



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών

και Φυσικών Επιστημών



Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

"Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές"

# Μέτρηση διαφορικών ενεργών διατομών της ελαστικής σκέδασης $^{nat}\text{Mg}(p,p_0)$ στα πλαίσια της φασματοσκοπίας ελαστικής οπισθοσκέδασης (EBS).

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αλβανού Ελένη

Επιβλέπων Καθηγητής: Κόκκορης Μιχαήλ

Επιβλέπων Ερευνητής: Λαγογιάννης Αναστάσιος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα. Μιχαήλ Κόκκορη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. και τον Δρα. Αναστάσιο Λαγογιάννη, ερευνητή Β΄ του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "Δημόκριτος", επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μου εργασίας, για τις γνώσεις, τις συμβουλές και την στήριξη που μου προσέφεραν. Επίσης, ευχαριστώ την Δρα. Ρόζα Ζάννη-Βλαστού καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., για τη βοήθεια και τις πολύ σημαντικές υποδείξεις της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα. Μιχαήλ Αξιώτη ερευνητή του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "Δημόκριτος" και το υπόλοιπο ερευνητικό προσωπικό για τη βοήθεια τους στην πειραματική διαδικασία και σε όποια ζητήματα δημιουργήθηκαν, καθώς και την ομάδα πυρηνικής φυσικής του Ε.Μ.Π. για τη συνεχή βοήθειά.

Ευχαριστώ θερμά την Υ.Δ. Ελένη Ντέμου για τη συνεχή εκπαίδευση που μου προσέφερε, την καθοδήγηση, την υπομονή και την υποστήριξή της σε επιστημονικό και προσωπικό επίπεδο.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Φώτη Μαραγκό και Ναταλία Μπλιγούρα για την πολύτιμη βοήθειά τους καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος και της ανάλυσης.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, Χρήστο και Σοφία, και στον αδερφό μου Μάκη, για όλα όσα μου έχουν προσφέρει και γιατί είναι πάντα δίπλα μου.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαφορική ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από φυσικό μαγνήσιο για ενέργειες δέσμης  $E_{p,lab} = 2700-4250$  keV με βήμα 10-40keV και για γωνίες ανίχνευσης  $120^\circ - 170^\circ$  με βήμα  $10^\circ$ .

Το πείραμα έλαβε χώρα στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» στο εργαστήριο του ηλεκτροστατικού επιταχυντή Van de Graaff Tandem 5.5 MV. Ο στόχος κατασκευάστηκε επίσης στο εργαστήριο και αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα χρυσού που εξαχνώθηκε σε στρώμα φυσικού μαγνησίου που βρίσκεται πάνω σε υμένιο άνθρακα. Χρησιμοποιήθηκαν ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού πυριτίου (Silicon Surface Barrier-SSB), κατάλληλοι για την ανίχνευση των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων. Τα σήματα από τους ανιχνευτές καταγράφονταν ταυτόχρονα.

Για τον προσδιορισμό των τιμών της ενεργού διαφορικής διατομής του φυσικού μαγνησίου έγινε χρήση της σχετικής μεθόδου προσδιορισμού, καθώς οι τιμές της ενεργού διαφορικής διατομής του χρυσού ακολουθούν τη σχέση του Rutherford και μπορούν να υπολογιστούν θεωρητικά.

Τέλος παρουσιάζονται σε γραφήματα και πίνακα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των ληφθέντων φασμάτων και ακολουθεί ο σχολιασμός τους και τα μελλοντικά σχέδια.

## **Abstract**

In the present work differential cross section values for proton elastic scattering from natural magnesium were determined in the energy range  $E_{p,lab} = 2700\text{--}4250$  keV and for detection angles  $120^\circ$  -  $170^\circ$  with a  $10^\circ$  step.

The experiment was carried out at the Van de Graaff Tandem 5.5 MV Accelerator of the Institute of Nuclear and Particle Physics (INPP), National Centre of Scientific Research (NCSR) Demokritos, Athens, Greece. The target was produced in the same laboratory and it consists of an ultra-thin layer of gold evaporated on the top of magnesium which was evaporated on a self-supporting carbon foil. The detection system consisted of Silicon Surface Barrier-SSB detectors, suitable for proton backscattering detection. The spectra from all detectors were recorded simultaneously.

The determination of the differential cross section values of natural magnesium was performed using the relative measurement technique, as the differential cross section values of gold follow the Rutherford formula and can be theoretically calculated.

Finally, the results of the present work are presented both in tabulated and graphical forms and a discussion about the acquired data and future plans is made.

## **Περιεχόμενα**

1. Προφίλομετρία Μαγνησίου .....	6
1.1. Εισαγωγή .....	6
1.2. Πυρηνικές Τεχνικές .....	9
2. Πειραματική διάταξη .....	14
2.1. Πειραματική γραμμή .....	14
2.2. Ηλεκτρονικά-συνδεσμολογία .....	18
2.3. Ενεργειακή βαθμονόμηση δέσμης .....	19
2.4. Κατασκευή Στόχων .....	20
3. Μέτρηση Διαφορικών Ενεργών Διατομών .....	22
3.1. Βαθμονόμηση φασμάτων .....	23
3.2. Εμβαδομέτρηση .....	25
3.3. Καθορισμός της Ενέργειας .....	26
3.4. Υπολογισμός λόγου παχών στόχου .....	27
4. Αποτελέσματα-σχολιασμός .....	29
5. Συμπεράσματα-Προοπτικές .....	35
6. Βιβλιογραφία .....	35

# 1. Προφίλομετρία Μαγνησίου

## 1.1. Εισαγωγή

Το μαγνήσιο ( $^{nat}\text{Mg}$ ) είναι ένα στοιχείο με μικρό ατομικό αριθμό ( $Z=12$ ) και αποτελείται από τρία σταθερά ισότοπα:  $^{24}\text{Mg}$  (78.99%),  $^{25}\text{Mg}$  (10%) και  $^{26}\text{Mg}$  (11.01%). Είναι ένα πολύ ελαφρύ μέταλλο, ανθεκτικό στις διαβρώσεις, με καλή διάχυση θερμότητας και εύκολα διαχειρίσιμο με μηχανικά μέσα. Εξ' αιτίας αυτών των ιδιοτήτων χρησιμοποιείται εκτενώς σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών, όπως η παραγωγή διάφορων ηλεκτρονικών συσκευών και στον τομέα της έρευνας των υπεραγωγών, συνήθως υπό τη μορφή κραμάτων[1]. Συνεπώς, ο ποσοτικός προσδιορισμός της κατά βάθος συγκέντρωσής του είναι μεγάλης σημασίας. Λόγω του μικρού ατομικού του αριθμού και αριθμού οξειδωσης, το μαγνήσιο παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή δραστηριότητα σχηματίζοντας σύνθετες ενώσεις στις οποίες βρίσκονται και άλλα ελαφρά στοιχεία (π.χ. B, O, N, C, F, Al και S) και ο ακριβής προσδιορισμός του αποτελεί πρόκληση για όλες τις τεχνικές ανάλυσης υλικών με ιοντικές δέσμες (Ion Beam Analysis-IBA). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο εμπλουτισμός των πειραματικών δεδομένων για την αντίδραση  $^{nat}\text{Mg}(p,p_0)^{nat}\text{Mg}$  σε ενεργειακό εύρος  $E_{p,lab} \sim 2700\text{--}4250$  keV, με ενεργειακό βήμα 10-40keV ανάλογα με την περιοχή μελέτης και σε γωνίες ανίχνευσης μεταξύ  $120^\circ$  και  $170^\circ$  (κάθε  $10^\circ$ ) με χρήση της φασματοσκοπίας ελαστικής οπισθοσκέδασης (Elastic Backscattering Spectroscopy-EBS). Οι μεγάλες σχετικά ενέργειες πρωτονίων επιτρέπουν την προφίλομετρία μαγνησίου από μεγαλύτερα βάθη, αντιμετωπίζοντας τις απαιτήσεις των σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών.

Η ανάλυση υλικών με ιοντικές δέσμες (Ion Beam Analysis-IBA) αποτελεί ισχυρό εργαλείο μελέτης της σύνθεσης και της δομής των στοιχείων στην επιφάνεια ενός δείγματος με μη καταστροφικό τρόπο. Το υπό εξέταση δείγμα τοποθετείται ως στόχος μπροστά από δέσμη επιταχυνόμενων φορτισμένων σωματιδίων. Όταν η δέσμη συναντήσει το δείγμα-στόχο, αντιδρά χάνοντας ενέργεια με συνεχόμενο ρυθμό λόγω ανελαστικών σκεδάσεων Coulomb με τα ηλεκτρόνια του στόχου. Κατά μήκος της τροχιάς υπάρχει επίσης και πιθανότητα αλληλεπίδρασης με πυρήνες των υλικών του στόχου. Τα προϊόντα των αλληλεπιδράσεων αυτών εκπέμπονται από το δείγμα με πιθανότητες που καθορίζονται από τις αντίστοιχες ενεργές διατομές των διάφορων αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα. Με κατάλληλο ανιχνευτικό σύστημα συλλέγεται

και καταγράφεται η ενέργεια των εκπεμπόμενων σωματιδίων ή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας η οποία είναι χαρακτηριστική των στοιχείων που απαρτίζουν το δείγμα.

Με τις τεχνικές IBA μπορούν να αναλυθούν διάφορα στοιχεία ταυτόχρονα, με μία μόνο μέτρηση, χωρίς την πρόκληση βλαβών στο δείγμα, με τις μετρήσεις να λαμβάνουν χώρα σε μικρό χρονικό διάστημα. Πριν τη μέτρηση απαιτείται μικρή ή και καθόλου προετοιμασία των δειγμάτων. Έτσι αναλύονται πολλά διαφορετικά δείγματα, από ένα και μόνο κύτταρο μέχρι έργα τέχνης. Οι τεχνικές IBA βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους επιστημονικούς κλάδους όπως στην έρευνα αερολυμάτων, στη φυσική στερεάς κατάστασης (ιδιαίτερα τους ημιαγωγούς), στην ανάλυση λεπτών υμένων (thin layer analysis), στη βιολογία, στην ιατρική, την φαρμακευτική, την αρχαιολογία, την τέχνη και πολλά άλλα. Οι πιο διαδεδομένες από τις μεθόδους είναι η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford (RBS), η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης (EBS), η μέθοδος πυρηνικών αντιδράσεων (NRA), με την τεχνική φασματοσκοπίας ακτίνων-γ (PIGE) να αποτελεί μία υποκατηγορία της NRA και η φασματοσκοπία ανίχνευσης πυρήνων από ανάκρουση (ERDA), με τις οποίες πραγματοποιούνται και μετρήσεις προφίλομετρίας, ενώ ευρύτερα διαδεδομένη είναι και η τεχνική φασματοσκοπίας ακτίνων-X (PIXE), μια μη προφίλομετρική μέθοδος. Πολλές φορές κρίνεται απαραίτητος ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων για την εξαγωγή ορθότερων αποτελεσμάτων και για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων στη μελέτη λεπτών υμενίων.

Βασική προϋπόθεση της υλοποίησης των ανωτέρω τεχνικών αποτελεί η γνώση των διαφορικών ενεργών διατομών της υπό μελέτη αλληλεπίδρασης. Δεδομένου ότι τα περισσότερα στοιχεία, και δη τα ελαφρύτερα, δεν ακολουθούν την σχέση του Rutherford, δεν υπάρχει αναλυτικός τρόπος να υπολογιστούν θεωρητικά οι ενεργές διατομές για τις τυπικές ενέργειες σωματιδίων που προέρχονται από επιταχυντές. Η λύση δίνεται με την πραγματοποίηση πειραμάτων μέτρησης διαφορικών ενεργών διατομών για διάφορα στοιχεία σε μεγάλο εύρος ενεργειών και η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων σε βιβλιοθήκες όπως η IBANDL[2] και η EXFOR[3]. Με μία μικρή διερεύνηση στις βιβλιοθήκες αυτές διαπιστώνεται εύκολα η ασυμφωνία που συχνά υπάρχει μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων ή/και τα πολύ αραιά ενεργειακά βήματα που ακολουθούνται. Ακόμη, η εξάρτηση της ενεργού διατομής από τη γωνία σκέδασης, καθιστά αξιόπιστα μόνο τα πειράματα που διεξάγονται σε όμοια γεωμετρία με αυτή που μετρήθηκαν οι τιμές της ενεργού διατομής. Επιπλέον, σε περιπτώσεις ύπαρξης λεπτών

συντονισμών η ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης παρουσιάζει δομή με τυπικό πλάτος 0,1-10 keV το οποίο συχνά μετριέται χωρίς μεγάλη λεπτομέρεια. Όμως η ακριβής γνώση των τιμών της ενεργού διατομής στην περιοχή του συντονισμού είναι κρίσιμη για την επαρκή προσομοίωση φασμάτων οπισθοσκέδασης. Για όλους αυτούς τους λόγους κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση (evaluation) των τιμών της ενεργού διατομής σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα. Αρχικά πραγματοποιείται έρευνα στη βιβλιογραφία και στις βάσεις δεδομένων για τη συλλογή των πειραματικών τιμών που υπάρχουν. Βάση της σύγκρισης των δεδομένων μεταξύ τους και της εξέτασης των σφαλμάτων που έχουν αποδοθεί στις τιμές και των συνθηκών διεξαγωγής των πειραμάτων συλλέγονται τα πιο αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια προσαρμόζονται οι παράμετροι του εκάστοτε θεωρητικού μοντέλου (το οποίο περιλαμβάνει την κατάλληλη φυσική για τη διαδικασία σκέδασης που μελετάται) σύμφωνα με τα δεδομένα που επιλέχθηκαν. Έτσι με χρήση του μοντέλου και των προσαρμοσμένων παραμέτρων προκύπτουν οι βέλτιστες θεωρητικές διαφορικές ενεργές διατομές. Τελευταίο στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η σύγκριση πειραματικών σημείων με τις υπολογισμένες καμπύλες και η ανάλυση των αποκλίσεων. Σε περιπτώσεις που υπάρχουν ασυμφωνίες πραγματοποιούνται πειράματα ελέγχου αξιοπιστίας (benchmarking) των ενεργών διατομών μαζί με προσομοίωση του φάσματος. Εάν δεν βρεθεί εξήγηση για τις διαφορές που προέκυψαν, επανεξετάζονται οι πειραματικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των παραμέτρων[4]. Είναι λοιπόν φανερό ότι η αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων είναι μία δυναμική διαδικασία η οποία εξαρτάται ισχυρά από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των πειραματικών μετρήσεων για ένα μεγάλο εύρος ενεργειών και γωνιών ανίχνευσης.

