

## ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

## ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## Κατασκευή και Χαρακτηρισμός Πυρηνικών Στόχων

## με τη Μέθοδο Οπισθοσκέδασης Rutherford

Καλλιόπη Κ. Τσαμπά

Επιβλέπων: Θεόδωρος Μερτζιμέκης, Επίκουρος Καθηγητής

AOHNA

**ΙΟΥΝΙΟΣ 2017** 

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κατασκευή και χαρακτηρισμός πυρηνικών στόχων με τη μέθοδο οπισθοσκέδασης Rutherford

**Καλλιόπη Κ. Τσαμπά Α.Μ.** : 1110200700286

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Θεόδωρος Μερτζιμέκης, Επίκουρος Καθηγητής

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της εκπόνησης πτυχιακής εργασίας στο Τμήμα Φυσικής του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Οι μετρήσεις και η ανάλυση έγιναν στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών "Δημόκριτος".

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν στόχοι φυσικού αργύρου (<sup>nat</sup>Ag) στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος", μέσω της Φυσικής Εναπόθεσης Ατμών και συγκεγκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Εξάτμισης μέσω Ηλεκτρικής Αντίστασης.

Επιπλέον, οι στόχοι του <sup>nat</sup>Ag και ο προϋπάρχον ισοτοπικός στόχος <sup>112</sup>Cd, ακτινοβολήθηκαν στον επιταχυντή Tandem με σκοπό το χαρακτηρισμό των στόχων, δηλαδή την εύρεση του πάχους και των προσμείξεών τους. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της οπισθοσκέδασης Rutherford, με δέσμη δευτερίου στα 1500 keV, σε γωνία οπισθοσκέδασης τις 170°.

#### ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Πειραματική Πυρηνική Φυσική

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** πυρηνικοί στόχοι, εναπόθεση με εξάτμιση, <sup>nat</sup>Ag, <sup>112</sup>Cd, IBA, RBS

•

#### ABSTRACT

The present thesis abides to the BSc requirements of the Department of Physics at the National and Kapodistrian University of Athens. The experimental work was conducted at the Institute of Nuclear and Particle Physics (INPP) of the Nuclear Center of Scientific Research "Demokritos".

Natural silver (<sup>nat</sup>Ag) targets were constructed using the method of Physical Vapor Deposition (PVD) and in particular the method of Evaporation through Electric Resistance at the INPP.

These <sup>nat</sup>Ag targets, as well as an existing isotopic <sup>112</sup>Cd target were irradiated in the Tandem Van de Graaff accelerator at the INPP aiming to a full characterization, i.e. determine their thickness and purity. The Ratherford Backscattering Spectrometry (RBS) was used to achieve these goals using a deuterium beam at 1500 keV and at a backscattering angle of 170°.

SUBJECT AREA: Experimental Nuclear Physics

**KEYWORDS:** nuclear targets, physical evaporation deposition, PVD, <sup>nat</sup>Ag, <sup>112</sup>Cd, IBA, RBS

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πριν ξεκινήσω την εργασία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν και με βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Δρ. Θεόδωρο Μερτζιμέκη, ο οποίος ήταν και ο επιβλέπων της παρούσας εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να γνωρίσω την πειραματική πυρηνική φυσική. Θα ήθελα, επίσης, να τον ευχαριστήσω για τις γνώσεις, τις συμβουλές, την αμέριστη καθοδήγηση και την απέραντη υπομονή του, που μου προσέφερε κατά τη δημιουργία της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος για την προθυμία τους να βοηθήσουν σε κάθε περίπτωση ανάγκης κατά τη λήψη των πειραματικών δεδομένων και ειδικότερα τη Δρ. Βαλεντίνα Πανέτα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη διαρκή και πολύπλευρη στήριξη που μου προσέφεραν απλόχερα.

# Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο	17
2.1 Φυσική Εναπόθεση Ατμών	17
2.1.1 Κατηγορίες PVD	17
2.1.2 Εναπόθεση με εξάτμιση	17
2.2 Πυρηνικές Αντιδράσεις	
2.2.1 Εισαγωγή	
2.2.2 Κατηγορίες πυρηνικών αντιδράσεων	20
2.2.3 Νόμοι διατήρησης	23
2.2.4 Κινηματική των πυρηνικών αντιδράσεων	24
2.2.5 Ενερνός διατομή αντίδρασης	
2.3 Τεχνικές Χαρακτηρισμού με Ιοντικές Δέσμες	
2.4 Χαρακτηρισμός με Οπισθοσκέδαση Rutherford	
2.4.1 Εισανωνή	
2.4.2 Γεωμετοία και κινηματική της σκέδασης Rutherford	
2.4.3 Ενερνός διατομή Rutherford	
2.4.4 Σύνοιm.	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πειραματική Λιαδικασία	
3.1 Εισανωνή	
3.2 Ο επιταχυντής TANDEM Van de Graaff	
3.2.1 Elgavový	
3.2.2 Τα βασικά τμήματα του επιταχυντή	
3.2.3 Invń Duoplasmatron off-axis	
$3.2.4 \text{ H} \delta\epsilon \epsilon \alpha \mu \epsilon \nu \eta$ του επιταχυντή	
3.2.5 Οι πειοαματικές νοαμμές	
3.2.6 Μόνωση κτηρίου ως προς την ακτινοβολία	
3.3 Κατασκευή και πορετομιασία των δεινμάτων και στόγων	
3.3.1 Εισανωνή	
3.3.2 Θέρμανση μέσω ηλεκτρικής αντίστασης	
3.3.3 Η διάταξη του εξαχνωτή	
3.3.3.1 Οι αντλίες	
3.3.4 Προετοιμασία εξάχνωσης	
3.3.4.1 Υλικό προς εξάγνωση	
3.3.4.2 Μήτρα	
3.3.4.3 Προετοιμασία υποστρώματος	43
3.3.4.4 Καθαρισμός	44
3.3.5 Η διαδικασία της εξάχνωσης	
3.3.6 Αποκόλληση υμενίων και κατασκευή στόχων	
3.3.6.1 Διαχωρισμός υμενίου - υποστρώματος	46
3.3.6.2 Κατασκευή στόχων	
3.4 Το πείραμα με το θάλαμο σκέδασης RBS	
3.4.1 Ο θάλαμος σκέδασης	
3.4.2 Ο ανιχνευτής SSB	
3.4.3 Οι στόχοι	
3.5 Συλλονή και επεξερνασία φασμάτων	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Δεδομένων και Αποτελέσματα	
4.1 Εισαγωγή	

