχυρή απόκλιση των διαφορικών ενεργών διατομών από τις αντίστοιχες ενεργές διατομές κατά Rutherford, η ισχυρή γωνιακή τους κατανομή και οι διαφορές μεταξύ των πειραματικών και των φασμάτων προσομοίωσης για το πείραμα του benchmarking.

ABSTRACT

The present work focused on the measurement of the differential cross sections for proton elastic scattering on natural silicon $^{nat}\text{Si}(p,p_0)^{nat}\text{Si}$ in the energy range 3-5 MeV, at six backward detector angles (namely from 120° to 170° in 10° steps), with a small energy step, in the framework of the EBS (Elastic Backscattering Spectroscopy) technique. Furthermore, a benchmarking experiment took place in order to validate the differential cross-sections values acquired.

The experiment was carried out at the 5.5 MV Tandem Accelerator of the National Center for Scientific Research (NCSR) 'Demokritos'. The target used for the determination of the cross sections was an ultra-thin silicon nitride (Si_3N_4) target which was coated with a thin layer of gold using the evaporation technique. The relative measurement method was used for the determination of the differential cross section values. This method takes advantage of the differential cross sections of gold, which in that energy region follow the Rutherford's formula. For the benchmarking experiment a silicon wafer was selected as target and was irradiated at its unpolished side. A thin gold layer was evaporated on top of the wafer for charge/solid angle normalization purposes. The reproduction of the benchmarking experimental spectra was accomplished via the SIMNRA code

Finally, the differential cross section values of the present work for the six backscattering angles are presented both in graphical and tabulated form, together with the benchmarking simulated spectra. The strong deviations from the Rutherford formula, the angular distributions and the differences between the experimental and simulated spectra for the benchmarking experiment are all discussed.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Το πυρίτιο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στον φλοιό της γης (27,7%) μετά από το οξυγόνο. Όντας εξαιρετικά δραστικό, στη φύση συναντάται κυρίως με την μορφή χημικών ενώσεων όπως το διοξείδιο του πυριτίου και άλλα πυριτικά άλατα. Αποτελείται από τρία ισότοπα, το ^{28}Si (92,23%), το ^{29}Si (4,67%) και το ^{30}Si (3,1%). Τόσο το πυρίτιο, όσο και οι χημικές του ενώσεις βρίσκουν ευρεία χρήση σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Κυριότερες εξ' αυτών είναι η κατασκευή ημιαγωγών και δισκίων πυριτίου (silicon wafers), τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων φωτοβολταϊκών κ.ά. Σε μικρότερες συγκεντρώσεις το πυρίτιο χρησιμοποιείται ακόμα στην μεταλλουργία για την παραγωγή κραμάτων (αλουμινίου, ατσαλιού), στην παραγωγή κεραμικών, όπως επίσης και σε κάποια φαρμακευτικά προϊόντα. Σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές, ρόλο κλειδί παίζει η ακριβής γνώση των συγκεντρώσεων βάθους του πυριτίου. Έτσι προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού τους μέσω ιοντικών τεχνικών ανάλυσης (Ion Beam Analysis – IBA).

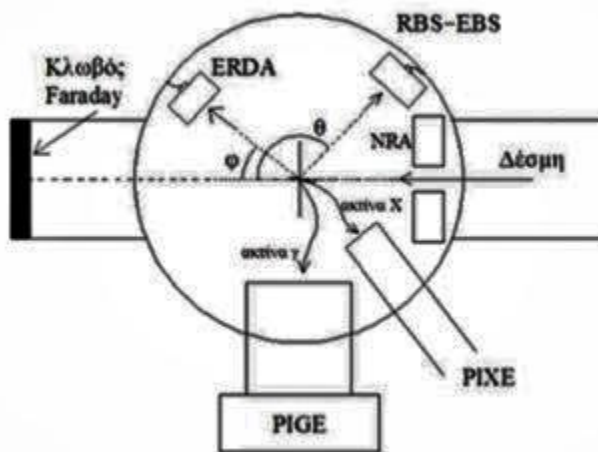
Η πιο διαδεδομένη τεχνική ανάλυσης για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων κατά βάθος του πυριτίου είναι η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης (Elastic Backscattering Spectroscopy – EBS) με δέσμη πρωτονίων και άλφα σωματιδίων, καθώς με αυτές τις δέσμες υπάρχουν αξιολογημένα πειραματικά δεδομένα στη βιβλιοθήκη IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library, www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm). Η ολοένα αυξανόμενη χρήση του πυριτίου σε τεχνολογικές εφαρμογές φέρνει στην επιφάνεια ανάγκες για μέτρηση της κατά βάθος συγκέντρωσης σε παχύτερους στόχους. Για να γίνουν αυτές οι μετρήσεις είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων σε υψηλότερες ενέργειες. Όπως κανείς μπορεί να παρατηρήσει όμως, στην βιβλιοθήκη IBANDL δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα πάνω από τα 3.5 MeV.

Στην παρούσα μελέτη, προκειμένου να συνεισφέρουμε στον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων IBANDL έγινε μέτρηση της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων σε φυσικό πυρίτιο $^{nat}\text{Si}(p, p_0)^{nat}\text{Si}$ στο ενεργειακό εύρος 3-5 MeV και για γωνίες σκέδασης από 120° έως 170° με βήμα 10°. Στη συνέχεια για να πιστοποιηθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ακολούθησε μέτρηση με παχύ στόχο πυριτίου ώστε να γίνει ο έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking).

1.2 Προφίλομετρία πυριτίου

Οι πυρηνικές τεχνικές ανάλυσης με ιοντικές δέσμες (IBA), χρησιμοποιούνται τόσο για την ποσοτικοποίηση όσο και για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης κατά βάθος (depth profiling) ενός ή και περισσότερων στοιχείων σε ένα δείγμα. Η χρήση αυτών των τεχνικών βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων ή των πυρήνων του στόχου με τα ιόντα της δέσμης. Καθώς τα ιόντα εισέρχονται στον στόχο αλληλεπιδρούν κυρίως με τα ηλεκτρόνια του στόχου και σπανιότερα με τους πυρήνες του. Σε κάθε περίπτωση το αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης είναι η απώλεια ενέργειας των ιόντων της δέσμης και πιθανότατα η αλλαγή της τροχιάς των εισερχόμενων ιόντων, ακόμα σε κάποιες περιπτώσεις οδηγεί στην εκπομπή ακτινοβολίας (χ και γάμμα) ή και σωματιδίων. Με την ανίχνευση κάποιου εξερχόμενου σωματιδίου (ή ακτινοβολίας) από τον στόχο, μπορεί να ταυτοποιηθεί η διαδικασία που έλαβε χώρα και με χρήση της κατάλληλης τεχνικής να ποσοτικοποιηθεί η συγκέντρωση και το προφίλ βάθους ενός υλικού στο υπό μελέτη δείγμα.

Οι ιοντικές τεχνικές ανάλυσης χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την αλληλεπίδραση η οποία μελετάται. Η τεχνική που χρησιμοποιείται κάθε φορά καθορίζεται από διάφορους παράγοντες όπως η στοιχειομετρία του στόχου, το υπό μελέτη στοιχείο καθώς και το βάθος αυτού μέσα στον στόχο. Στην περίπτωση του πυριτίου, η εύρεση του προφίλ βάθους του μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποια από τις τεχνικές που αναλύονται συνοπτικά παρακάτω



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση των πυρηνικών τεχνικών ανάλυσης με ιοντικές δέσμες.

Τεχνική RBS- Rutherford Backscattering Spectroscopy

Η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης Rutherford χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις ανίχνευσης βαρύ πυρήνα ($Z > 60$) σε ελαφρύ υπόστρωμα, ακόμα και αν βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση. Κατά την τεχνική αυτή τα ανιχνευόμενα σωματίδια είναι οι ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενοι πυρήνες της δέσμης που σκεδάζονται από το δυναμικό Coulomb του στόχου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η εφαρμογή της δεν απαιτεί την γνώση της διαφορικής ενεργού διατομής της εκάστοτε αντίδρασης αφού μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο του Rutherford. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται η χρήση της τεχνικής αυτής μόνο σε δέσμες με ενέργεια πολύ μικρότερη από το φράγμα δυναμικού Coulomb, αφού όσο αυξάνει η ενέργεια της δέσμης παρατηρούνται αποκλίσεις από την σχέση του Rutherford. Έτσι, στην περίπτωση του πυριτίου για ενέργειες δέσμης πρωτονίων μεγαλύτερες των 1.5 MeV, κάτι που μεταφράζεται σε περιορισμένο βάθος ανάλυσης, οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής δεν ακολουθούν την σχέση του Rutherford. Το ίδιο πρόβλημα παρατηρείται και σε δέσμες δευτερίων και σωματιδίων- α , αφού η ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων έχει αποκλίσεις από την σχέση του Rutherford για ενέργειες μεγαλύτερες από 1.4 MeV[1], ενώ με δέσμη σωματιδίων- α παρατηρούνται αποκλίσεις από την σχέση του Rutherford σε ενέργειες μικρότερες από 1 MeV ενέργειες και μάλιστα σε πολύ ελαφρύτερα στοιχεία[2].

Τεχνική ERDA- Elastic Recoil Detection analysis

Η τεχνική ERDA βασίζεται στην ελαστική σκέδαση όπως και η τεχνική RBS αλλά σε αυτή την περίπτωση το ανιχνευόμενο σωματίδιο είναι κάποιος ανακρουόμενος πυρήνας του στόχου που μάλιστα ανιχνεύεται σε μπροστινές γωνίες ($\theta < 90^\circ$). Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται κυρίως δέσμες βαρέων ιόντων και είναι κατάλληλη για ανίχνευση ελαφρών στοιχείων.

Για την προφίλομετρία του πυριτίου σε μεγάλα βάθη η τεχνική αυτή κρίνεται ακατάλληλη, καθώς το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η δέσμη βαρέων ιόντων έχει μεγάλη απώλεια ενέργειας (stopping power) και κατά συνέπεια δεν μπορεί παρά να μελετηθεί η συγκέντρωση του πυριτίου σε επιφανειακά στρώματα.

Τεχνική NRA-Nuclear Reaction Analysis

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ανίχνευση των σωματιδίων που προκύπτουν από πυρηνικές αντιδράσεις μεταξύ των πυρήνων της δέσμης και του στόχου. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου είναι ότι τα ανιχνευόμενα σωματίδια έχουν υψηλές ενέργειες λόγω του μεγάλου, συνήθως, Q-value της αντίδρασης.

Οι κυριότερες αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατά βάθος συγκέντρωσης σε σχετικά ελαφρείς πυρήνες όπως το πυρίτιο είναι οι (d,p_0) , (d,p_1) και (d,α) , καθώς συγκεντρώνουν τα δύο κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής d-NRA, δηλαδή την υψηλή τιμή Q-value, που συνεπάγεται απομονωμένες κορυφές χωρίς καθόλου υπόβαθρο και την ταυτόχρονη μελέτη όλων των ελαφρών στοιχείων που πιθανώς υπάρχουν στο δείγμα. Στην περίπτωση όμως που θέλουμε να μελετήσουμε την συγκέντρωση με μεγάλα βάθη μέσα στο

υλικό (υψηλές E_d), η αντίδραση (d,a) δεν είναι ιδανική καθώς τα ανιχνευόμενα σωματίδια-α, λόγω της μεγάλης απώλειας ενέργειας που έχουν στον υλικό δεν είναι αρκετά διεισδυτικά. Αντίθετα το πρόβλημα που παρατηρείται κάνοντας χρήση της τεχνικής, με αντιδράσεις (d,p), είναι ότι λόγω του μεγάλου Q-value που έχουν ($Q=6249$ keV), το ανιχνευόμενο πρωτόνιο, όντας ελαφρύ θα πάρει μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας και η ισχύς ανάλυσής του θα είναι πολύ μικρή. Αυτό θα είχε ως συνέπεια την μείωση της διακριτικής ικανότητας του συστήματός (οι κορυφές στο φάσμα εμφανίζονται πολύ στενές). Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν τόσο οι μετρήσεις με τις αντιδράσεις (d,p) όσο και με την αντίδραση (d,a) είναι η επιμόλυνση του χώρου από νετρόνια που παράγονται από την αντίδραση (d,n). Αυτή η αντίδραση είναι εξώθερμη και συνεπώς τα νετρόνια θα είναι παρόντα ανεξάρτητα από την ενέργεια της δέσμης δευτερίων. Μια ακόμα αντίδραση που είναι υπεύθυνη για την επιμόλυνση της πειραματικής διάταξης με νετρόνια σε προφίλομετρία σε μεγάλα βάθη είναι το break-up του δευτερίου (d,n+p). Αυτή η αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για ενέργεια δέσμης δευτερίων μεγαλύτερη από 2.2 MeV, δηλαδή όση είναι και η ενέργεια σύνδεσης των δευτερίων. Τέλος ένας ακόμα λόγος που η τεχνική NRA, δεν θεωρείται η ιδανική μέθοδος για προφίλομετρία πυριτίου είναι ο χρόνος που απαιτείται για την λήψη επαρκούς στατιστικής, αφού οι ενεργές διατομές τόσο των αντιδράσεων (d,p) [3–5], όσο και τις αντίδρασης (d,a) [6] είναι πολύ μικρότερες από αυτές της ελαστικής σκέδασης. Επίσης, σε κάθε περίπτωση, το μέγιστο βάθος ανάλυσης καθορίζεται από την ενέργεια των δευτερίων της δέσμης και επί του παρόντος δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών σε ενέργειες συγκρίσιμες με αυτές της παρούσας εργασίας, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη τις παρόμοιες τιμές ισχύος ανάλυσης δευτερίων και πρωτονίων.

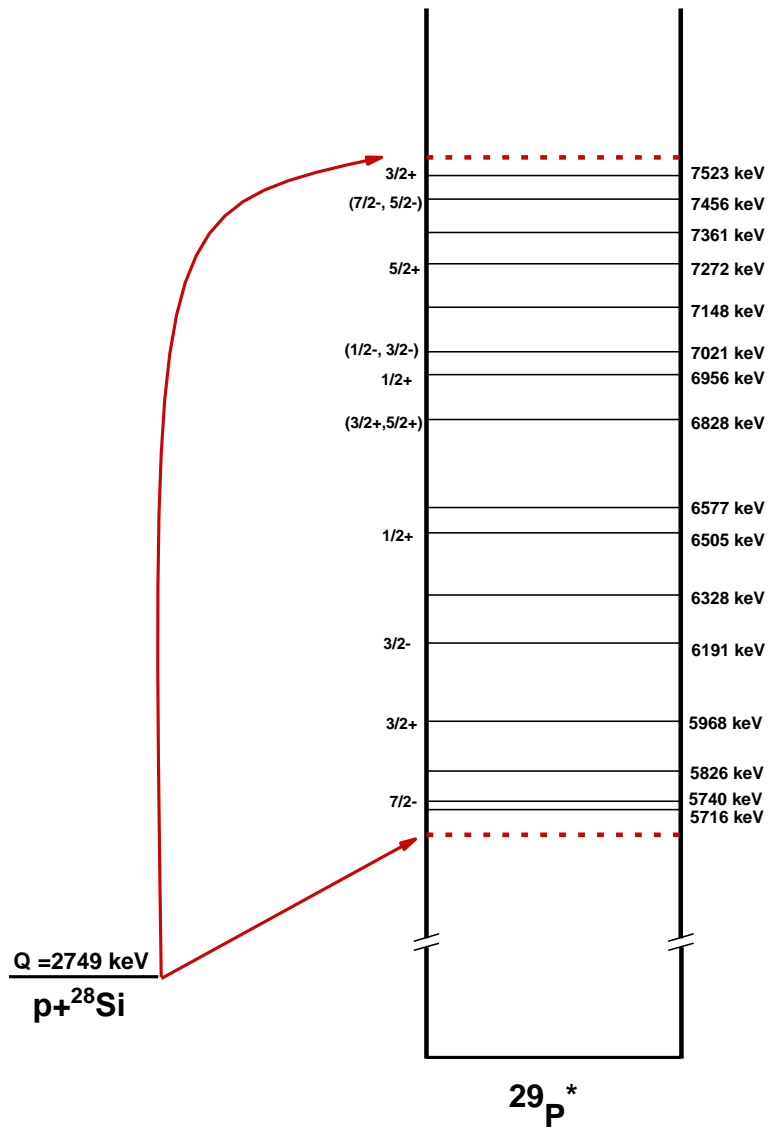
Τεχνική EBS- Elastic Backscattering Spectroscopy

Η τεχνική της ελαστικής οπισθοσκέδασης αποτελεί γενίκευση της μεθόδου RBS. Σε αυτή την περίπτωση η σκέδαση δεν είναι καθαρά ηλεκτροστατική (όπως στην RBS) καθώς ο ανακρουόμενος πυρήνας της δέσμης σκεδάζεται και από το πυρηνικό δυναμικό σχηματίζοντας σύνθετο πυρήνα. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η ενεργός διατομή παρουσιάζει αποκλίσεις από την σχέση του Rutherford. Στη φασματοσκοπία EBS, οι δέσμες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αυτές των πρωτονίων (p, p_0), δευτερίων (d, d_0) και σωματιδίων-α (α , α_0). Η καταλληλότερη δέσμη για εύρεση προφίλ συγκέντρωσης βάθους στο πυρίτιο είναι η δέσμη πρωτονίων. Με την χρήση αυτής της δέσμης επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη διεισδυτικότητα των ιόντων της δέσμης στο πυρίτιο έναντι μια δέσμης σωματιδίων-α. Ενώ το βασικό πλεονέκτημα έναντι της δέσμης δευτερίων, εκτός από την λίγο μικρότερη απώλεια ενέργειας, είναι ότι στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε δεν υπάρχει επιμόλυνση του χώρου με νετρόνια καθώς η αντίδραση (p,n) σε όλα τα σταθερά ισότοπα του πυριτίου ανοίγει μετά τα 5 MeV. Συγκεκριμένα η αντίδραση $^{28}\text{Si}(p,n)^{28}\text{P}$ έχει $Q = -15.13$ MeV με ενέργεια threshold $E_{th} = 15.67$ MeV. Η (p,n) στο ^{29}Si έχει $Q = -5.73$ MeV με ενέργεια threshold $E_{th} = 5.92$ MeV και τέλος, το Q-value της αντίδρασης (p,n) στο ^{30}Si είναι $Q = -5.01$ MeV και η ενέργεια threshold $E_{th} = 5.18$ MeV. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής, όπως και της NRA, είναι ότι δεν υπάρχει αναλυτικός τύπος υπολογισμού των ενεργών διατομών και κατά συνέπεια η χρήση της απαιτεί την ύπαρξη πειραματικών ή και αξιολογημένων πειραματικών δεδομένων (evaluated

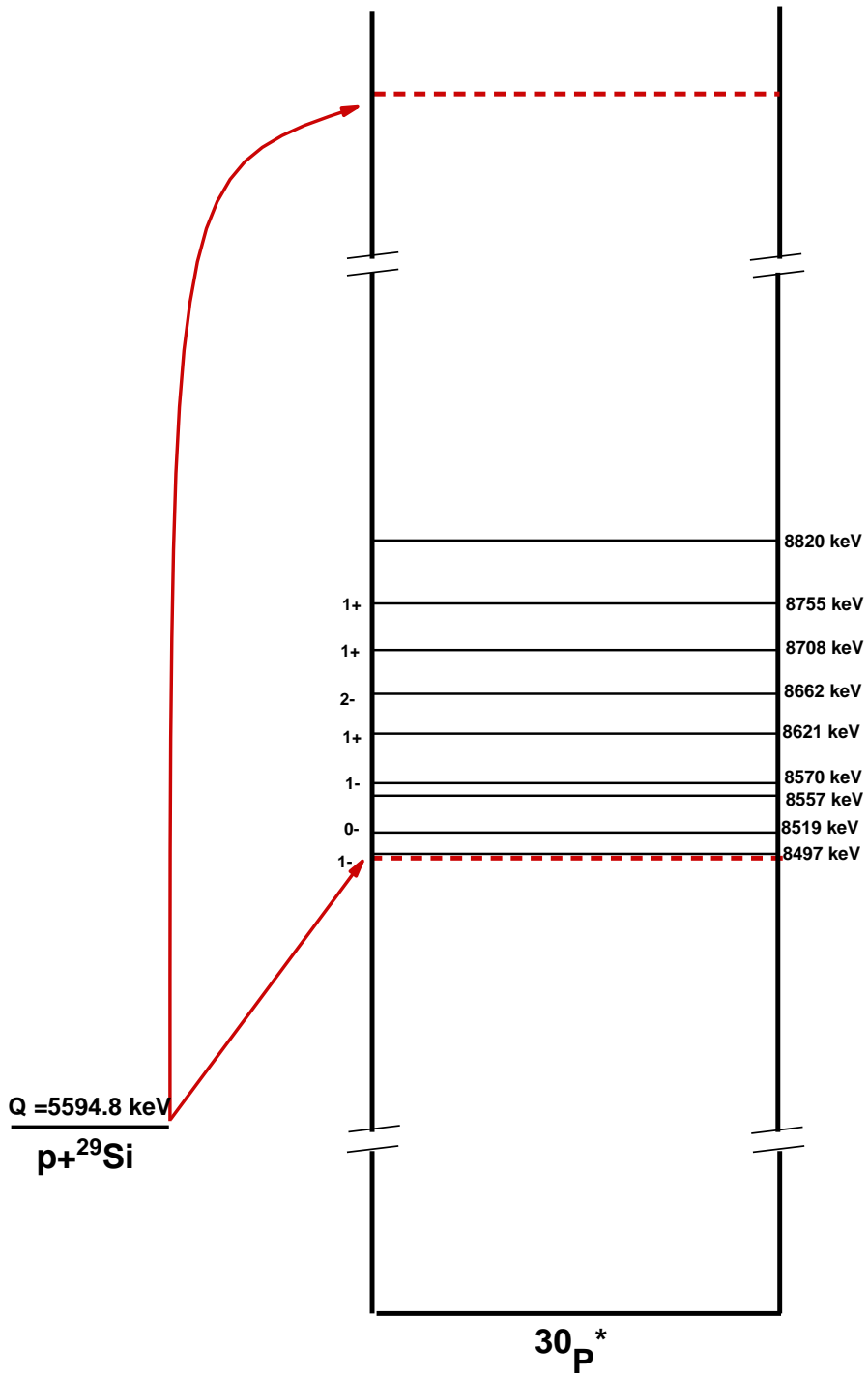
data). Για την ελαστική σκέδαση πρωτονίου στο πυρίτιο τα evaluated δεδομένα σταματούν στα 3.2 MeV [7] ενώ τα πειραματικά δεδομένα φτάνουν μέχρι τα 3.5 MeV.

Στην παρούσα μελέτη, μετρήθηκε η ελαστική σκέδαση πρωτονίου από πυρίτιο σε ενέργειες από 3-5 MeV για έξι γωνίες σκέδασης, ονομαστικά 120°, 130°, 140°, 150°, 160°, 170° με σκοπό τη δημιουργία ενός συνεκτικού σετ δεδομένων που θα συμβάλει στην επέκταση του evaluation του πυριτίου σε υψηλότερες ενέργειες και θα εμπλουτίσει τη βιβλιοθήκη IBANDL.

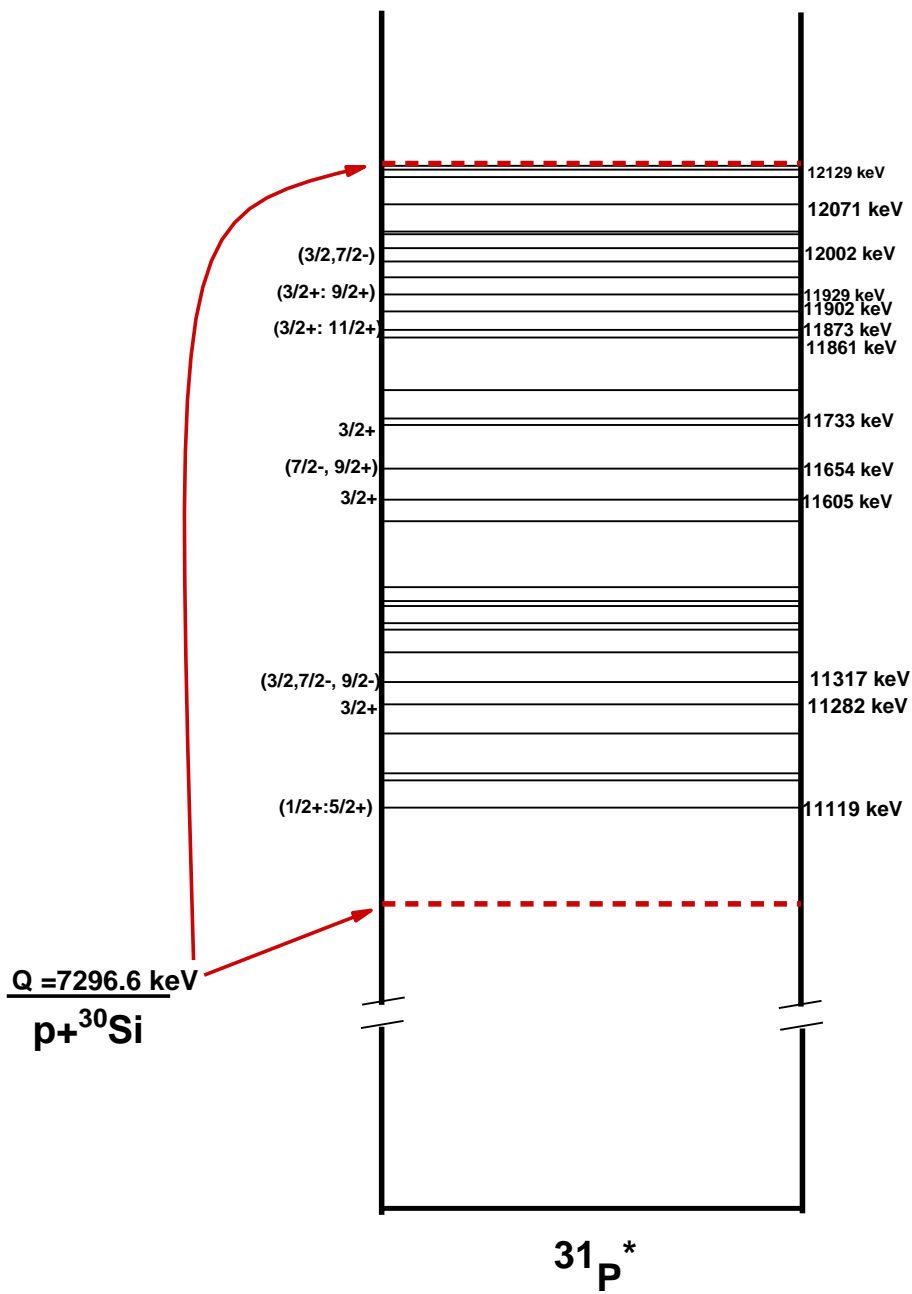
Το ενεργειακό διάγραμμα του σύνθετου πυρήνα $^{29}\text{P}^*$ που σχηματίζεται κατά την ελαστική σκέδαση του πρωτονίου με το ^{28}Si παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Τα ενεργειακά διαγράμματα των συνθετών πυρήνων $^{29}\text{P}^*$ $^{29}\text{P}^*$ παρουσιάζονται και αυτά, παρά το ότι η συνεισφορά τους αναμένεται να είναι μικρή.