Η τρέχουσα αξιολόγηση για το μαγνήσιο φτάνει μέχρι 2700keV. Αυτό συμβαίνει γιατί η ελαστική σκέδαση πρωτονίου από φυσικό μαγνήσιο δεν έχει μετρηθεί για ενέργειες πάνω από 2540keV, οι μετρήσεις που υπάρχουν για το μαγνήσιο 24 στην περιοχή από 2800-3990keV είναι λίγες, ενώ για μεγαλύτερες ενέργειες υπάρχει μεγάλη ασυμφωνία μεταξύ των διαφορετικών πειραματικών μετρήσεων. Συνεπώς βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συνεισφορά στο πλήθος των υπαρχόντων μετρήσεων με σκοπό την επέκταση της αξιολόγησης σε μεγαλύτερες ενέργειες παρέχοντας ένα συνεκτικό (coherent) σετ πειραματικών δεδομένων πάνω στα οποία θα μπορούσε να βασιστεί η θεωρία R-matrix για τη μελέτη των συντονισμών.



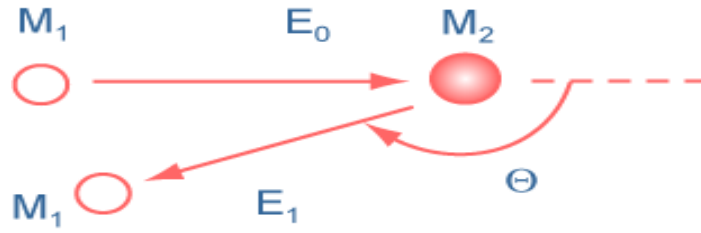
Ο λόγος που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν ενέργειες υψηλότερες των 2700keV, όπου σταματάει η αξιολόγηση, έγκειται στο γεγονός ότι η ενεργός διατομή των ελαφρών στοιχείων που δεν ακολουθεί την σχέση του Rutherford αυξάνεται ραγδαία, σε αντίθεση με αυτή των βαρύτερων στοιχείων που συνεχίζει να ακολουθεί την εξάρτηση  $1/E^2$  με αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθησίας της μεθόδου για τον καθορισμό ελαφρών στοιχείων που επιμολύνουν δείγματα με βαριές μήτρες σε σημαντικά μεγαλύτερα βάθη ανίχνευσης. Επιλέχθηκε η χρήση δέσμης πρωτονίων έναντι βαρύτερων ιόντων (δευτέρια ή σωματια-α) καθώς αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση ελαφρών στοιχείων σε βαριές μήτρες και σε σημαντικά μεγαλύτερα βάθη[4]. Αυτό συμβαίνει γιατί η ενεργός διατομή των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων από ελαφρά στοιχεία είναι πολλές φορές μεγαλύτερη (3-300 φορές) από αυτή που προκύπτει από τη σχέση του Rutherford και παρουσιάζουν μικρότερη ισχύ ανάσχεσης στα υλικά του στόχου. Συνεπώς, τα πρωτόνια έχουν μεγαλύτερη διαπεραστικότητα και μικρότερο ενεργειακό διασκεδασμό (straggling).

Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούν συνοπτικά οι πιο διαδεδομένες από τις μεθόδους IBA.

## 1.2 Πυρηνικές Τεχνικές

Η μέθοδος της φασματοσκοπίας οπισθοσκέδασης Rutherford (**Rutherford Backscattering Spectroscopy - RBS**) αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη πυρηνική μέθοδο ανάλυσης του επιφανειακού στρώματος διάφορων στερεών υλικών. Ο υπό ανάλυση στόχος βομβαρδίζεται με ιόντα της τάξης των MeV και καταγράφεται η ενέργεια των ελαστικά οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων και σύμφωνα με την σχέση Rutherford, επιτρέποντας τον ποσοτικό προσδιορισμό και την κατά βάθος κατανομή των στοιχείων των υλικών του στόχου. Το βάθος ανάλυσης μπορεί να φτάσει τα ~20μm για δέσμη πρωτονίων. Το κύριο μειονέκτημα της RBS είναι η χαμηλή ευαισθησία σε ελαφρά στοιχεία ( $A < 60$ ).

Σκέδαση Rutherford ονομάζεται η ελαστική σκέδαση των πυρήνων της δέσμης από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα του στόχου, όταν αυτή πραγματοποιείται για ενέργειες δέσμης αρκετά μικρότερες από το φράγμα δυναμικού του συστήματος πυρήνων στόχου – βλήματος.



Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση οπισθοσκέδασης.

Η ενεργός διατομή των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων δίνεται σύμφωνα με τη σχέση Rutherford:

$$\sigma_R [\text{mb/sr}] = 5.1837436 \times 10^6 \left( \frac{Z_1 Z_2}{E [\text{keV}]} \right)^2 \frac{\left\{ (M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + M_2 \cos \theta \right\}^2}{M_2 \sin^4 \theta (M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (\text{σχέση 1}),$$

στο σύστημα του εργαστηρίου.

Ο κινηματικός παράγοντας  $K$  ισούται με

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

Η τεχνική **ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis)**, φασματοσκοπία ανίχνευσης πυρήνων από ανάκρουση, είναι μία συγγενής τεχνική με την RBS μόνο που σε αυτή την περίπτωση ανιχνεύεται ο ανακρουόμενος πυρήνας στο εμπρόσθιο ημισφαίριο. Χρησιμοποιείται κυρίως για ανίχνευση υδρογόνου και δευτερίου σε δείγματα, αφορά κυρίως επιφανειακά στρώματα και η δέσμη αποτελείται συνήθως από βαρέα ιόντα.

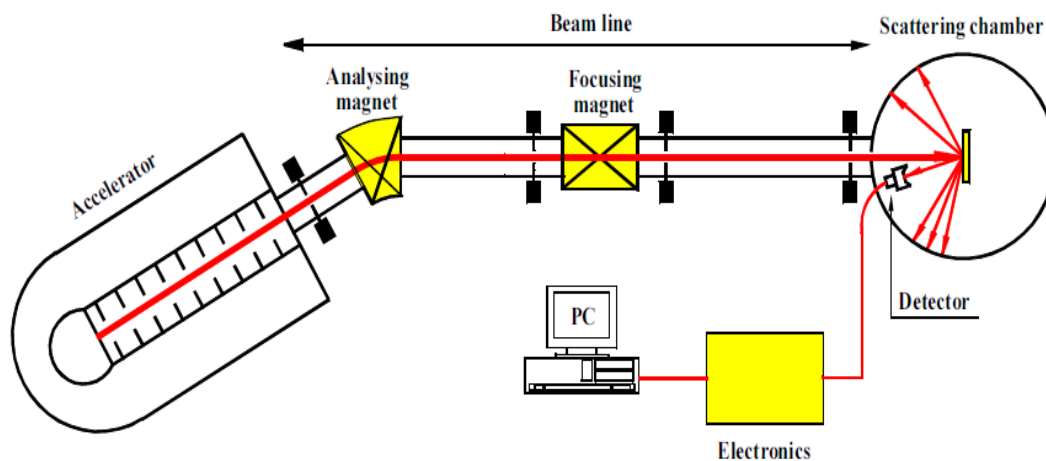
Στην περίπτωση της φασματοσκοπίας ακτίνων- $\gamma$ , **PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission)** το προϊόν της αντίδρασης που ανιχνεύεται είναι ακτίνες- $\gamma$ . Όταν ιόντα με επαρκή ενέργεια της τάξης των MeV ξεπεράσουν το δυναμικό Coulomb και βρεθούν σε απόσταση συγκρίσιμη με αυτή της ακτίνας του πυρήνα είτε θα προκύψουν αποκλίσεις από την ελαστική σκέδαση και όταν η συνολική ενέργεια του συστήματος συμπέσει με την ενέργεια μιας διεγερμένης στάθμης του σύνθετου πυρήνα, τότε η πιθανότητα να συμβεί αντίδραση αυξάνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα η ενεργός διατομή να παρουσιάζει συντονισμούς, είτε θα λάβουν χώρα κάποιες πυρηνικές αντιδράσεις με προϊόντα πρωτόνια, σωματία  $\alpha$ , νετρόνια ή ακτίνες- $\gamma$ . Όσον αφορά στο φυσικό μαγνήσιο δεν υπάρχουν δεδομένα στην IBANDL, ενώ κάποιες μετρήσεις που υπάρχουν για τα ισότοπα μαγνήσιο-24 ((p,p $\gamma$ )-E $\gamma$ =1369keV) και μαγνήσιο-25 ((p,p $\gamma_1$ )-

$E_{\gamma}=582\text{keV}, (p, p\gamma_2) - E_{\gamma}=975\text{keV}$ ) δεν είναι τόσο κατάλληλες για μελέτη του μαγνησίου καθώς οι συντονισμοί είναι πολύ φαρδιοί και περιορίζουν την διακριτική ικανότητα.

Η φασματοσκοπία ανάλυσης πυρηνικών αντιδράσεων (**Nuclear Reaction Analysis - NRA**) αφορά στην ανίχνευση των σωματιδίων  $\beta$  που προκύπτουν από την πυρηνική αντίδραση  $A(\alpha, \beta)B$  όταν τα σωματίδια της δέσμης- $\alpha$  αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες  $A$  του υλικού. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το υπό μελέτη δείγμα αποτελείται από ένα στρώμα ελαφρού στοιχείου τοποθετημένο στην επιφάνεια βαρύτερου υποστρώματος, το φάσμα RBS του ελαφρού στοιχείου θα αλληλεπικαλύπτεται με αυτό του βαρύτερου γεγονός που οδηγεί σε παρουσία μεγάλου υποβάθρου. Σε μια τέτοια κατάσταση η NRA δίνει πρόσθετες πληροφορίες για τον υπό μελέτη στόχο. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μέτρηση σε μία ενέργεια, με δεδομένο είδος δέσμης οδηγεί σε ανίχνευση ενός ή και μερικών διαφορετικών ισοτόπων με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως η σύσταση ενός υλικού από μια και μόνο μέτρηση αλλά απαιτούνται μετρήσεις σε πολλές διαφορετικές ενέργειες ή/και με διαφορετική δέσμη ιόντων[5]. Εφαρμόζεται συνήθως σε εξώθερμες αντιδράσεις με υψηλή τιμή  $Q$ -value και τα εκπεμπόμενα σωματίδια εμφανίζονται στην περιοχή υψηλών ενεργειών στα πειραματικά φάσματα (τα ανιχνευόμενα σωματίδια έχουν μεγάλη ενέργεια, μεγαλύτερη από αυτή των ελαστικά σκεδαζόμενων) όπου δεν υπάρχει υποβάθρο προκαλούμενο από τη μήτρα του στόχου. Στην περίπτωση που η δέσμη αποτελείται από δευτέρια υπάρχει κίνδυνος ύπαρξης υψηλού υποβάθρου, γεγονός που οφείλεται στην ταυτόχρονη διέγερση ελαφρών στοιχείων που ενδέχεται να υπάρχουν στο υπό μελέτη δείγμα, διαφορετικά από το στοιχείο ενδιαφέροντος [6]. Οι αντιδράσεις που προτιμούνται για την μελέτη των στοιχείων/ισοτόπων είναι οι  $(p, \alpha_0)$ ,  $(d, p_{0,1,2})$ , και η  $(d, \alpha_0)$ . Ως μέτρο σύγκρισης μεταξύ τους λαμβάνεται η ισχύς ανάσχεσης των σωματιδίων στον στόχο κατά την είσοδο και έξοδο από αυτόν, η τιμή του  $Q$ -value της κάθε αντίδρασης και η τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής. Όπως στην περίπτωση της PIGE, έτσι και στην NRA δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις για όλα τα φυσικά ισότοπα του μαγνησίου. Για το μαγνήσιο-24 οι αντιδράσεις που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μελέτη είναι οι  $(d, p_0)$  με  $Q=5106\text{keV}$ ,  $(d, p_1)$  με  $Q=4521,1\text{keV}$  και η  $(d, p_2)$  με  $Q=4131,4\text{keV}$  με ίδια τάξη μεγέθους της ενεργού διατομής, οπότε με βάση την τιμή του  $Q$ -value η  $(d, p_0)$  είναι προτιμητέα. Τα προβλήματα που υπάρχουν για την χρήση της αντίδρασης αυτής έχουν να κάνουν με την έλλειψη πειραματικών μετρήσεων για ενέργειες πάνω από  $2500\text{keV}$ , ενώ σε χαμηλότερες ενέργειες όπου υπάρχουν δεδομένα η τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής δεν ξεπερνάει σε καμία περίπτωση το  $1.5\text{mb/sr}$  (μία τάξη μεγέθους μικρότερη

από αυτή της  $(p_0, p_0)$  καθώς επίσης παρατηρείται έντονη γωνιακή εξάρτηση από τα 1700keV και πάνω. Για το μαγνήσιο-25 υπάρχει μετρημένη  $\eta(d, \alpha_0)$  με  $Q=7049,8$  keV, όπως και για το μαγνήσιο-26 με  $Q=2914,34$ keV όμως με μικρή τιμή διαφορικής ενεργού διατομής της τάξης του 0,1mb/sr.

Τέλος, η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης (**EBS-Elastic (Non Rutherford) Backscattering Spectroscopy**), αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες IBA τεχνικές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προφίλομετρία μαγνησίου. Όταν τα σωματίδια που ανιχνεύονται προέρχονται από ελαστική οπισθοσκέδαση στους πυρήνες του στόχου, αλλά δεν ακολουθούν την σχέση του Rutherford, λόγω συνεισφοράς του δυναμικού του πυρήνα και της ύπαρξης του μηχανισμού του σύνθετου πυρήνα (όπως συμβαίνει στην περίπτωση ελαφρών ιόντων-βλημάτων σε τυπικές ενέργειες που προέρχονται από επιταχυντές τα οποία αλληλεπιδρούν με ελαφρείς πυρήνες-στόχους) η τεχνική αποκαλείται απλά φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης. Αποτελεί παρόμοια τεχνική με την RBS αλλά στην τεχνική EBS οι διαφορικές ενεργές διατομές θα πρέπει να προσδιοριστούν πειραματικά.