4.2 Επεξεργασία Φασμάτων	52
4.2.1 Ενεργειακή Βαθμονόμηση	52
4.2.2. Το γινόμενο Q·Ω	53
4.2.3 Ένταση δέσμης	53
4.2.4 Πάχος στόχων	53
4.3 Ανάλυση Φασμάτων	54
4.3.1 Φάσμα <sup>197</sup> Au	54
4.3.2 Φάσμα <sup>106</sup> Pd	56
4.3.3 Φάσμα <sup>nat</sup> Ag	57
4.3.4 Φάσμα <sup>112</sup> Cd	58
4.4 Αποτελέσματα	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Το πρόγραμμα simNRA	63
Π.Α.1. Χαρακτηριστικά δέσμης και γεωμετρία πειράματος	63
Π.Α.2. Στόχος	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Το χρονικό της εξάχνωσης του <sup>nat</sup> Ag	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Εύρεση πάχους στόχων	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68

Η πυρηνική φυσική είναι μία επιστήμη με ένα ευρύ πεδίο μελέτης, από το μικροσκοπικό πυρήνα της ύλης έως και τους γιγαντιαίων διαστάσεων αστέρες του διαστήματος, υπό τη σκοπιά των ασθενών και ισχυρών αλληλεπιδράσεων. Ένας θεμελιώδης τρόπος κατανόησης αυτών των αλληλεπιδράσεων είναι μέσω του πειράματος και συγκεκριμένα, μέσω της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη. Μέσα από αυτές τις αλληλεπιδράσεις, μπορούμε να μελετήσουμε και να εξάγουμε συμπεράσματα για τη δομή του πυρήνα, τη δυναμική των αντιδράσεων κτλ. Τυπικό εργαλείο στην αναζήτηση αυτή αποτελούν οι πειραματικές αντιδράσεις με προεξέχουσες αυτές όπου μια δέσμη πυρήνων συγκρούεται με σταθερό στόχο στο σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου. Για αυτό το λόγο, χρειαζόμαστε μία ποικιλία στόχων, ώστε να πάρουμε πληροφορίες για κάθε έκφανση των αλληλεπιδράσεων αυτών. Αναγκαία πληροφορία είναι η μελέτη της στοιχειομετρίας του στόχου, αλλά και των παχών των διαφόρων διαστρωματώσεων όταν ο στόχος είναι σύνθετος.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο βασικοί στόχοι. Ο στόχος ισοτοπικού <sup>112</sup>Cd πάνω σε πρόσθετα υποστρώματα και ο στόχος του φυσικού αργύρου, <sup>nat</sup>Ag (51.84% <sup>107</sup>Ag, 48.16% <sup>109</sup>Ag) [IUP97]. Για τις ανάγκες της εργασίας, ο στόχος του <sup>nat</sup>Ag παρασκεύαστηκε πλήρως στο Ιντστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής (ΙΠΣΦ) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος". Ο χαρακτηρισμός του έγινε μέσω της τεχνικής RBS (φασματοσκοπίας οπισθοσκέδασης Rutherford), μέλος μίας οικογένειας αναλυτικών πυρηνικών τεχνικών, η οποία μας παρέχει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τη στοιχειομετρία, τη στοιχειώδη επιφανειακή πυκνότητα και την κατανομή των προσμείξεων σε λεπτά υμένια.

Η προετοιμασία των στόχων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του πειράματος, με πιο σημαντικό σημείο, τα χαρακτηριστικά του στόχου να συνάδουν με τις απαιτήσεις του πειράματος, όσον αφορά στην καθαρότητα, τη σύνθεση, το πάχος κτλ. Η διαδικασία με την οποία κατασκευάστηκαν οι στόχοι είναι η Εναπόθεση με Εξάτμιση με Θέρμανση μέσω Ηλεκτρικής Αντίστασης. Αυτή η τεχνική είναι μόνο ένα μικρό τμήμα μίας μεγάλης κατηγορίας μεθόδων, της Φυσικής Εναπόθεσης Ατμών (Physical Vapor Deposition, PVD). Στις μεθόδους PVD, ένα υλικό εξαχνώνεται από μία πηγή, η οποία βρίσκεται σε στερεή μορφή, στη μορφή ατόμων ή μορίων και μεταφέρεται μέσω κενού σε ένα υπόστρωμα, όπου και συμπυκνώνεται. Είναι μία τεχνική, η οποία έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η Νανοτεχνολογία, η Μικροηλεκτρονική ακόμα και η Αρχιτεκτονική, καθώς μπορεί να γίνει σε υποστρώματα με διαστάσεις από μερικά χιλιοστά έως και σε γυαλιά των 25x30 cm. Η Εναπόθεση Ατμών είναι μία διαδικασία, η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον στη πυρηνική φυσική για τη δημιουργία στόχων πάχους < 200 μg/cm<sup>2</sup> [Glo13], με την απόδοση μεταφοράς του υλικού στο υμένιο να αγγίζει το 70% [Sug97]. Τα μόρια του υλικού που εξαχνώνεται, φτάνουν στο υπόστρωμα, με μικρή ή χωρίς καθόλου επαφή με τα μόρια του αέρα. Αναφέρεται χαρακτηριστικά το "χωρίς επαφή με τον αέρα", καθώς υπάρχουν τεχικές PVD στις οποίες τα μόρια του υλικού, έρχονται σε επαφή με αέρια στοιχεία για τη δημιουργία λεπτών υμενίων δύο στοιχείων. Η μέθοδος αυτή, διεξάγεται σε περιβάλλον υψηλού κενού από 10<sup>-5</sup> έως 10<sup>-9</sup> torr, γεγονός που επιτρέπει τον περιορισμό τυχόν επιμολύνσεων του στόχου [Mat10]. Η πρώτη εξάχνωση σε κενό, έγινε το 1887 από τον Nahrwold, και όχι νωρίτερα, καθώς μέχρι τότε δεν υπήρχαν αντλίες ικανές να επιφέρουν τέτοιας τάξης κενό [Mat10].