Εικόνα 1.2: Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $p + {}^{28}\text{Si}$



Εικόνα 1.3: Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $p+^{29}\text{Si}$



Εικόνα 1.4: Ενεργειακό διάγραμμα της αντίδρασης $p + {}^{30}\text{Si}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πειραματικά Στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα πειραματικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των διαφορικών ενεργών διατομών και του ελέγχου αξιοπιστίας τους, στα πλαίσια αυτής της μελέτης.

2.1 Επιταχυντής

Οι μετρήσεις του πειράματος πραγματοποιήθηκαν στον ηλεκτροστατικό επιταχυντή, 5.5 MV TN11 TANDEM, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”.

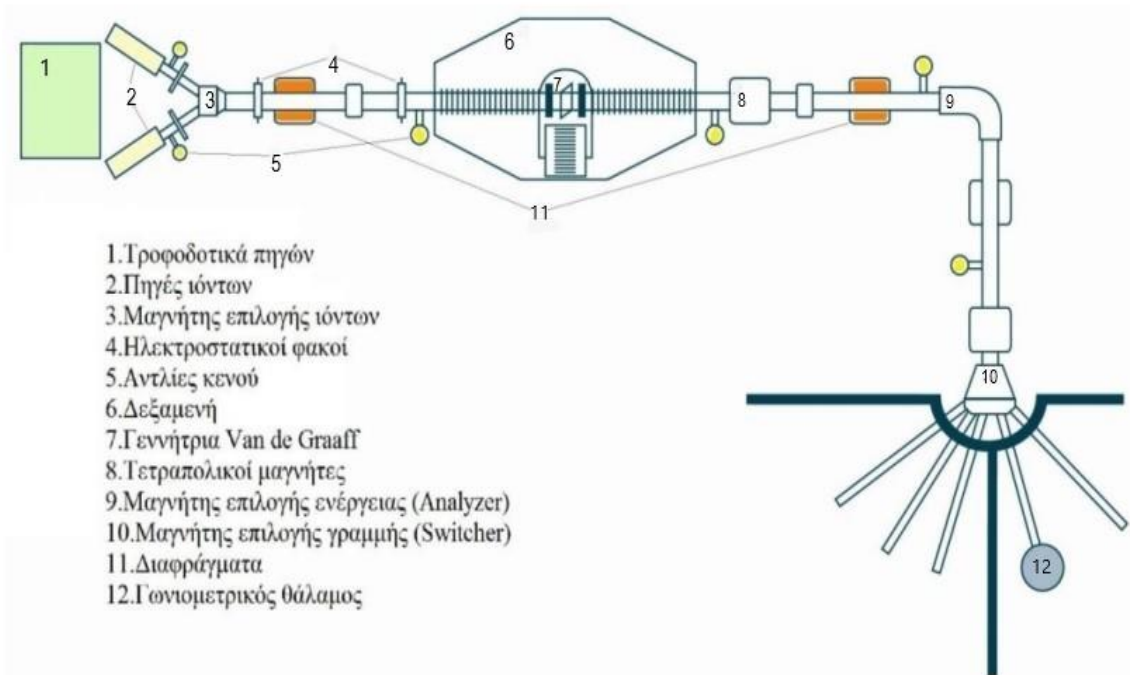


Εικόνα 2.1: Ο επιταχυντής Tandem 5.5 MV του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”

Τα βασικά μέρη του επιταχυντή, τα οποία φαίνονται και στο σχεδιάγραμμα της εικόνας 2.2, είναι οι πηγές παραγωγής ιόντων που βρίσκονται στην αρχή της πειραματικής γραμμής, η γεννήτρια Van de Graaff, η οποία βρίσκεται στο κέντρο της δεξαμενής υψηλού κενού και τέλος οι πειραματικές γραμμές.

Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τις πηγές ιόντων, στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε πηγή πλάσματος (dioplasmatron) για την παραγωγή των αρνητικών ιόντων. Η πηγή αποτελείται από ένα θάλαμο υψηλού κενού και μία κάθοδο που εκπέμπει ηλεκτρόνια μέσα στο θάλαμο.

Εγχύοντας πολύ μικρές ποσότητες αερίου υδρογόνου μέσα στον θάλαμο, αυτό, μέσω της αλληλεπίδρασής του με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στον θάλαμο, ιονίζεται και σχηματίζεται πλάσμα. Εφαρμόζοντας μια διαφορά δυναμικού (60 kV) το πλάσμα επιταχύνεται και σχηματίζεται η δέσμη αρνητικών ιόντων υδρογόνου, η οποία έλκεται από το θετικό δυναμικό (έως 5.5 MV) της γεννήτριας van de Graaff. Το δυναμικό αυτό παράγεται με την χρήση ενός περιστροφικού μονωτικού ιμάντα, ο οποίος εναποθέτει θετικά φορτία σε μία μεταλλική σφαίρα που βρίσκεται μέσα στην δεξαμενή και κατ' επέκταση τη φορτίζει. Στο κέντρο αυτής της σφαίρας βρίσκεται λεπτό φύλλο (foil) άνθρακα. Καθώς τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα προσκρούουν στο foil άνθρακα, γίνεται απογύμνωση (stripping) των ηλεκτρονίων τους και τα αρνητικά ιόντα γίνονται θετικά. Κατόπιν τα θετικά πλέον ιόντα, απωθούνται από το δυναμικό της μεταλλικής σφαίρας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μία δεύτερη επιτάχυνση. Στη συνέχεια η δέσμη διέρχεται από έναν τετραπολικό μαγνήτη ώστε να εστιαστεί και οδηγείται στον μαγνήτη ανάλυσης (analyzing magnet). Εκεί επιλέγεται η επιθυμητή ενέργεια της δέσμης, κατευθύνοντας τα ιόντα με συγκεκριμένο λόγο φορτίου προς μάζα (q/m) στη διεύθυνση των 90° (φασματογράφος μάζας). Η δέσμη που προκύπτει μετά το μαγνήτη ανάλυσης δεν είναι μονοενεργειακή. Για το λόγο αυτό, η δέσμη διέρχεται από σχισμές (slits) ώστε να αποκόπτονται, ανάλογα με το άνοιγμα των slits, όσο το δυνατόν περισσότερες κοντινά ενεργειακά τιμές στην επιθυμητή ενέργεια. Τέλος η δέσμη διέρχεται από το μαγνήτη επιλογής, όπου γίνεται η επιλογή της εκάστοτε πειραματικής γραμμής.



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του επιταχυντή.

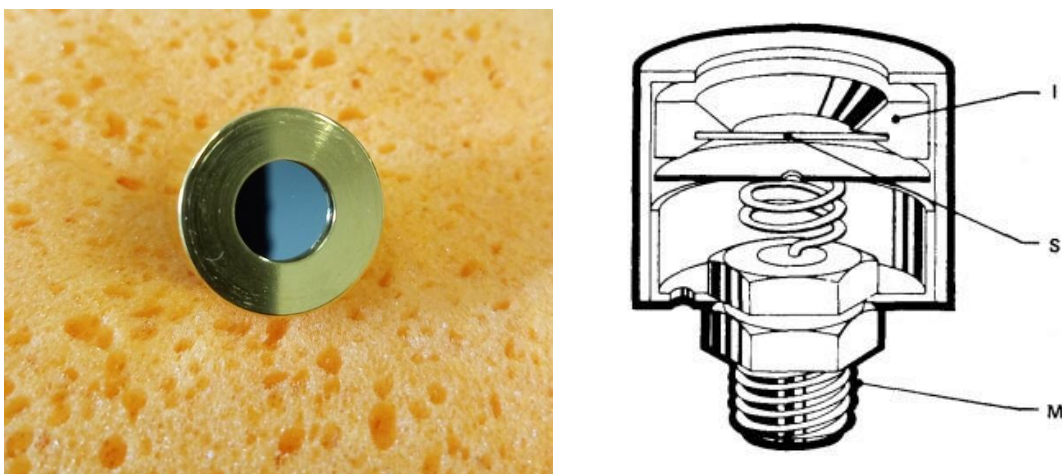
2.2 Ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (SSB)

Το ανιχνευτικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη αποτελείται από έξι ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (silicon surface barrier- SSB). Αυτοί οι ανιχνευτές εντάσσονται στην κατηγορία των ανιχνευτών στερεάς κατάστασης και βασίζουν τη λειτουργία τους στη συλλογή ζευγών οπών-ηλεκτρονίων που προκαλεί η διέλευση ενός σωματιδίου στον κρύσταλλο του ανιχνευτή.

Πιο συγκεκριμένα, η μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος κάθε υλικού, καθορίζει τις επιτρεπτές ενεργειακές ζώνες των ηλεκτρονίων του. Αυτές οι ζώνες μπορεί να διαχωρίζονται είτε με κενά (gaps), είτε με περιοχές απαγορευμένων ενεργειών. Η χαμηλότερη εξ' αυτών των ζωνών ονομάζεται ζώνη σθένους (valence band) και αντιστοιχεί σε ηλεκτρόνια εξωτερικής στοιβάδας, τα οποία είναι δεσμευμένα σε συγκεκριμένες θέσεις στο πλέγμα του κρυστάλλου. Η ζώνη που βρίσκεται υψηλότερα από αυτή ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) και αντιπροσωπεύει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κρυστάλλου. Οι δύο αυτές ζώνες χωρίζονται από μία απαγορευμένη ενεργειακά περιοχή που ονομάζεται ζώνη απογύμνωσης [8].

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο εισέρχεται στον κρύσταλλο του ημιαγωγού και αλληλεπιδρά με κάποια από τα ηλεκτρόνια στην ζώνη σθένους, αυτά αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτή η διέγερση του ηλεκτρονίου δημιουργεί ένα κενό στη ζώνη σθένους, που ονομάζεται οπή, και φυσικά ένα ηλεκτρόνιο στην ζώνη αγωγιμότητας. Στη συνέχεια, παρουσία ηλεκτρικού πεδίου σε όλο τον ενεργό όγκο του κρυστάλλου, συλλέγεται το ρεύμα που δημιουργείται από την κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών, και παράγεται ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της ενέργειας που εναπόθεσε το σωματίδιο στον κρύσταλλο. Το σήμα αυτό στη συνέχεια περνά από έναν προενισχυτή (preamplifier). Εκεί γίνεται μια πρώτη μικρή ενίσχυση του σήματος για να περάσει στον ενισχυτή (amplifier), όπου γίνεται η τελική ενίσχυση και διαμόρφωση του σήματος. Κατόπιν το σήμα οδηγείται σε έναν αναλογικοψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter- ADC) όπου γίνεται η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και έναν πολυκαναλικό αναλυτή (Multichannel analyzer-MCA) για την καταγραφή των ψηφιακών πλέον παλμών σε κανάλια, ανάλογα με την ενέργειά τους.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι πριν από κάθε μέτρηση είναι απαραίτητη η ρύθμιση κάποιων παραμέτρων του ενισχυτή όπως είναι ο χρόνος διαμόρφωσης (shaping time) και μηδενισμού του παλμού (pole zero) και φυσικά το μέγεθος της επιθυμητής ενίσχυσης του σήματος.

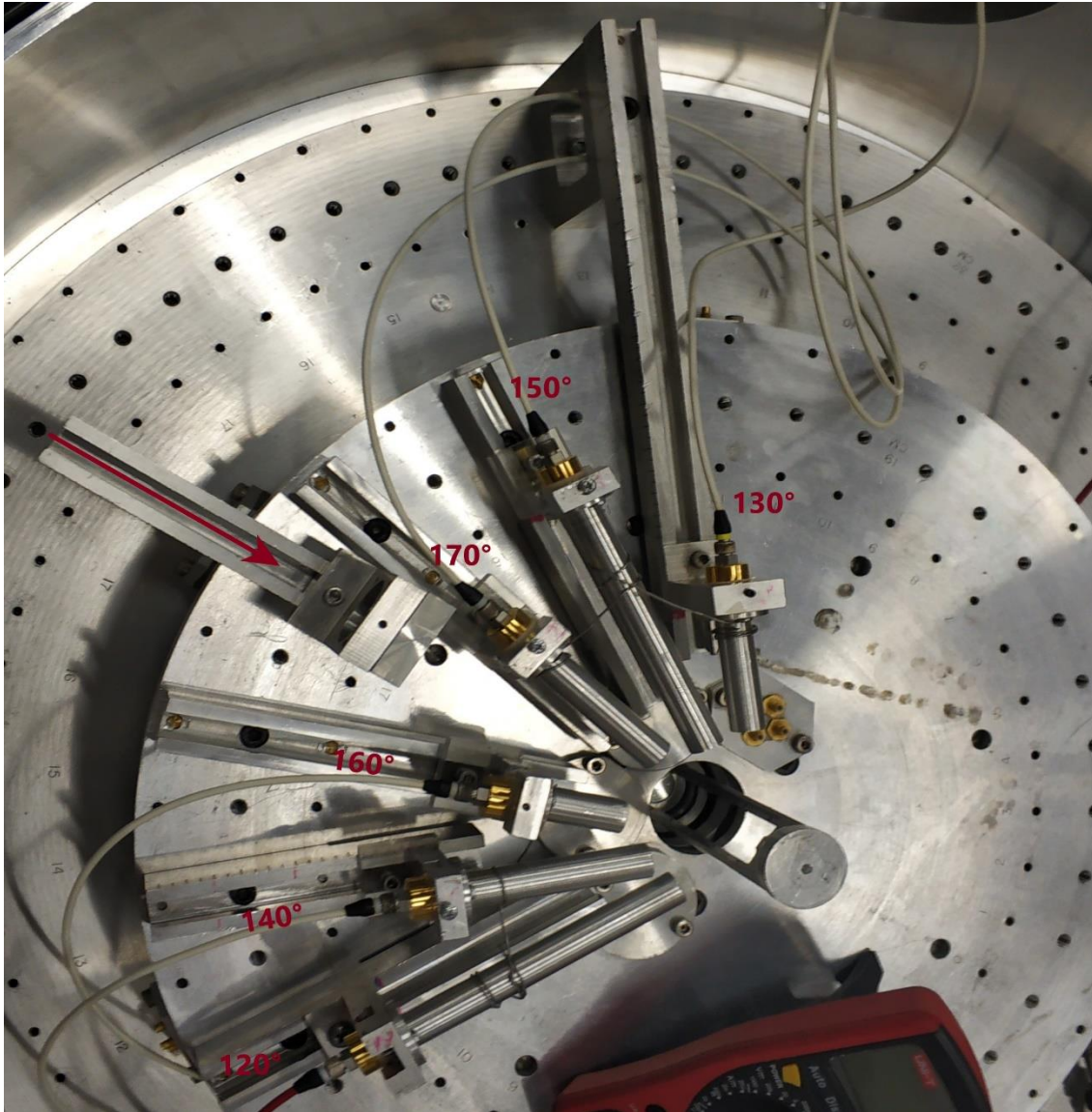


Εικόνα 2.3: Ανιχνευτής πυριτίου επιφανειακού φραγμού (αριστερά) και σχηματική αναπαράσταση της κάθετης τομής του (δεξιά). Στην κάθετη τομή του ανιχνευτή διακρίνονται το λεπτό δισκίο πυριτίου (silicon wafer) (s) που είναι τοποθετημένο σε κεραμικό μονωτικό δακτύλιο (I) και συνδεδεμένο με την υποδοχή ομοαξονικού καλωδίου (M).

2.3 Θάλαμος σκέδασης

Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε η πειραματική γραμμή, η οποία καταλήγει σε ένα θάλαμο σκέδασης διαμέτρου 70 cm, στον οποίο είναι τοποθετημένη μια γωνιομετρική τράπεζα υψηλής ακρίβειας. Ο θάλαμος αυτός βρισκόταν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος σε υψηλό κενό ($\sim 10^{-6}$ Torr) μέσω δύο αντλιών, μιας περιστροφικής (rotary) αντλίας λαδιού, για την δημιουργία του προ-κενού και μίας στροβιλομοριακής αντλίας (turbo) για το υψηλό κενό.

Πριν την είσοδο του θαλάμου έχει τοποθετηθεί ένα σετ κατευθυντήρων (ένας collimator και ένας anti-scatterer) με σκοπό την ευθυγράμμιση και τον περιορισμό του μεγέθους της δέσμης. Οι έξι ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού τοποθετήθηκαν στη γωνιομετρική τράπεζα με τη βοήθεια κατάλληλων βάσεων σε γωνίες $120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$ και αποστάσεις $\sim 9-15$ cm από την βάση των στόχων (Εικόνα 2.4). Επίσης τοποθετήθηκε στη διεύθυνση της δέσμης (180°), σε απόσταση ~ 16 cm από τον στόχο, ένας ακόμα collimator διαμέτρου 1 mm προκειμένου να περιοριστεί περαιτέρω το μέγεθος της δέσμης (εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους των υπό μελέτη στόχων).



Εικόνα 2.4: Εσωτερικό του θαλάμου σκέδασης. Στο κέντρο του θαλάμου βρίσκεται η βάση στήριξης των στόχων, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της δέσμης (κόκκινο βέλος). Περιμετρικά της βάσης είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές στις επιθυμητές γωνίες και ένας collimator κάθετα στην διεύθυνση της δέσμης.

Στην εικόνα 2.4 παρατηρείται ότι μπροστά από κάθε ανιχνευτή έχουν τοποθετηθεί μικροί σωλήνες αλουμινίου διαμέτρου 1 cm, διαφόρων μηκών. Η τοποθέτηση των σωλήνων έγινε με σκοπό τη μείωση του υποβάθρου, καθώς δεν επιτρέπουν την καταγραφή ελαστικά σκεδαζόμενων σωματιδίων από τα τοιχώματα του θαλάμου και από το faraday cup, το οποίο βρίσκεται στο τέλος της πειραματικής γραμμής. Ακόμα, για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στη γωνιακή κατανομή των ανιχνευόμενων σωματιδίων, που προκύπτει από το μέγεθος του παραθύρου του ανιχνευτή (1cm), τοποθετήθηκε μπροστά από κάθε ανιχνευτή μια ορθογώνια κάθετη σχισμή (slit) από αλουμίνιο (Εικόνα 2.5). Το άνοιγμα των σχισμών επιλέχθηκε κατάλληλα

ώστε να ελαχιστοποιεί τη γωνιακή αβεβαιότητα (~1%) και παράλληλα τα καταγραφόμενα γεγονότα σε κάθε ανιχνευτή σωμάτια να είναι στατιστικά επαρκή



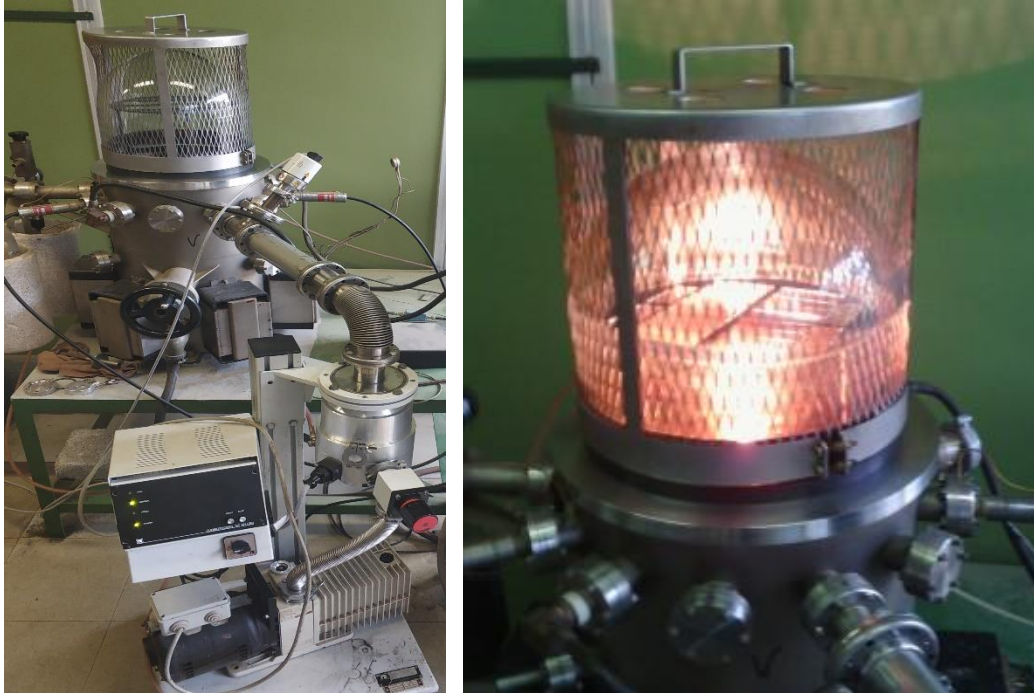
Εικόνα 2.5: κάθετη σχισμή αλουμινίου (slit) τοποθετημένη στην βάση στήριξης του ανιχνευτή.

2.2 Στόχοι

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα προσδιορισμού της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από πυρίτιο ήταν ένας υπέρλεπτος στόχος (75 nm), υψηλής καθαρότητας νιτριδίου του πυριτίου (silicon nitride) Si_3N_4 , με ενεργή επιφάνεια $5 \times 5 \text{ mm}^2$, κατασκευασμένος από την εταιρία Silson Ltd. Πάνω στην υπέρλεπτη μεμβράνη του στόχου έγινε εξάχνωση χρυσού για λόγους κανονικοποίησης.

Ο στόχος του πειράματος ελέγχου αξιοπιστίας (benchmarking) ήταν ένα δισκίο πυριτίου (silicon wafer) απείρου πάχους, ο οποίος είχε μια πλευρά λεία (polished) και την άλλη τραχιά (unpolished). Η εξάχνωση του χρυσού για κανονικοποίηση του φορτίου πραγματοποιήθηκε την τραχιά του πλευρά ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα channeling.

Η εξάχνωση χρυσού και στους δύο στόχους πραγματοποιήθηκε στον εξαχνωτήρα του του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” που φαίνεται στην εικόνα 2.6. Κατά τη διαδικασία της θερμικής εξάχνωσης, τοποθετείται η επιθυμητή ποσότητα χρυσού πάνω σε ένα έλασμα τανταλίου που βρίσκεται στο κέντρο του θαλάμου εξάχνωσης υψηλού κενού. Το έλασμα τανταλίου στη συνέχεια διαρρέεται από ρεύμα έως ότου έρθει στη θερμοκρασία εξάχνωσης του χρυσού (~950°C στα 10^{-6} Torr).



Εικόνα 2.5: Εξαχνωτήρας Ινσιτιούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος”. Το σύστημα αντλιών που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί το υψηλό κενό διακρίνεται στην εικόνα αριστερά. Στο κάτω μέρος είναι η περιστροφική αντλία λαδιού η οποία είναι συνδεδεμένη με την αντλία turbo.

Για τον προσδιορισμό της επιθυμητής μάζας του χρυσού που επρόκειτο να εξαχνωθεί (m_{Au}), έγινε η υπόθεση ότι κατά την εξαχνωσή του, όλος ο χρυσός θα εναποτεθεί ομοιόμορφα στην επιφάνεια ενός ημισφαιρίου με κέντρο το έλασμα τανταλίου, σύμφωνα με την σχέση

$$m_{Au} = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \quad (2.1)$$

Όπου, R η απόσταση του στόχου από το έλασμα τανταλίου και ρ η επιφανειακή πυκνότητα του χρυσού (mg/cm^2) που έχει εξαχνωθεί. Η επιλογή της επιθυμητής πυκνότητας χρυσού στο στόχο έγινε με την απαίτηση η απώλεια ενέργειας της δέσμης στο εσωτερικό του στόχου να μην ξεπερνάει τα 3 keV, ενώ παράλληλα η στατιστική των γεγονότων της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από χρυσό να είναι επαρκής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειραματική ανάλυση

3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή

Ο ακριβής προσδιορισμός των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής απαιτεί την πολύ καλή γνώση της ενέργειας της δέσμης. Της ενέργειας δηλαδή των πρωτονίων με την οποία γίνεται η πρόσκρουσή τους με τον στόχο. Αυτή η ενέργεια συνήθως διαφέρει κατά μερικά keV από την ενέργεια που δίνεται από το χειριστή του επιταχυντή. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της τάσης που εφαρμόζεται στον επιταχυντή, άρα και της ενέργειας της δέσμης. Το μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια είναι το πεδίο του μαγνήτη επιλογής ενέργειας (analyzing magnet). Βαθμονομώντας ενεργειακά αυτό το μαγνητικό πεδίο (offset του μαγνήτη) μπορεί να καθοριστεί η ενέργεια της δέσμης, με σφάλμα (ripple) που εξαρτάται από το άνοιγμα των slits. [9]

Ο συνήθης τρόπος πραγματοποίησης αυτής της βαθμονόμησης είναι μέσω λεπτών συντονισμών ακτινών – γάμμα. Ωστόσο στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε μια διαφορετική τεχνική, χρησιμοποιήθηκε ο συντονισμός της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από άνθρακα $^{12}\text{C}(p, p_0)$ σε ενέργεια 1.737 MeV ($\Gamma = 47 \pm 7\text{ KeV}$). Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος συντονισμός του άνθρακα είναι ότι σε αυτή την ενέργεια πρωτονίων, η διαφορική ενεργός διατομή του πυριτίου παρουσιάζει απότομη πτώση λόγω του συντονισμού του ^{28}Si στα 1.652 MeV

($\Gamma = 47 \pm 7\text{ KeV}$), πράγμα που μας επιτρέπει την ταυτόχρονη μελέτη των μεταβολών των γεγονότων και των δυο στοιχείων. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις ενέργειες πρωτονίων (με στόχο Si_3N_4 : 1720, 1730, 1740), ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση ήταν ο ίδιος με αυτόν του πειράματος καθώς εκμεταλλευτήκαμε την αναπόφευκτη παρουσία του άνθρακα στον στόχο λόγω της εξάχνωσης του χρυσού που έγινε για νορμαλισμό του φορτίου.