Εικόνα 1: Τυπική διάταξη EBS.

Η χρήση της μεθόδου EBS γενικά προτιμάται στις περισσότερες εφαρμογές καθώς προσφέρει υψηλή διακριτική ικανότητα για κατά βάθος ανάλυση υλικών, και μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ίδια πειραματική διάταξη με αυτήν της RBS με πολύ μικρές αλλαγές στις πειραματικές συνθήκες. Στην περίπτωση της προφίλομετρίας ελαφρών στοιχείων, αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική. Η δημιουργία της IBANDL (<http://www.nds.iaea.org/ibandl/>), μιας βιβλιοθήκης που υποστηρίζεται από την IAEA και περιέχει διαφορικές ενεργές διατομές κατάλληλες για χρήση των IBA τεχνικών,

έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες ανάλυσης μέσω της τεχνικής EBS. Οι πιο αξιόπιστες τιμές ενεργών διατομών είναι αυτές που έχει πραγματοποιηθεί αξιολόγηση(evaluation) και διανέμονται στην επιστημονική κοινότητα μέσω του SigmaCalc (<http://www.nds.iaea.org/sigmacalc/>) και μέσω της IBANDL.

Ο λόγος που στην παρούσα μέτρηση χρησιμοποιήθηκε δέσμη πρωτονίων αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Όσον αφορά στην ελαστική οπισθοσκέδαση για δέσμες βαρύτερες των πρωτονίων θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχουν μετρήσεις για τα ισότοπα μαγνήσιο-25 και μαγνήσιο-26. Για το φυσικό μαγνήσιο υπάρχουν μετρήσεις για την αντίδραση (d,d<sub>0</sub>) μέχρι την ενέργεια 2000keV χωρίς όμως να υπάρχει evaluation, ενώ για την (α<sub>0</sub>,α<sub>0</sub>) υπάρχει ένα μόνο σετ μετρήσεων. Για το μαγνήσιο-24 στην περίπτωση της αντίδρασης (d,d<sub>0</sub>) υπάρχει μόνο μία μέτρηση με μεγάλο ενεργειακό βήμα, ενώ για την αντίδραση (α<sub>0</sub>,α<sub>0</sub>) υπάρχει evaluation για ενέργειες 3170-3780keV αλλά δεν προτιμάται γιατί τα σωματίδια-α έχουν μικρότερη διαπεραστικότητα και παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενεργειακό διασκεδασμό (straggling).

## 2. Πειραματική διάταξη

### 2.1 Πειραματική γραμμή

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής (ΙΠΣΦ) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» όπου βρίσκεται ο ηλεκτροστατικός επιταχυντής ιόντων Van de Graaff Tandem 5.5 MV.



Εικόνα 2: Ο επιταχυντής Tandem του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής (ΙΠΣΦ) του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

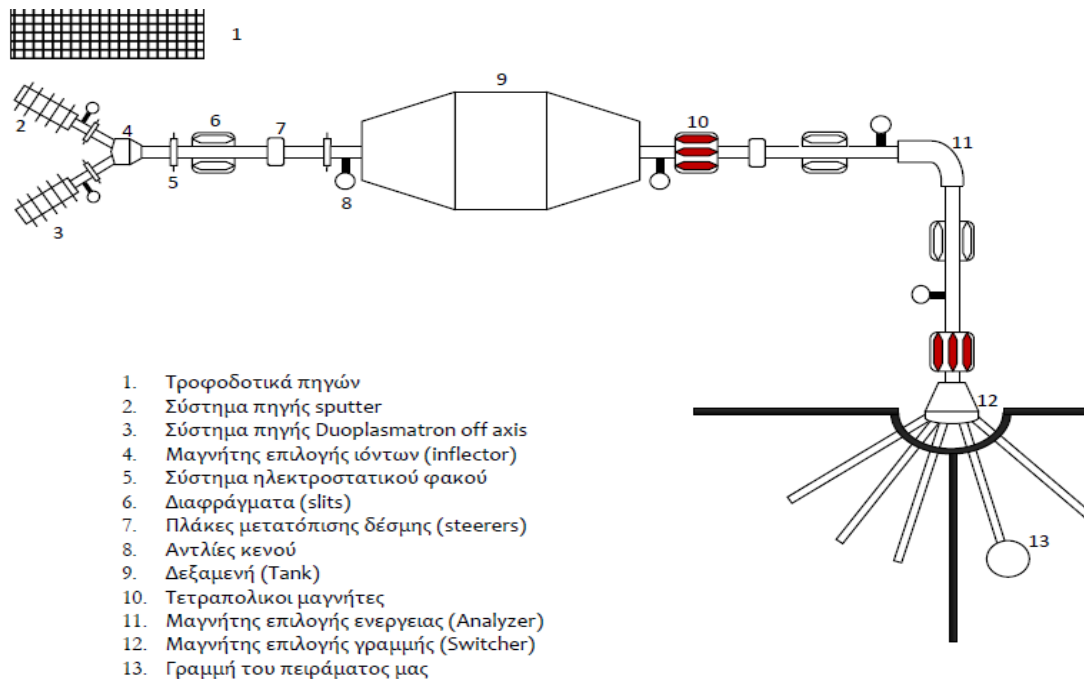
Ο επιταχυντής τύπου Tandem είναι ένα είδος ηλεκτροστατικού επιταχυντή στον οποίο η επιτάχυνση των ιόντων πραγματοποιείται σε δύο στάδια, με ένα τερματικό υψηλής τάσης. Αποτελείται από τρία βασικά τμήματα, (i) τις πηγές ιόντων στην αρχή της γραμμής, (ii) τη γεννήτρια Van de Graaff στο μέσο της επιταχυντικής διάταξης και (iii) την πειραματική γραμμή.

Οι πηγές ιόντων είναι δύο, η Sputter για παραγωγή βαρέων ιόντων, και η Duoplasmatron για ελαφρά ιόντα. Στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε χρήση δέσμης πρωτονίων τα οποία παρήχθησαν από την πηγή Duoplasmatron σε ενέργειες από 2700keV έως 4250keV με βήμα 10-40keV ανάλογα με την ενεργειακή περιοχή μελέτης. Η διαδικασία επιτάχυνσης είναι η ακόλουθη: τα αρνητικά ιόντα με φορτίο  $-e$ , αφού παραχθούν από την πηγή, εστιάζονται από ένα σύστημα φακών και τετραπόλων

Έπειτα, διέρχονται από έναν ηλεκτρομαγνήτη μεταβλητού μαγνητικού πεδίου που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής ιόντων (inflector). Στη συνέχεια περνούν στον προ-επιταχυντικό σωλήνα, αποκτώντας μεγίστη ενέργεια 60 keV.

Η κύρια επιτάχυνση πραγματοποιείται στη δεξαμενή (tank) του επιταχυντή όπου βρίσκεται και η γεννήτρια Van de Graaff. Τα βασικά μέρη της γεννήτριας είναι μια μεγάλη μεταλλική σφαίρα (τερματικό) στο μέσο της δεξαμενής, η οποία φορτίζεται σε υψηλό δυναμικό και ένας κατακόρυφος μάντας από μονωτικό υλικό που τη φορτίζει μεταφέροντας σε αυτή θετικά φορτία. Τα αρνητικά ιόντα κατά την είσοδό τους στην δεξαμενή έλκονται από τη θετική τάση της μεταλλικής σφαίρας. Μέσα στη σφαίρα βρίσκεται ο απογυμνωτής, ο οποίος περιέχει μια σειρά λεπτών φύλλων άνθρακα, παρατεταγμένων κυκλικά με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε φορά μόνο ένα από τα φύλλα να βρίσκεται με την επιφάνειά του στην πορεία της δέσμης. Καθώς τα ιόντα διαπερνούν το φύλλο άνθρακα, απογυμνώνονται από το επιπλέον ηλεκτρόνιο, που τα καθιστά αρνητικά καθώς και από άλλα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να μετατρέπονται σε θετικά ιόντα. Το ηλεκτρικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί λόγω της υψηλής τάσης απωθεί τα θετικά αυτά ιόντα προς την έξοδο του επιταχυντή. Η συνολική ενέργεια των ιόντων στην έξοδο θα είναι  $E = q(\text{πριν το τερματικό})V_{\text{τερματικού}} + q'(\text{μετά το τερματικό})V_{\text{τερματικού}}$ , με  $q$  (πριν το τερματικό) =  $e$ .

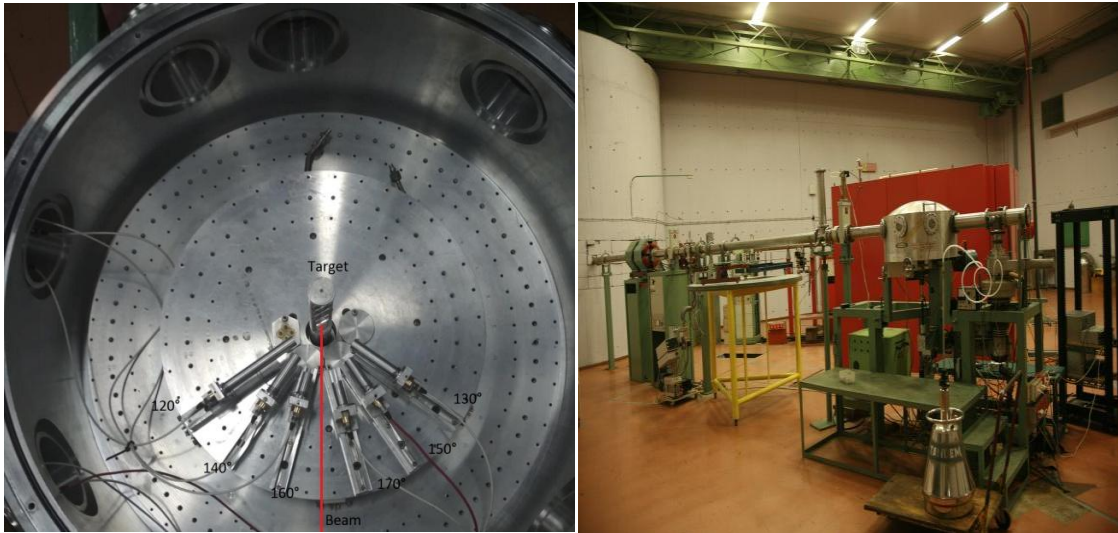
Τα ιόντα συνεχίζουν την πορεία τους μέσα στη γραμμή και στρέφονται κατά 90° από έναν ηλεκτρομαγνήτη που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής ενέργειας (μαγνήτης ανάλυσης-analyser) και εξασφαλίζει την καθαρότητα της δέσμης ως προς την ενέργεια. Τόσο ο analyzer όσο και το δυναμικό της σφαίρας, δημιουργούν μια μικρή διακύμανση στην ενέργεια της δέσμης, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με τη διαδικασία της ενεργειακής βαθμονόμησης. Με τη βοήθεια ενός τρίτου ηλεκτρομαγνήτη που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής πειραματικής γραμμής (switcher) η δέσμη οδηγείται σε μία από τις 6 πειραματικές γραμμές-διατάξεις. Η διαμόρφωση και ο έλεγχος της δέσμης κατά μήκος όλης της γραμμής, γίνεται με διάφορα «οπτικά» στοιχεία όπως διαφράγματα, πλάκες μετατόπισης, μαγνητικά δίπολα, τετράπολα και συσκευές μέτρησης της έντασης. Κατά μήκος όλης της γραμμής διαμορφώνονται συνθήκες υψηλού κενού ( $10^{-5} - 10^{-6}$  Torr), ώστε να απαλειφθούν οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων της δέσμης και των σωματιδίων του αέρα γεγονός που θα προκαλούσε εξασθένιση της δέσμης. Για το λόγο αυτόν ανά τακτά διαστήματα υπάρχουν αντλίες υψηλού κενού, καθώς και όργανα μέτρησης κενού.



Εικόνα 3: Σχεδιάγραμμα του επιταχυντικού συστήματος.

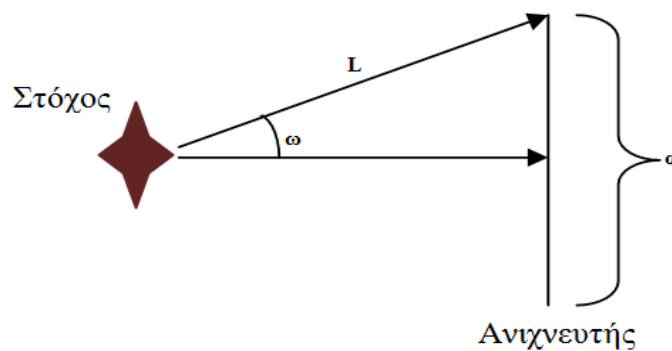
Το γωνιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα είναι υψηλής ακρίβειας, διαμέτρου 70cm με θέσεις στηρίξεως ανιχνευτών βαθμονομημένες ανά  $5^\circ$  ή  $10^\circ$  με ακρίβεια  $0,01^\circ$ . Βρίσκεται στο εσωτερικό του θαλάμου σκέδασης ο οποίος σφραγίζεται και με χρήση δύο αντλιών, μίας περιστροφικής και μίας στροβιλομοριακής δημιουργείται υψηλό κενό της τάξης των  $10^{-6}$ Torr που διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Στην είσοδο του θαλάμου τοποθετούνται κατευθυντήρες δέσμης(collimators)για την επίτευξη του επιθυμητού μεγέθους της δέσμης πρωτονίων. Οι στόχοι τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένη βάση στο κέντρο του θαλάμου και οι ανιχνευτές εφαρμόζονται στις θέσεις στήριξης που υπάρχουν πάνω στο γωνιόμετρο(όπως φαίνεται στην εικόνα 4). Στα πλαϊνά τοιχώματα του θαλάμου υπάρχουν υποδοχείς για την λήψη των σημάτων και ταυτόχρονα την τροφοδότηση των ανιχνευτών με κατάλληλη τάση μέσω ομοαξονικών καλωδίων.





Εικόνα 4:Γωνιόμετρο εντός του θαλάμου. Εικόνα 5:Πειραματική γραμμή γωνιομέτρου.