Δυνητικά κάθε στοιχείο του περιοδικού πίνακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή στόχων. Όμως, σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ακολουθηθεί μία πληθώρα σταδίων και προϋποθέσεων, όπως η σωστή επιλογή και επεξεργασία του υποστρώματος, η σωστή επιλογή διαλυτικού, συμβατά με το σημείο τήξης του υλικού, ώστε να επιλεχθεί η κατάλληλη διαδικασία. Παρόλο, λοιπόν, που υπάρχουν πολλές μέθοδοι κατασκευής στόχων, είναι αναγκαία μία περαιτέρω εξέλιξη κάθε τεχνικής. Παραδείγματος χάριν, πολύ συχνά, ο στόχος πρέπει να είναι λεπτός και αυτοαναρτούμενος (self-suppotring) σε επιφάνεια περίπου 1 cm<sup>2</sup>, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη ευκρίνεια των ενεργειακών κορυφών στη φασματοσκοπία. Η ομοιομορφία και το πόσο επίπεδη θα είναι η επιφάνεια ενός λεπτού υμενίου, είναι, επίσης, αναγκαίες παράμετροι [Gal72]. Στις επόμενες παραγράφους, αναφέρονται πέντε παραδείγματα τεχνικών κατασκευής πυρηνικών στόχων.

Για στόχους από ευσταθή ισότοπα, τρεις διαδικασίες προτιμούνται, η εναπόθεση ατμών, η ψυχρή διέλαση (cold rolling) και η εμφύτευση ιόντων. Σύμφωνα με τους ερευνητές, γίνεται μεγαλύτερη προσπάθεια στο να τελειοποιηθούν αυτές οι τεχνικές, παρά στην ανάπτυξη καινούργιων. Για στόχους από την ομάδα των ακτινίδων, χρησιμοποιείται η τεχνική επίχρωσης (painting technique), ενώ για στοιχεία χωρίς ισότοπα, η εναπόθεση ατμών σε κενό, με άνθρακα συνήθως για υπόστρωμα, θεωρείται η πιο κατάλληλη μέθοδος [Glo13].

Ο Valenzuela και οι συνεργάτες του [Val71], θέλησαν να μετρήσουν την ισχύ ανάσχεσης (stopping power) διαφόρων μετάλλων με πρωτονιακή δέσμη σε ενέργειες από 25 έως 250 keV. Κατασκεύασαν στόχους με τη διαδικασία της Εναπόθεσης Ατμών, αλλά ως υπόστρωμα επέλεξαν πλαστικό, αντί για γυαλί, υλικό που χρησιμοποίησαμε στη παρούσα εργασία και ο διαχωρισμός υποστρώματος-υμενίου έγινε μέσα σε λουτρό αιθέρα. Αναφέρουν, λοιπόν, πως αυτή η μέθοδος είχε απόδοση 70%.

Ο Fan και οι συνεργάτες του [Fan08], σε πείραμα μέτρησης μαγνητικών ροπών, κατασκεύασαν στόχους από Zn και Cd. Και τα δύο αυτά στοιχεία, είναι ιδιαίτερα πτητικά και αποτελούνται από πολλά ισότοπα. Έτσι, λοιπόν, για τα ισότοπα του ψευδαργύρου <sup>67,68,70</sup>Zn χρησιμοποίησαν υποστρώματα σιδήρου, ενώ από τα ισότοπα <sup>64,66,68,70</sup>Zn και <sup>110,114,116</sup>Cd, παράχθηκαν στόχοι με τη μέθοδο rolling σε υποστώματα άνθρακα.

Ο Cabanelas και οι συνεργάτες του [Cab16], κατασκεύασαν στόχους από άργυρο μέσω εξάχνωσης. Το ενδιαφέρον σε αυτή την περίπτωση, ήταν ότι μπορούσαν να προβλέψουν, αλλά όχι σε απόλυτο βαθμό, το πάχος του στόχου, καθώς, μέσα στο θάλαμο εξάχνωσης υπήρχε ειδική συσκευή, με την οποία μπορούσαν να ελέγξουν τον ρυθμό εναπόθεσης. Αναφέρεται, πως σε θερμοκρασία 950°C, υπήρχε εναπόθεση 10 nm σε 10 λεπτά. Για το χαρακτηρισμό των στόχων, έκαναν εφαρμογή της τεχνικής RBS, με δέσμη σωματιδίων α σε ενέργεια 2 MeV και γωνία σκέδασης 165°.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, κάθε υλικό απαιτεί έναν ιδιαίτερο τρόπο προσέγγισης, όσον αφορά τη κατασκευή λεπτών υμενίων. Όμως, κάθε τέτοιος τρόπος, δεν είναι και ο μοναδικός. Ο Maréchal και οι συνεργάτες του [Mar94], κατασκεύασαν στόχους Ag μέσω της τεχνικής sputtering, με ρυθμό εναπόθεσης 70 nm ανά λεπτό. Μετά το χαρακτηρισμό των στόχων μέσω της RBS, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως αυτή η τεχνική παρέχει υψηλής καθαρότητας στόχους, χωρίς προσμείξεις.

'Ολα όσα αναφέρονται παραπάνω, είναι μόνο ένα μικρό κομμάτι της επιστήμης και της τεχνολογίας που κρύβεται πίσω από την κατασκευή στόχων και λεπτών υμενίων. Υπάρχουν πολλές ακόμη μέθοδοι, διαδικασίες και χρήσεις αυτών, οι οποίες όμως δεν περιλαμβάνονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Η ανάλυση των στόχων γίνεται χρησιμοποιώντας δέσμη φορτισμένων σωματιδίων (Ion Beam Analysis – IBA) και αποτελεί τη λιγότερο (σχεδόν καθόλου) καταστροφική μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της επιφανειακής σύνθεσης για την εύρεση του προφίλ της επιφανειακής κατανομής ενός στοιχείου σε ένα δείγμα. Σύμφωνα με τον Ourabah και τους συνεργάτες του [Our13], ο χαρακτηρισμός λεπτών υμενίων μέσω της φασματοσκοπίας Rutherford (RBS), είναι η πιο κατάλληλη τεχνική ανάλυσης με ιοντικές δέσμες, μέθοδος που ακολουθείται και στην παρούσα εργασία. Η RBS είναι μία αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης πάχους στόχων, μέτρησης του ενεργειακού διασκεδασμού της δέσμης εντός στόχου και άλλων παραμέτρων ενός πειράματος. Σήμερα, βρίσκει μεγάλες και διαρκώς διευρυνόμενες εφαρμογές σε θέματα υψηλής τεχνολογίας, βιομηχανικών εφαρμογών, αλλά και γεωλογίας, πολιτιστικής κληρονομιάς και περιβάλλοντος. Οι πυρηνικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο πεδίο αυτό, βασίζονται στην ανίχνευση των σωματιδίων ή της ακτινοβολίας που προκύπτει μετά την αλληλεπίδραση των σωματιδίων της δέσμης με το νοι μελέτη στόχου.