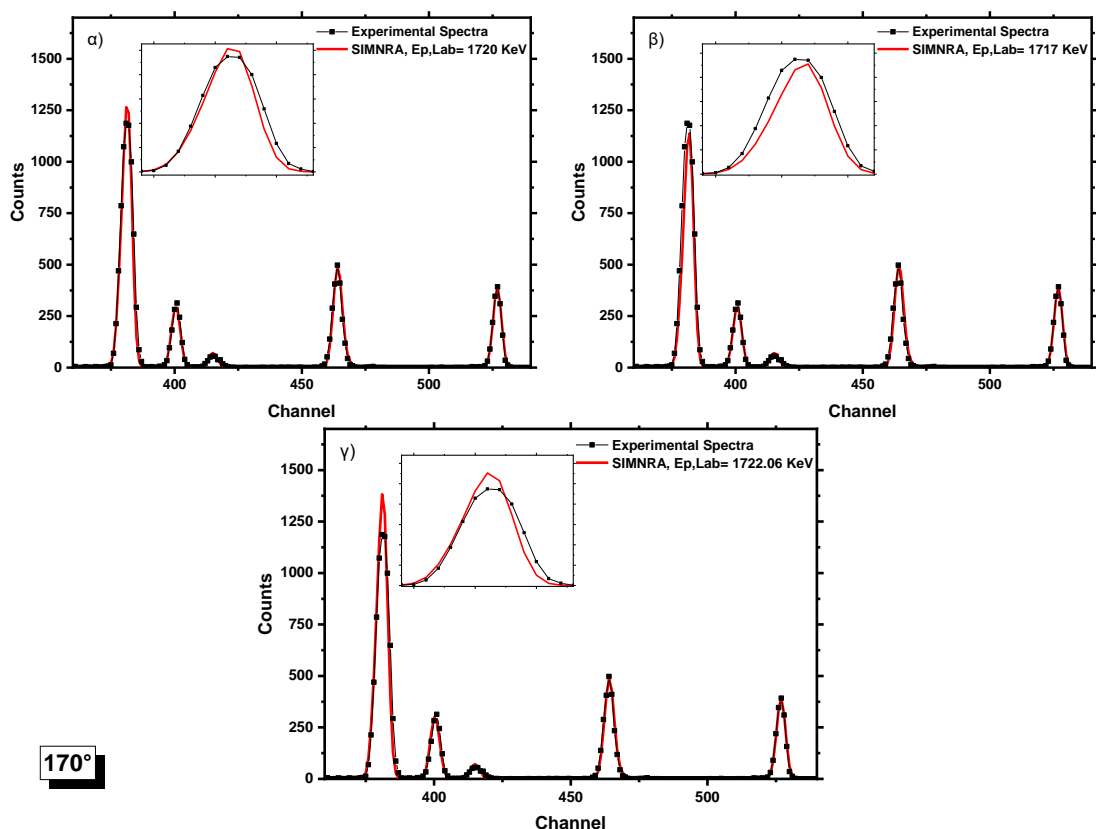
Αρχικά δημιουργήθηκε ένας πρότυπος στόχος με τη βοήθεια του προγράμματος SIMNRA [10] και έγινε προσομοίωση του πειραματικού φάσματος στα 980 keV . Η ενέργεια αυτή έχει επιλεχθεί κατάλληλα, αφού στη συγκεκριμένη ενέργεια το πυρίτιο ακολουθεί την σχέση του Rutherford ενώ ο άνθρακας βρίσκεται μακριά από συντονισμούς, έτσι ώστε να μην υπάρχουν απότομες αυξομειώσεις στις διαφορικές ενεργές διατομές. Η απαίτηση για αυτόν τον στόχο ήταν τα ολοκληρώματα των κορυφών (counts) του χρυσού, του πυριτίου και του άνθρακα να είναι ίδια με αυτά του πειραματικού φάσματος. Στη συνέχεια, με τον στόχο που δημιουργήθηκε, έγινε έλεγχος στις τρεις ενέργειες προκειμένου να επιλεχθεί η ενέργεια με την μεγαλύτερη ευαισθησία για να γίνει η βαθμονόμηση. Με τον όρο ευαισθησία εννοείται η μεταβολή των counts του άνθρακα και του πυριτίου όταν αυξάνεται λίγο η ενέργεια (λόγω του συντονισμού). Τελικά για την βαθμονόμηση επιλέχθηκε η ενέργεια των 1720 keV , καθώς η αύξηση ενός keV στα 1720 επιφέρει αλλαγή στα counts του άνθρακα της τάξης του 3%, η αντίστοιχη αύξηση στα 1730 περίπου 1%, ενώ στα 1740 είναι πρακτικά αμελητέα. Για το πυρίτιο όπως ήταν αναμενόμενο μεγαλύτερες μεταβολές παρουσιάζονται στα 1720 keV καθώς είναι πιο κοντά στο συντονισμό

του . Τέλος, έγινε προσομοίωση στην επιλεγμένη ενέργεια, στις 'πίσω' γωνίες (170°, 160°, 150°) ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα straggling. Ο σκοπός ήταν με κατάλληλη αυξομείωση λίγων keV στην ενέργεια (nominal), τα counts της κορυφής για καθένα από τα στοιχεία (Au, Si, C) να είναι ίδια στο πειραματικό και στο προσομοιωμένο φάσμα αντίστοιχα. Αυτή η διαφορά των λίγων keV στην ενέργεια είναι το offset του μαγνήτη. Στην προκειμένη περίπτωση βρέθηκαν τρία offset, ένα για κάθε γωνία. Η τελική τιμή για το offset του μαγνήτη προέκυψε από τον μέσο όρο των τιμών των τριών γωνιών. Η τελική τιμή του offset, καθώς και οι τιμές για κάθε μια από τις επιμέρους γωνίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1 : Τιμές για το ενεργειακό offset του μαγνήτη σε κάθε ενέργεια που μελετήθηκε μαζί με τον μέσο όρο αυτών

	170°	160°	150°	Μέση Τιμή
offset	2.065	2.930	2.520	2.505

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία για την εύρεση του offset στις 170°. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες γωνίες. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται το πειραματικό φάσμα για ενέργεια πρωτονίων 1720 keV μαζί με διάφορα φάσματα προσομοίωσης, στα οποία έχει γίνει αυξομείωση λίγων keV στην ενέργεια της δέσμης προκειμένου να διαπιστωθεί για ποια ενέργεια δέσμης τα δύο φάσματα παρουσιάζουν τις μικρότερες αποκλίσεις. Πιο αναλυτικά στη εικόνα 3.1α εκτός από το πειραματικό φάσμα παρουσιάζεται το φάσμα προσομοίωσης σε ενέργεια 1720 keV (nominal), στην εικόνα 3.1β το φάσμα προσομοίωσης είναι σε ενέργεια 1717 keV (nominal - 3 keV), ενώ στην εικόνα 3.1γ σε ενέργεια 1722,06 keV (nominal+ 2.06 keV)



Εικόνα 3.1α-γ: Πειραματικό φάσμα πρωτονίων ενέργειας 1720 KeV σε γωνία 170°, μαζί με τα προσομοιωμένα φάσματα σε ενέργειες 1720 keV (α), 1717 keV (β) και 1722.06 KeV (γ). Με μαύρα σημεία συμβολίζεται το πειραματικό φάσμα, ενώ με κόκκινη γραμμή τα προσομοιωμένα. Ακόμα έχει γίνει μεγέθυνση της κορυφής του άνθρακα ώστε να διακρίνονται καλύτερα οι διαφορές μεταξύ του πειραματικού φάσματος και του φάσματος της προσομοίωσης.

Τέλος για να γίνει η τελική επιλογή του offset, βρέθηκαν οι ποσοστιαίες αποκλίσεις, των γεγονότων κάθε κορυφής, των φασμάτων προσομοίωσης από το πειραματικό φάσμα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 2

Πίνακας 2: Αποκλίσεις (%) των γεγονότων στις κορυφές των πειραματικών φασμάτων και των φασμάτων προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με (+) αν η προσομοίωση υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα και με (-) αν συμβαίνει το αντίθετο

$E_{p,Lab}$ (keV)	Αποκλίσεις (%)		
	Au	Si	C
1717	+1.0	+3.2	-18.8
1720	+0.6	+1.3	-8.0
1722.06	+0.4	0	-0.8

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής βαθμονόμησης είναι ότι δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός, όπως ανιχνευτές ακτινών – γάμμα, καθώς επίσης ότι είναι λιγότερο χρονοβόρα από την μέθοδο των λεπτών συντονισμών. Ωστόσο η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής δεν επιτρέπει τον αναλυτικό υπολογισμό της αβεβαιότητας (ripple) στην ενέργεια της δέσμης. Συνεπώς η τιμή του ripple θα πρέπει να εκτιμηθεί. Παρατηρήθηκε ότι η διακύμανση στην τιμή της ενέργειας δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αντιστοιχεί σε δυο κανάλια του ADC. Συνεπώς σε αυτή την μέθοδο η εύρεση του ripple της δέσμης μπορεί να γίνει μόνο κατόπιν της ενεργειακής βαθμονόμησης του ADC.

3.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση ADC/MCA

Η διαδικασία της ενεργειακής βαθμονόμησης του ADC/MCA, πρόκειται ουσιαστικά για την αντιστοίχιση των καναλιών του ADC με τις τιμές της ενέργειας των σκεδαζόμενων σωματιδίων του πειραματικού φάσματος όπως αυτά προκύπτουν από αναλυτικούς υπολογισμούς.

Για την πραγματοποίηση αυτής της αντιστοίχισης ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιου στοιχείου από το οποίο να μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων με αναλυτικούς υπολογισμούς. Η επιλογή άλλου στοιχείου πέρα από το χρυσό, που είχε εξαχρωθεί στην μπροστινή πλευρά του στόχου, θα εισήγαγε αβεβαιότητες στον παραπάνω υπολογισμό λόγω της απώλειας ενέργειας που θα υπήρχε από τον ίδιο το χρυσό. Συνεπώς η βαθμονόμηση προκύπτει από την αντιστοίχιση των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων με το κανάλι στο οποίο παρατηρείται ο μέγιστος αριθμός γεγονότων ελαστικής σκέδασης πρωτονίων στο χρυσό $Au(p, p_0)$.

Η ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων υπολογίστηκε μέσω της σχέσης του κινηματικού παράγοντα K (kinematic factor) [11]:

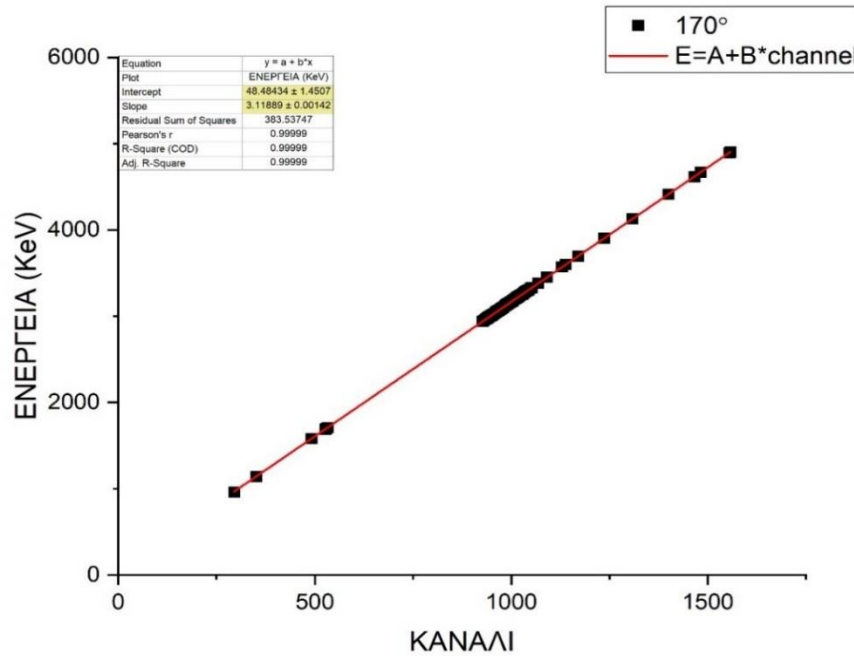
$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{M_1 \cos\theta + \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2\theta}}{M_1 + M_2} \right]^2 \quad (3.2)$$

όπου, E_1 η ενέργεια του σκεδαζόμενου πρωτονίου, E_0 η ενέργεια της δέσμης λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή, M_1 και M_2 οι ατομικές μάζες του πρωτονίου και του χρυσού αντίστοιχα και τέλος θ η γωνία του σκεδαζόμενου πρωτονίου.

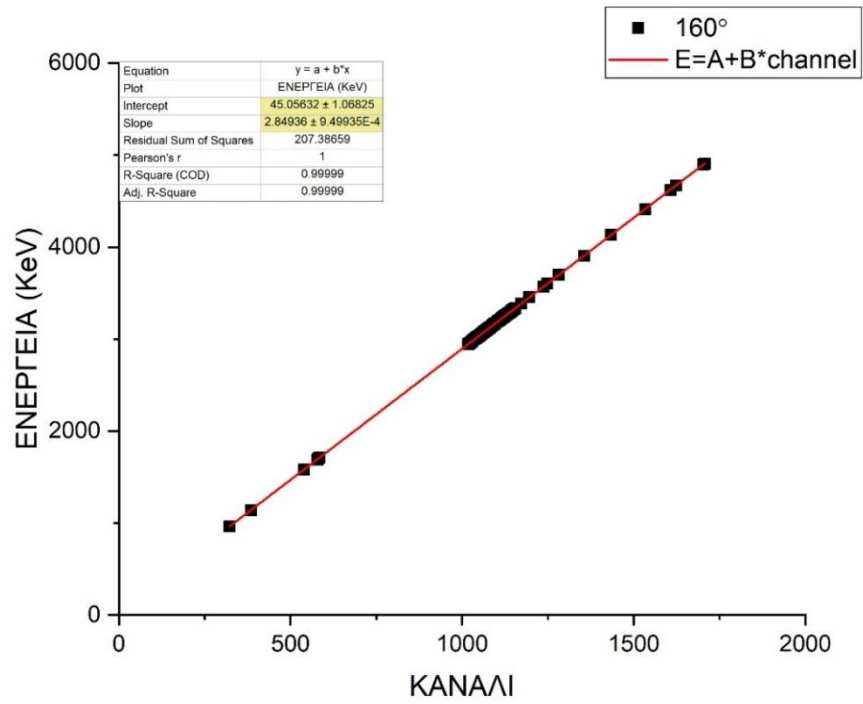
Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν 60 πειραματικά φάσματα για κάθε γωνία, με μεταβλητό ενεργειακό βήμα έτσι ώστε να καλύπτουν ενεργειακό εύρος από 1 έως 5 MeV. Στη συνέχεια καταγράφηκε για κάθε φάσμα το κανάλι με το μέγιστο αριθμό σκεδαζόμενων πρωτονίων και υπολογίστηκε η ενέργεια τους (nominal) από την παραπάνω σχέση. Έγινε η γραφική παράσταση της ενέργειας συναρτήσει των καναλιών (Energy/channel) και γραμμική προσαρμογή στα δεδομένα με τη συνάρτηση

$$E(\text{keV}) = A + B * \text{channel}$$

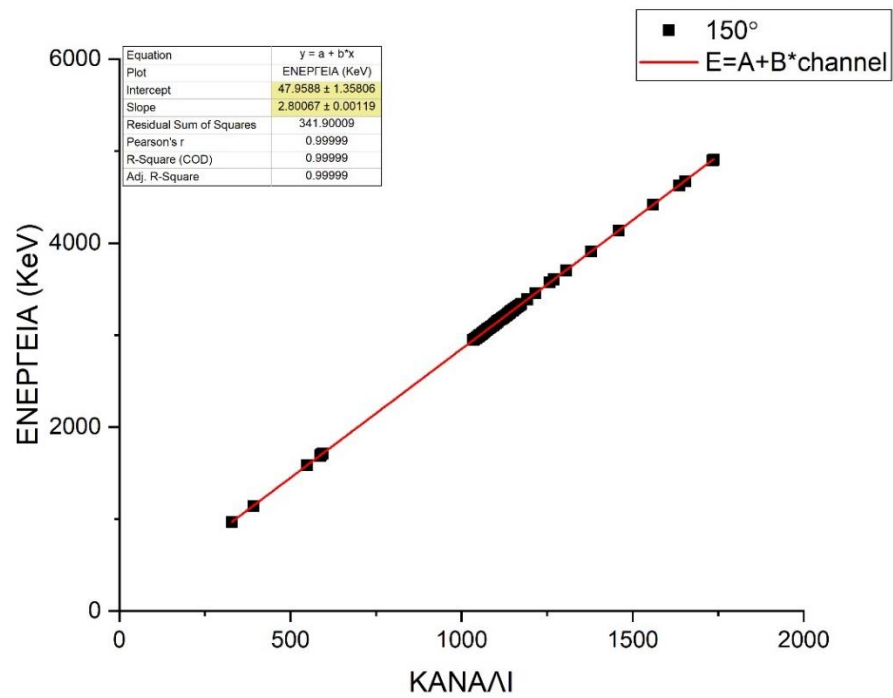
Επομένως η εύρεση της κλίσης της ευθείας προσαρμογής δίνει την ενέργεια ανά κανάλι του ADC και συνεπώς επιτρέπει την βαθμονόμηση του ADC. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε ακόμα τέσσερις φορές, για ενέργειες οι οποίες διαφέρουν από την nominal τιμή ± 3 και ± 6 keV, ωστόσο σε όλα τα διαφορετικά σενάρια η κλίση της ευθείας και συνεπώς η βαθμονόμηση του ADC παρέμενε σταθερή. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που προαναφέρθηκαν, για την nominal τιμή της ενέργειας, καθώς επίσης και ένας πίνακας με τις τιμές των παραμέτρων A και B για κάθε γωνία



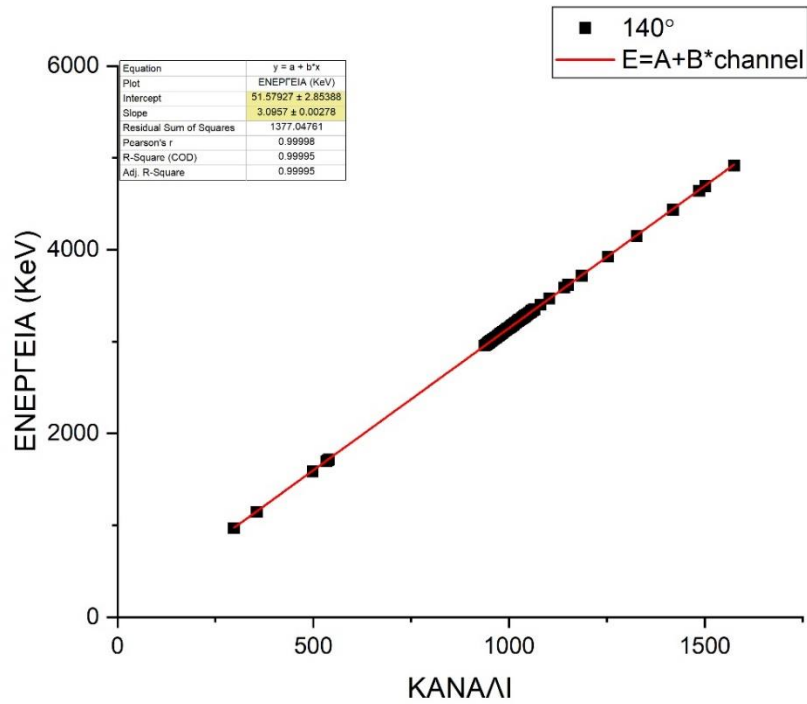
Γράφημα 3.1 : Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή στις 170°



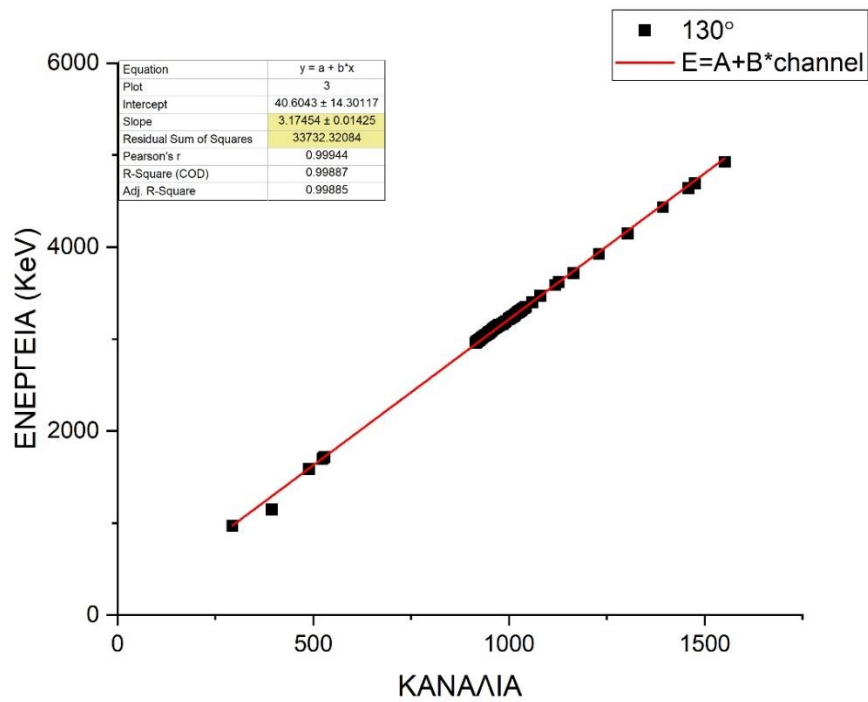
Γράφημα 3.2: Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή στις 160°



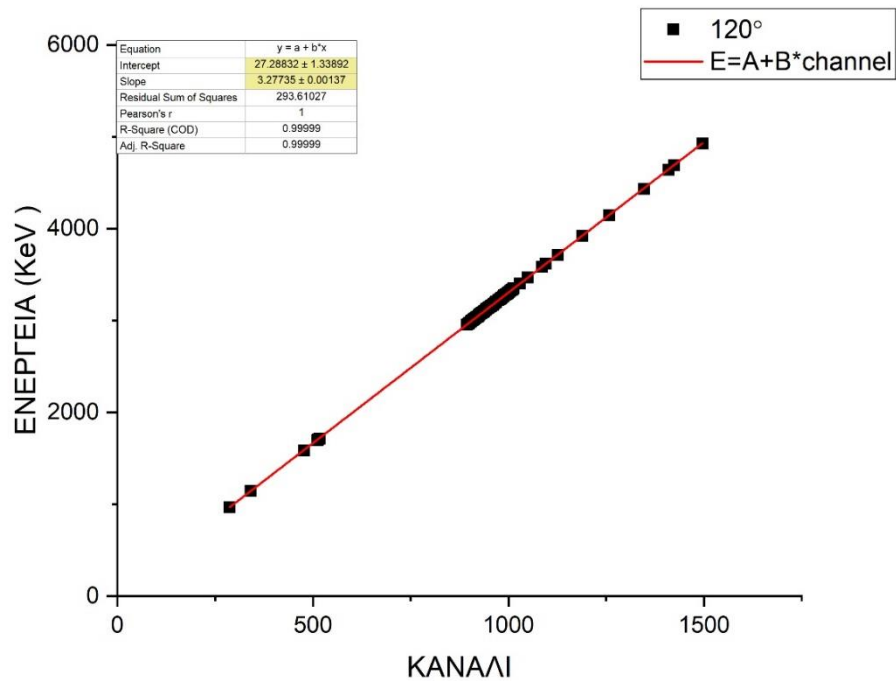
Γράφημα 3.3: Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή στις 150°



Γράφημα 3.4 : Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή στις 140°



Γράφημα 3.5: Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή στις 130°



Γράφημα 3.6: Ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή στις 120°

Πίνακας 3: Τιμές των παραμέτρων A,B για κάθε ανιχνευτή

ΓΩΝΙΕΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ A		ΣΥΝΤΕΣΤΗΣ B (KeV/ch)	
	A	δ_A	B	δ_B
170	48,5	1,5	3,1189	0,0014
160	45,06	1,07	2,8494	0,0009
150	48,0	1,4	2,8006	0,0012
140	51,6	2,8	3,096	0,003
130	41	14	3,175	0,014
120	27,3	1,3	3,2774	0,0014

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται το εξαιρετικό fit, αφού ακόμα και στο διάγραμμα των 130 μοιρών όπου στις αρχικές μετρήσεις παρατηρείται ένα μικρό gain shift τα αποτελέσματα είναι εξαιρετικά ικανοποιητικά.

Τέλος, αφού έχει γίνει η βαθμονόμηση του ADC, μπορεί να υπολογιστεί και η τιμή του ripple της δέσμης. Έχει ήδη εκτιμηθεί με ασφάλεια παραπάνω, ότι το ripple δεν μπορεί να ξεπερνάει την ενέργεια που αντιστοιχεί σε 2 κανάλια. Όμως για την πραγματοποίηση της ενεργειακής

βαθμονόμησης του επιταχυντή (machine calibration) χρησιμοποιήθηκαν 3 ανιχνευτές (γωνίες), επομένως βγάζοντας το μέσο όρο των τριών γωνιών καταλήγουμε στην μέση ενέργεια ανά κανάλι για τους τρεις ανιχνευτές η οποία είναι $\overline{En/ch} \sim 2,9$. Άρα χρησιμοποιώντας την μέση ενέργεια ανά κανάλι καταλήγουμε ότι το ripple της δέσμης είναι $\sim 5,8$ keV.