Για την ανίχνευση των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων χρησιμοποιήθηκαν έξι ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού και διακριτικής ικανότητας  $\sim 13\text{keV}$  σε γωνίες  $170^\circ - 120^\circ$  με βήμα  $10^\circ$ . Στο πρόσθιο τμήμα των ανιχνευτών τοποθετήθηκαν ορθογώνιες μάσκες τανταλίου οι οποίες χρησιμεύουν στην αύξηση της ακρίβειας της γωνίας στην οποία ο ανιχνευτής ανιχνεύει σωματίδια. Για τον προσδιορισμό της ιδανικής απόστασης των ανιχνευτών από τον στόχο λήφθηκε υπ' όψιν το γεγονός ότι η συνολική αβεβαιότητα στην γωνία  $\omega$  (Σχήμα 2) δεν έπρεπε να ξεπερνά την  $1,5^\circ$ .



Σχήμα 2:Προσδιορισμός ιδανικής απόστασης στόχου-ανιχνευτή.

Έχοντας μετρήσει το άνοιγμα της μάσκας  $\sim 4,5\text{mm}$  προκύπτει ότι  $L=8,6\text{cm}$ . Λόγω περιορισμένου χώρου εξ αιτίας του όγκου των βάσεων των ανιχνευτών, τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις  $11\text{cm}$  έως  $15,5\text{cm}$ , όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

ΓΩΝΙΑ	ΣΕΙΡΙΑΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ
120 <sup>0</sup>	5501121	15.5cm
130 <sup>0</sup>	5501132R	12cm
140 <sup>0</sup>	5311203	12cm
150 <sup>0</sup>	5501133	11.5cm
160 <sup>0</sup>	5501122	11cm
170 <sup>0</sup>	5309118	11cm

Πίνακας 1:Στοιχεία για τους ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν.

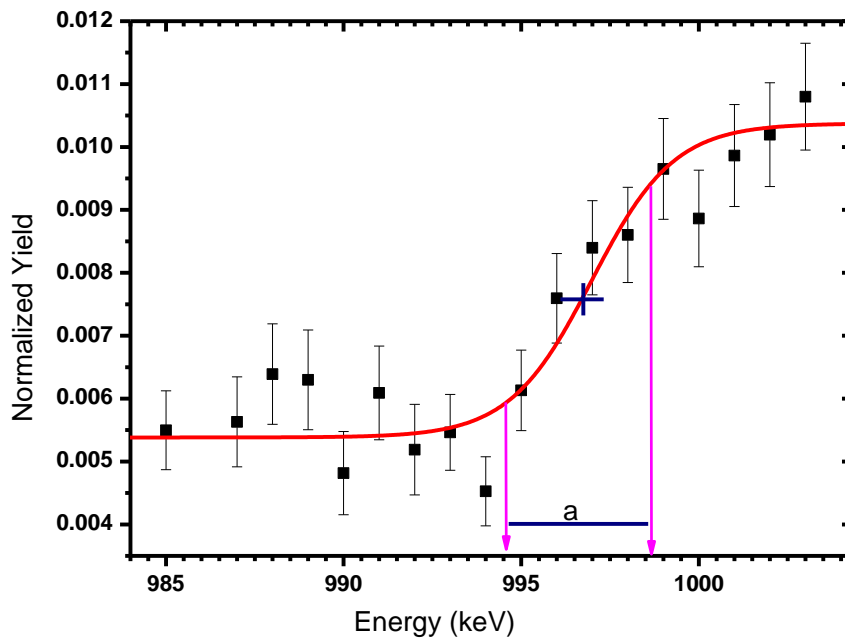
Επίσης πραγματοποιήθηκε τοποθέτηση μικρών σωλήνων από αλουμίνιο μπροστά από τους ανιχνευτές με σκοπό την θωράκιση αυτών από τα ελαστικά σκεδαζόμενα σωματίδια στα τοιχώματα του θαλάμου και σε λοιπά στοιχεία της διάταξης.

## 2.2 Ηλεκτρονικά-συνδεσμολογία

Τα ηλεκτρικά σήματα που δημιουργούνται στους ανιχνευτές πυριτίου επιφανειακού φραγμού είναι ανάλογα της ενέργειας του προσπίπτοντος σωματιδίου. Οι παλμοί είναι της τάξης του pV με αποτέλεσμα να χρειάζονται ενίσχυση για να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία τους. Στους ανιχνευτές των γωνιών 120<sup>0</sup> και 160<sup>0</sup> τοποθετήθηκαν προενισχυτές (preamplifiers) που αποδίδουν μια μικρή ενίσχυση και τοποθετούνται όσο το δυνατό πιο κοντά σε αυτούς ώστε να προσθέτουν το λιγότερο δυνατό θόρυβο και έπειτα συνδέονται οι ενισχυτές (amplifiers) για την περαιτέρω ενίσχυση και την κατάλληλη διαμόρφωση των σημάτων για επεξεργασία (shaping time,pole zero,polarity). Οι υπόλοιπες γωνίες συνδέθηκαν σε διαφορετική μονάδα η οποία απαρτίζεται από ενσωματωμένους προενισχυτές και ενισχυτές. Στην συνέχεια τα σήματα εξόδου των ενισχυτών οδηγούνται σε αναλογικοψηφιακούς μετατροπείς (Analog to Digital Converter-ADC), οι οποίοι ψηφιοποιούν τα σήματα και είναι συνδεδεμένοι με πολυκαναλικούς αναλυτές (Multi-Channel Analyzer-MCA), οι οποίοι καταχωρούν σε κανάλια (θέσεις μνήμης) τους παλμούς ανάλογα με το ύψος τους. Στο συγκεκριμένο πείραμα το μέγιστο εύρος ορίστηκε στα 1024 κανάλια, μέγεθος επαρκές για την ενεργειακή διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών επιφανειακού φραγμού πυριτίου. Τελικά τα σήματα καταλήγουν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου παρουσιάζονται υπό μορφή ιστογράμματος (φάσματα), όπου στον x-άξονα αναγράφονται τα κανάλια και στον y-άξονα ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων.

### 2.3 Ενεργειακή βαθμονόμηση δέσμης

Η ενεργειακή βαθμονόμηση της δέσμης του επιταχυντή πραγματοποιήθηκε με χρήση του λεπτού και ισχυρού συντονισμού της αντίδρασης  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  ( $E_\gamma=1779\text{keV}$ ) που επιτυγχάνεται για ενέργεια πρωτονίων  $E_{p,\text{lab}}=991,9\text{keV}$  με ενεργειακό εύρος στάθμης  $110\text{eV}$ . Ακτινοβολήθηκε στόχος αλουμινίου απείρου πάχους με δέσμη πρωτονίων ενέργειας  $980\text{keV}-1017\text{keV}$  με βήμα  $5\text{keV}$  (μακριά από το συντονισμό) και  $1\text{keV}$  (κοντά στο συντονισμό). Η ανίχνευση των εκπεμπόμενων ακτίνων- $\gamma$  έγινε με ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High Purity -HPGe).



Σχήμα 3:Βαθμονόμηση επιταχυντή με χρήση της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$

Η σιγμοειδής μορφή της καμπύλης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 εξηγείται ως εξής: σε μικρές ενέργειες τα πρωτόνια δεν έχουν επαρκή ενέργεια ώστε να διεγείρουν τον συντονισμό. Όσο αυξάνεται η ενέργεια και πλησιάζει την ενέργεια συντονισμού κάποια από αυτά έχουν την επιθυμητή ενέργεια και διεγείρουν τον συντονισμό με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση στο πλήθος των φωτονίων στην φωτοκορυφή. Το μέσο της ανόδου της καμπύλης αντιστοιχεί στην ενέργεια συντονισμού ενώ η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του 12% και του 88% του ύψους της καμπύλης (απόσταση a) δίνει την διακύμανση της δέσμης (ripple). Από τη γραφική παράσταση προκύπτει απόκλιση στην ενέργεια (offset) ίση με  $5,1\text{keV}$  και διακύμανση της δέσμης ίση με  $4,7\text{keV}$ .

## 2.4 Κατασκευή Στόχων

Η κατασκευή των στόχων του πειράματος πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του εξαχνωτήρα στο εργαστήριο Tandem του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» με την μέθοδο της εξάχνωσης, που εμφανίζεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Ο εξαχνωτήρας του Ινστιτούτου για την παρασκευή στόχων.

Η βασική μορφολογία του εξαχνωτήρα του Ινστιτούτου περιλαμβάνει ένα θάλαμο, κωδωνοειδούς σχήματος, ο οποίος αποσπάται από την κεντρική διάταξη. Το σύστημα του εξαχνωτή μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλό κενό έως και  $10^{-6}$  Torr με τη βοήθεια τριών αντλιών (rotary, turbo, vac/ion). Μέσα στο θάλαμο βρίσκονται χάλκινοι υποδοχείς, μέσω των οποίων γίνεται η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στην ειδική βάση (μήτρα) με το προς εξάχνωση υλικό. Η μήτρα είναι κατασκευασμένη από ταντάλιο, στοιχείο με σημείο τήξης  $\approx 3290\text{K}$ . Σε ύψος 13.5 cm από τη βάση τοποθετείται μεταλλική “εξέδρα” με ειδικά γυάλινα πλακίδια στα οποία θα εναποτεθεί το εξάχνωμένο υλικό, σχηματίζοντας λεπτά υμένια.

Για την κατασκευή των στόχων του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μεταλλική ταινία φυσικού μαγνησίου. Το μαγνήσιο όταν έρχεται σε επαφή με τον αέρα αντιδρά με αυτόν με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός στρώματος οξειδίου του μαγνησίου στην επιφάνειά του. Αφού απομακρύνθηκε κατά το δυνατόν το περιττό οξείδιο από την επιφάνεια της ταινίας ακολουθήθηκε η τυπική διαδικασία εξάχνωσης προς κατασκευή των στόχων σε υπόστρωμα άνθρακα.

### Υπολογισμός μάζας μαγνησίου και χρυσού.

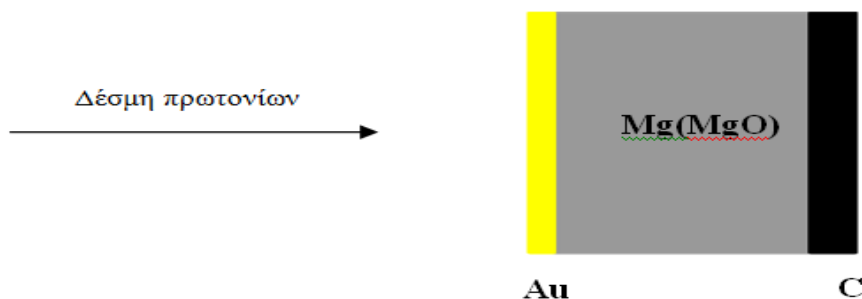
Αρχικά πραγματοποιήθηκε ο θεωρητικός υπολογισμός της απαραίτητης ποσότητας του μαγνησίου  $^{nat}\text{Mg}$ . Αφού αποφασίστηκε ότι το μικρότερο βήμα στην ενέργεια θα είναι 10keV υπολογίστηκε η απαιτούμενη ποσότητα μαγνησίου για απώλεια ενέργειας μέσα στον στόχο ίσης περίπου με 5keV με την βοήθεια του προγράμματος SRIM[7] και της σχέσης 3. Η σχέση αυτή εξυπηρετεί τους υπολογισμούς μας, καθώς η εξάχνωση είναι ισοτροπική στο άνω 2π μέρος του εξαχνωτήρα όπου τοποθετούνται τα λεπτά φύλλα άνθρακα.

$$A = \frac{m}{2\pi R^2} \Leftrightarrow m = 53.56\text{mg} \text{ (σχέση 3)}$$

Θεωρητική τιμή $^{nat}\text{Mg} = 53.56\text{mg}$	Πειραματική τιμή $^{nat}\text{Mg} = 57,36 \text{ mg}$ .
Διάρκεια εξάχνωσης: 8h	Σημείο τήξης μαγνησίου: $651^\circ\text{C}$

Με την ίδια διαδικασία υπολογίστηκε και η μάζα του χρυσού που εξαχνώθηκε στην επιφάνεια του μαγνησίου για απώλεια ενέργειας της δέσμης  $\sim 1,5\text{keV}$ . Η εξάχνωση του χρυσού πραγματοποιείται για χρήση της σχετικής μεθόδου υπολογισμού διαφορικής ενεργού διατομής του  $^{nat}\text{Mg}$ , για χημική και μηχανική προστασία των λεπτών στόχων και για τη βαθμονόμηση του ADC.

Θεωρητική τιμή Au=41.82mg	Πειραματική τιμή Au=43.40 mg
Διάρκεια εξάχνωσης: 5h	Σημείο τήξης χρυσού: $1.064^\circ\text{C}$



Σχήμα 4: Εγκάρσια διατομή του στόχου.

### 3. Μέτρηση Διαφορικών Ενεργών Διατομών

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των ενεργών διαφορικών διατομών της ελαστικής σκέδασης  ${}^{\text{nat}}\text{Mg}(p,p_0){}^{\text{nat}}\text{Mg}$ .

Η τιμή της διαφορικής ενεργού διατομής μιας αντίδρασης, όταν ο στόχος είναι πολύ λεπτός, δίνεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{E,\theta} = \frac{Y}{N_t(Q\Omega)\varepsilon} \text{(σχέση 4)}$$

Στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης εκφράζει την πιθανότητα τα σωματίδια της δέσμης με ενέργεια  $E$  (στο σύστημα του εργαστηρίου) να σκεδαστούν από τους πυρήνες του στόχου σε γωνία  $\theta$ . Για την τεχνική EBS δίνεται συνήθως σε μονάδες [mb/sr].

Για να υπολογιστεί λοιπόν η διαφορική ενεργός διατομή ενός στοιχείου σε ενέργεια  $E$  θα πρέπει να είναι γνωστά τα ακόλουθα μεγέθη:

- $Y$  (Yield): ο αριθμός των γεγονότων (σωματίδια που ανιχνεύθηκαν) σε γωνία  $\theta$  όπου τοποθετήθηκε ο ανιχνευτής
- $\Omega$ : η στερεά γωνία μεταξύ στόχου και ανιχνευτή
- $Q$ : το φορτίο της δέσμης μετρούμενο σαν αριθμός σωματιδίων δέσμης, δηλαδή σαν καθαρός αριθμός
- $N_t$ : το πάχος του στόχου (εκφράζει την πυκνότητα του υπό μελέτη στοιχείου στον στόχο)
- $\varepsilon$ : η απόδοση του ανιχνευτή που ισούται με τη μονάδα στην περίπτωση των ανιχνευτών πυριτίου.