Ξεκινώντας όμως από την αρχή της αλληλεπίδρασης, από τη στιγμή δηλαδή που η δέσμη προσπίπτει στο στόχο, τέσσερα σημαντικά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα και πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αρχικά, τα σωματίδια της δέσμης χάνουν ενέργεια όσο διαπερνούν το στόχο, αλληλεπιδρώντας με τα άτομά του (κυρίως με το ηλεκτρονιακό νέφος), μέχρι να αλληλεπιδράσουν με κάποιον πυρήνα. Η απώλεια ενέργειας της δέσμης μέσα στον στόχο (ισχύς ανάσχεσης - stopping power S και stopping cross section ε) οδηγεί στην αντίληψη του βάθους-πάχους του στόχου και γενικά προσεγγίζεται θεωρητικά από τη γνωστή σχέση Bethe-Bloch [Lea95], ενώ οι στατιστικές διακυμάνσεις του φαινομένου αυτού οδηγούν στον ενεργειακό διασκεδασμό (energy straggling) της δέσμης που σε συνδυασμό με άλλες πειραματικές παραμέτρους, όπως η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, θέτει περιορισμούς στην επιτεύξιμη διακριτική ικανότητα ανάλυσης μαζών και βάθους. Η αλληλεπίδραση, ενός σωματιδίου της δέσμης με έναν πυρήνα του στόχου και η ανίχνευση του αντίστοιχου εξερχόμενου/εκπεμπόμενου σωματιδίου (ή ακτινοβολίας) εξαρτάται από την πιθανότητα να συμβεί η συγκεκριμένη αντίδραση (διαφορική ενεργός διατομή dσ/dΩ) επιτρέποντας να αναλύουμε ποσοτικά ένα στόχο. Η ενέργεια του εξερχόμενου σωματιδίου εξαρτάται βέβαια από την κινηματική της αντίδρασης (παράγοντας k) για την ελαστική σκέδαση, αλλά και τη διαφορά μαζών (Q-value) στην περίπτωση πυρηνικής αντίδρασης, ενώ η τελική ενέργεια των σωματιδίων που φτάνουν στον ανιχνευτή εξαρτάται και από την επιπρόσθετη απώλεια ενέργειας διασχίζοντας το στόχο από το σημείο (βάθος) της αντίδρασης «πίσω» προς τον ανιχνευτή. Τέλος, τα ανιχνευόμενα σωματίδια καταγράφονται με τη βοήθεια των κατάλληλων ηλεκτρονικών μονάδων σε ένα φάσμα, ανάλογα με την ενέργεια τους [Pan15].

Αρχικά, στο κεφάλαιο 2, γίνεται μια εκτενής εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει το πέιραμά μας. Αναφέρεται η τεχνική Φυσικής Εναπόθεσης Ατμών, εισάγεται η έννοια των πυρηνικών αντιδράσεων, της κινηματικής και των νόμων διατήρησης που τις διέπουν. Επίσης, πραγματοποιείται μια περιγραφή των τεχνικών χαρακτηρισμού με ιοντικές δέσμες και μία λεπτομερής ανάλυση της φασματοσκοπίας με σκέδαση Rutherford.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3, αναφέρεται η πειραματική διαδικασία. Αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος κατασκευής των προς ακτινοβόληση στόχων και δίνονται πληροφορίες για τον θάλαμο σκέδασης που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

Στο κεφάλιο 4, παρουσιάζονται τα συλλεχθέντα φάσματα μαζί με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους, καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο 5, γίνεται μία περίληψη των παραμέτρων του πειράματός μας και αναφέρονται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μετά την επεξεργασία των φασμάτων.

Τέλος, στο Παράρτημα, γίνεται μία σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του προγράμματος simNRA, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και προσομοιώση των φασμάτων RBS και παρουσιάζονται κάποιες λεπτομέρειες από τη διαδικασία παραγωγής των στόχων.

## 2.1 Φυσική Εναπόθεση Ατμών

#### 2.1.1 Κατηγορίες PVD

Η Φυσική Εναπόθεση Ατμών (Physical vapor deposition - PVD) αναφέρεται σε μία οικογένεια μεθόδων, στις οποίες, ένα υλικό εξαχνώνεται (ή εξατμίζεται) από μία πηγή, η οποία βρίσκεται σε στερεή (ή υγρή) μορφή, στη μορφή ατόμων ή μορίων και μεταφέρεται μέσω κενού σε ένα υπόστρωμα, όπου και συμπυκνώνεται. Οι διαδικασίες PVD μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία υμενίων από υλικά ενός στοιχείου, κράματα, σύμπλοκες ενώσεις, ακόμα και πολυμερή. Το πάχος των υμενίων ποικίλει από μερικά έως και χιλιάδες angstroms (1 Å = 0.1 nm), με το μέσο αριθμό εναπόθεσης να κυμαίνεται στα 10-100 Å/sec. Κύριο πλεονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι πως σχεδόν οποιοδήποτε ανόργανο και αρκετά οργανικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές. Οι στόχοι που κατασκευάζονται δύναται να αποτελούνται όχι μόνο από ένα στρώμα, αλλά και πολλαπλά στρώματα, διαφορετικής σύστασης και πάχους.