3.3 Προσδιορισμός της διαφορικής ενεργού διατομής

3.3.1 Σχετική μέθοδος προσδιορισμού ενεργών διατομών

Ο προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών ενός στοιχείου μέσω απόλυτης μέτρησης δίνεται μέσω της σχέσης 3.2:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta} = \frac{Y}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N_t} \quad (3.2)$$

Όπου τα μεγέθη που εμφανίζονται στην παραπάνω σχέση είναι τα εξής

- E : Η ενέργεια της δέσμης στο μέσο του πάχους του στόχου
- θ : Η γωνία σκέδασης
- Y : Ο συνολικός αριθμός γεγονότων στην κορυφή του υπό μελέτη στοιχείου, όπως αυτά εμφανίζονται στο πειραματικό φάσμα
- ε : Η απόδοση του ανιχνευτή (για ανιχνευτές SSB η κβαντική απόδοση θεωρείται ίση με 1)
- Q : Ο αριθμός των σωματιδίων που προσκρούουν στον στόχο
- Ω : Η στερεά γωνία του ανιχνευτή [sr]
- N_t : Ο αριθμός του υπό μελέτη στοιχείου στο στόχο [atoms/cm²]

Όμως ο προσδιορισμός του γινομένου $Q \cdot \Omega$ εισάγει ένα σημαντικό σφάλμα στην τελική τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής, καθώς είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η σχετική μέθοδος προσδιορισμού της διαφορικής ενεργού διατομής του φυσικού πυριτίου [1]. Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται τις διαφορικές ενεργές διατομές της ελαστικής σκέδασης των πρωτονίων στον χρυσό, αφού στην υπό μελέτη ενεργειακή περιοχή (3-5 MeV) ακολουθούν τη σχέση του Rutherford και επομένως προσδιορίζονται αναλυτικά χωρίς σφάλμα. Η σχέση με την οποία γίνεται ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής (3.5) προκύπτει από την διαίρεση κατά μέλη των παρακάτω σχέσεων.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{natSi} = \frac{Y_{natSi}}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N_{natSi}} \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{Au} = \frac{Y_{Au}}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega \cdot N_{Au}} \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{natSi} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{Au} \times \left(\frac{Y_{natSi}}{Y_{Au}}\right) \times \left(\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}\right) \quad (3.5)$$

Όπου

- E : Η ενέργεια της δέσμης στο μέσο του πάχους του στόχου
- E' : Η ενέργεια στην επιφάνεια του στόχου
- θ : Η γωνία σκέδασης
- $\left(\frac{Y_{natSi}}{Y_{Au}}\right)$: Ο λόγος των γεγονότων της κορυφής του πυριτίου προς του χρυσού όπως αυτά εμφανίζονται στο πειραματικό φάσμα
- $\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}$: Ο λόγος του συνολικού αριθμού ατόμων χρυσού προς τον αντίστοιχο αριθμό ατόμων πυριτίου που υπάρχουν στον στόχο

3.3.2 Υπολογισμός διαφορικής ενεργού διατομής χρυσού κατά Rutherford

Στο ενεργειακό εύρος που μελετάται, η ενεργός διατομή του χρυσού ακολουθεί τη σχέση του Rutherford. Έτσι ο υπολογισμός του όρου $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta}^{Au}$ μπορεί να γίνει αναλυτικά μέσω της παρακάτω σχέσης για το σύστημα του εργαστηρίου.

$$\left(\frac{d\sigma_R}{d\Omega}\right)_{E,\theta} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right)^2 \frac{4}{\sin^4 \theta} \frac{\left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin \theta\right)^2} + \cos \theta \right\}^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin \theta\right)^2}} \quad (3.6)$$

Πειραματικά δεδομένα έχουν αποδείξει ότι η χρήση της παραπάνω σχέσης οδηγεί σε μια μικρή υπερεκτίμηση της τιμής της διαφορικής ενεργού διατομής για στοιχεία με μεγάλο Z [12]. Αυτές

οι μικρές αποκλίσεις οφείλονται στο φαινόμενο της ηλεκτρονιακής θωράκισης (screening effect).. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ενεργό φορτίο του πυρήνα (effective charge Z_{eff}) να μειώνεται και η σκέδαση τής δέσμης να πραγματοποιείται από μικρότερο δυναμικό από αυτό που υπολογίζεται μέσω της σχέσης του Rutherford. Για την πραγματοποίηση της διόρθωσης για το screening πρέπει να εισαχθεί κάποιος διορθωτικός παράγοντας (F). Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο φαινομενολογικός παράγοντας L'Ecuyer, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

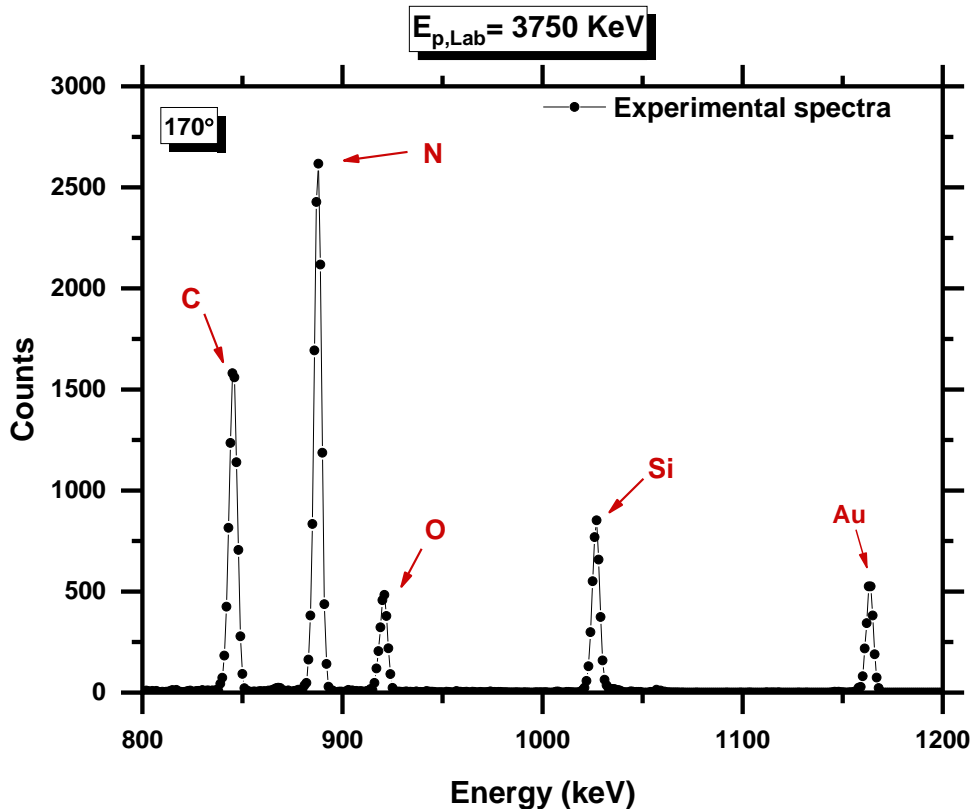
$$F_{L'Ecuyer} = 1 - \frac{0.4873 Z_1 Z_2^{4/3}}{E_{cm}} \quad (4.7)$$

Επομένως οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών του χρυσού υπολογίστηκαν από τη σχέση

$$\left(\frac{d\sigma_{Au}}{d\Omega}\right)_{E,\theta} = F_{L'Ecuyer} \left(\frac{d\sigma_R}{d\Omega}\right)_{E,\theta} \quad (5.8)$$

3.3.3 Ολοκλήρωση κορυφών

Η εύρεση των γεγονότων (counts) που αντιστοιχούν στην ελαστική σκέδαση του πυριτίου ($Y_{nat_{Si}}$) και του χρυσού (Y_{Au}), έγκειται στην ολοκλήρωση των αντίστοιχων κορυφών των πειραματικών φασμάτων. Ο στόχος που ακτινοβολήθηκε περιείχε χρυσό, πυρίτιο, άζωτο, οξυγόνο και άνθρακα. Τα δύο τελευταία δεν εμπεριέχονταν κατά την κατασκευή του στόχου αλλά εισήλθαν σε αυτόν κατά τη διαδικασία της εξάχνωσης του χρυσού. Έτσι στα πειραματικά φάσματα που λήφθηκαν είναι διακριτές πέντε κορυφές. Από την κινηματική κάθε αντίδρασης έγινε ταυτοποίηση κάθε κορυφής χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα, αφού σε όλο το ενεργειακό εύρος οι κορυφές δεν είχαν επικαλύψεις μεταξύ τους. Η ολοκλήρωση των counts κάθε κορυφής έγινε με την χρήση του προγράμματος SPECTRW [13], αφού είχε προηγηθεί η αφαίρεση της συνεισφοράς του υποβάθρου (background). Το στατιστικό σφάλμα για τα γεγονότα στις κορυφές του χρυσού κυμαίνεται από ~1,4 έως 4,4 %, ενώ το αντίστοιχο σφάλμα για τις κορυφές του πυριτίου από ~0,8 έως 3,8 %. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό φάσμα πρωτονίων ενέργειας $E_p = 3750 \text{ KeV}$ μαζί με την αναγνώριση των κορυφών. Όλα τα φάσματα που ελήφθησαν είχαν τις ίδιες σχετικές θέσεις κορυφών και η συνεισφορά του υποβάθρου που παρατηρείται σε όλα τα φάσματα είναι πολύ μικρή



Εικόνα 3.2: Πειραματικό φάσμα πρωτονίων ενέργειας 3750 KeV σε γωνία 170°, μαζί με την αναγνώριση κορυφών

3.3.4 Υπολογισμός λόγου παχών $\left(\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}\right)$

Για τον προσδιορισμό του λόγου του συνολικού αριθμού ατόμων χρυσού προς τον αντίστοιχο αριθμό ατόμων πυριτίου που υπάρχουν στον στόχο $\left(\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}\right)$ πραγματοποιήθηκαν δύο συμπληρωματικές μετρήσεις, με ενέργειες δέσμης (E_p) 980 και 1160 keV αντίστοιχα. Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν εκ νέου μετρήσεις και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια ενέργεια η οποία είχε ήδη μετρηθεί για τον προσδιορισμό των διαφορικών ενεργών διατομών του πυριτίου, είναι ότι αφενός μεν ότι στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε (3-5 MeV) δεν υπήρχαν αξιολογημένα πειραματικά δεδομένα (evaluated data), αφετέρου δε οι μετρήσεις χαμηλής ενέργειας παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία στον προσδιορισμό του πάχους λόγω της αύξησης της ισχύος ανάσχεσης των πρωτονίων μέσα στο στόχο. Επιπλέον, οι δύο αυτές ενέργειες είναι επιλεγμένες κατάλληλα ώστε να είναι 'μακριά' από συντονισμούς για να μην υπάρχουν απότομες μεταβολές στις ενεργές διαφορικές διατομές των στοιχείων του στόχου.

Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό του πάχους του στόχου, ήταν απαραίτητη η ανάλυσή του μέσω μιας διαδικασίας που βασίζεται στην χρήση του κώδικα SIMNRA και των πειραματικών φασμάτων. Τα πειραματικά φάσματα που αναλύθηκαν ήταν δέκα (980 και 1160 keV σε γωνίες 130°, 140°, 150°, 160°, 170°), αφού τα δύο φάσματα στις 120° ήταν αδύνατο να αναλυθούν καθώς εμφάνιζαν επικαλύψεις στις κορυφές.

Κύριος στόχος λοιπόν, αυτής της ανάλυσης ήταν η δημιουργία κατάλληλου προφίλ στόχου ώστε μετά την προσομοίωση με το πρόγραμμα SIMNRA να αναπαράγονται τα πειραματικά φάσματα. Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης εκτός από τη δημιουργία του στόχου είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάποιων επιπλέον παραμέτρων, όπως το είδος και η ενέργεια της δέσμης, η γωνία σκέδασης των πρωτονίων, η βαθμονόμηση του επιταχυντή και η ενέργεια ανά κανάλι (keV/ch), το φορτίο που προσπίπτει στον στόχο (particles*sr), η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή (detector resolution) και οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών για κάθε στοιχείο του στόχου. Επιπλέον, ο κώδικας του προγράμματος SIMNRA μπορεί να συμπεριλάβει και επιπλέον παραμέτρους, όπως φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης (multiple scattering), δυνατότητα επιλογής δεδομένων για την ισχύ ανάσχεσης (stopping power), και διάφορα μοντέλα για τον διασκεδασμό (straggling). Ωστόσο, στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκαν το μοντέλο των Chu και Yang για τον διασκεδασμό [14,15], ενώ η ισχύς ανάσχεσης υπολογίστηκε από τον κώδικα SRIM[16]. Οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης από τον χρυσό θεωρήθηκε ότι ακολουθούν την εξίσωση Rutherford 3.6. Ενώ, για τις τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης του πυριτίου και των άλλων στοιχείων του στόχου επιλέχθηκαν αξιολογημένα δεδομένα (evaluated) από το SigmaCalc [7]

Μετά την εισαγωγή των ζητούμενων δεδομένων από το πρόγραμμα, υπήρχαν δυο άγνωστες παράμετροι, ο ζητούμενος λόγος των ατόμων του πυριτίου προς αυτόν του χρυσού και το φορτίο που προσπίπτει στον στόχο. Για την εύρεση των δύο άγνωστων παραμέτρων ακολουθήθηκε η παρακάτω τακτική. Αρχικά διατηρήθηκε σταθερή η ποσότητα του χρυσού και μεταβλήθηκε το φορτίο που προσκρούει στον στόχο, μέχρις ότου ο αριθμός των counts του χρυσού στο πειραματικό και στο προσομοιωμένο φάσμα να είναι ίδιος. Στην συνέχεια, κρατώντας σταθερό το φορτίο που βρέθηκε, έγινε αλλαγή στη σύσταση του στόχου έως ότου αναπαραχθεί το πειραματικό φάσμα ικανοποιητικά. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα δέκα φάσματα που μελετήθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόκλιση των γεγονότων σε κάθε κορυφή, μεταξύ των δεδομένων του πειράματος και της προσομοίωσης δεν ξεπέρασε το 3% σε κανένα από τα φάσματα που αναλύθηκαν. Στις εικόνες 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα πειραματικά φάσματα μαζί με τα προσομοιωμένα. Επίσης στον Πίνακα 3 φαίνονται ο αριθμός ατόμων του χρυσού και του πυριτίου στον στόχο όπως προέκυψαν από την προσομοίωση.

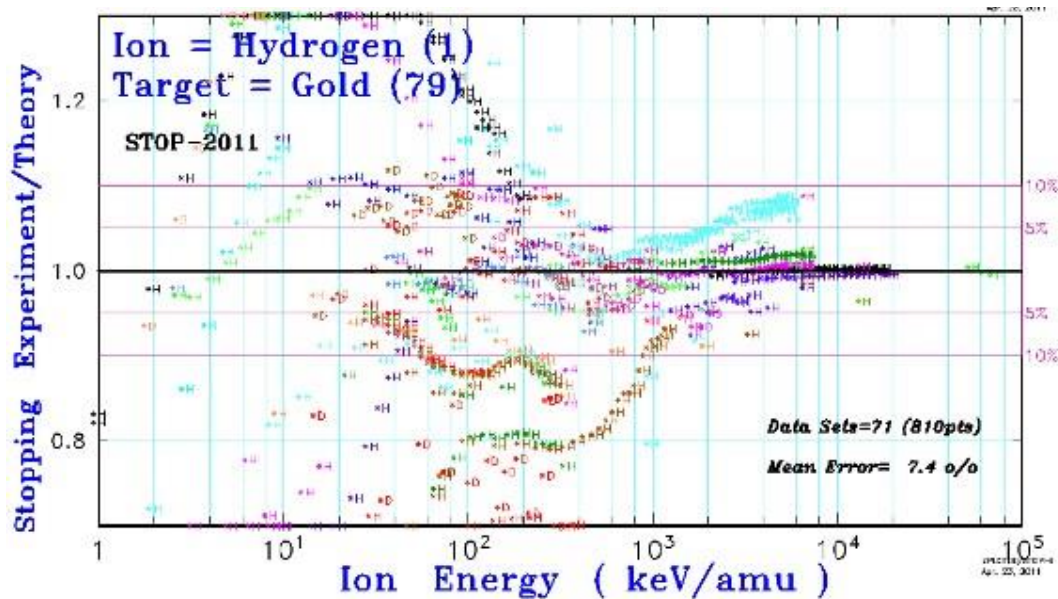
Η τελική τιμή του λόγου $\left(\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}\right)$ που βρέθηκε μετά τις προσομοιώσεις, προκύπτει από τον λόγο του αριθμού ατόμων του χρυσού προς τη μέση τιμή του αριθμού ατόμων πυριτίου, με το αντίστοιχο στατιστικό σφάλμα.

$$\left(\frac{N_{Au}}{N_{natSi}}\right) = 0,0426 \pm 0,0012$$

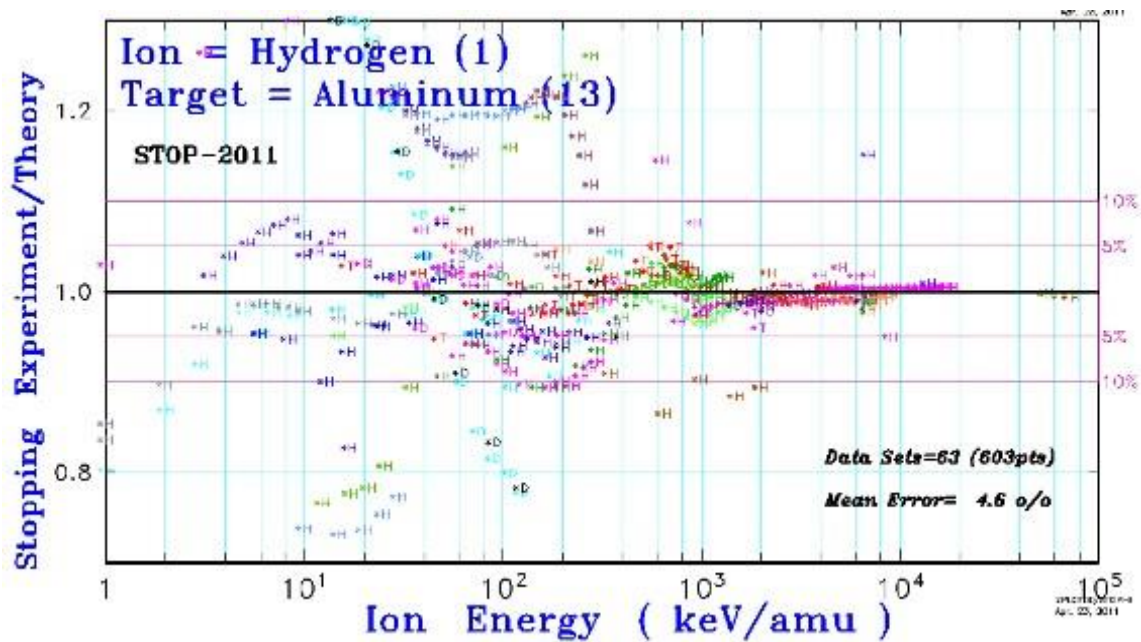
Το σχετικό σφάλμα δεν ξεπερνά το 3%. Σε αυτό το σφάλμα δεν συμπεριλαμβάνονται τα συστηματικά σφάλματα τα οποία οφείλονται κυρίως στην ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου ισχύς ανάσχεσης που χρησιμοποιήθηκε. Η ακρίβεια των υπολογισμών του κώδικα SRIM μπορεί να εκτιμηθεί από τη σύγκρισή τους με υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα τόσο για το πυρίτιο όσο και για το χρυσό. Στην περίπτωση του πυριτίου παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα και έτσι πραγματοποιήθηκε σύγκριση και με το αλουμίνιο, το οποίο είναι γειτονικό του στοιχείο και δεν αναμένονται μεγάλες αποκλίσεις από την ισχύ ανάσχεσης του πυριτίου. Η απόκλιση των υπολογισμών του κώδικα SRIM από τα πειραματικά

δεδομένα στο ενεργειακό εύρος που μελετάται (3-5 MeV) δεν ξεπερνά το 10% στην περίπτωση του χρυσού και του αλουμινίου. Στο πυρίτιο δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για ενέργειες υψηλότερες από 1 MeV, ωστόσο η απόκλιση στα 980 keV είναι ~3%.

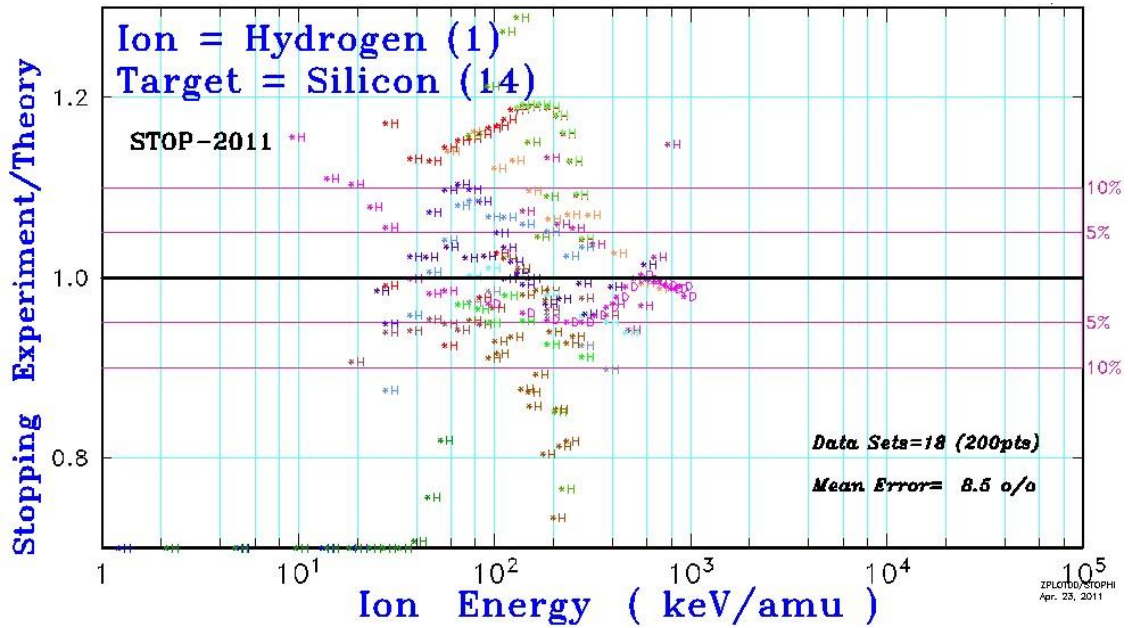
α)



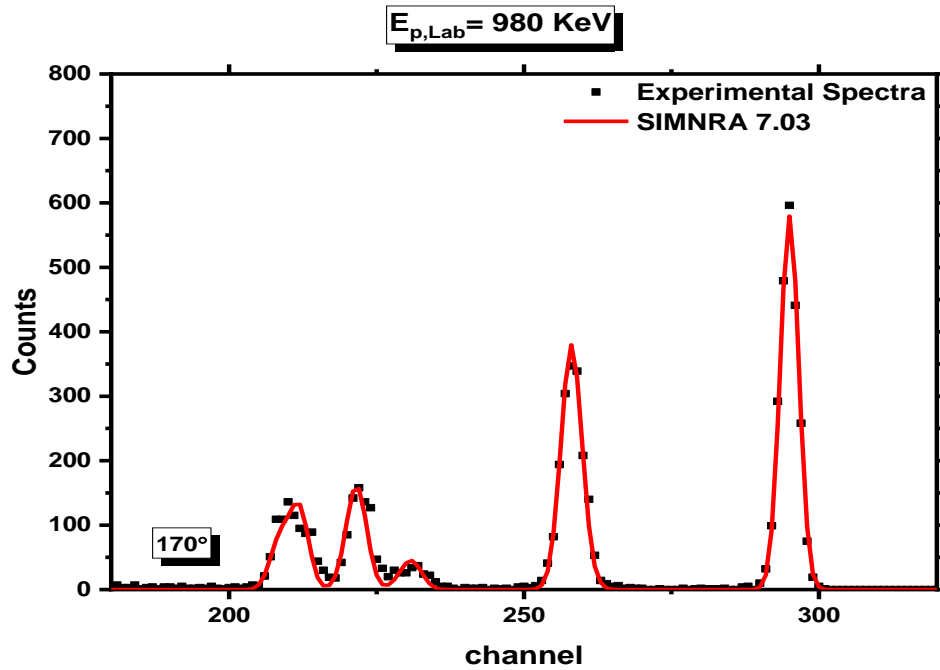
β)



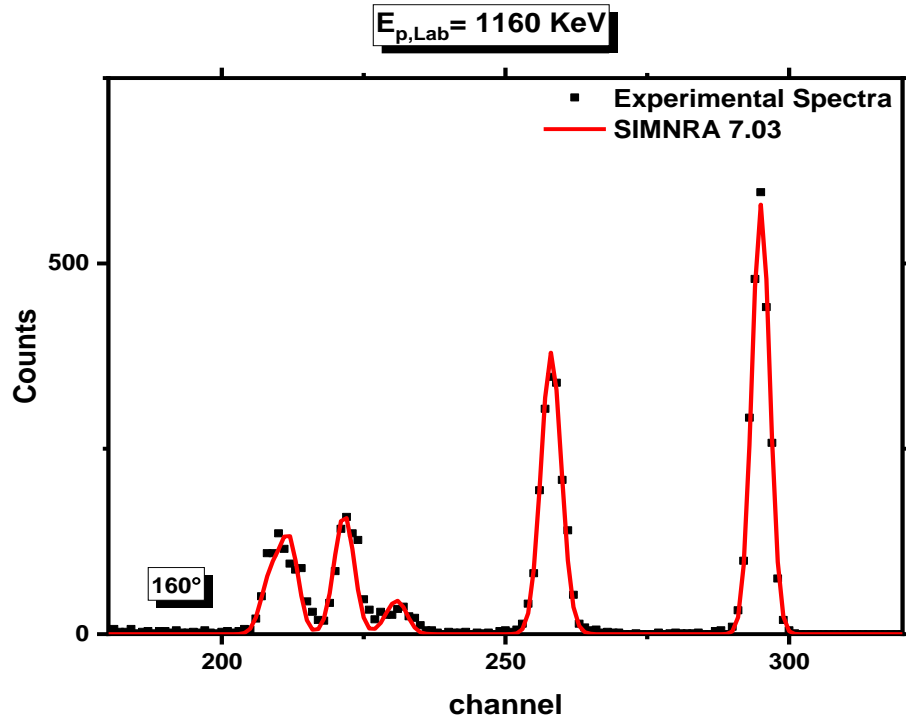
γ)



Εικόνα 3.2: Γραφική παράσταση του λόγου της πειραματικής προς την θεωρητικά υπολογιζόμενη ισχύ ανάσχεσης για το χρυσό (α), το αλουμίνιο (β) και το πυρίτιο (γ)



Γράφημα 3.7 Πειραματικό και προσομοιωμένο φάσμα σε ενέργεια $E_p=980 \text{ keV}$ και γωνία 170° . Με μαύρα σημεία συμβολίζεται το πειραματικό φάσμα, ενώ με κόκκινο χρώμα το προσομοιωμένο φάσμα



Γράφημα 3.8: Πειραματικό και προσομοιωμένο φάσμα σε ενέργεια $E_p=1160$ KeV και γωνία 160° . Με μαύρα σημεία συμβολίζεται το πειραματικό φάσμα, ενώ με κόκκινο χρώμα το προσομοιωμένο φάσμα.

Πίνακας 4: Ο λόγος του αριθμού ατόμων χρυσού προς τον αριθμό ατόμων πυριτίου που υπάρχουν στον στόχο, όπως προέκυψαν από κάθε προσομείωση

Γωνία	Ενέργεια (KeV)	$\left(\frac{N_{Au}}{N_{nat_{Si}}} \right)$
170	980	0.0429
	1160	0.0440
160	980	0.0410
	1160	0.0403
150	980	0.0433
	1160	0.0418
140	980	0.0433
	1160	0.0441
130	980	0.0422
	1660	0.0432

3.3.5 Υπολογισμός ενέργειας της δέσμης E' , E

Η ενέργεια της δέσμης στην επιφάνεια του στόχου E' , είναι η ενέργεια που προκύπτει μετά από την βαθμονόμηση του επιταχυντή.

$$E' = E_{nominal} + offset \quad (3.9)$$

Στην περίπτωση που το πάχος του χρυσού που είχε εξαχνωθεί ήταν μεγαλύτερο θα έπρεπε να αφαιρεθεί η απώλεια ενέργειας στο μέσο του πάχους του στρώματος του χρυσού. Στην προκειμένη περίπτωση όμως το στρώμα του χρυσού που εξαχνώθηκε ήταν υπέρλεπτο και συνεπώς, η απώλεια ενέργειας είναι αμελητέα, άρα μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ακριβής η παραδοχή ότι η τιμή της ενέργειας στη μέση του πάχους του χρυσού είναι η ίδια ενέργεια με την ενέργεια της δέσμης στην επιφάνεια του στόχου.

$$E' \cong E_{nominal} + 3 \text{ KeV}$$

Η ενέργεια, E στο μέσο του πάχους του στόχου, καθώς και το σφάλμα της δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [17]

$$E = E_{nominal} + offset - \Delta E_{Au} - \frac{\Delta E_{Si_3N_4}}{2} \quad (3.10)$$

$$dE = \sqrt{(ripple)^2 + (straggling)^2} \quad (3.11)$$

Όπου, οι δύο πρώτοι όροι της σχέσης 3.9 ($E_{nominal} + offset$) είναι η ενέργεια της δέσμης στην επιφάνεια του στόχου E' . ΔE_{Au} η απώλεια ενέργειας της δέσμης στο στρώμα του χρυσού και $\frac{\Delta E_{Si_3N_4}}{2}$ η απώλεια ενέργειας της δέσμης στο μέσο του πάχους του στόχου.