Όλοι οι παραπάνω όροι μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά. Συγκεκριμένα, τα σωματίδια που ανιχνεύτηκαν βρίσκονται με ολοκλήρωση των πειραματικών κορυφών των υπό μελέτη ισοτόπων/στοιχείων με κατάλληλο πρόγραμμα (SPECTRW [8]), το πάχος προσδιορίζεται υπολογιστικά μέσω του προγράμματος SIMNRA [9] όπως θα αναλυθεί παρακάτω, ενώ το γινόμενο  $Q\Omega$  είναι αυτό που επιφέρει το μεγαλύτερο σφάλμα εάν προσδιοριστεί πειραματικά γι' αυτό στην παρούσα εργασία προτιμάται η μέθοδος σχετικής μέτρησης [10]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή οι ελαστικές διαφορικές

ενεργές διατομές του φυσικού μαγνησίου προσδιορίστηκαν σε σχέση με αυτές του χρυσού.

Συγκεκριμένα, όταν δέσμη πρωτονίων ενέργειας  $E$  φτάσει στον στόχο θα συναντήσει ένα πολύ λεπτό στρώμα χρυσού. Η διαφορική ενεργός διατομή του χρυσού ακολουθεί την σχέση του Rutherford έτσι γνωρίζουμε την τιμή της σε όλο το εύρος ενεργειών των μετρήσεων μας. Καθώς πρόκειται για πολύ λεπτό στρώμα, ισχύει η σχέση 4, έτσι :

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Au}^{E,\theta} = \frac{Y_{Au}}{N_{t,Au}(Q\Omega)} \quad (\text{σχέση 5}).$$

Στη συνέχεια ο ίδιος αριθμός πρωτονίων (ίδιο φορτίο  $Q$ ) θα αλληλεπιδράσει με το μαγνήσιο του στόχου. Η διαφορική ενεργός διατομή για το μαγνήσιο θα δίνεται από την σχέση 4 και είναι:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{nat\ Mg}^{E,\theta} = \frac{Y_{nat\ Mg}}{N_{t,nat\ Mg}(Q\Omega)} \quad (\text{σχέση 6}).$$

Τα πρωτόνια που θα σκεδασθούν και από τα δύο στοιχεία θα ανιχνευτούν από τον ίδιο ανιχνευτή για συγκεκριμένη γωνία  $\theta$ , στην ίδια στερεά γωνία  $\Omega$ . Συνεπώς το γινόμενο  $Q\Omega$  έχει ίδια τιμή στις σχέσεις 5 και 6. Με διαίρεση των σχέσεων κατά μέλη προκύπτει ότι

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{nat\ Mg}^{E,\theta} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Au}^{E,\theta} \frac{Y_{nat\ Mg}}{Y_{Au}} \frac{N_{t,Au}}{N_{t,nat\ Mg}} \quad (\text{σχέση 7})$$

Συμφώνα με την σχέση 7 η διαφορική ενεργός διατομή του φυσικού μαγνησίου μπορεί να υπολογιστεί για συγκεκριμένη ενέργεια δέσμης σε γωνία  $\theta$  χωρίς να απαιτείται η γνώση του όρου  $Q\Omega$ . Στην συνέχεια θα αναλυθεί πώς ακριβώς πραγματοποιείται αυτός ο υπολογισμός.

### 3.1 Βαθμονόμηση φασμάτων

Η ενέργεια των σκεδαζόμενων πρωτονίων από τα διάφορα στοιχεία του στόχου μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων με βάση την κινηματική της ελαστικής σκέδασης. Με γνώση της ενέργειας αυτής πραγματοποιείται αναγνώριση των κορυφών στο προκύπτον φάσμα ώστε να υπάρχει η βεβαιότητα ότι η υπό ολοκλήρωση κορυφή για την εύρεση του yield αντιστοιχεί σε πρωτόνια που σκεδάστηκαν από το στοιχείο ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα της πειραματικής μέτρησης παρουσιάζονται με τη μορφή φασμάτων όπου στον x-άξονα αναγράφονται τα κανάλια και στον y-άξονα ο αριθμός των

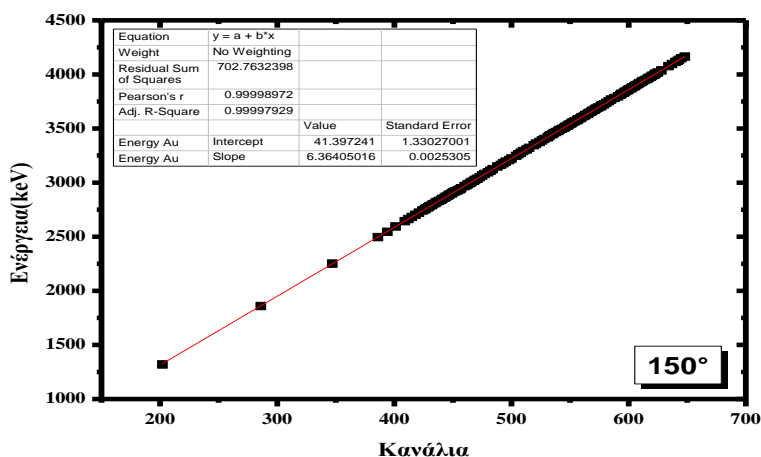
καταγεγραμμένων γεγονότων. Απαιτείται λοιπόν η βαθμονόμηση των φασμάτων, δηλαδή η διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται αντιστοίχιση των καναλιών αυτών σε αριθμητικές τιμές της ενέργειας. Η σχέση που συνδέει την ενέργεια με τα κανάλια είναι γραμμική :

$$\text{Ενέργεια (keV)}=a*\text{κανάλι}+b \text{ (σχέση 8),}$$

όπου a είναι το gain (σε keV per channel) και b το offset (σε keV).

Στην παρούσα εργασία η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με χρήση των κορυφών του χρυσού(που εξαχνώθηκε στην επιφάνεια του μαγνησίου). Υπολογίστηκαν για όλες τις ενέργειες και όλες τις γωνίες οι αναμενόμενες ενέργειες των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων από χρυσό με βάση την κινηματική της ελαστικής σκέδασης. Έπειτα, αφού αναγνωρίστηκαν οι κορυφές του χρυσού στα φάσματα, έγινε αντιστοίχιση του καναλιού στο μέσο των κορυφών με την κάθε ενέργεια και με χρήση του προγράμματος ORIGIN πραγματοποιήθηκε γραμμική προσαρμογή στα δεδομένα σε όλο το εύρος των ενεργειών από την οποία προκύπτουν οι τιμές του gain και του offset. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο υπολογισμός των ενεργειών των οπισθοσκεδαζόμενων πρωτονίων από τον χρυσό πραγματοποιήθηκε για ενέργειες δέσμης που έχουν διορθωθεί, δηλαδή από την αρχική ενέργεια έχει αφαιρεθεί το offset που προέκυψε από την ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή. Στο Σχήμα 5 παρατίθεται η βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε για τις 150°. Με όμοιο τρόπο έγινε η βαθμονόμηση σε όλες τις γωνίες για κάθε ανιχνευτή ξεχωριστά και οι τιμές που προέκυψαν για το gain και το offset φαίνονται στον Πίνακα 2. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του gain και του offset χρησιμοποιούνται και στον υπολογισμό του λόγου των παχών του στόχου, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.





Σχήμα 5: Γραφική παράσταση και προσαρμογή για την ενεργειακή βαθμονόμηση του ADC που συνδέεται με τον ανιχνευτή των 150°

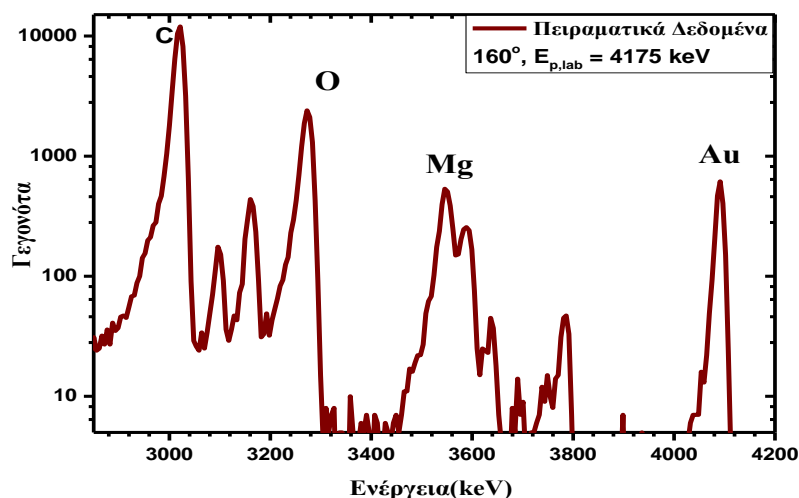
Γωνία(°)	Offset(keV)	Gain ( keV/ch)
120	4.98	24.77
130	6.19	54.55
140	5.66	45.72
150	6.36	41.40
160	5.35	-28.13
170-1	5.56	39.36
170-2	7.89	-10.35

Πίνακας 2: Οι τιμές του gain και του offset μετά από την γραμμική προσαρμογή

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 για την γωνία των 170° πραγματοποιήθηκε γραμμική προσαρμογή σε δύο ενεργειακές περιοχές γιατί παρατηρήθηκε έντονη απόκλιση από την γραμμική σχέση που συνδέει την ενέργεια με τα κανάλια. Και πάλι η γραμμική προσαρμογή δεν ήταν αξιόπιστη καθώς συνέχισε να υπάρχει απόκλιση από την γραμμικότητα, βέβαια σε πολύ μικρότερο βαθμό. Στις υπόλοιπες γωνίες υπήρξε εξαιρετική γραμμική αντιστοιχία καναλιών με ενέργειες.

### 3.2 Εμβαδομέτρηση

Αφού αναγνωρίστηκαν οι κορυφές του μαγνησίου και του χρυσού σε όλα τα φάσματα ακολούθησε η ολοκλήρωση αυτών για την εύρεση του yield. Οι κορυφές ήταν απομονωμένες και καλά καθορισμένες σε όλες τις ενέργειες και σε όλες τις γωνίες, η αφαίρεση του υποβάθρου έγινε γραμμικά και η ολοκλήρωσή τους πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος SPECTRW μέσω του οποίου βρέθηκε το yield μαζί με το στατιστικό του σφάλμα.



Σχήμα 6: Τυπικό φάσμα πρωτονίων ενέργειας  $E_{p,lab}=4175\text{keV}$ , για γωνία σκέδασης  $\theta=160^\circ$  με την αντίστοιχη αναγνώριση κορυφών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από ενέργεια 3960keV και πάνω παρατηρείται διαχωρισμός των σημάτων των επιμέρους ισοτόπων του μαγνησίου, όπως προκύπτει από την κινηματική της αντίδρασης. Καθώς όμως η μελέτη αφορά φυσικό μαγνήσιο που αποτελείται και από τα τρία ισότοπα δεν ολοκληρώθηκαν ξεχωριστά οι κορυφές .

### 3.3 Καθορισμός της Ενέργειας

Εξαιτίας της ύπαρξης πολλών ενεργειακών επιπέδων στον σύνθετο πυρήνα του  $^{25}\text{Al}$  που σχηματίζεται κατά την αλληλεπίδραση πρωτονίου με το  $^{24}\text{Mg}$  (το ισότοπο με την μεγαλύτερη ισοτοπική αναλογία στο φυσικό μαγνήσιο) αναμένεται η ύπαρξη συντονισμών στη μορφή της διαφορικής ενεργού διατομής. Για τη μελέτη των συντονισμών αυτών είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση της ενέργειας των σωματιδίων της δέσμης . Η συνολική διόρθωση στην ενέργεια προκύπτει από τον τρόπο λειτουργίας του επιταχυντή (ενεργειακή βαθμονόμηση επιταχυντή-offset), όπως έχει ήδη αναφερθεί στην πειραματική διάταξη, και από την απώλεια ενέργειας των σωματιδίων μέσα στο στόχο πριν αυτά αλληλεπιδράσουν.

Καθώς για τον υπολογισμό της διαφορικής ενεργού διατομής χρησιμοποιήθηκε πολύ λεπτός στόχος, είναι σύνηθες να ακολουθείται η σύμβαση ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις συνέβησαν στο μέσο του πάχους του στόχου. Συνεπώς, ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής του χρυσού στην σχέση 7 πραγματοποιείται για ενέργεια  $E'=(E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma}-\text{offset})-\text{απώλεια ενέργειας πρωτονίου στο μέσο του πάχους του χρυσού και ο$

υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής του μαγνησίου γίνεται για ενέργεια  $E'=(E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma}-\text{offset})$ -απώλεια ενέργειας πρωτονίου σε όλο το πάχος του χρυσού -απώλεια ενέργειας πρωτονίου στο μέσο του πάχους του μαγνησίου.

Όταν μια δέσμη μονοενεργειακών φορτισμένων σωματιδίων διαπερνά την ύλη επιβραδύνεται και ταυτόχρονα παύει να είναι μονοενεργειακή αλλά παρουσιάζει μια κατανομή στην ενέργεια λόγω της στατιστικής διακύμανσης του αριθμού των κρούσεων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ενεργειακός διασκεδασμός (straggling) και συμβάλλει στην αβεβαιότητα της τιμής της ενέργειας.