Οι βασικές τεχνικές PVD είναι οι ακόλουθες:

- <u>Εναπόθεση με εξάτμιση (vacuum evaporation)</u>: το υλικό που εξαχνώνεται επικάθεται στο υπόστρωμα χωρίς να έρθει σε επαφή με αέρια στοιχεία.
- Εναπόθεση θρυμματισμού (sputter deposition): το προς εξάχνωση υλικό βομβαρδίζεται με ιόντα κάποιου αδρανούς αερίου (συνήθως Ar). Λόγω των αρχών διατήρησης ενέργειας και ορμής, τα μόρια του υλικού της πηγής σκεδάζονται και επικαλύπτουν το υπόστρωμα.
- Εναπόθεση τόξου εκκένωσης (arc vapor deposition): το αέριο που εναποτίθεται στα υποστρώματα δημιουργείται από την άνοδο ή την κάθοδο ενός ηλεκτρικού τόξου (υψηλή πυκνότητα ρεύματος, χαμηλή διαφορά δυναμικού), εντός περιβάλλοντος αερίου χαμηλής πίεσης.
- Επίστρωση ιόντων (ion plating): κατά την τεχνική αυτή, το προς εξάχνωση υλικό βαμβαρδίζεται συνεχώς ή περιοδικά από υψηλής ενέργειας σωματίδια (συνήθως κάποιου αδρανούς ή reactive αερίου), με σκοπό να τροποποιηθούν και να ελεγχούν η σύσταση και οι ιδιότητες του υμενίου που κατασκευάζεται. Η διαδικασία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με την εναπόθεση θρυμματισμού και την εναπόθεση τόξου εκκένωσης.

#### 2.1.2 Εναπόθεση με εξάτμιση

Όπως έχει αναφερθεί, η εναπόθεση με εξάτμιση είναι μία τεχνική κατά την οποία τα μόρια του υλικού που εξαχνώνεται, φτάνουν στο υπόστρωμα, χωρίς καθόλου επαφή με τα μόρια κάποιου αερίου. Η μέθοδος αυτή, διεξάγεται σε περιβάλλον υψηλού κενού από 10<sup>-5</sup> έως 10<sup>-9</sup> torr, γεγονός που επιτρέπει τον περιορισμό τυχόν επιμολύνσεων του στόχου.

Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι πως μπορούμε να κατασκευάσουμε στόχους διαφορετικού πάχους, με μία μόνο εξάχνωση, εκμεταλλευόμενοι τον τρόπο κατανομής των αέριων μορίων του υλικού που εξαχώνεται. Δηλαδή, ακολουθούν μία συνημιτονική κατανομή, η οποία περιγράφεται από τη σχέση

$$\frac{dm}{dA} = \left(\frac{E}{\pi \cdot r^2}\right) \cos\varphi \cdot \cos\theta \tag{2.1}$$

όπου dm/dA : η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας

Ε: η συνολική μάζα που έχει εξαχνωθεί

r: η απόσταση της πηγής και του υποστρώματος

θ: η γωνία μεταξύ πηγής και υποστρώματος

φ: η γωνία μεταξύ σε σχέση με την ευθεία που ορίζεται από την πηγή ως το υπόστρωμα



Σχήμα 2.1: Η γωνιακή κατανομή των ατόμων της πηγής και η κατανομή του πάχους σε επίπεδο υπόστρωμα [Mat10].

Πλεονεκτήματα της τεχνικής εναπόθεσης ατμών:

- Υψηλής καθαρότητας υμένια μπορούν να κατασκευαστούν από υψηλής καθαρότητας υλικά.
- Η πηγή του υλικού εξάχνωσης δύναται να είναι ένα στερεό υλικό οποιουδήποτε σχήματος και καθαρότητας.
- Μπορούν να επιιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης (1-10 nm/sec).
- Υπάρχουν ευθείες τροχίες εναπόθεσης και η χρήση ειδικών κατευθυντήριων φραγμάτων που μπορούν να καθορίσουν των επιφάνεια εναπόθεσης.
- Ο έλεγχος και η καταγραφή της εναπόθεσης είναι σχετικά εύκολες διαδικασίες.
- Απαιτεί το ελάχιστο κόστος σε σχέση με τις άλλες τεχνικές PVD

Μειονεκτήματα της τεχνικής εναπόθεσης ατμών:

• Υπάρχει δυσκολία στην εναπόθεση αρκετών κραμάτων και σύμπλοκων ενώσεων.

- Χαμηλή επιφανειακή κάλυψη σε πολύπλοκες επιφάνειες
- Ανομοιογένεια πάχους σε στόχους μεγάλης επιφάνειας
- Μεγάλα ποσά θερμότητας μπορεί να εκλυθούν κατά τη διάρκεια της εξάχνωσης επιρεάζοντας αρνητικά την διαδικασία της εξάχνωσης.

Η διαδικασία της Θέρμανσης μέσω Ηλεκτρικής Αντίστασης, ακολουθείται για την εξάχνωση υλικών με σημείο τήξης κάτω από τους 1500°C (για υλικά με μεγαλύτερο σημείο τήξης χρησιμοποιείται η μέθοδος θέρμανσης με δέσμες ηλεκτρονίων [Goy15]). Το προς εξάχνωση υλικό, τοποθείται με μία μήτρα με υψηλό σημείο τήξης, συνήθως W, Ta, Mo, BN/TiB<sub>2</sub>, μέσω της οποίας διέρχεται ρεύμα εκατοντάδων Ampère, προκαλώντας, έτσι, την τήξη του υλικού. Σημαντικό παράγοντα αποτελεί, τό μέγεθος του θαλάμου μέσα στον οποίο γίνεται η εξάχνωση, ώστε να μην επηρεάζεται το υπόστρωμα από τη θερμότητα [Mat10].