Η απώλεια ενέργειας στο μέσο του πάχους του στόχου καθώς επίσης και το straggling της δέσμης υπολογίστηκαν μέσω του κώδικα SIMNRA. Οι τιμές τις απώλειες ενέργειας της δέσμης ($\Delta E_{Au} - \frac{\Delta E_{Si_3N_4}}{2}$) κυμαίνονταν από 0,88 έως 1,32 KeV στα 5 MeV και 3 MeV αντίστοιχα. Ενώ η τιμή του straggling της δέσμης μέσα στο στόχο βρέθηκε 2,325 (keV FWHM) και παρέμενε πρακτικά σταθερή σε όλο το ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε.

Για να γίνει η στρογγυλοποίηση της τιμής της ενέργειας αρχικά υπολογίστηκε το σφάλμα της και η στρογγυλοποίηση έγινε τελικά στο πρώτο σημαντικό ψηφίο αυτού.

Έτσι η ενέργεια E και το σφάλμα της dE είναι

$$dE = 6 \text{ keV}$$

$$E \cong E_{nominal} + 2 \text{ keV}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αποτελέσματα- Έλεγχος αξιοπιστίας Benchmarking

4.1 Αποτελέσματα διαφορικής ενεργού διατομής

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από φυσικό πυρίτιο που προσδιορίστηκαν με την διαδικασία που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ελαστική σκέδαση $^{nat}Si(p,p_0)^{nat}Si$ μελετήθηκε σε γωνίες 120°, 130°, 140°, 150°, 160°, 170°, στο ενεργειακό εύρος 3 ως 5 MeV με μεταβλητό βήμα από 10 έως 30 KeV. Οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών μαζί με τα σφάλματα τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 και παριστάνονται γραφικά στα Γραφήματα 4.1 A– ΣΤ. Η στρογγυλοποίηση των τιμών έχει γίνει στο πρώτο (ή το δεύτερο) σημαντικό ψηφίο του σφάλματος, όπως ορίζεται από τη θεωρία σφαλμάτων.

Όλα τα σφάλματα που αναγράφονται στον πίνακα, αντιστοιχούν στα στατιστικά σφάλματα και υπολογίστηκαν με βάση τον κανόνα διάδοσης σφαλμάτων. Το σχετικό σφάλμα δεν ξεπερνά σε καμία μέτρηση το 5.5% και οφείλεται τόσο στον προσδιορισμό του πάχους του στόχου, όσο και στο σφάλμα ολοκλήρωσης των κορυφών του πειραματικού φάσματος. Οι συστηματικές αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στη μέτρηση, οφείλονται αποκλειστικά στα μοντέλα για την ισχύ ανάσχεσης που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του πάχους του στόχου και έχουν συζητηθεί παραπάνω.

Πίνακας 5: Τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων σε πυρίτιο για γωνίες 120°, 130°, 140°, 150°, 160°, 170°, στο ενεργειακό εύρος 3 ως 5 MeV

$E_{p,Lab}$ (keV)	$\delta E_{p,Lab}$ (keV)	$\sigma, \delta\sigma$ (mb/sr)											
		120°	130°	140°	150°	160°	170°						
3002	6.0	58.4	2.8	51.1	2.2	46.7	2.3	49.9	2.6	53.5	2.3	57.6	2.5
3012	6.0	59.0	2.7	47.7	2.1	49.4	2.4	54.6	2.9	56.1	2.4	59	2.5
3022	6.0	56.6	2.6	47.1	2	46.4	2.2	56.7	2.9	62.2	2.6	63.8	2.6
3032	6.0	58.4	2.7	48.5	2.1	50.7	2.5	48.1	2.6	62.9	2.7	68.3	2.9
3042	6.0	54.6	2.6	48.2	2.1	50.6	2.5	52.4	2.7	66.8	2.9	75	3
3052	6.0	57.3	2.6	49.2	2.1	49.4	2.4	56.2	2.9	63.5	2.7	71.8	3.0
3062	6.0	57.3	2.8	47.0	2.0	49.5	2.5	53.9	2.8	67.2	2.9	74	3
3072	6.0	51.8	2.4	45.9	1.9	51.3	2.5	58.9	3	70.6	3.0	81	3
3082	6.0	53.9	2.5	47.2	2.0	49.6	2.5	56.8	3	73	3	87	4
3092	6.0	51.4	2.4	43.3	1.9	47.0	2.3	63	3	86	4	98	4
3102	6.0	53.1	2.5	37.1	1.6	49.3	2.3	79	4	119	5	145	6
3112	6.0	35.6	1.7	42.3	1.8	72	3	111	4	156	6	196	8
3122	6.0	42.2	2.0	51.5	2.1	65.9	3.0	81	4	85	3	92	4

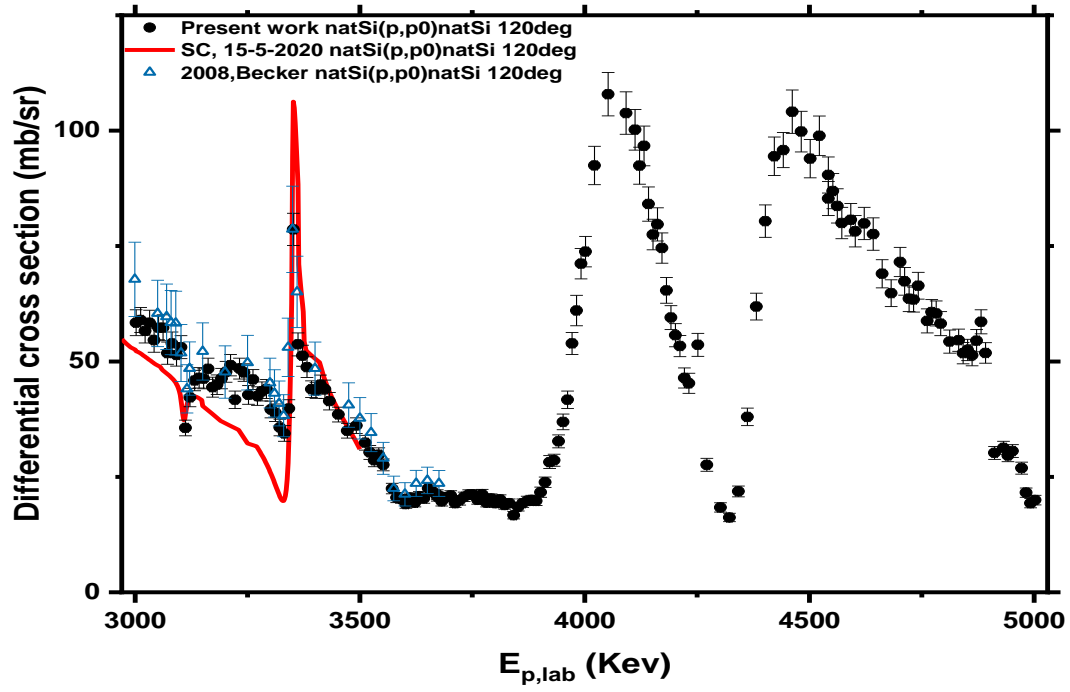
3132	6.0	45.9	2.2	51.7	2.2	64	3	68	3	74	3	77	3
3142	6.0	46.5	2.2	51.6	2.1	61.4	2.8	68	3	69.8	2.9	74	3
3152	6.0	46.2	2.1	49.6	2.0	57.1	2.7	68	3	73.7	3	82	3
3162	6.0	48.4	2.3	49.1	2.0	57.0	2.7	65	3	76	3	77	3
3172	6.0	44.4	2.2	48.6	2.1	57.2	2.7	62	3	74	3	76	3
3182	6.0	45.0	2.1	51.6	2.1	55.7	2.6	68	3	71.6	3	75	3
3192	6.0	46.3	2.2	50.4	2.1	54.4	2.5	67	3	70.7	2.9	71.6	2.9
3202	6.0	47.8	2.3	51.1	2.2	57.6	2.7	65	3	78	3	79	3
3212	6.0	49.2	2.3	48.1	2.0	57.3	2.7	62	3	72.4	3.0	79	3
3222	6.0	41.7	1.9	49.0	2.0	59.4	2.7	64	3	71.4	2.9	80	3
3232	6.0	48.5	2.3	50.1	2.1	56.1	2.6	65	3	73.7	3.0	77	3
3242	6.0	47.6	1.9	48.1	2.0	59.7	2.7	63	3	77	3	80	3
3252	6.0	42.7	2.0	47.7	2.0	59.5	2.8	65	3	76	3	79	3
3262	6.0	46.1	2.2	49.3	2.0	57.5	2.6	69	3	72.8	2.9	81	3
3272	6.0	42.5	2.0	43.5	1.8	55.8	2.6	69	3	71.7	2.9	81	3
3282	6.0	43.5	2.1	46.3	1.9	56.1	2.6	66	3	72.5	3.0	76	3
3292	6.0	44.0	2.1	46.5	1.9	53.3	2.4	66	3	76	3	73.7	2.9
3302	6.0	39.6	1.8	42.7	1.7	57.3	2.6	71	3	77	3	83	3
3312	6.0	38.9	1.9	44.4	1.9	55.0	2.5	69	3	82	3	87	4
3322	6.0	35.7	1.8	43.1	1.8	57.9	2.7	74	4	81	3	92	4
3332	6.0	34.4	1.7	45.2	1.9	68	3	84	4	86	3	103	4
3342	6.0	39.8	1.9	57.3	2.3	81	4	96	4	111	4	125	5
3352	6.0	79	3	71.6	2.9	63.2	2.9	49.9	2.5	35.4	1.6	22.4	1.1
3362	6.0	53.7	2.5	50.8	2.1	50.5	2.4	42.1	2.2	41.0	1.8	38.2	1.7
3372	6.0	51.2	2.3	45.1	1.8	46.0	2.1	48.6	2.4	47.4	1.9	48.1	2.0
3382	6.0	48.8	2.2	45.4	1.9	44.9	2.1	46.3	2.3	51.9	2.2	50.3	2.1
3392	6.0	44.0	1.8	44.4	1.7	48.3	2.0	48.4	2.2	52.4	2.0	55.0	2.1
3402	6.0	43.7	1.7	42.2	1.5	46.7	1.9	51.3	2.1	52.4	1.9	54.7	2.0
3412	6.0	45.0	2.1	45.1	1.9	44.6	2.1	49.6	2.5	51.7	2.2	56.4	2.4
3422	6.0	44.0	2.0	38.6	1.6	44.9	2.1	48.4	2.4	56.7	2.4	57.7	2.4
3432	6.0	41.4	1.9	40.1	1.7	42.8	2.0	51.3	2.6	53.6	2.2	57.8	2.4
3452	6.0	38.5	1.6	39.2	1.5	42.8	1.9	49.2	2.3	51.8	2.0	53.4	2.1
3472	6.0	35.0	1.6	39.0	1.6	38.9	1.8	46.6	2.2	52.9	2.1	52.9	2.1
3492	6.0	36.1	1.7	34.9	1.5	41.4	2.0	47.0	2.4	55.8	2.4	58.2	2.4
3512	6.0	32.4	1.6	32.4	1.4	40.0	2.0	41.0	2.1	50.4	2.2	52.3	2.2
3522	6.0	30.3	1.5	33.5	1.5	35.5	1.7	40.0	2.1	45.0	1.9	48.6	2.1
3532	6.0	28.6	1.4	29.3	1.3	29.6	1.3	38.1	2.0	44.4	1.9	46.7	1.9
3542	6.0	29.8	1.5	28.3	1.3	31.0	1.6	35.2	1.9	42.2	1.8	45.4	2.0
3552	6.0	27.6	1.3	24.2	1.1	29.0	1.4	34.2	1.8	41.2	1.7	43.5	1.8
3572	6.0	22.5	1.1	23.2	1.0	27.7	1.4	33.6	1.8	40.5	1.7	41.2	1.8
3582	6.0	20.5	1.1	21.7	1.0	29.1	1.5	34.9	1.8	42.0	1.8	46.4	2.0

3592	6.0	20.2	0.9	23.0	1.0	29.9	1.4	38.9	1.8	46.5	1.8	54.1	2.1
3602	6.0	19.1	0.9	23.8	1.0	32.5	1.4	41.2	1.5	50.6	1.9	58.1	2.2
3612	6.0	20.5	1.0	24.5	1.0	36.0	1.6	44.5	2.1	57.5	2.2	63.2	2.4
3622	6.0	19.4	0.9	26.4	1.1	38.0	1.7	48.7	2.2	61.2	2.4	65.3	2.5
3632	6.0	20.8	1.0	26.7	1.1	40.4	1.7	50.5	2.3	61.1	2.3	66.6	2.5
3642	6.0	20.3	1.0	27.9	1.1	40.6	1.8	52.4	2.4	63.2	2.5	70.0	2.7
3652	6.0	22.5	1.1	28.3	1.2	42.2	1.9	56.3	2.6	65.3	2.5	70.9	2.8
3662	6.0	21.8	1.1	27.9	1.2	40.5	1.8	51.1	2.4	62.6	2.5	70.2	2.7
3672	6.0	20.8	1.0	28.5	1.2	37.9	1.7	52.1	2.4	61.4	2.4	66.6	2.6
3672	6.0	21.2	1.0	27.8	1.1	39.3	1.7	52.4	2.4	61.4	2.4	65.4	2.5
3682	6.0	19.7	1.0	28.0	1.2	36.8	1.6	47.8	2.2	60.2	2.3	63.5	2.4
3692	6.0	20.6	1.0	27.6	1.1	39.7	1.8	52.3	2.5	58.5	2.3	64.9	2.5
3702	6.0	21.0	1.0	27.3	1.1	37.3	1.7	43.5	2.1	49.6	2.0	56.9	2.2
3712	6.0	19.3	0.9	23.8	1.0	33.8	1.5	40.1	1.9	47.2	1.9	49.9	1.9
3722	6.0	19.9	1.0	25.0	1.0	31.5	1.4	39.8	1.9	38.5	1.5	39.3	1.6
3732	6.0	20.7	1.0	24.3	1.0	30.7	1.4	36.8	1.8	37.2	1.5	38.4	1.6
3742	6.0	21.1	1.1	24.1	1.0	32.5	1.5	36.4	1.7	38.9	1.6	44.9	1.8
3752	6.0	21.2	1.0	25.9	1.1	32.0	1.5	36.4	1.7	41.3	1.7	42.3	1.7
3762	6.0	20.0	0.9	23.7	1.0	32.7	1.5	39.5	1.9	44.2	1.7	45.2	1.8
3772	6.0	21.3	1.0	24.8	1.0	36.1	1.6	43.6	2.0	52.3	2.1	54.1	2.1
3782	6.0	19.4	0.9	27.2	1.1	39.2	1.8	41.9	2.0	50.5	2.0	57.5	2.3
3792	6.0	20.3	1.0	27.3	1.1	37.8	1.6	48.1	2.3	55.0	2.1	58.5	2.3
3802	6.0	19.3	0.9	25.9	1.0	38.5	1.6	46.1	2.0	56.7	2.2	62.4	2.4
3812	6.0	20.1	1.0	26.6	1.1	40.0	1.8	52.1	2.5	58.2	2.3	62.5	2.4
3822	6.0	18.9	0.9	28.3	1.2	41.5	1.8	47.9	2.2	59.7	2.3	65.5	2.5
3832	6.0	19.3	0.9	28.5	1.2	42.0	1.8	54.8	2.5	60.0	2.3	71.1	2.8
3842	6.0	16.7	0.8	26.9	1.1	39.7	1.7	50.7	2.2	59.1	2.3	66.3	2.5
3852	6.0	18.5	0.9	27.5	1.1	44.6	1.9	56.3	2.6	62.3	2.4	69.0	2.6
3862	6.0	19.3	0.9	30.0	1.2	44.0	1.9	54.7	2.4	64.7	2.5	72.7	2.8
3872	6.0	19.8	1.0	31.7	1.3	46.9	2.1	58.0	2.7	69.5	2.7	76.4	3
3882	6.0	20.0	1.0	31.8	1.3	49.5	2.2	62.1	2.8	70.2	2.7	77.8	3
3892	6.0	19.8	1.0	30.2	1.2	47.8	2.1	57.6	2.6	70.0	2.8	81	3
3902	6.0	21.7	1.1	37.2	1.5	55.2	2.4	67	3	80	3	88	3
3912	6.0	23.8	1.1	39.0	1.6	57.1	2.4	76	3	87	3	93	4
3922	6.0	28.2	1.4	42.4	1.8	59.6	2.7	78	4	85	3	91	4
3932	6.0	28.6	1.3	48.6	1.9	68.5	3.0	83	4	94	4	102	4
3942	6.0	32.7	1.4	48.8	1.9	71.5	3.0	91	4	98	4	105	4
3952	6.0	36.9	1.7	55.6	2.2	76	3	97	4	107	4	111	4
3962	6.0	41.7	1.9	62.4	2.4	90	4	112	5	112	4	126	5
3972	6.0	53.9	2.4	70.7	2.8	95	4	112	5	123	5	139	6
3982	6.0	61	3	78	4	108	6	126	7	148	7	157	7

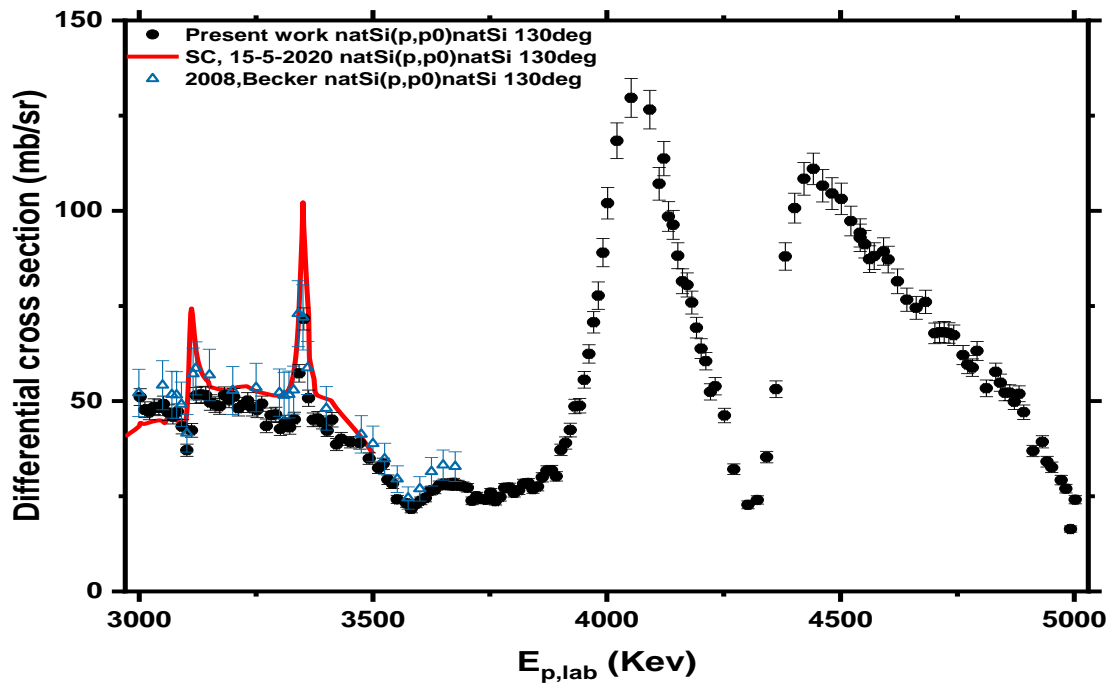
3992	6.0	71	3	89	4	120	6	135	7	150	6	164	7
4002	6.0	74	3	102	4	124	6	151	7	171	7	181	7
4022	6.0	92	4	118	5	145	7	168	8	179	7	196	8
4052	6.0	108	5	130	5	154	7	182	9	201	8	209	8
4092	6.0	104	5	127	5	141	6	158	8	164	7	172	7
4112	6.0	100	4	107	4	129	6	147	7	152	6	166	7
4122	6.0	92	4	114	5	127	6	138	7	134	5	158	6
4132	6.0	97	4	99	4	122	6	133	6	133	6	141	6
4142	6.0	84	4	96	4	113	5	118	6	125	5	140	6
4152	6.0	78	3	88	3	107	5	116	5	124	5	139	6
4162	6.0	80	4	81	3	100	4	103	5	123	5	128	5
4172	6.0	75	3	81	3	89	4	111	5	112	5	125	5
4182	6.0	65.4	2.8	76	3	91	4	97	4	104	4	120	5
4192	6.0	59.5	2.6	69.3	2.7	84	4	89	4	100	4	111	5
4202	6.0	55.7	2.5	63.8	2.6	79	4	86	4	101	4	109	5
4212	6.0	53.3	2.3	60.5	2.3	73	3	87	4	93	4	100	4
4222	6.0	46.4	2.2	52.4	2.1	74	3	83	4	94	4	104	4
4232	6.0	45.3	2.2	53.9	2.3	70	3	83	4	99	4	110	5
4252	6.0	53.6	2.5	46.2	1.9	43.2	2.1	36.3	1.9	31.9	1.4	27.9	1.3
4272	6.0	27.6	1.4	32.1	1.4	35.4	1.7	38.7	2.1	45.2	2.0	46.7	2.0
4302	6.0	18.4	1.0	22.7	1.0	33.1	1.6	43.5	2.3	48.4	2.1	56.9	2.4
4322	6.0	16.2	0.9	24	1.1	39.4	1.9	49.1	2.6	57.2	2.4	60	2.5
4342	6.0	21.9	1.2	35.3	1.5	51.3	2.4	64	3	81	3	86	4
4362	6.0	38.0	1.9	53.1	2.2	81	4	95	5	113	5	120	5
4382	6.0	61.9	2.9	88	4	111	5	119	6	142	6	145	6
4402	6.0	80	3	101	4	121	5	146	7	160	6	177	7
4422	6.0	94	4	108	4	134	6	149	7	147	6	164	7
4442	6.0	96	4	111	4	126	5	150	7	139	5	151	6
4462	6.0	104	5	107	4	128	6	122	6	131	5	134	6
4482	6.0	100	4	105	4	118	5	126	6	124	5	126	5
4502	6.0	94	4	103	4	112	5	120	6	128	5	120	5
4522	6.0	99	4	97	4	102	4	115	6	114	5	124	5
4542	6.0	90	4	94	4	103	5	111	5	119	5	118	5
4542	6.0	85	4	93	4	110	5	115	6	119	5	116	5
4552	6.0	87	4	91	4	98	4	112	6	114	5	119	5
4562	6.0	84	4	87	3	99	4	105	5	108	4	112	5
4572	6.0	80	3	88	3	97	4	108	5	115	5	116	5
4592	6.0	81	4	89	4	99	4	101	5	110	5	108	4
4602	6.0	78	3	87	3	97	4	98	5	106	4	102	4
4622	6.0	80	4	81	3	92	4	102	5	101	4	107	4
4642	6.0	78	3	77	3	88	4	88	4	94	4	98	4

4662	6.0	69	3	75	3	83	4	85	4	98	4	98	4
4682	6.0	64.8	2.9	76	3	82	4	89	4	94	4	98	4
4702	6.0	72	3	67.8	2.7	72	3	82	4	86	4	93	4
4712	6.0	67	3	68.1	2.7	79	4	86	4	91	4	94	4
4722	6.0	63.6	2.8	68.1	2.8	69	3	81	4	87	4	88	4
4732	6.0	63.4	2.7	67.9	2.7	70	3	83	4	79	3	88	4
4742	6.0	66.4	2.9	67.3	2.7	74	3	77	4	82	3	85	4
4762	6.0	58.8	2.6	62.1	2.5	69	3	75	4	77	3	84	4
4772	6.0	60.7	2.7	59.6	2.4	73	3	75	4	78	3	79	3
4782	6.0	60.4	2.7	58.8	2.3	68	3	78	4	78	3	85	3
4792	6.0	58.2	2.6	63.2	2.5	68	3	77	4	88	4	83	3
4812	6.0	54.3	2.5	53.4	2.2	62.6	2.8	69	3	74	3	76	3
4832	6.0	54.6	2.4	57.7	2.3	63.8	2.9	68	3	69.4	2.8	73	3
4842	6.0	51.8	2.3	54.8	2.2	61	2.9	63	3	64.1	2.7	71	3
4852	6.0	52.5	2.3	52.2	2.1	59.5	2.7	58.9	2.9	65.5	2.7	68.3	2.8
4862	6.0	51.3	2.3	52.2	2.1	57.1	2.7	58.7	2.9	63.2	2.6	66.2	2.7
4872	6.0	54.5	2.4	49.8	2.0	51.0	2.3	54.4	2.6	63.7	2.6	66.8	2.7
4882	6.0	58.6	2.6	51.9	2.1	52.3	2.4	56.4	2.8	63.1	2.6	70.6	2.9
4892	6.0	51.8	2.2	47.1	1.9	53.9	2.4	78	4	112	4	138	5
4912	6.0	30.2	1.4	36.9	1.5	51.2	2.2	68	3	84	3	91	4
4932	6.0	31.3	1.4	39.3	1.6	48.7	2.1	61.1	2.9	69.5	2.8	77	3
4942	6.0	29.6	1.3	34.1	1.4	43.2	1.9	51.9	2.5	59.1	2.4	62.9	2.6
4952	6.0	30.6	1.4	32.6	1.4	44.3	2.1	51.9	2.6	56.2	2.3	57.3	2.3
4972	6.0	26.9	1.3	29.3	1.3	34.3	1.7	40.6	2.1	47.3	2.0	47.8	2.0
4982	6.0	21.6	1.0	27.0	1.1	33.4	1.5	42.5	2.0	48.9	2.0	51.0	2.1
4992	6.0	19.3	1.0	16.4	0.8	30.9	1.5	38.3	2.0	47.0	2.0	49.7	2.1
5002	6.0	20.0	1.0	24.1	1.1	30.2	1.5	37.1	1.9	45.2	1.9	51.8	2.2