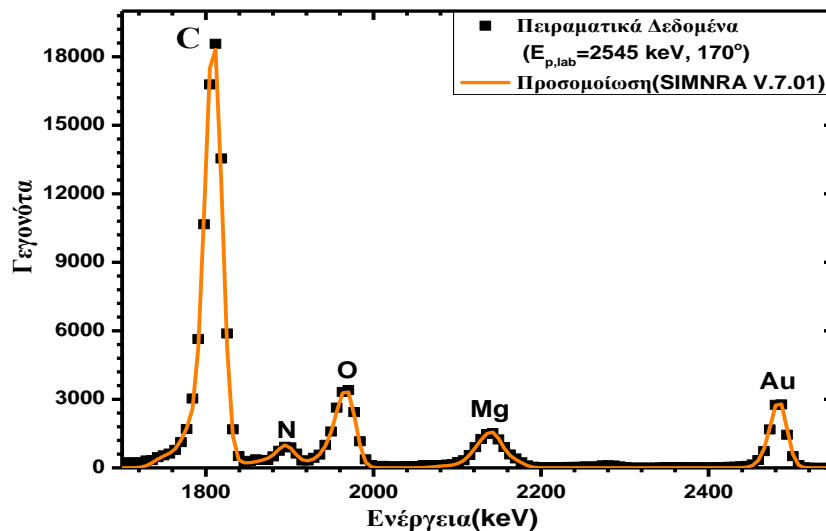
Τόσο η απώλεια ενέργειας όσο και ο ενεργειακός διασκεδασμός βρέθηκαν με χρήση του προγράμματος SIMNRA. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση στόχου με άνθρακα, μαγνήσιο και χρυσό, που είναι τα κύρια στοιχεία που υπάρχουν στο στόχο που χρησιμοποιήθηκε, και υπολογίστηκε η απώλεια ενέργειας και ο ενεργειακός διασκεδασμός για τη μικρότερη ενέργεια δέσμης, όπου η απώλεια ενέργειας είναι μέγιστη.

Συνοψίζοντας, η διόρθωση στην ενέργεια πραγματοποιείται με την ενεργειακή βαθμονόμηση του επιταχυντή και τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας στον στόχο. Η αβεβαιότητα στην ενέργεια προκύπτει από το ripple του επιταχυντή (συγκεκριμένα από το άνοιγμα των analyzing slits) και το straggling της δέσμης.

### 3.4 Υπολογισμός λόγου παχών στόχου

Ο υπολογισμός του λόγου  $\frac{N_{t,Au}}{N_{t,nat\ Mg}}$  πραγματοποιείται με χρήση των πειραματικών φασμάτων και του προγράμματος SIMNRA. Ελήφθησαν φάσματα σε ενέργειες 1900, 2300 και 2550 keV και γωνίες 150°, 160°, 170° όπου υπάρχουν αξιολογημένες (evaluated) ενεργές διατομές για τη σκέδαση πρωτονίων από φυσικό μαγνήσιο με ακρίβεια της τάξης του 5% από το SigmaCalc. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον άνθρακα και το οξυγόνο είναι επίσης αξιολογημένα και πάρθηκαν από το SigmaCalc. Για το φυσικό άζωτο δεν υπήρχαν αξιολογημένα δεδομένα στις υπό μελέτη ενέργειες και γωνίες, γι' αυτό και έγινε χρήση των τιμών για το άζωτο-14, που είναι και το ισότοπο με την μεγαλύτερη ισοτοπική αναλογία. Στην περίπτωση του χρυσού οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής ελαστικής σκέδασης πρωτονίων ακολουθούν την εξίσωση Rutherford. Για την προσομοίωση των φασμάτων από το πρόγραμμα SIMNRA απαιτείται η εισαγωγή διαφόρων παραμέτρων όπως το gain και το offset που

προέκυψαν από την βαθμονόμηση των φασμάτων, το φορτίο που προσπίπτει στον στόχο, το είδος και η ενέργεια της δέσμης, η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, η γωνία σκέδασης και η επιλογή των κατάλληλων τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών των στοιχείων του στόχου για όλες τις αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Προσομοιώθηκε κατ' αρχήν όσο το δυνατό καλύτερα το φάσμα σε ενέργεια 2550keV και γωνία 160° γιατί ήταν αυτό με το λιγότερο υπόβαθρο. Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερή την ποσότητα χρυσού στους υπόλοιπους στόχους σύμφωνα με αυτή που προέκυψε από το στόχο των 160° σε ενέργεια 2550keV, και μεταβάλλοντας το φορτίο και την ποσότητα μαγνησίου, έγινε προσπάθεια το προσομοιωμένο φάσμα να βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με το πειραματικό. Ο μέσος όρος των τιμών που προέκυψαν για τις τρεις γωνίες και ενέργειες είναι αυτός που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς και ισούται με  $\frac{N_{t,Au}}{N_{t,nat Mg}}=0.0445 \pm 0.0024$ , με σχετικό σφάλμα ~5%.

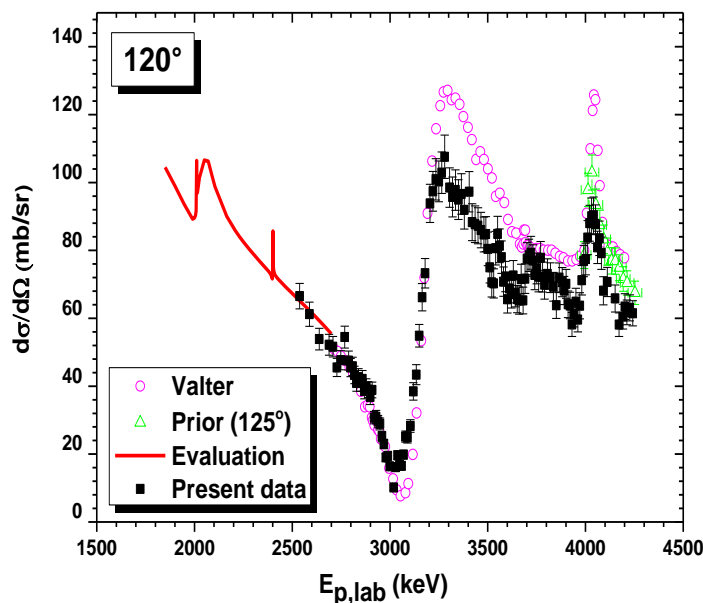


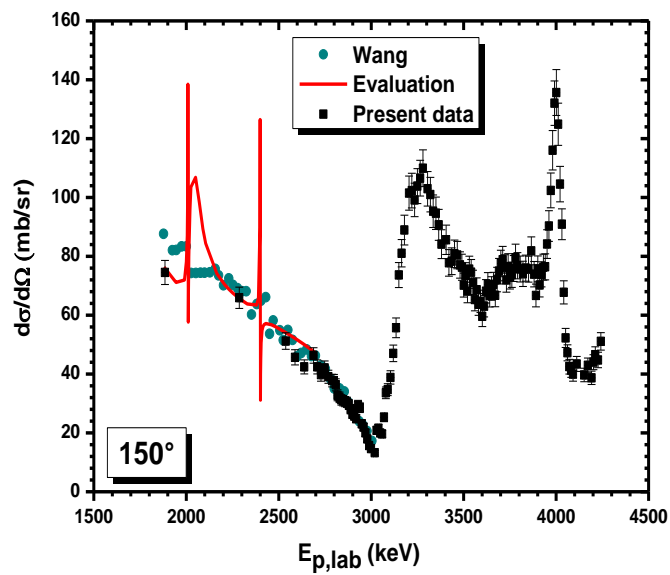
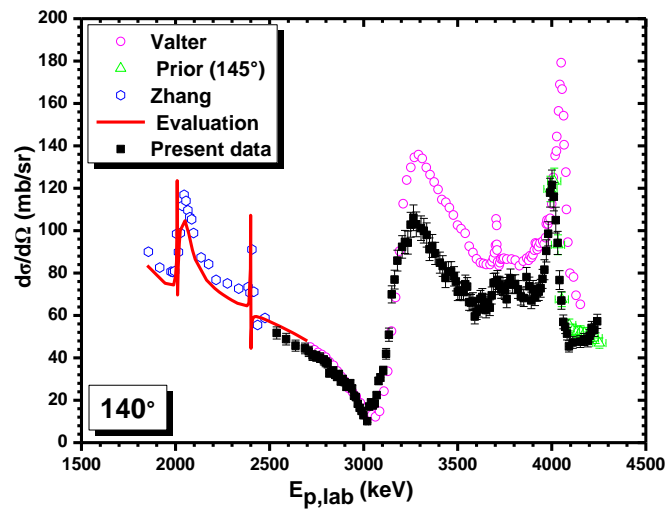
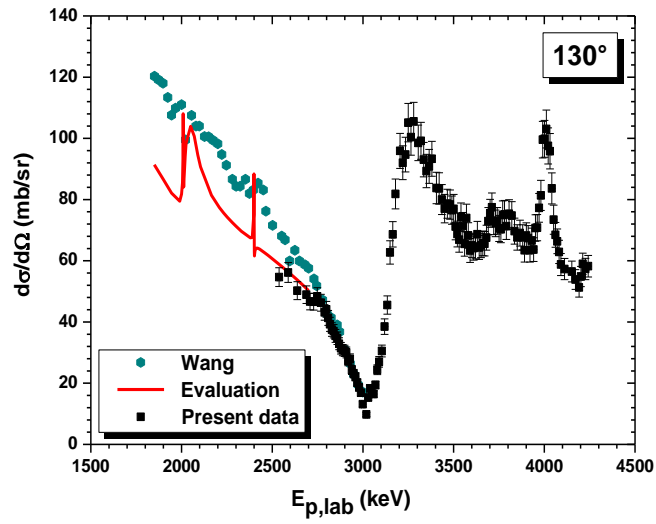
Σχήμα7: Προσομοιωμένο και πειραματικό φάσμα με δέσμη πρωτονίων ενέργειας  $E_{p,lab}=2545keV$  σε γωνία 170°

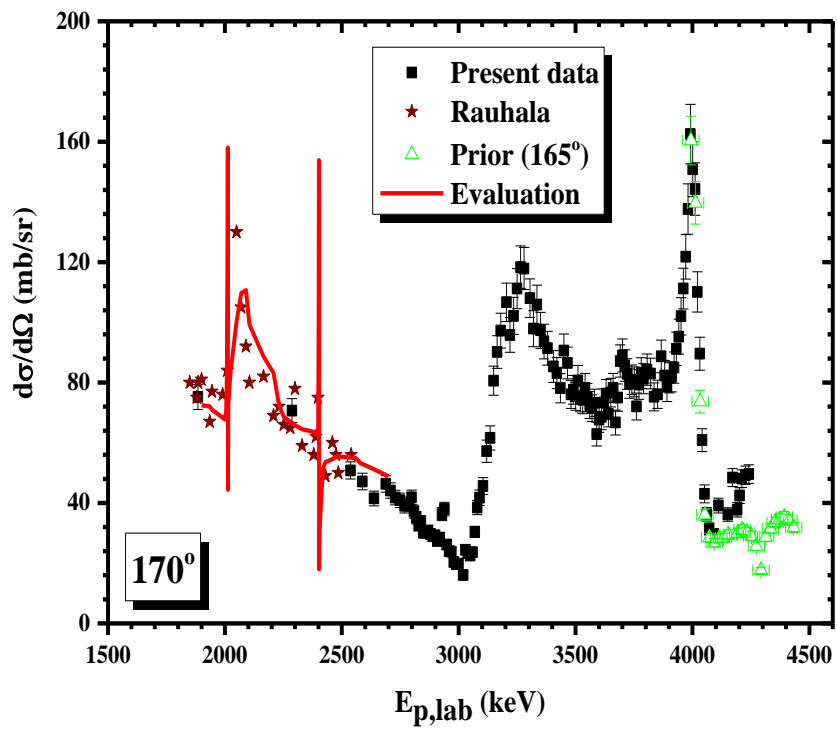
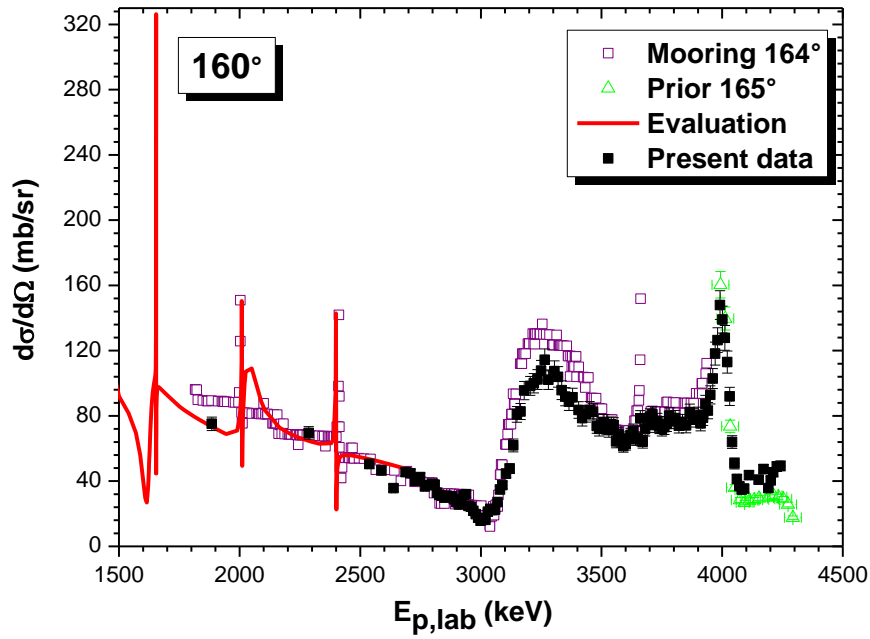
Πλέον είναι γνωστοί όλοι οι όροι της σχέσης 7 και μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των τιμών της ενεργού διαφορικής διατομής ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από φυσικό μαγνήσιο.

#### 4. Αποτελέσματα-σχολιασμός

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαφορικής ενεργού διατομής της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από το φυσικό μαγνήσιο,  ${}^{\text{nat}}\text{Mg}(p,p_0){}^{\text{nat}}\text{Mg}$ . Το ενεργειακό εύρος μελέτης της σκέδασης είναι  $E_{p,\text{lab}}=2700\text{-}4250\text{keV}$  με βήμα 10 - 40 keV για γωνίες σκέδασης  $120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$ . Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και παριστάνονται γραφικά στην εικόνα 11. Η αβεβαιότητα στην ενέργεια της δέσμης προέκυψε 7keV και οφείλεται στο ripple της μηχανής και το straggling της δέσμης. Το στατιστικό σφάλμα των τιμών της διαφορικής ενεργού διατομής οφείλεται στα στατιστικά σφάλματα που προκύπτουν από τις ολοκληρώσεις των κορυφών του μαγνησίου και του χρυσού και από αυτό του υπολογισμού του πάχους του στόχου, υπολογίστηκε από τον τύπο διάδοσης σφαλμάτων και δεν ξεπερνάει το 6,9%. Το συστηματικό σφάλμα, το οποίο λόγω σύμβασης δεν συμπεριλαμβάνεται στις αναγραφόμενες τιμές, προκύπτει από τις διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στις πειραματικές τιμές της ισχύς ανάσχεσης με αυτές που προκύπτουν από υπολογισμό με βάση θεωρητικά μοντέλα. Με έρευνα στο <http://www.srim.org> διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν δεδομένα για το μαγνήσιο, υπάρχουν όμως για τον γειτονικό πυρήνα αλουμινίου, με το συστηματικό σφάλμα να είναι ~2,7%.