## 2.2 Πυρηνικές Αντιδράσεις

#### 2.2.1 Εισαγωγή

Πυρηνική αντίδραση θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία δύο πυρήνες ή, αλλιώς, ο πυρήνας ενός ατόμου και ένα υποατομικό σωματίδιο (όπως πρωτόνιο, νετρόνιο ή υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνιο) που βρίσκεται εξωτερικά του ατόμου, συγκρούονται παράγοντας, ένα ή και περισσότερα, προϊόντα διαφορετικά από τα αρχικά σωματίδια. Έτσι, σε μία πυρηνική αντίδραση, πρέπει να υπάρχει μεταστοιχείωση ενός σωματιδίου σε κάποιο άλλο. Μία τέτοια διαδικασία συμβαίνει όταν ένας στόχος βομβαρδίζεται από σωματίδια ερχόμενα από έναν επιταχυντή ή μια ραδιεργή πηγή [Ber07]. Στην περίπτωση που ένας πυρήνας αλληλεπιδράσει με κάποιον άλλο πυρήνα ή σωματίδιο, χωρίς την παραγωγή διαφορετικών σωματιδίων, τότε αναφερόμαστε στη πυρηνική σκέδαση.

Έτσι, λοιπόν, ο Rutherford, το 1919, παρατήρησε τη πρώτη πυρηνική αντίδραση που συνέβη σε εργαστήριο,

$$\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{17}_{8}O + p \tag{2.2}$$

(διαφορετικός συμβολισμός:  ${}^{14}N(\alpha,p){}^{17}O$ ), έχοντας ως βλήμα σωματίδια α προερχόμενα από πυρήνα  ${}^{214}$ Bi και ως στόχο  ${}^{14}$ N.

Για αρκετά χρόνια, τα σωματίδια α χρησιμοποιούνταν ως δέσμη στις πυρηνικές αντιδράσεις, καθώς ήταν το μόνο βλήμα αρχικά διαθέσιμο, ως προϊόν διάσπασης α από διαριενεργές πηγές. Με την ανάπτυξη, όμως, των επιταχυντών γύρω στο 1930, οι δυνατότητες αυξήθηκαν δραματικά, όχι μόνο σχετικά με την ενέργεια του βλήματος, αλλά και τη μάζα του. Σήμερα είναι πλέον εφικτό να βομβαρδίζουμε στόχους με πρωτόνια ενέργειας >1 TeV και με δέσμες βαρέων σωματιδίων, όπως το ουράνιο, για τη μελέτη αντιδράσεων με βαριά ιόντα.

#### 2.2.2 Κατηγορίες πυρηνικών αντιδράσεων

'Οπως αναφέρθηκε, η σχέση (2.2), αντιπροσωπεύει μια πυρηνική αντίδραση. Όμως, οι πυρηνικές αντιδράσεις δεν συναντιούνται μόνο σε αυτή τη μορφή, καθώς ο αριθμός των αντιδρώντων ή/και των προϊόντων μπορεί να ποικίλει. Αυτό σημαίνει, πως μπορούμε να έχουμε δύο τελικά προϊόντα ή και μόνο ένα, όπως στην p+<sup>27</sup>Al → <sup>28</sup>Si\*, η οποία ανήκει στην κατηγορία αντιδράσεων απορρόφησης. Σε ιδιάζουσες περιπτώσεις, παρατηρούνται αντιδράσεις με τρία αντιδρώντα, όπως η α+α+α → <sup>12</sup>C, η οποία λαμβάνει χώρα στο υπέρθερμο πλάσμα στο εσωτερικό των άστρων.

Υπάρχουν πολλοί τύποι πυρηνικών αντιδράσεων, όμως οι πιο συνηθισμένοι και αξιοσημείωτοι είναι οι εξής:

<u>Ελαστική σκέδαση</u>: Ο αριθμός και το είδος των σωματιδίων, καθώς και η κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου πάνω σε έναν πυρήνα στο κέντρο μάζας (Ε<sub>CM</sub>) διατηρούνται.

Έστω Α(α,α)Α η αντίδραση μεταξύ βλήματος α και στόχου Α. Αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας ελαστικής σκέδασης είναι

$$b \gg R_1 + R_2 \tag{2.3}$$

όπου b: η παράμετρος κρούσης, δηλαδή η ελάχιστη απόσταση στην οποία το σωμάτιο α θα πλησιάσει τον πυρήνα εάν δεν υπήρχε το απωστικό δυναμικό Coulomb. Η παράμετρος αυτή, καθορίζει ανμία αλληλεπίδραση επάγεται στις πυρηνικές σκεδάσεις ή στις πυρηνικές αντιδράσεις. Για τιμές του μεγαλύτερες του αθροίσματος των ακτίνων, βρισκόμαστε στις σκέδασεις, ενώ στηναντίθετη περίπτωση, αναφερόμαστε σε αντιδράσεις.

R1: η ακτίνα του σωματιδίου - βλήματος,

R<sub>2</sub>: η ακτίνα του πυρήνα – στόχου.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και η οπισθοσκέδαση Rutherford (Rutherford backscattering), η οποία αποτελεί και τη μέθοδο που χρησιμοποίησαμε στην παρούσα εργασία για το χαρακτηρισμό των στόχων. Η μέθοδος αυτή αναλύεται στην παράγραφο 2.4.



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της παραμέτρου κρούσης, b.



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής σκέδασης.

<u>Ανελαστική σκέδαση</u>: Ο αριθμός ή/και το είδος των σωματιδίων διαφέρει από την αρχική στην τελική κατάσταση. Έπισης, η κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου (E<sub>CM</sub>) δεν διατηρείται. Κατά τη σκέδαση, το προσπίπτον σωματίδιο απορροφάται από τον πυρήνα-στόχο, σχηματίζοντας έναν σύνθετο πυρήνα. Ο σύνθετος αυτός πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης και αποδιεγείρεται με εκπομπή γ. Παράδειγμα αποτελεί η μετάβαση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες σε αντιδράσεις που η Κ στοιβάδα είναι πλήρης [Nas15].

Έστω A(α,α\*)A\*, ο συμβολισμός μίας ανελαστικής σκέδασης. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί, πρέπει

![](_page_20_Figure_5.jpeg)

Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση της ανελαστικής σκέδασης.