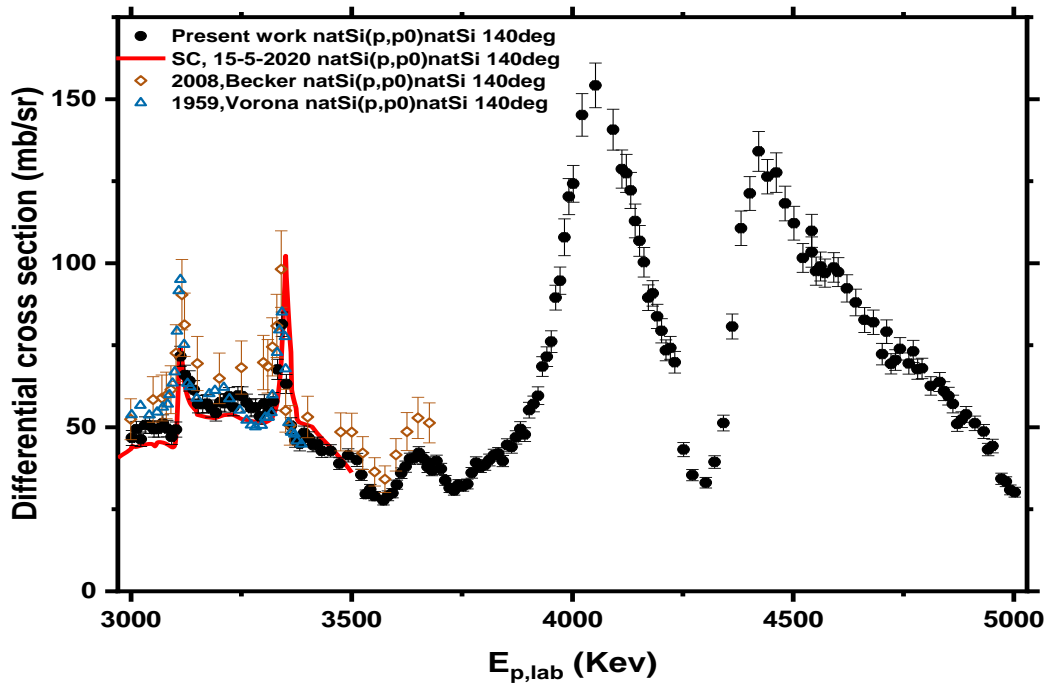
A)



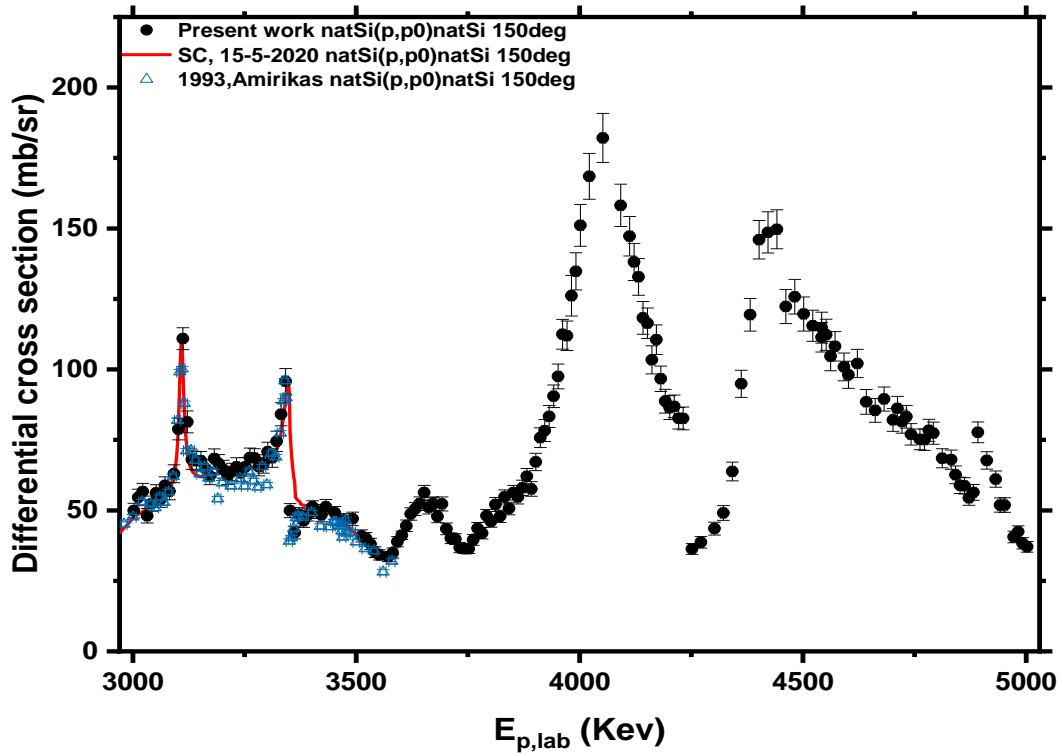
B)



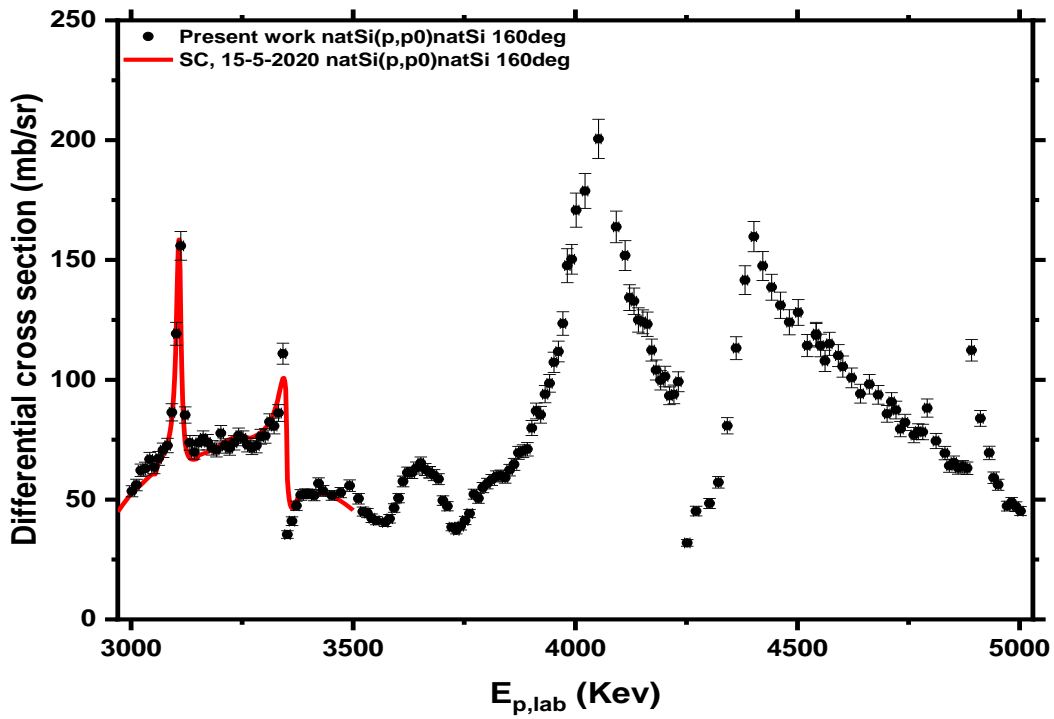
Γ)



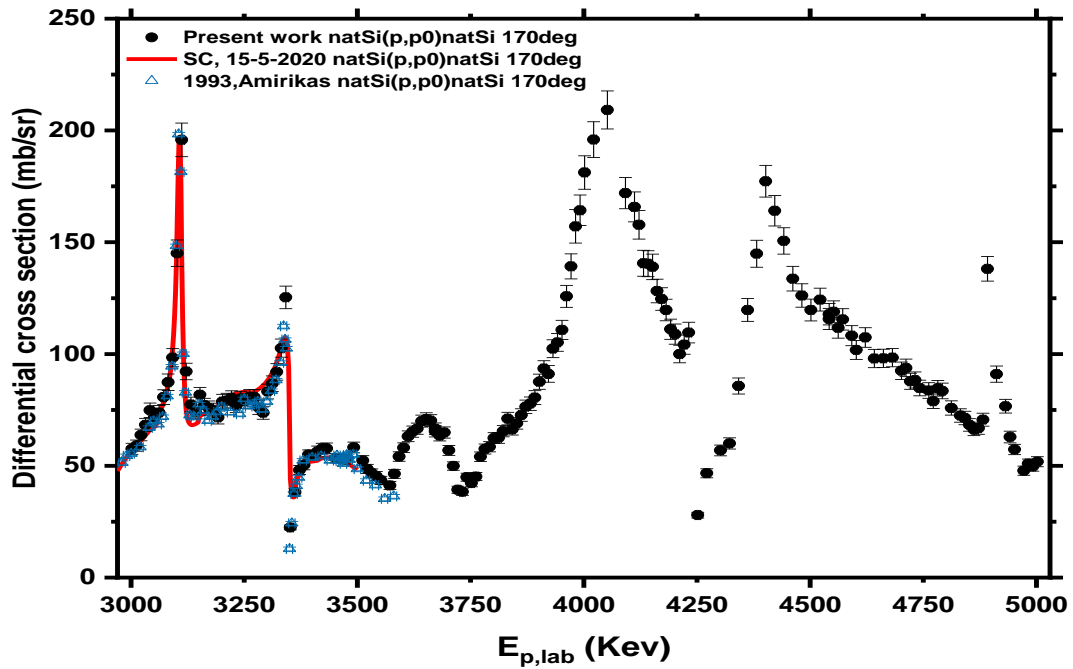
Δ)



E)



ΣΤ)

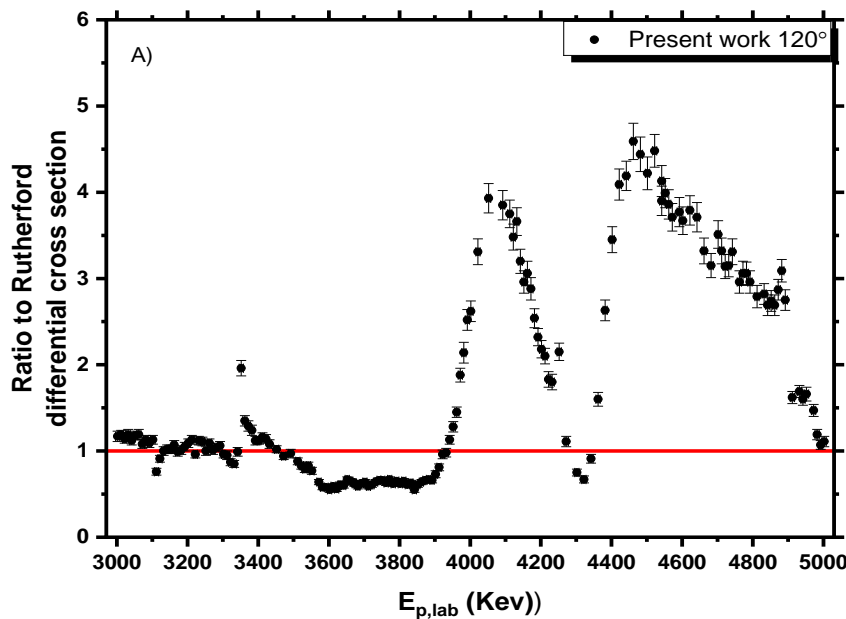


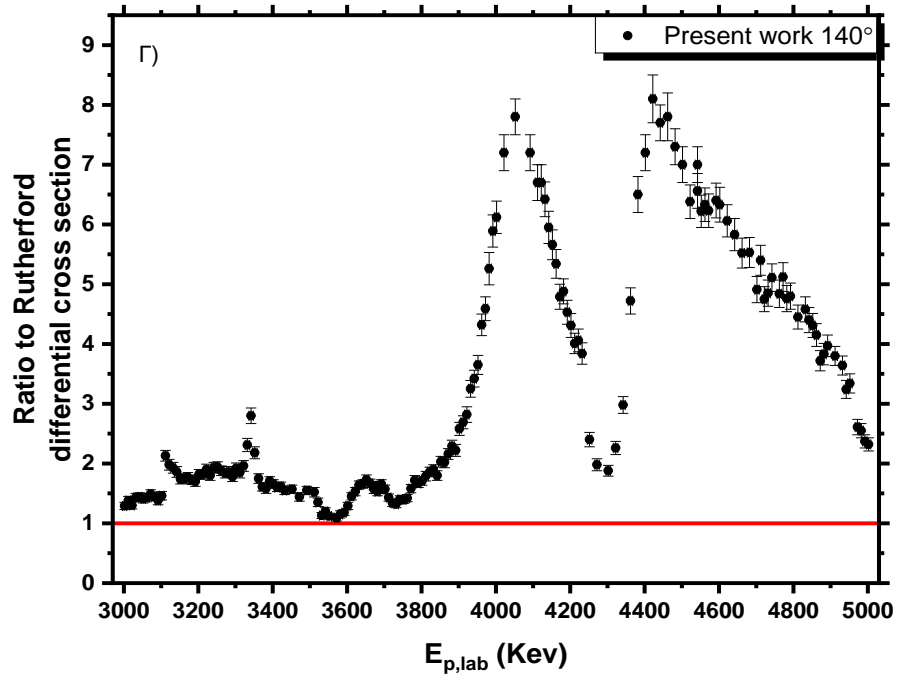
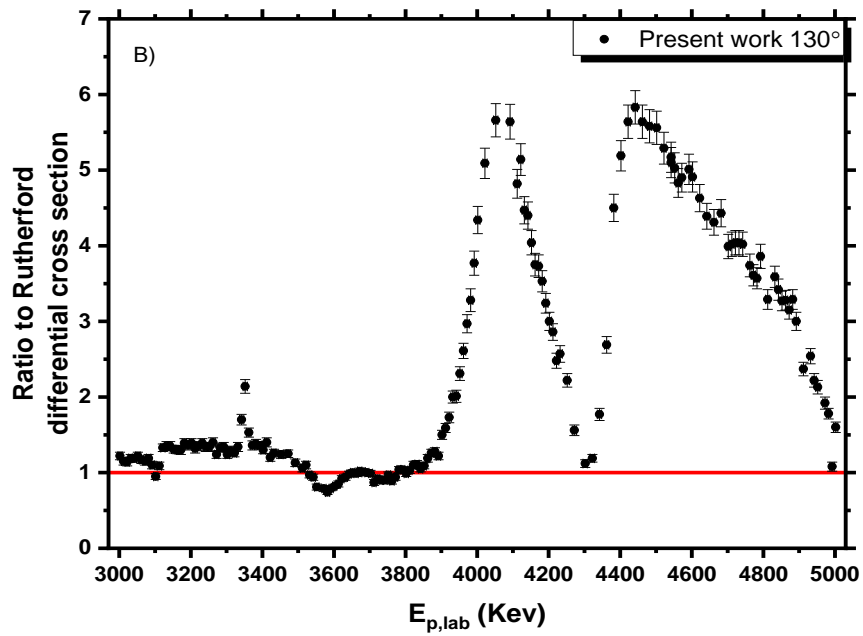
Γράφημα 4.1 (Α-ΣΤ): Τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής (mb/sr) της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων σε φυσικό πυρίτιο μετρημένες σε γωνίες σκέδασης 120°, 130°, 140°, 150°, 160°, 170° και εύρος ενεργειών

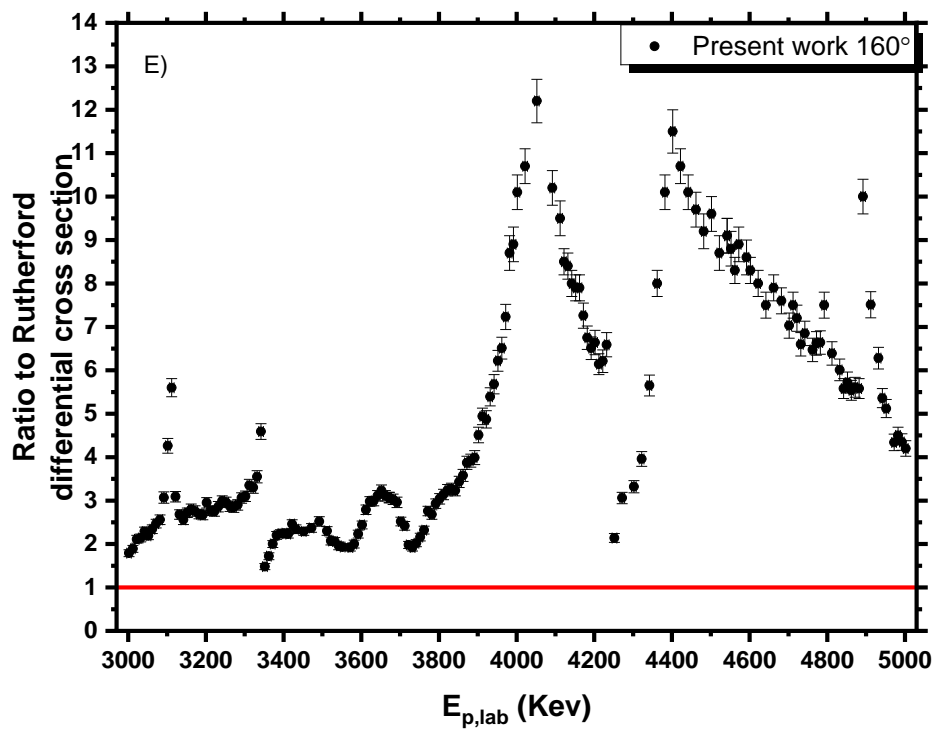
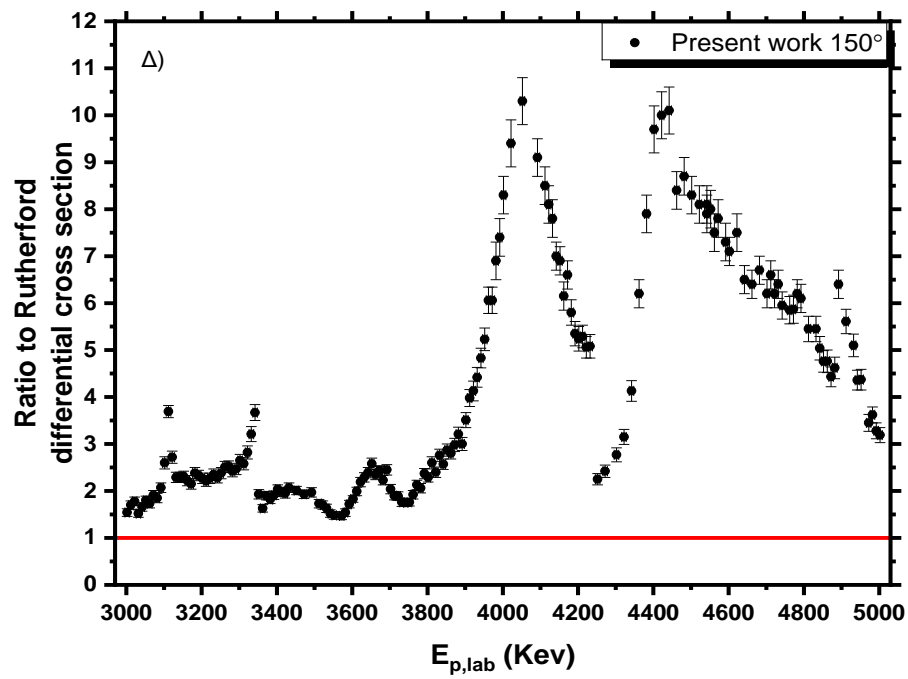
δέσμης $E_{p,lab}=3000-5000$ KeV. Σε όλα τα παραπάνω γραφήματα έχουν συμπεριληφθεί (με κόκκινη γραμμή) οι τιμές των αξιολογημένων ενεργών διατομών (evaluated cross sections) [7]. Επίσης έχουν συμπεριληφθεί και προγενέστερες μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί [18–20] στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε, όπου αυτές είναι διαθέσιμες.

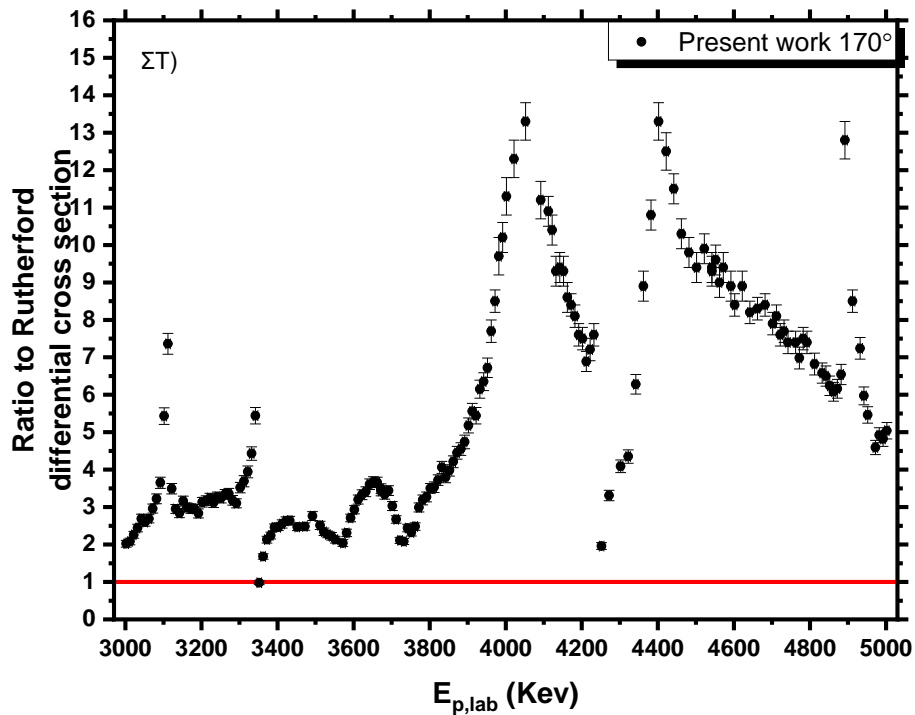
Όπως φαίνεται στα γραφήματα 4.1A, B και Γ οι τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών που έχουν μετρηθεί από τους B. Becker et al.[20] φαίνονται συστηματικά υπερεκτιμημένες σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν στην παρούσα μελέτη, αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων εντός σφάλματος. Αντίθετα οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής στις 140° (Γράφημα 4.1Γ) των J. Vorona et al. [19] όπως επίσης και οι τιμές των R. Amirikas et al. [18] για τις 150° και 170° (Γράφημα 4.1Δ, 4.1ΣΤ) βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία με τις τιμές που μετρήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Τέλος οι evaluated καμπύλες φαίνονται να έχουν κάποιες αποκλίσεις, κυρίως στις μικρές γωνίες σκέδασης, τόσο από τις τιμές που μετρήθηκαν στην παρούσα μελέτη όσο και από παλιότερες μετρήσεις. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αναγκαιότητα πολλών διαφορετικών μετρήσεων ώστε οι καμπύλες του evaluation να είναι όσο πιο αξιόπιστες γίνεται.

Τέλος, αξίζει να μελετηθούν οι αποκλίσεις των τιμών της ενεργού διατομής που μετρήθηκε από τις αντίστοιχες τιμές της ενεργού διατομής κατά Rutherford, καθώς στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε αναμένονται μεγάλες αποκλίσεις από αυτήν. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτή η σύγκριση, βρέθηκαν οι λόγοι των τιμών της ενεργού διατομής που μετρήθηκε προς την ενεργό διατομή Rutherford και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα



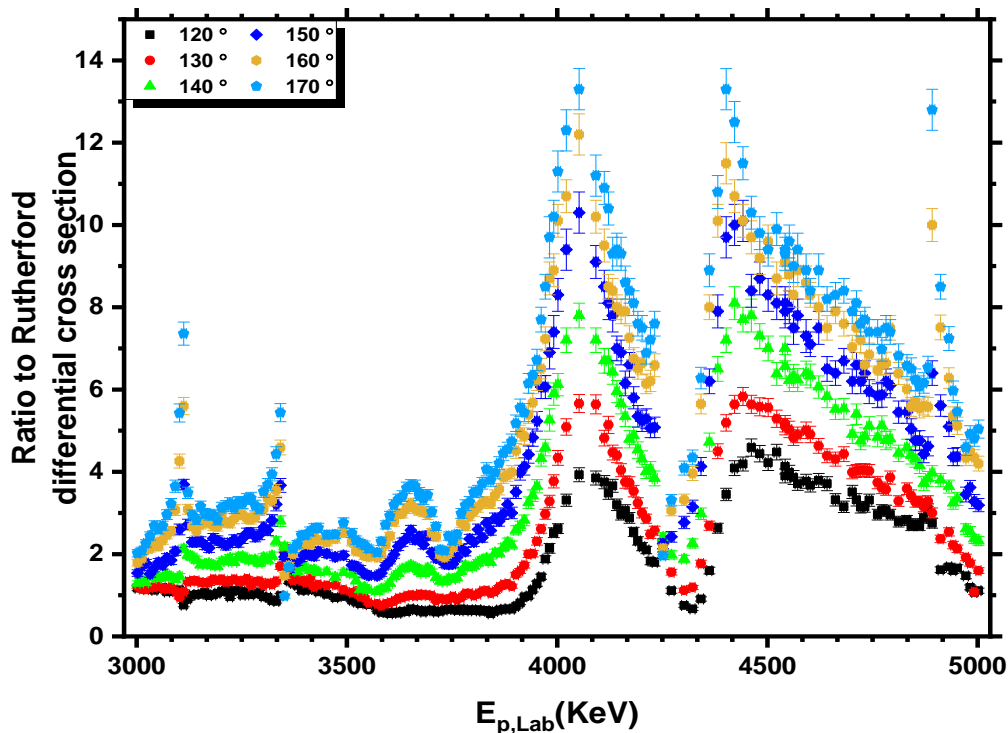






Γράφημα 4.2 A-4.2ΣΤ: Λόγος των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης προς τις αντίστοιχες τιμές υπολογισμένες από την εξίσωση του Rutherford.