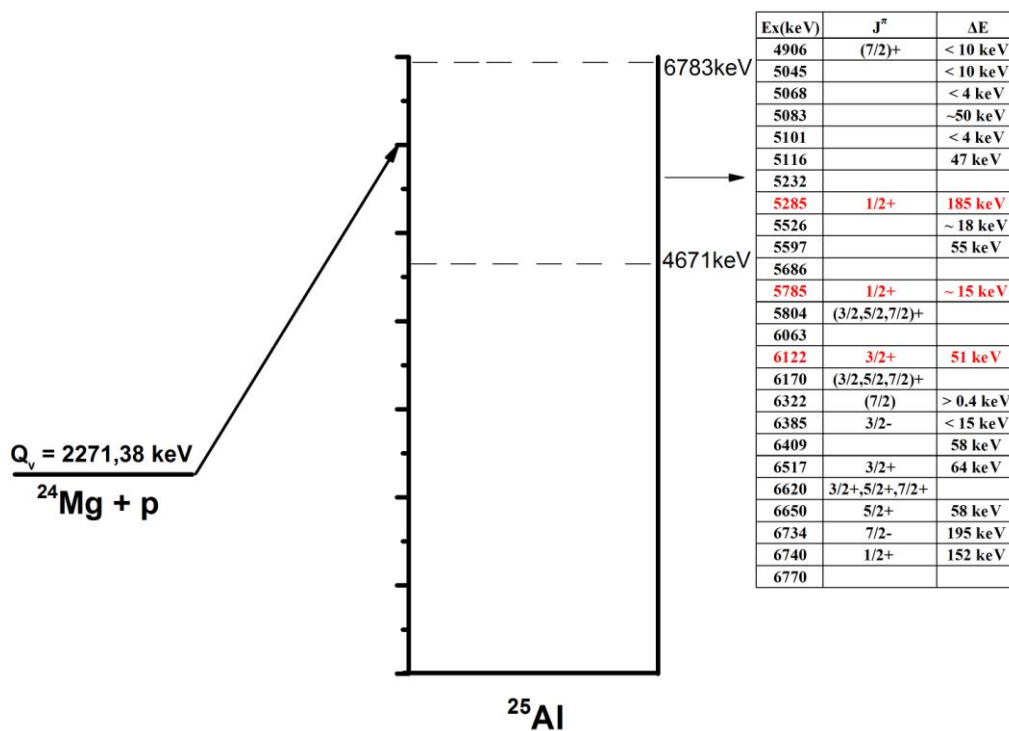




Σχήμα 8: Τελικά αποτελέσματα διαφορετικών ενεργών διατομών μαζί με προηγούμενες μετρήσεις

Τα τελικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την ύπαρξη συντονισμών που αντιστοιχούν στις ενεργειακές καταστάσεις του σύνθετου πυρήνα  $^{25}\text{Al}$ . Για ενέργεια δέσμης  $\sim 3200\text{keV}$  παρατηρείται ένας ευρής συντονισμός ο οποίος μπορεί να αποδοθεί στην ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα  $^{25}\text{Al}$  με ενέργεια  $E_{\text{Level}}=5285\text{keV}$  και εύρος  $\Gamma=185\text{keV}$ . Στην περιοχή  $3400\text{-}3900\text{keV}$  παρουσιάζεται διακύμανση των τιμών των διαφορικών ενεργών διατομών η οποία ενδέχεται να οφείλεται στην ύπαρξη επικαλυπτόμενων ενεργειακών καταστάσεων. Σε ενέργεια  $\sim 3700\text{keV}$  μπορεί να αποδοθεί η ενεργειακή στάθμη του πυρήνα  $^{25}\text{Al}$  με  $E_{\text{Level}}=5785\text{keV}$  και εύρος  $\Gamma=15\text{keV}$ . Τέλος, για ενέργεια  $\sim 4000\text{keV}$  ενδέχεται να βρίσκεται ο συντονισμός με  $E_{\text{Level}}=6122\text{keV}$  και εύρος  $\Gamma=51\text{keV}$ . Τα ενεργειακά επίπεδα του σύνθετου πυρήνα  $^{25}\text{Al}$  φαίνονται στην εικόνα 12.

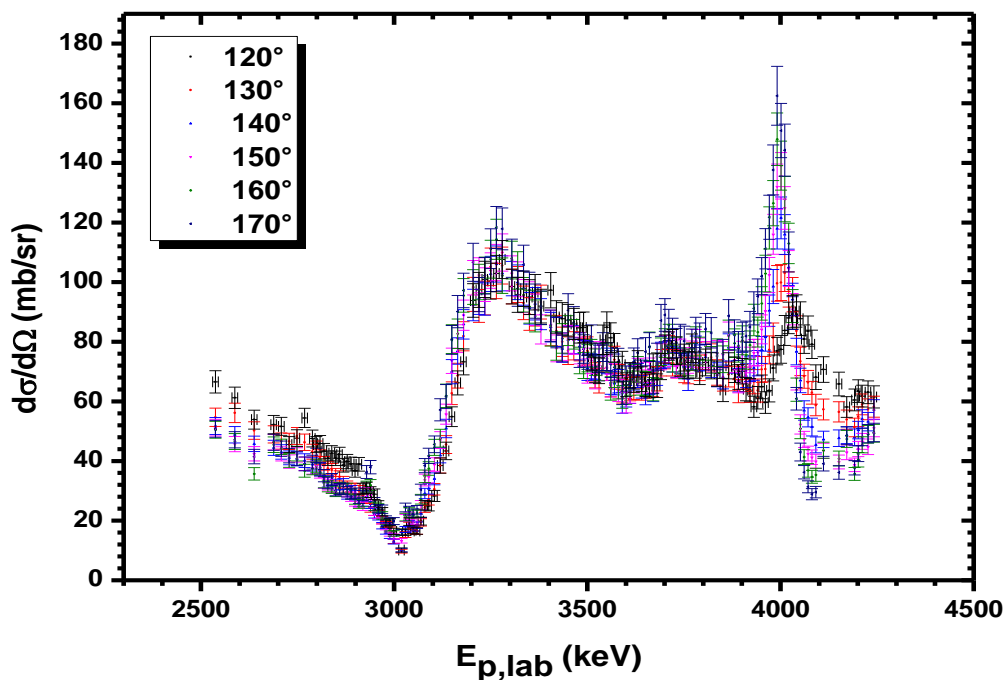
Αξίζει να σημειωθεί ότι όλοι οι συντονισμοί αποδόθηκαν στον σύνθετο πυρήνα  $^{25}\text{Al}$  γιατί το ισότοπο  $^{24}\text{Mg}$  είναι αυτό με την μεγαλύτερη ισοτοπική αναλογία (78.99%).



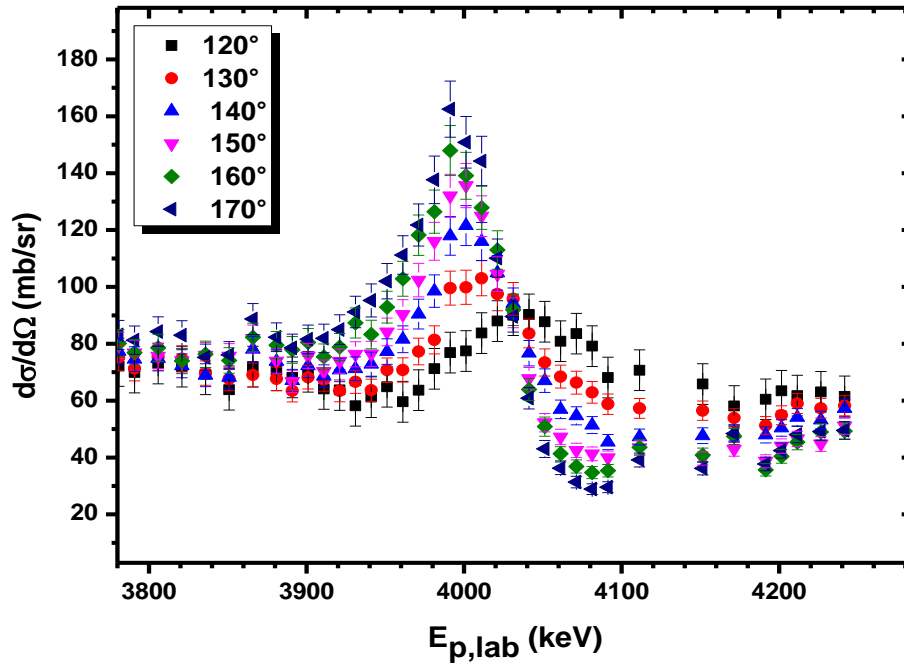
Σχήμα 9: Ενεργειακό διάγραμμα της αλληλεπίδρασης  $^{nat}\text{Mg}(p,p_0)^{nat}\text{Mg}$ .



Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της παρούσας εργασίας με τις υπάρχουσες μετρήσεις παρατηρήθηκε καλή συμφωνία στη μορφή της διαφορικής ενεργού διατομής σε όλες τις γωνίες. Στις  $130^\circ$  και  $150^\circ$ , όπου μετρήθηκαν οι ενέργειες 1851 keV έως 2999 keV από τον Wang et al.[11], η ασυμφωνία των τιμών δεν ξεπερνά το 16% και το 9% αντίστοιχα. Στις  $120^\circ$  οι παρούσες μετρήσεις βρίσκονται κάτω από αυτές του Valter et al[12] και του Prior et al.[13] από τα 3200 keV και μετά. Όμοια συμβαίνει στις  $140^\circ$  σε σχέση με τις μετρήσεις του Valter et al., όχι όμως και με του Prior et al. οι οποίες μετά τα 4200keV(για τις  $140^\circ$ ) και μετά τα 4000keV για τις  $160^\circ$  και τις  $170^\circ$  βρίσκονται κάτω από τις πειραματικές τιμές αυτής της εργασίας. Ακόμη, οι συντονισμοί που βρίσκονται σε ενέργειες  $\sim 3200\text{keV}$  και  $\sim 4000\text{keV}$  βρέθηκαν να είναι μετατοπισμένοι αριστερότερα σε σχέση με τις μετρήσεις του Valter et al. στις  $120^\circ$  και  $140^\circ$ . Στις  $160^\circ$  υπάρχει καλή συμφωνία με τις μετρήσεις του Mooring et al.[14], εκτός από τις περιοχές που έχουν μετρηθεί συντονισμοί, δηλαδή για ενέργεια  $\sim 3200\text{keV}$  υπάρχει ασυμφωνία 12% και για ενέργεια  $\sim 3700\text{keV}$ , 48%. Ακόμη, σε σχέση με τις αξιολογημένες τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής, οι ληφθείσες μετρήσεις παρουσιάζουν καλή συμφωνία σε όλες τις γωνίες, εκτός της ενέργειας 2638keV, όπου υπάρχει η ένδειξη ύπαρξης συντονισμού.



Σχήμα 10: Γωνιακή κατανομή αποτελεσμάτων



Σχήμα 11: Γωνιακή κατανομή αποτελεσμάτων αναλυτικά

Στα σχήματα 10 και 11 παρουσιάζονται οι γωνιακές κατανομές των διαφορετικών ενεργών διατομών ώστε να αναδειχθεί η τυχόν εξάρτησή της από την γωνία ανίχνευσης. Προκύπτει ότι μετά τα 3900 keV υπάρχει ισχυρή γωνιακή εξάρτηση της ενεργού διατομής από τη γωνία σκέδασης, γεγονός που καθιστά αυτή την ενεργειακή περιοχή μάλλον ακατάλληλη για μετρήσεις προφίλομετρίας μαγνησίου.

## 5. Συμπεράσματα-Προοπτικές

Μετρήθηκαν οι διαφορικές ενεργές διατομές του φυσικού μαγνησίου σε ενέργειες 2700-4250keV. Διαπιστώθηκε ότι είναι κατάλληλες για χρήση στην τεχνική EBS μέχρι την ενέργεια 3900keV και για επέκταση της αξιολόγησης σε όλο το εύρος ενεργειών. Παρατηρείται καλή συμφωνία με τις υπάρχουσες μετρήσεις σε όλο το εύρος των ενεργειών εκτός από τις περιοχές όπου υπάρχουν συντονισμοί.

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε ο πειραματικός προσδιορισμός των διαφορικών ενεργών διατομών της  $^{nat}\text{Mg}(p,p_0)^{nat}\text{Mg}$  σε ακόμα μεγαλύτερες ενέργειες για να καταστεί δυνατή η ανίχνευση  $^{nat}\text{Mg}$  σε μεγαλύτερα βάθη. Ακόμη, σημαντική μελλοντική εργασία είναι η προσπάθεια αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων στην περιοχή των συντονισμών μέσω θεωρίας R-matrix. Τέλος, η πραγματοποίηση ελέγχου αξιοπιστίας (benchmarking) των ελαστικών σκεδάσεων πρωτονίων από μαγνήσιο θα συνεισφέρει στην απόδειξη της ορθότητας των διαφορικών ενεργών διατομών που μετρήθηκαν και θα διευκολύνει την εξαγωγή των κατάλληλων θεωρητικών παραμέτρων της R-matrix.

Για την ορθότερη επέκταση των αξιολογημένων διαφορικών ενεργών διατομών θα άξιζε να μελετηθούν ισοτοπικά εμπλουτισμένοι στόχοι με μαγνήσιο-25 και μαγνήσιο-26 (αποτελούν συνολικά ~20% του φυσικού μαγνησίου) την ενεργειακή περιοχή 3600-4500keV και 3600-5000keV αντίστοιχα όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Ακόμη, σε περιπτώσεις που τα ισότοπα χρησιμοποιούνται σε τεχνολογικές εφαρμογές, χρειάζεται η γνώση της διαφορικής ενεργού διατομής για κάθε ισότοπο χωριστά, ώστε να μπορεί να μελετηθεί η προφίλομετρία τους.