<u>Αντιδράσεις μεταφροράς</u>: Αυτού του είδους οι αντιδράσεις, συνήθως γίνονται σε χαμηλές ενέργειες και ένα ή περισσότερα νουκλεόνια μεταφέρονται μεταξύ προσπίπτοντος σωματιδίου και στόχου. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Αντιδράσεις απογύμνωσης (stripping reactions): το βλήμα δίνει ένα νουκλεόνιο στον πυρήνα π.χ.  ${}^{16}O({}^{12}C, {}^{11}C){}^{17}O$ 

2. Αντιδράσεις πρόσληψης (pick-up reaction): το βλήμα συλλέγει ένα νουκλεόνιο από τον πυρήνα π.χ.  ${}^{16}O({}^{12}C, {}^{13}C){}^{15}O$ 

Έστω A(α,b)B, η αντίδραση μεταξύ βλήματος και στόχου. Η σχέση για την παράμετρο κρούσης ορίζεται ως

$$b \leq R_1 + R_2 \tag{2.5}$$

(2.6)

Αναγκαία συνθήκη για να πραγματοποιήθει μια πυρηνική αντίδραση είναι, η ενέργεια του κέντρου μάζας του βλήματος να είναι μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού Coulomb του πυρήναστόχου, δηλαδή

![](_page_21_Figure_6.jpeg)

Σχήμα 2.5: Απεικόνιση των αντιδράσεων μεταφοράς.

<u>Αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα</u>: Το μοντέλο του σύνθετου πυρήνα προτάθηκε από τον Niels Bohr [Boh36], ώστε να εξηγήσει τις πυρηνικές αντιδράσεις ως διαδικασίες δύο σταδίων, που περιλαμβάνουν το σχηματισμό ενός ενδιάμεσου πυρήνα σχετικά μακράς διάρκειας ζωής και την επακόλουθη διάσπασή του. Αρχικά, ένα σωματίδιο βομβαρδίζει ένα πυρήνα-στόχο, χάνοντας όλη την ενέργειά του και γίνεται αναπόσπαστο κομμάτι ενός νέου, διεγερμένου και ασταθούς πυρήνα που ονομάζεται σύνθετος πυρήνας. Το στάδιο του σχηματισμού αυτού του καινούργιου πυρήνα, παίρνει ένα χρονικό διάστημα περίπου ίσο με το χρονικό διάστημα από τον βομβαρδισμό του στόχου, μέχρι τη διέλευση του προσπίποντος σωματιδίου από όλη τη διάμετρο που πυρήνα-στόχου. Στη συνέχεια, ο πυρήνας διασπάται, δημιουργώντας έναν νέο πυρήνα και ένα σωματίδιο [Ber07].

Στην περίπτωση του σύνθετου πυρήνα, η παράμετρος κρούσης ικανοποιείται από τη σχέση $b \approx 0$  (2.7)

![](_page_21_Figure_10.jpeg)

Σχήμα 2.6: Απεικόνιση των αντιδράσεων σύνθετου πυρήνα.

Τέλος, είναι σημαντικό να τονίσουμε πως, σε αντίθεση με τις χημικές αντιδράσεις, τα προϊόντα που προκύπτουν από μία πυρηνική αντίδραση δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένα, δηλαδή έχοντας ως αφετηρία δύο συγκεκριμένα αντιδρώντα μπορούν να παραχθούν δεκάδες προϊόντα, όπως η αντίδραση:

$$d + {}^{238}U \rightarrow \begin{cases} {}^{240}Np^* + \gamma \\ {}^{239}Np + n \\ {}^{239}U + p \\ {}^{237}U + {}^{3}H \end{cases}$$
(2.8)

η οποία περιγράφει την αλληλεπίδραση ενός d (δευτερίου) με έναν πυρήνα <sup>238</sup>U (ουρανίου). Στην πρώτη από αυτές, το δευτέριο απορροφάται από τον στόχο ουρανίου, σχηματίζοντας έναν διεγερμένο πυρήνα <sup>240</sup>Np, ο οποίος αποδιεγείρεται εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Οι επόμενες δύο αντιδράσεις αποτελούν παράδειγμα των stripping reactions, ενώ η τελευταία, περιγράφει την αντίθετη διαδικασία, την pick-up reaction. Κάθε πιθανό αποτέλεσμα της αντίδρασης (2.8), με καλά ορισμένες κβαντικές στάθμες, ορίζεται ως κανάλι. Δηλαδή, για το κανάλι εισόδου d+<sup>238</sup>U, υπάρχουν τέσσερα δυνατά κανάλια εξόδου. Η πιθανότητα μίας πυρηνικής αντίδρασης να γίνει μέσω ενός συγκεκριμένου καναλιού, εξαρτάται από την ενέργεια της εισερχόμενης δέσμης και μετράται με την ενεργό διατομή του συγκεκριμένου καναλιού.

#### 2.2.3 Νόμοι διατήρησης

Ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη και την πιθανή πορεία μίας πυρηνικής αντίδρασης είναι οι νόμοι διατήρησης, οι οποίοι καθορίζουν και τα προϊόντα αυτών [Ber07].

- <u>Βαρυονικός αριθμός</u>: Δεν υπάρχουν πειραματικές ενδείξεις διαδικασιών στις οποίες νουκλεόνια δημιουργούνται ή καταστρέφονται, χωρίς τη δημιουργία ή την καταστροφή αντίστοιχων αντινουκλεονίων. Η αρχή αυτή, εφαρμόζεται πολύ πιο αυστηρά στις αντιδράσεις χαμηλής ενέργειας. Κάτω από το όριο δημιουργίας μεσονίων (~140 MeV), δεν υπάρχουν διαδικασίες που να μετατρέπουν πρωτόνια σε νετρόνια ή αντίστροφα και οι διαδικασίες της ασθενούς αλληλεπίδρασης είναι πολύ αργες σε σχέση με τους χρόνους των αντιδράσεων. Έτσι, μπορούμε να μιλάμε χωριστά για διατήρηση αριθμού νετρονίων.
- <u>Φορτίο</u>: Η διατήρηση του φορτίου είναι μία γενική αρχή στη φυσική και ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Στις πυρηνικές αντιδράσεις, το άθροισμα των ατομικών αριθμών των ατόμων κάθε μέλους θα πρέπει να είναι ίδιο και στα δύο μέλη.
- Ενέργεια και ορμή: Δύο θεμελιώδεις αρχές στη μελέτη της κινηματικής των αντιδράσεων.
   Μέσω αυτών, γωνίες και ταχύτητες συσχετίζονται με τις αρχικές παραμέτρους του προβλήματος.
- <u>Ολική στροφορμή:</u> Η διατήρηση της στροφορμής ισχύει σε κάθε στροφική κίνηση.
- <u>Ομοτιμία</u>: Η ομοτιμία διατηρείται πάντα σε ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις. Ο συνδυασμός διατήρησης ολκής στροφορμής και ομοτιμίας, μας δίνει την τροχιακή στροφορμή.