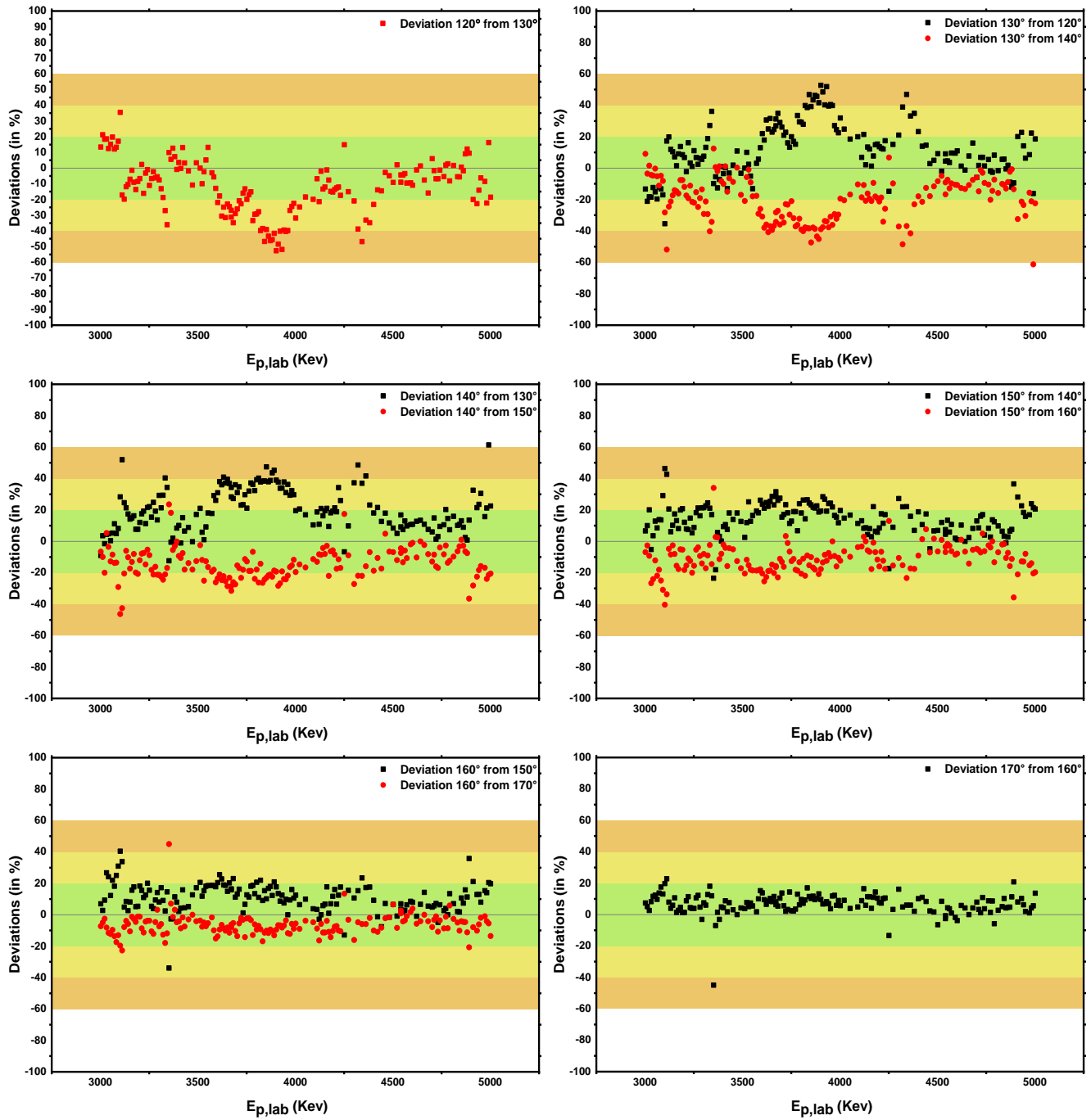
Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής που μετρήθηκαν παρουσιάζουν ισχυρές αποκλίσεις από την ενεργό διατομή κατά Rutherford, οι οποίες φτάνουν έως και ένα παράγοντα της τάξης του 13 σε μεγάλες γωνίες σκέδασης, κάτι που μπορεί να διευκολύνει σημαντικά την προφίλομετρία του πυριτίου. Η έντονη γωνιακή κατανομή των τιμών της ελαστικής σκέδασης που μετρήθηκαν είναι εμφανής και παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα ως προς τις τιμές της ενεργού διατομής Rutherford.



Γράφημα 4.3: Γωνιακή κατανομή του λόγου των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης προς τις τιμές της ελαστικής σκέδασης κατά Rutherford.

Η γνώση της γωνιακής κατανομής των διαφορικών ενεργών διατομών είναι απαραίτητο στοιχείο για να πραγματοποιηθεί προφίλομετρία σε κάποιο υλικό, καθώς μια μικρή αβεβαιότητα στη γωνία ανίχνευσης, σε κάποιο υλικό που η διαφορική ενεργός διατομή του παρουσιάζει πολύ έντονη γωνιακή κατανομή, μπορεί να επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα της προφίλομετρίας να μην είναι αξιόπιστα.

Έτσι, για την εύρεση του γωνιακού εύρους, στο οποίο είναι εντονότερη η γωνιακή κατανομή στο πυρίτιο, έγινε το γράφημα 4.4. Στο γράφημα αυτό παρουσιάζονται, με μαύρο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα, οι αποκλίσεις (επί %) της υπό μελέτη γωνίας σε σχέση με την μεγαλύτερη και την μικρότερη από αυτή γωνίες που μετρήθηκαν. Είναι φανερό ότι εντονότερη γωνιακή κατανομή παρουσιάζεται σε μικρές γωνίες σκέδασης



Γράφημα 4.4: Αποκλίσεις (επι %) κάθε μία από τις έξι γωνίες που μετρήθηκαν σε σχέση με την μεγαλύτερη και την μικρότερη από αυτήν γωνίες. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι αποκλίσεις τις εκάστοτε γωνίας σε σχέση με την μεγαλύτερη από αυτή γωνία που μελετήθηκε, ενώ με μαύρο χρώμα είναι οι αποκλίσεις από την μικρότερη γωνία.

Τέλος έγινε προσπάθεια να αποδοθούν οι συντονισμοί των διαφορικών ενεργών διατομών που παρατηρούνται, σε κάποιες στάθμες (levels) των σύνθετων πυρήνων που σχηματίζονται (^{29}P , ^{30}P , ^{31}P).

Η μικρή αφθονία του ^{29}Si και του ^{30}Si στο φυσικό πυρίτιο, σε συνδυασμό με τον ελλιπή προσδιορισμό των levels των σύνθετων πυρήνων που σχηματίζουν, δεν επέτρεψε την απόδοση κάποιου ακρότατου σε κάποιο level των ^{30}P και ^{31}P . Συνεπώς όλοι οι συντονισμοί που παρατηρούνται έχουν αποδοθεί σε διεγερμένες στάθμες του σύνθετου πυρήνα ^{29}P που σχηματίζεται από την ελαστική σκέδαση πρωτονίου σε ^{28}Si .

Για τον προσδιορισμό αυτών των levels έπρεπε πρώτα να υπολογιστούν οι επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες. Θεωρώντας ότι το l φτάνει έως 5 για ενέργεια δέσμης πρωτονίων 5 MeV, τα επιτρεπτά levels είναι αυτά που έχουν spin $1/2$ έως $11/2$ με αρνητική ομοτιμία και από $1/2$ έως $9/2$ με θετική ομοτιμία.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλοι οι συντονισμοί που έχουν αποδοθεί στην διέγερση κάποιου level του σύνθετου πυρήνα ^{29}P .

Πίνακας 6: Ενέργειες στις οποίες παρουσιάζονται συντονισμοί στις διαφορικές ενεργές διατομές και η ενεργειακή στάθμη από την οποία προκαλείται

$E_{p,\text{Lab}}$ (keV)	^{29}P		
	Energy level	Jπ	T ½
~3112	5740	7/2 -	12.5 keV 7
~3342	5968	3/2 +	9.5 keV 15
~3572	6191	3/2 -	95 keV 6
~4052	6660	1/2 +	200 keV 20
~4232	6828	3/2 +, 5/2 +	4.9 keV 4
	6956	1/2 +	120 keV 10
~4422	7021	1/2 -, 3/2 -	100 keV 8
	7456	7/2 -, 5/2 -	8.4 keV 7

4.2 Έλεγχος αξιοπιστίας (Benchmarking)

Ο έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) είναι μία πειραματική διαδικασία ελέγχου της ορθότητας των μικροσκοπικών διαφορικών ενεργών διατομών μέσω της μέτρησης φασμάτων (EBS) από παχύ στόχο γνωστής στοιχειομετρίας, ακολουθούμενες από την σύγκριση τους με προσομοιωμένα φάσματα. Οι μετρήσεις benchmarking είναι απαραίτητες καθώς η ακρίβεια όλων των τεχνικών IBA για την εύρεση προφίλ βάθους (depth profile techniques) εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια με την οποία έχουν προσδιοριστεί οι διαφορικές ενεργές διατομές. Όμως τα πειραματικά δεδομένα σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζουν ασυμφωνίες και έτσι η

επιλογή ενός σετ πειραματικών δεδομένων, έναντι κάποιου άλλου (όπου δεν υπάρχει evaluation) για χρήση σε τεχνικές IBA, θα οδηγήσει σε διαφορετικά προφίλ βάρους. Ακόμα και τα evaluated δεδομένα σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι επαρκώς επικυρωμένα για αυτό προκύπτει η ανάγκη ελέγχου αξιοπιστίας ακόμα και αυτών των δεδομένων.

Στα πλαίσια του ελέγχου αξιοπιστίας αυτής της μελέτης, ακτινοβολήθηκε δισκίο πυριτίου (silicon wafer), στο οποίο είχε εξαχνωθεί χρυσός (βλέπε κεφ. 2) για κανονικοποίηση του φορτίου. Η εξαχνωση όπως επίσης και η ακτινοβολήση πραγματοποιήθηκε από την τραχιά πλευρά του δισκίου, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα channeling. Οι μετρήσεις στον παχύ στόχο πραγματοποιήθηκαν για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_{p,Lab} = 3200, 3400, 3600, 3850, 4100, 4300, 4500, 4740, 5000$ KeV και για γωνίες σκέδασης από 120° έως 170° με βήμα 10° . Οι ενέργειες δέσμης είναι κατάλληλα επιλεγμένες έτσι ώστε να καλύπτουν όλο το ενεργειακό εύρος ενώ παράλληλα το παράθυρο ολοκλήρωσης να είναι μικρότερο από 250 KeV από την επιφάνεια του στόχου. Το παράθυρο ολοκλήρωσης δεν επιλέχθηκε μεγαλύτερο για να ελαχιστοποιηθούν τα στατιστικά σφάλματα και να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τα μοντέλα για το energy loss και το straggling.

Ο τελικός στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η αναπαραγωγή των πειραματικών φασμάτων χρησιμοποιώντας τις μικροσκοπικές διαφορικές ενεργές διατομές που υπολογίστηκαν παραπάνω. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των φασμάτων του παχέος στόχου πυριτίου είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για την εύρεση του πάχους του στόχου Si_3N_4 .

Αρχικά δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα SIMNRA, στόχος πυριτίου απείρου πάχους με χρυσό στην μπροστινή του πλευρά. Στην συνέχεια εισήχθησαν οι απαραίτητες παράμετροι (βλέπε παράγραφο 4.3.4). Οι διαφορικές ενεργές διατομές του πυριτίου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις ήταν αυτές που υπολογίστηκαν με τον λεπτό στόχο Si_3N_4 . Οι υπόλοιπες παράμετροι που εισήχθησαν ήταν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του πάχους του στόχου, καθώς τα δυο πειράματα έγιναν διαδοχικά, χωρίς κάποια αλλαγή στην πειραματική διάταξη.

Μετά την εισαγωγή των ζητούμενων δεδομένων από το πρόγραμμα, οι μόνες άγνωστες παράμετροι ήταν ο αριθμός των ατόμων χρυσού που είχε εξαχνωθεί στο στόχο όπως επίσης και το φορτίο που προσπίπτει σε αυτόν. Ο αριθμός των ατόμων χρυσού βρέθηκε με προσομοίωση από τα φάσματα όλων των γωνιών στα 3200 KeV, διότι μόνο σε αυτή την ενέργεια υπήρχε evaluation. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση αυτού του αριθμού, ήταν να προσδιοριστεί το φορτίο από το ύψος του edge του πυριτίου και να αλλαχθεί ο αριθμός των ατόμων χρυσού στον στόχο ώστε η κορυφή της ελαστικής σκέδασης του χρυσού στο πειραματικό και το φάσμα προσομοίωσης να είναι ίδια. Ο τελικός αριθμός ατόμων χρυσού που χρησιμοποιήθηκε, προέκυψε από τον μέσο όρο αυτών των τιμών που προέκυψαν από κάθε γωνία. Επομένως, έχοντας προσδιορίσει τον αριθμό ατόμων χρυσού στον στόχο, η εύρεση του φορτίου σε κάθε φάσμα πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας την τιμή του μέχρις ότου ο αριθμός των counts του χρυσού στο πειραματικό και στο προσομοιωμένο φάσμα να είναι ίδιος. Τέλος αυξήθηκε κατά μερικά keV η ενέργεια δέσμης έως ότου η απόκλιση μεταξύ του πειραματικού και το προσομοιωμένου φάσματος να είναι η μικρότερη δυνατή. Αυτή η αύξηση μερικών keV στην ενέργεια δέσμης έγινε εξαιτίας του βρόγχου υστέρησης του ηλεκτρομαγνήτη, αφού οι

μετρήσεις για το benchmarking ξεκίνησαν με ενέργεια δέσμης 5000 keV η οποία ελαττωνόταν σε σχετικά μεγάλα ενεργειακά βήματα.

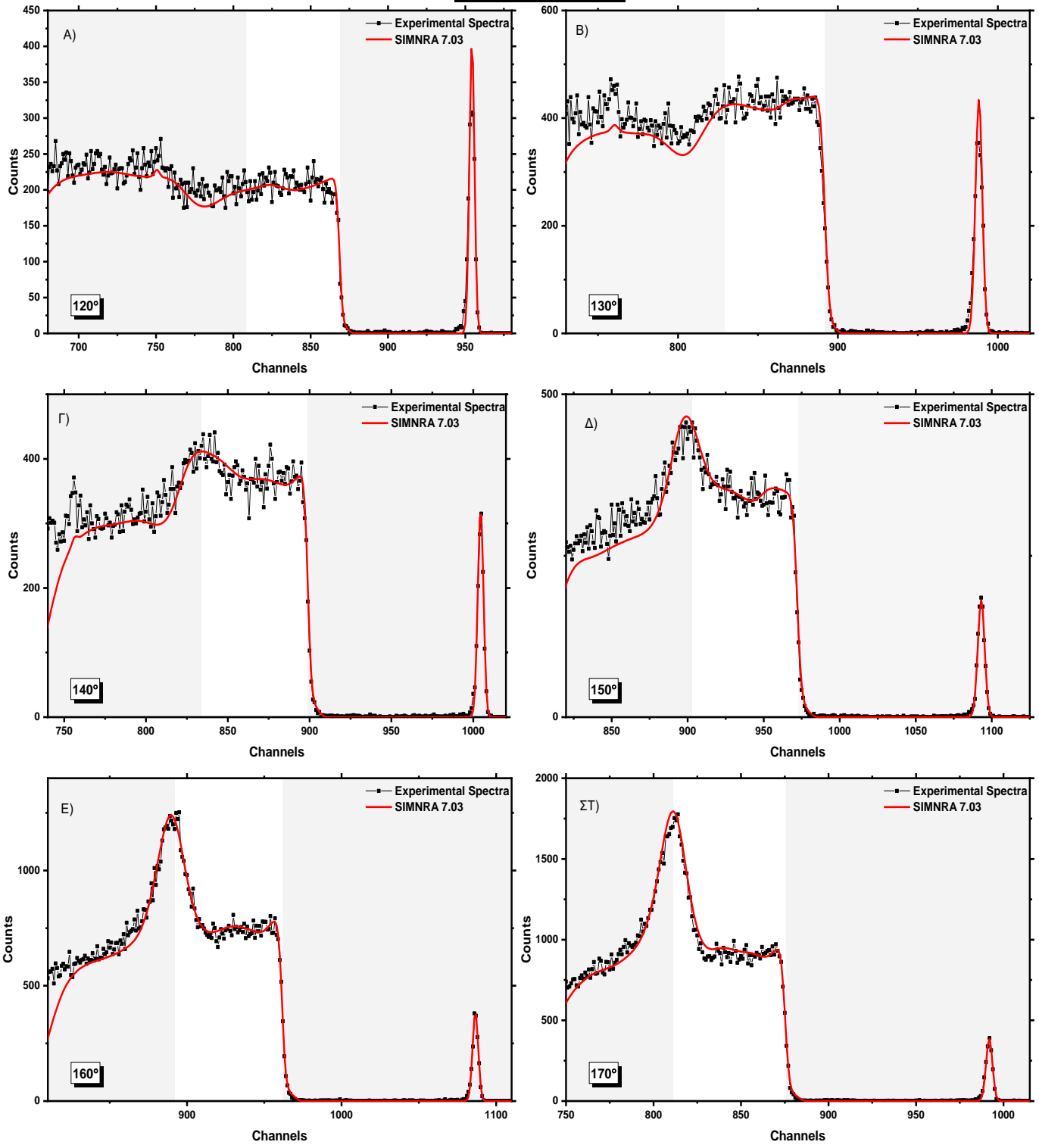
Στον πίνακα 5 καταγράφονται οι αποκλίσεις (%) μεταξύ των πειραματικών φασμάτων και των φασμάτων προσομοίωσης, με παράθυρο ολοκλήρωσης από 200-250 KeV. Λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες της μέτρησης, οι οποίες φτάνουν μέχρι και το 3% παρατηρείται εξαιρετική συμφωνία μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, η οποία φαίνεται και στα Γραφήματα 4.5-4.12. Σε αυτά παρουσιάζονται τα πειραματικά φάσματα του παχύ στόχου πυριτίου μαζί με τα φάσματα προσομοίωσης για κάθε ενέργεια και γωνία σκέδασης. Με μαύρα σημεία παριστάνονται τα πειραματικά φάσματα ενώ με κόκκινες γραμμές τα φάσματα προσομοίωσης. Επιπλέον το λευκό τμήμα κάθε διαγράμματος αντιστοιχεί στο εκάστοτε παράθυρο ολοκλήρωσης, το οποίο υπολογίζεται εύκολα διαιρώντας κάθε φορά το ενεργειακό βήμα με τον λόγο keV/channel (Πίνακας 3).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι ο έλεγχος αξιοπιστίας για ενέργεια δέσμης 5000 KeV δεν πραγματοποιήθηκε καθώς ήταν αδύνατη η προσομοίωση του φάσματος του παχύ στόχου μέσω του κώδικα SIMNRA. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε ανομειογένειες στο πάχος του χρυσού, καθώς το σχετικά μεγάλο ενεργειακό βήμα μπορεί να δικαιολογήσει αλλαγή στο σημείο πρόσκρουσης της δέσμης στον στόχο, είτε στο ενεργειακό βήμα με το οποίο είχε υπολογιστεί η μικροσκοπική διαφορική ενεργός διατομή σε εκείνη την ενεργειακή περιοχή.

Πίνακας 6: Αποκλίσεις (%) πειραματικών φασμάτων και φασμάτων προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με (+) αν η προσομοίωση υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα και με (-) αν συμβαίνει το αντίθετο.

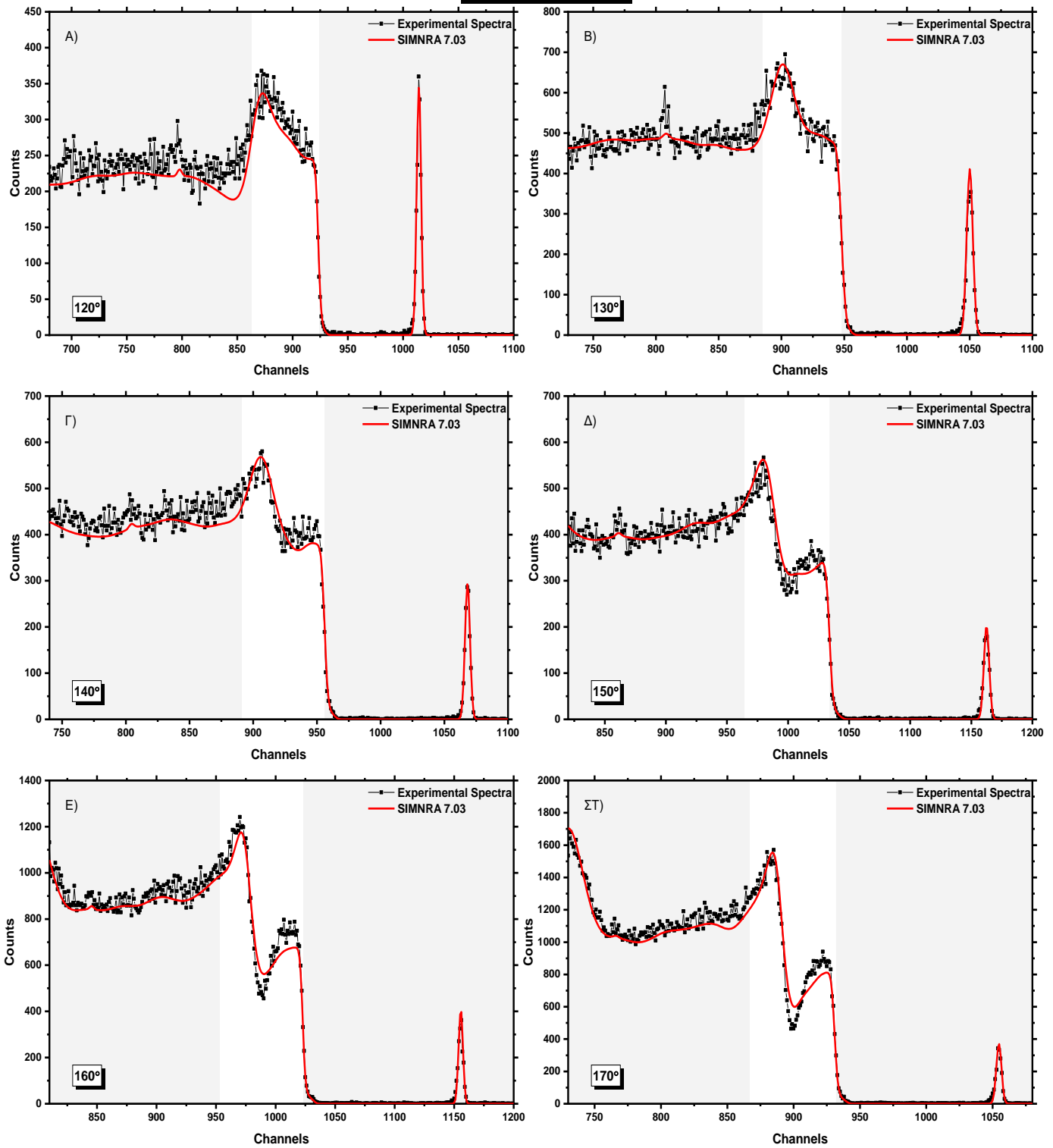
E_{p,Lab} (keV)	Αποκλίσεις (%)					
	170°	160°	150°	140°	130°	120°
3200	+2.6	+0.4	+1.5	+0.3	-0.1	-0.5
3400	-0.8	-3.0	+2.9	-0.7	-0.3	-4.8
3600	-0.1	-0.1	-3.5	-6.6	-0.1	+0.5
3850	0	+3.2	+0.5	-0.7	-3.5	-6.1
4100	+4.6	+2.6	-0.1	0	+2.5	-0.1
4300	-1.7	-7.7	-8.7	-4.6	-4.4	-3.4
4500	-0.2	-3.5	+0.9	-9.2	-4.2	-8.2
4740	+1.1	-0.8	-0.2	-6.2	-3.8	-3.8

$E_{p,Lab} = 3200 \text{ KeV}$



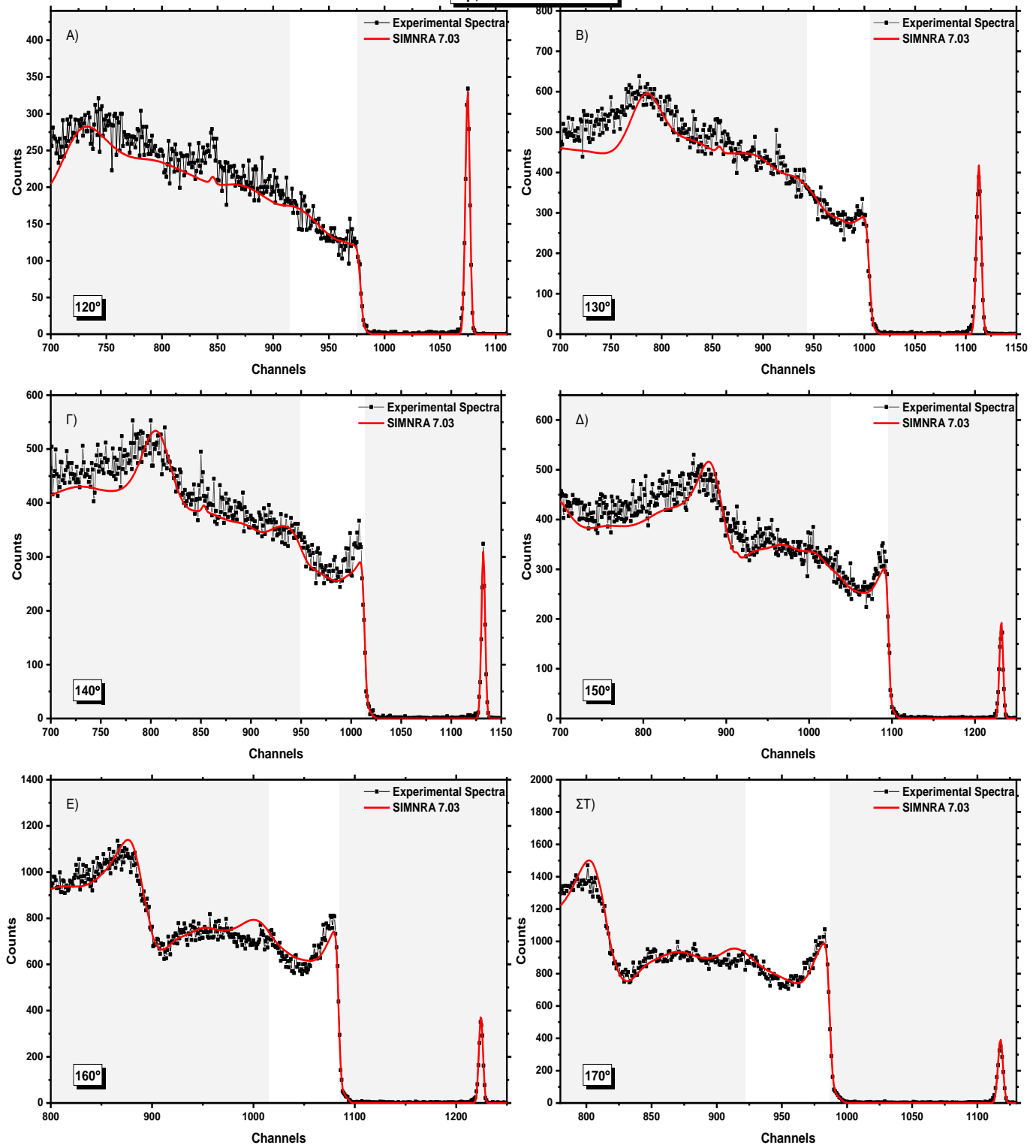
Γράφημα 4.5 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=3200 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 3400 \text{ KeV}$