E <sub>plab</sub> (keV)	δE <sub>plab</sub> (keV)	σ±δσ(mb/sr), <sup>nat</sup> Mg(p,p <sub>0</sub> ) <sup>nat</sup> Mg											
		120°		130°		140°		150°		160°		170°	
2538	7	67	4	55	3		2.9	51.2	2.8	50.5	2.8	50.8	2.8
2588	7	61	4	56	3	48.8	2.8	45.7	2.6	46.5	2.7	47.1	2.7
2638	7	54	3	50.2	2.9	45.8	2.6	42.4	2.4	35.7	2.1	41.5	2.4
2688	7	52	3	48.9	2.9	44.4	2.5	46.3	2.6	45.5	2.6	46.3	2.7
2708	7	52	3	46.7	2.7	43.0	2.4	42.4	2.4	44.8	2.6	44.1	2.5
2728	7	45.5	2.7	46.6	2.7	41.1	2.3	39.8	2.2	40.2	2.3	41.8	2.4
2748	7	47.6	2.8	48.4	2.8	40.7	2.3	42.1	2.4	42.5	2.4	40.9	2.4
2768	7	54	3	46.3	2.7	40.1	2.3	39.1	2.2	36.7	2.2	39.0	2.3
2788	7	47.5	2.8	43.1	2.5	38.9	2.2	37.8	2.1	37.5	2.2	39.6	2.3
2798	7	45.5	2.7	44.1	2.6	37.9	2.1	37.7	2.1	38.4	2.2	41.8	2.4
2809	7	45.8	2.7	41.3	2.4	37.3	2.1	36.3	2.1	37.9	2.2	37.1	2.2
2818	7	43.3	2.6	39.2	2.3	32.8	1.9	32.8	1.9	32.9	1.9	35.1	2.1
2829	7	41.0	2.4	37.5	2.2	33.2	1.9	32.1	1.8	31.5	1.8	32.6	1.9
2839	7	42.6	2.5	37.0	2.2	33.9	1.9	31.2	1.8	30.9	1.8	33.8	2.0
2849	7	40.9	2.4	35.4	2.1	32.1	1.8	31.0	1.8	29.8	1.7	30.2	1.8
2859	7	42.1	2.5	34.7	2.0	31.0	1.8	30.6	1.7	31.1	1.8	30.7	1.8
2869	7	38.6	2.3	32.9	2.0	32.3	1.8	30.4	1.7	30.5	1.8	30.8	1.8
2879	7	39.8	2.4	31.4	1.9	28.9	1.7	29.7	1.7	30.8	1.8	29.7	1.8
2889	7	39.0	2.3	30.8	1.8	30.0	1.7	28.0	1.6	28.9	1.7	28.9	1.7
2899	7	36.8	2.2	30.6	1.8	28.5	1.6	26.4	1.5	27.1	1.6	29.2	1.7
2909	7	38.9	2.3	30.0	1.8	26.3	1.5	25.8	1.5	25.6	1.5	27.3	1.6
2919	7	30.7	1.8	27.3	1.6	26.4	1.5	24.9	1.4	26.2	1.5	28.5	1.7
2929	7	31.0	1.9	27.9	1.7	28.0	1.6	29.4	1.7	31.4	1.8	36.3	2.2
2939	7	29.6	1.8	24.3	1.5	25.6	1.5	28.6	1.6	31.9	1.9	38.0	2.2
2949	7	28.9	1.8	23.1	1.4	22.1	1.3	23.1	1.3	24.7	1.4	26.2	1.6
2959	7	25.1	1.5	22.1	1.3	21.4	1.2	22.0	1.3	24.3	1.4	24.0	1.4
2969	7	23.0	1.4	20.2	1.2	18.3	1.1	20.0	1.1	21.7	1.3	23.8	1.4
2979	7	19.0	1.2	18.6	1.1	16.4	0.9	18.0	1.0	19.8	1.1	20.4	1.2
2989	7	19.4	1.2	16.9	1.0	14.9	0.9	15.7	0.9	17.6	1.0	19.7	1.2
2999	7	16.4	1.0	13.2	0.8	12.9	0.8	14.7	0.9	15.7	0.9	19.8	1.2
3019	7	10.2	0.7	9.8	0.6	10.1	0.6	13.3	0.8	16.2	1.0	16.1	1.0
3029	7	16.1	1.0	15.3	1.0	17.0	1.0	20.9	1.2	21.2	1.3	24.4	1.5
3039	7	19.7	1.3	18.3	1.2	19.0	1.1	21.6	1.3	23.0	1.4	23.4	1.4
3049	7	16.8	1.1	16.6	1.0	17.5	1.0	20.0	1.2	22.2	1.3	22.5	1.4
3059	7	16.5	1.1	16.4	1.0	18.5	1.1	19.7	1.1	22.5	1.3	23.7	1.4
3069	7	19.8	1.3	19.4	1.2	22.4	1.3	25.3	1.5	27.2	1.6	30.4	1.9
3079	7	25.2	1.6	24.4	1.6	29.1	1.7	33.6	2.0	34.9	2.1	38.5	2.4
3089	7	24.9	1.7	27.0	1.7	30.7	1.8	34.7	2.0	37.5	2.3	41.7	2.6
3104	7	28.3	1.9	30.5	1.9	34.0	2.0	38.8	2.3	44.6	2.7	45.6	2.8
3119	7	38.5	2.6	38.5	2.5	41.9	2.5	47.0	2.8	47.7	3.0	57	4
3134	7	43.4	2.9	45.5	3.0	51	3	56	3	62	4	62	4
3149	7	55	3	63	4	70	4	74	4	81	5	81	5
3165	7	66	4	69	4	77	4	81	5	83	5	90	5
3180	7	73	4	82	5	86	5	89	5	96	6	97	6
3205	7	94	6	96	6	92	5	101	6	98	6	107	6
3220	7	97	6	92	6	95	5	102	6	100	6	96	6
3235	7	101	6	95	6	94	5	99	6	102	6	102	6
3250	7	100	6	105	6	103	6	104	6	108	6	111	7
3265	7	103	6	100	6	106	6	107	6	114	7	118	7
3280	7	108	6	106	6	103	6	110	6	102	6	118	7

3305	7	99	6	99	6	101	6	103	6	107	6	108	6
3320	7	96	6	99	6	100	6	101	6	104	6	98	6
3335	7	98	6	93	6	98	6	95	6	96	6	106	6
3350	7	95	6	89	5	91	5	95	5	92	6	97	6
3365	7	97	6	91	6	93	5	91	5	89	5	94	6
3380	7	92	6	93	6	89	5	84	5	91	6	91	6
3405	7	97	6	84	5	85	5	86	5	84	5	85	5
3420	7	88	5	84	5	83	5	78	5	79	5	83	5
3435	7	88	5	80	5	78	5	78	5	81	5	78	5
3450	7	87	5	77	5	81	5	81	5	84	5	91	6
3465	7	86	5	79	5	81	5	80	5	83	5	87	5
3480	7	85	5	78	5	78	5	77	4	74	4	76	5
3490	7	85	5	77	5	76	4	76	4	72	4	78	5
3500	7	80	5	77	5	71	4	70	4	74	5	75	5
3510	7	75	5	71	4	72	4	74	4	76	5	81	5
3520	7	71	4	69	4	72	4	68	4	73	4	75	5
3530	7	70	4	67	4	71	4	76	4	71	4	74	5
3540	7	81	5	74	5	75	4	75	4	75	5	78	5
3550	7	85	5	71	4	74	4	71	4	74	5	75	5
3560	7	81	5	66	4	66	4	65	4	64	4	73	5
3570	7	78	5	74	5	66	4	69	4	69	4	71	4
3580	7	71	4	68	4	67	4	64	4	65	4	73	5
3590	7	72	4	63	4	60	4	65	4	61	4	63	4
3600	7	66	4	65	4	62	4	60	3	63	4	68	4
3611	7	69	4	64	4	63	4	63	4	66	4	69	4
3621	7	67	4	65	4	68	4	68	4	68	4	73	5
3631	7	73	4	69	4	69	4	70	4	71	4	76	5
3641	7	68	4	64	4	65	4	67	4	66	4	70	4
3651	7	66	4	65	4	63	4	69	4	66	4	77	5
3661	7	65	4	66	4	66	4	70	4	78	5	78	5
3671	7	72	4	66	4	64	4	67	4	64	4	67	4
3681	7	65	4	68	4	69	4	72	4	72	4	75	5
3691	7	72	4	73	4	75	4	75	4	77	5	87	5
3701	7	78	5	75	5	76	4	78	4	80	5	89	5
3711	7	79	5	77	5	77	4	79	5	81	5	86	5
3721	7	79	5	73	4	74	4	76	4	74	4	83	5
3731	7	77	5	72	4	72	4	72	4	77	5	80	5
3741	7	73	4	73	4	74	4	76	4	74	4	81	5
3751	7	75	5	71	4	72	4	73	4	72	4	80	5
3761	7	72	4	70	4	68	4	74	4	73	4	72	4
3771	7	78	5	75	5	75	4	76	4	75	5	79	5
3781	7	72	4	75	5	77	5	80	5	80	5	83	5
3791	7	70	4	71	4	75	4	77	4	77	5	81	5
3806	7	73	4	75	5	75	4	76	4	79	5	84	5
3821	7	72	4	75	5	72	4	74	4	74	4	83	5
3836	7	69	4	70	4	69	4	76	4	76	5	75	5
3851	7	64	4	68	4	68	4	76	4	74	4	76	5
3866	7	72	4	69	4	78	5	82	5	82	5	89	5
3881	7	71	4	68	4	74	4	74	4	80	5	82	5
3891	7	68	4	63	4	67	4	67	4	78	5	79	5
3901	7	70	4	68	4	72	4	76	4	81	5	82	5
3911	7	64	4	67	4	69	4	70	4	75	5	82	5
3921	7	64	4	63	4	71	4	74	4	79	5	85	5

3931	7	58	4	67	4	71	4	76	4	87	5	91	6
3941	7	61	4	64	4	73	4	76	4	83	5	95	6
3951	7	65	4	71	4	77	4	84	5	93	6	102	6
3961	7	60	4	71	4	82	5	90	5	103	6	111	7
3971	7	64	4	77	5	90	5	102	6	118	7	122	7
3981	7	71	4	81	5	99	6	116	7	126	8	138	8
3991	7	77	5	100	6	118	7	132	8	148	9	163	10
4001	7	77	5	100	6	122	7	136	8	139	8	151	9
4011	7	84	5	103	6	116	7	125	7	128	8	144	9
4021	7	88	5	98	6	105	6	105	6	113	7	110	7
4031	7	90	5	96	6	94	5	91	5	92	6	90	5
4041	7	90	5	84	5	77	4	68	4	64	4	61	4
4051	7	88	6	73	5	67	4	52	3	51	3	43.0	3.0
4061	7	81	5	68	4	57	3	47.2	2.7	41.3	2.5	36.2	2.2
4071	7	84	5	66	4	55	3	42.5	2.5	36.9	2.3	31.4	2.0
4081	7	79	5	63	4	51	3	41.3	2.4	34.7	2.1	28.9	1.9
4091	7	68	4	59	4	45.4	2.7	39.9	2.3	35.4	2.2	29.6	1.9
4111	7	71	4	57	3	47.3	2.8	43.4	2.5	43.6	2.7	39.1	2.5
4151	7	66	4	56	3	47.7	2.8	39.7	2.3	40.9	2.5	36.2	2.3
4171	7	58	3	54	3	48.7	2.8	43.0	2.5	47.4	2.8	48.4	3.0
4191	7	60	4	51	3	48.0	2.8	38.7	2.3	35.7	2.2	37.7	2.4
4201	7	63	4	55	3	50.4	2.9	44.0	2.5	40.4	2.4	42.5	2.6
4211	7	62	4	59	3	54	3	46.6	2.7	45.4	2.7	48.1	2.9
4226	7	63	4	57	3	53	3	44.8	2.6	49.0	3.0	49	3
4242	7	61	4	58	4	57	3	51.1	3.0	49.3	3.0	50	3

Πίνακας 3: Τελικά αποτελέσματα διαφορικών ενεργών διατομών ανά γωνία

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] N. Patronis *et al.*, “Study of  $^{nat}\text{Mg}(d,d_0)$  reaction at detector angles between  $90^\circ$  and  $170^\circ$ , for the energy range  $E_{d,\text{lab}}=1660\text{-}1990$  keV,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 337, pp. 97–101, 2014.
- [2] “ibandl @ www-nds.iaea.org.” .
- [3] A. F. Gurbich, “Evaluation of non-Rutherford cross sections for IBA: Theory and results,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 261, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 401–404, 2007.
- [4] E. Rauhala, “proton backscattering in the non-rutherford and computer data analysis 2 . The proton backscattering method,” vol. 41, pp. 790–796, 1989.
- [5] O. Benka, “Nuclear Reaction Analysis (NRA),” *Surf. Thin Film Anal. A Compend. Princ. Instrumentation, Appl. Second Ed.*, no. May, pp. 229–236, 2011.
- [6] V. Paneta *et al.*, “Study of the  $^{24}\text{Mg}(d,p_{0,1,2})$  reactions at energies and angles relevant to NRA,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 319, pp. 34–38, 2014.
- [7] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, and 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*, vol. 268, no. 11–12, pp. 1818–1823, 2010.
- [8] C. A. Kalfas, M. Axiotis, and C. Tsabaris, “SPECTRW: A software package for nuclear and atomic spectroscopy,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 830, pp. 265–274, 2016.
- [9] M. Mayer, “SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA,” vol. 541, no. 1, pp. 541–544, 2008.
- [10] I. N. The and H. Caseload, “E N E E N,” vol. 2963, no. 35, p. 2963, 1949.
- [11] W. Wang, E. Lin, and C. Tung, “Differential Cross Sections for Elastic

Scattering of Low-Energy Protons from  $^{24}\text{Mg}$  and  $^{26}\text{Mg}$ ,” *Chinese J. Phys.*, vol. 10, no. 1, p. 1, 1972.

- [12] A.K. Valter, V.E. Storizhko, A.I. Popov, *J. Exp. Theoretic. Phys.* 44 (1963) 57, in Russian.
- [13] R.M. Prior, S.E. Darden, K.R. Nyga, H. Paetz GEN. Schieck, “states of  $^{25}\text{Al}$  between 6 and 8 ev\*,” *Nucl. Phys. A* vol.533, pp.411-427, 1991
- [14] F.P. Mooring, L.J. Koster, E. Goldberg, D. Saxon, S.G. Kaufmann, *Phys. Rev.* 84 (1951) 703.