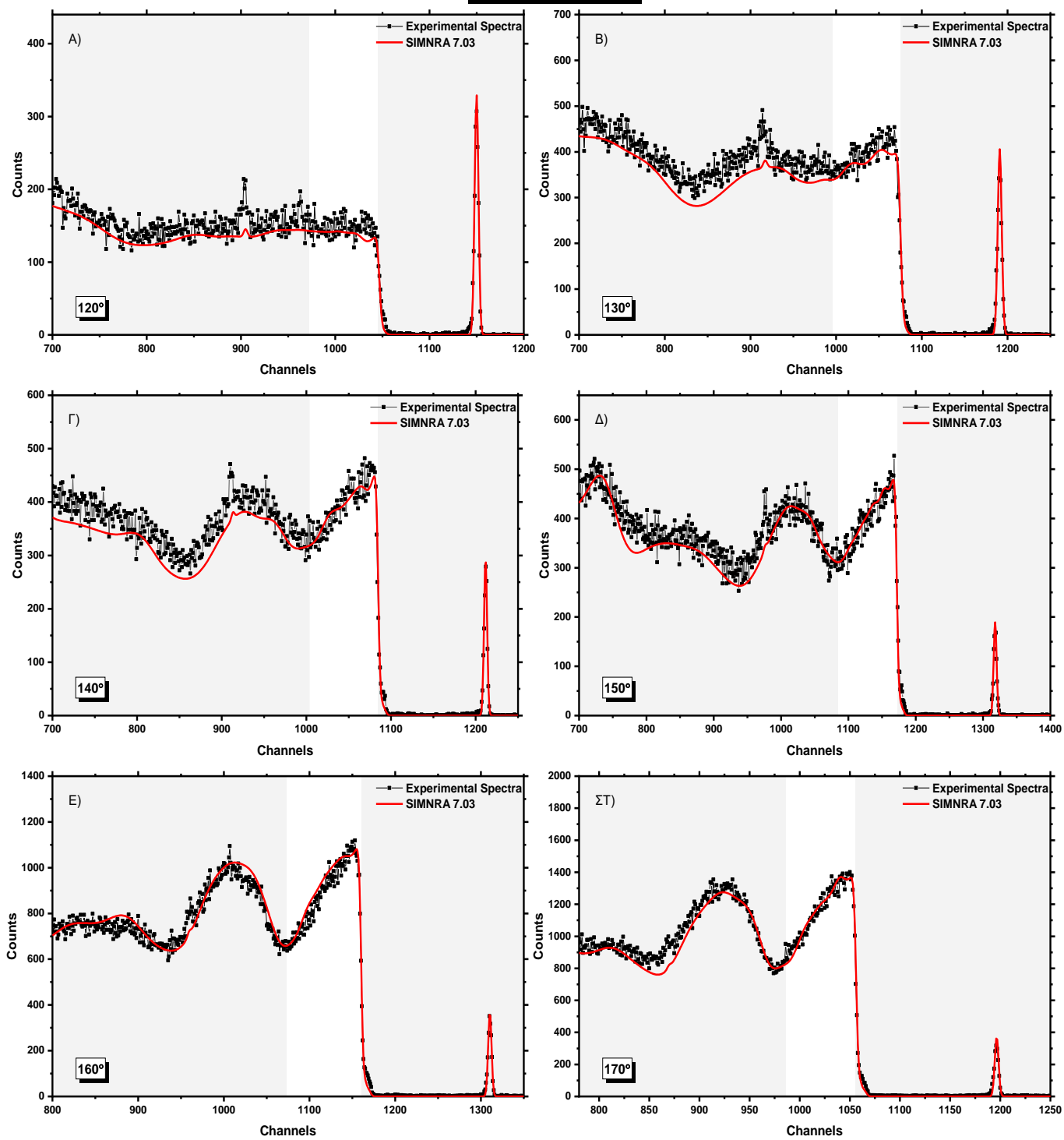
Γράφημα 4.6 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=3400 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 3600 \text{ KeV}$



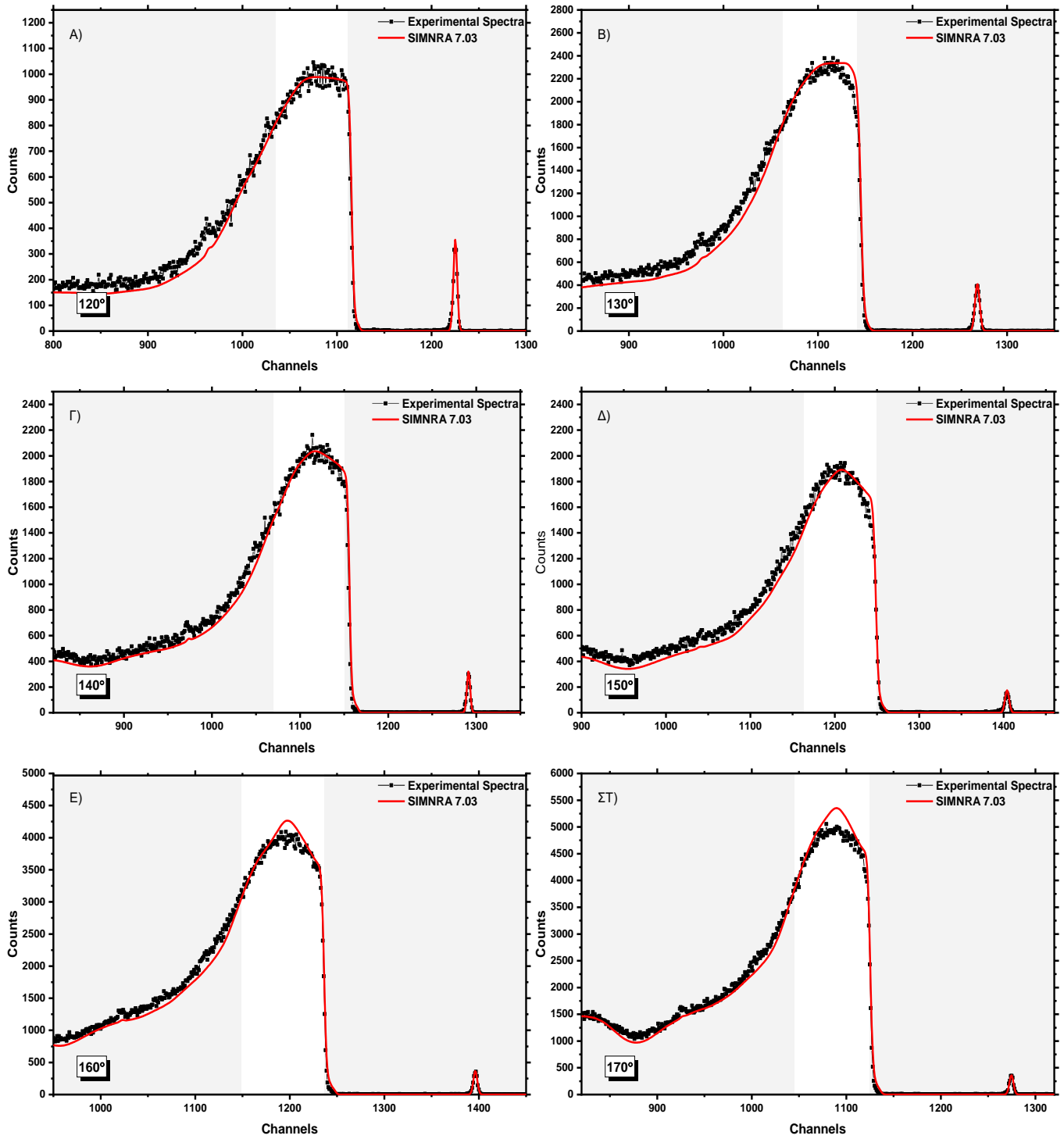
Γράφημα 4.7 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=3600 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 3850 \text{ KeV}$



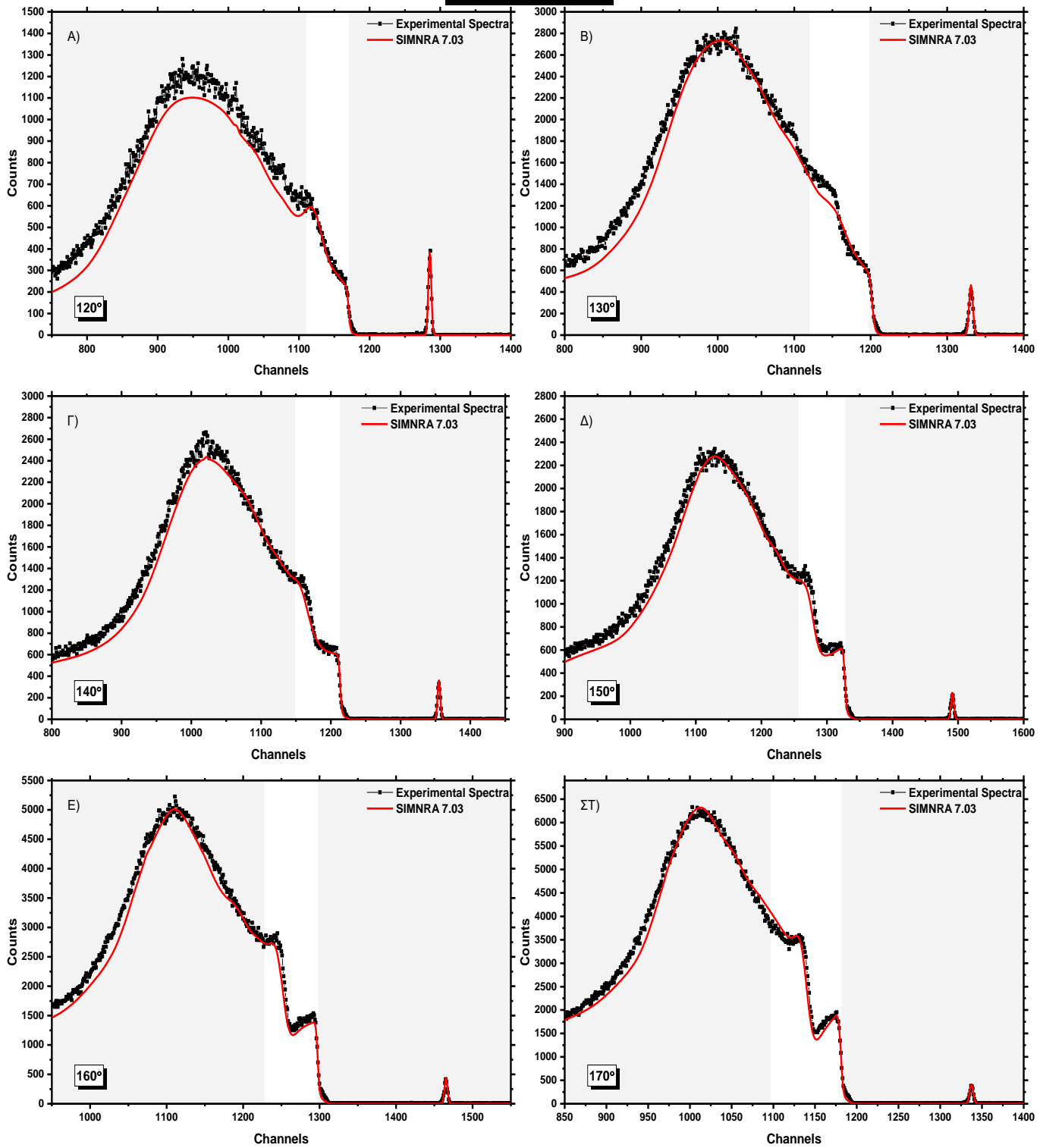
Γράφημα 4.8 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=3850 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 4100 \text{ KeV}$



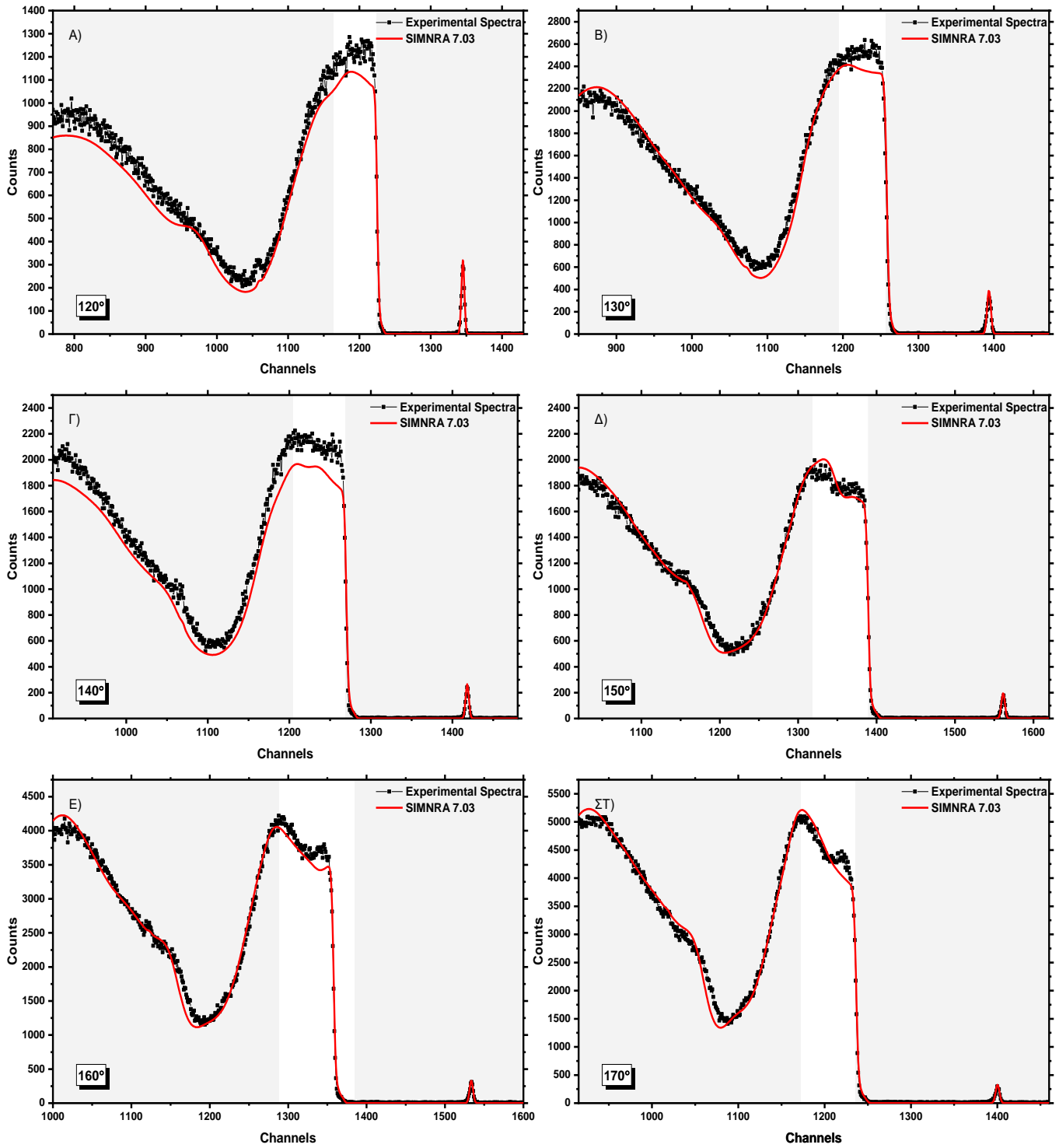
Γράφημα 4.9 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=4100 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 4300 \text{ KeV}$



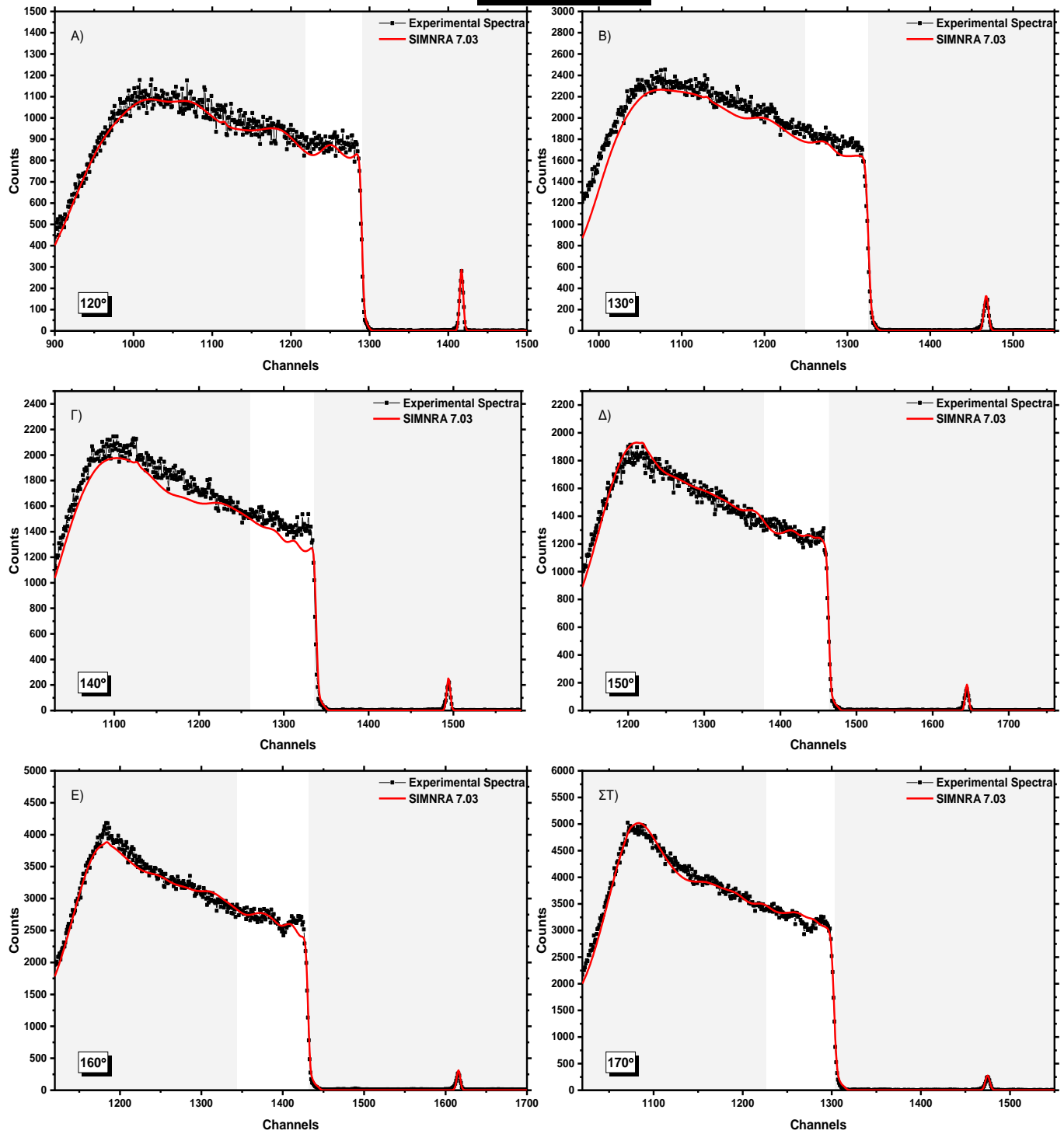
Γράφημα 4.10 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=4300 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 4500 \text{ KeV}$



Γράφημα 4.11 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=4500 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

$E_{p,Lab} = 4740 \text{ KeV}$



Γράφημα 4.12 Α-ΣΤ: Έλεγχος αξιοπιστίας (benchmarking) για $E_{p,Lab}=4740 \text{ KeV}$, για γωνίες 120° έως 170° με βήμα 10°

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα- Προοπτικές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από φυσικό πυρίτιο $^{nat}Si(p, p_0)^{nat}Si$ για ενέργειες δέσμης πρωτονίων $E_{p,Lab} = 3 - 5 \text{ MeV}$ και γωνίες ανίχνευσης $120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ$ και 170° . 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 των διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκεδάσεως παρουσιάζουν ισχυρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες διαφορικές ενεργές διατομές της σκέδασης Rutherford, σε ολόκληρο το ενεργειακό και γωνιακό εύρος που μελετήθηκε. Ακόμα παρατηρήθηκε έντονη γωνιακή κατανομή των διαφορικών ενεργών διατομών σε όλο το ενεργειακό εύρος, η οποία είναι ισχυρότερη σε σχετικά εμπρόσθιες γωνίες (120° - 140°).

Η σύγκριση των διαφορικών ενεργών διατομών που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη με παλαιότερες μετρήσεις όπως επίσης και με τις evaluated καμπύλες έδειξε εξαιρετική συμφωνία στις πίσω γωνίες, ενώ και σε πιο μπροστινές γωνίες η συμφωνία ήταν πολύ ικανοποιητική. Παρόλα αυτά πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η σύγκριση γίνεται μόνο σε ένα πολύ μικρό ενεργειακό εύρος καθώς μόνο σε αυτό το εύρος υπήρχαν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Όσον αφορά τα αξιολογημένα πειραματικά δεδομένα, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται από τα δεδομένα της παρούσας μελέτης, στις πιο μπροστά γωνίες (120° και 130°), παρατηρούνται και στα υπόλοιπα διαθέσιμα πειραματικά σετ δεδομένων.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις benchmarking με παχύ στόχο πυριτίου (benchmarking) σε 8 ενέργειες πρωτονίων στο ενεργειακό εύρος που μελετήθηκε και συγκεκριμένα στις ενέργειες 3200, 3400, 3600, 3850, 4100, 4300, 4500 και 4750 keV. Τα πειραματικά φάσματα συγκρίθηκαν με τα φάσματα προσομοίωσης και παρατηρήθηκε εξαιρετική συμφωνία έως και τα 4100 keV, αφού μέχρι εκείνη την ενέργεια, και στις 6 γωνίες που μελετήθηκαν δεν παρατηρήθηκε απόκλιση μεταξύ πειραματικών και φασμάτων προσομοίωσης η οποία να υπερβαίνει το 5%. Από ενέργειες δέσμης πρωτονίων 4300 keV και πάνω, σε κάποιες γωνίες παρατηρούνται αποκλίσεις έως και 10%. Η κύρια αιτία αυτών των αποκλίσεων είναι το ενεργειακό βήμα με το οποίο υπολογίστηκε η διαφορική ενεργός διατομή.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία είναι σημαντικά καθώς δημιουργήθηκε ένα συνεκτικό σετ δεδομένων για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων πάνω σε φυσικό πυρίτιο σε ενεργειακό εύρος το οποίο δεν είχε μελετηθεί παλαιότερα και θα εμπλουτίσει την βιβλιοθήκη IBANDL. Ακόμα η επιτυχία του πειράματος benchmarking καθιστά τα αποτελέσματα αξιόπιστα και κατάλληλα για αναλυτικούς σκοπούς όπως επίσης και για επέκταση του evaluation στο πυρίτιο.

Τέλος, στα μελλοντικά σχέδια είναι η θεωρητική αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης με χρήση της θεωρίας R-matrix, καθώς επίσης και η μελέτη της ελαστικής σκέδασης

πρωτονίου από άζωτο στο ίδιο ενεργειακό εύρος μιας και τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από το λεπτό στόχο νιτριδίου του πυριτίου επιτρέπουν τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομή του αζώτου

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] E. Ntemou, X. Aslanoglou, M. Axiotis, M. Kokkoris, A. Lagoyannis, P. Misaelides, N. Patronis, K. Preketes-Sigalas, P. Tsintari, Differential cross-section measurements for deuteron elastic scattering on natSi for elastic backscattering purposes, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 450 (2019) 24–30. doi:10.1016/j.nimb.2018.02.033.
- [2] R.W. Hill, Elastic scattering of alpha-particles by carbon, Phys. Rev. 90 (1953) 845–848. doi:10.1103/PhysRev.90.845.
- [3] A.F. Gurbich, S.L. Molodtsov, Application of IBA techniques to silicon profiling in protective oxide films on a steel surface, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 226 (2004) 637–643. doi:10.1016/j.nimb.2004.08.006.
- [4] M. Kokkoris, K. Michalakis, P. Misaelides, A. Lagoyannis, S. Harissopoulos, R. Vlastou, C.T. Papadopoulos, Study of selected differential cross-sections of the $^{28}\text{Si}(d, p_0, p_1, p_2, p_3)$ reactions for NRA purposes, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 267 (2009) 1744–1747. doi:10.1016/j.nimb.2009.01.090.
- [5] C.C. Hsu, T.P. Pai, T. Tohei, S. Morita, Mechanism of the reaction $\text{Si}^{28}(d, p)\text{Si}^{29}$ from 2.0 to 4.2 MeV, Phys. Rev. C. 7 (1973) 1425–1432. doi:10.1103/PhysRevC.7.1425.
- [6] D.O. Boerma, A.R. Arends, P.M. Endt, W. Grüebler, V. König, P.A. Schmelzbach, R. Risler, Nuclear spectroscopy of ^{26}Al , Nucl. Physics, Sect. A. 449 (1986) 187–200. doi:10.1016/0375-9474(86)90001-1.
- [7] A.F. Gurbich, SigmaCalc recent development and present status of the evaluated cross-sections for IBA, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 371 (2016) 27–32. doi:10.1016/j.nimb.2015.09.035.
- [8] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2000. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [9] ΒΑΛΕΝΤΙΝΑ ΠΑΝΕΤΑ, ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΓΙΑ EBS ΚΑΙ NRA, National Technical University of Athens, 2015.
- [10] M. Mayer, SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA, in: AIP Conf. Proc., AIP Publishing, 2008: pp. 541–544. doi:10.1063/1.59188.
- [11] M.A. Nastasi, J.W. Mayer, Y. (Nuclear physicist) Wang, Ion beam analysis : fundamentals and applications, n.d.
- [12] J. L'Ecuyer, J.A. Davies, N. Matsunami, How accurate are absolute rutherford backscattering yields, Nucl. Instruments Methods. 160 (1979) 337–346. doi:10.1016/0029-554X(79)90612-8.
- [13] C.A. Kalfas, M. Axiotis, C. Tsabaris, SPECTRW: A software package for nuclear and atomic spectroscopy, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. (2016). doi:10.1016/j.nima.2016.05.098.
- [14] W.K. Chu, Calculation of energy straggling for protons and helium ions, Phys. Rev. A. 13

- (1976) 2057–2060. doi:10.1103/PhysRevA.13.2057.
- [15] Q. Yang, D.J. O'Connor, Z. Wang, Empirical formulae for energy loss straggling of ions in matter, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B.* 61 (1991) 149–155. doi:10.1016/0168-583X(91)95454-L.
- [16] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010), *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 268 (2010) 1818–1823. doi:10.1016/j.nimb.2010.02.091.
- [17] I.B. Radović, Z. Siketić, M. Jakšić, A.F. Gurbich, Measurement and parametrization of proton elastic scattering cross sections for nitrogen, *J. Appl. Phys.* 104 (2008) 074905. doi:10.1063/1.2988276.
- [18] R. Amirkas, D.N. Jamieson, S.P. Dooley, Measurement of (p, p) elastic cross sections for C, O and Si in the energy range 1.0-3.5 MeV, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B.* 77 (1993) 110–116. doi:10.1016/0168-583X(93)95531-9.
- [19] J. Vorona, J.W. Olness, W. Haerberli, H.W. Lewis, Levels of P29 from Si28(p, p)Si28 and Si28(p, p')Si28, *Phys. Rev.* 116 (1959) 1563–1571. doi:10.1103/PhysRev.116.1563.
- [20] Haendel, M., Becker, B., Lemaitre, S., Sydow, L., & Paetz, H. (1997). Elastic scattering Si(vector p,p)Si as polarimeter reaction for low-energetic protons. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 32(1), 79., (n.d.).