 Ισοσπίν: Αυτή είναι μια προσεγγιστική αρχή που εφαρμόζεται σε ελαφρούς πυρήνες, όπου η δύναμη Coulomb είναι πολύ μικρή. Μία αντίδραση με αυτούς του πυρήνες δεν διατηρεί μόνο την τρίτη προβολή του ισοσπίν (αποτέλεσμα της διατήρησης φορτίου και βαρυονικού αριθμού), αλλά και το συνολικό ισοσπίν Τ.

#### 2.2.4 Κινηματική των πυρηνικών αντιδράσεων

Ένα ακόμα βασικό βήμα για την πραγματοποίηση μίας αντίδρασης είναι η κινηματική της, δηλαδή το πώς μεταφέρεται ποιοτικά και ποσοτικά η κινητική ενέργεια στο σύστημα και ποιές οι τροχίες των σωματιδίων. Θεωρούμε, λοιπόν, βλήμα α, το οποίο προσκρούει σε στόχο A, παράγοντας τα προϊόντα b και B.

$$\alpha + A \to b + B \tag{2.9}$$

Σχήμα 2.7: Η πυρηνική αντίδραση Α(α,b)Β για το σύστημα αναφοράς εργαστηρίου.[Ber07]

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα α και b είναι ελαφροί πυρήνες, ενώ τα A και B, βαριοί. Ο πυρήνας b σκεδάζεται με γωνία θ με ενέργεια καθορισμένη στο σύστημα εργαστηρίου, ενώ ο ανακρουόμενος πυρήνας B έχει μικρή εμβέλεια και δεν μπορεί να φύγει από τον στόχο. Έτσι, για λόγους ευκολίας, μπορούμε να εξαλείψουμε τις παραμέτρους του B από τις εκφράσεις διατήρησης της ενέργειας και της ορμής:

$$E_{\alpha} + Q = E_{b} + E_{B}$$

$$\sqrt{2m_{a}E_{a}} = \sqrt{2m_{b}E_{b}}\cos\theta + \sqrt{2m_{B}E_{B}}\cos\phi$$

$$\sqrt{2m_{b}E_{b}}\sin\theta = \sqrt{2m_{B}E_{B}}\sin\phi$$
(2.10)

όπου η *Q-τιμή της αντίδρασης*, μας πληροφορεί για το ποσό της ενέργειας που εκλύεται ή απορροφάται εξαιτίας της διαφοράς μεταξύ των αρχικών και τελικών μαζών

$$Q = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2$$
(2.11)

Κ. Τσαμπά

![](_page_23_Figure_11.jpeg)

Εξαλείφοντας τα  $E_B$  και  $\varphi$  μπορούμε να συσχετίσουμε το Q με τις παραμέτρους της κρούσης που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή

$$Q = E_{b} (1 + \frac{m_{b}}{m_{B}}) - E_{a} (1 - \frac{m_{a}}{m_{B}}) - \frac{2}{m_{B}} \sqrt{m_{a} m_{b} E_{a} E_{b}} \cos\theta$$
(2.12)

Παρατηρώντας την παραπάνω σχέση, βλέπουμε πως είναι μία δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς  $\sqrt{E_b}$ 

με λύση

$$\sqrt{E_b} = \frac{1}{m_b + m_B} \{\sqrt{m_a m_b E_a} \cos\theta \pm \sqrt{m_a m_b E_a \cos^2\theta + (m_b + m_B)[E_a(m_B - m_a) + Qm_B]}\}$$
(2.13)

Αν φτιάξουμε μία γραφική παράσταση της ενέργειας  $E_b$  του εκπεμπόμενου σωματιδίου συναρτήσει της ενέργειας  $E_{\alpha}$  του προσπίπτοντος σωματιδίου, για διάφορες γωνίες θ, θα πάρουμε μία οικογένεια καμπυλών, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα

![](_page_24_Figure_7.jpeg)

Σχήμα 2.8: Ενέργεια Ε<sub>b</sub> συναρτήσει της ενέργειας Ε<sub>α</sub>.[Ber07]

Το γράφημα του σχ. 2.8, αναφέρεται στην αντίδραση  ${}^{12}C+{}^{14}N \rightarrow {}^{10}B+{}^{16}O$ , όπου Q = -4.4506 MeV. Δύο πράγματα μπορούμε να διακρίνουμε, λοιπόν, από τη γραφική. Πρώτον, εφόσον το Q < 0, υπάρχει ένα ενεργειακό κατώφλι για το προσπίπτον σωματίδιο  $E_t$  ως συνάρτηση της γωνίας  $\theta$ , κάτω από το οποίο δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε τον πυρήνα b για τη συγκεκριμένη γωνία. Σε αυτές τις ενέργειες, η σχέση (2.12) γίνεται

$$E_{t} = \frac{-Q m_{B} (m_{B} + m_{b})}{m_{a} m_{b} \cos^{2} \theta + (m_{B} + m_{b}) (m_{B} + m_{a})}$$
(2.14)

Αυτά τα όρια είναι αποτέλεσμα την πυρηνικής δύναμης και μάλιστα, θα ήταν μικρότερα αν λαμβάναμε υπόψιν μας και την άπωση του δυναμικού Coulomb. Στην περίπτωση που θ=0°, λαμβάνουμε τη μικρότερη τιμή της (2.13)

Κ. Τσαμπά

$$E_{t} = \frac{-Q(m_{B} + m_{b})}{m_{B} + m_{b} - m_{a}}$$
(2.15)

και είναι το απόλυτο όριο για την αντίδραση, δηλαδή η μικρότερη τιμή της *E*<sub>α</sub>, για την οποία μπορεί η αντίδραση να πραγματοποιηθεί.

Στην περίπτωση που Q > 0 (εξώθερμη αντίδραση – έχουμε έκλυση ενέργειας), το ενεργειακό κατώφλι είναι αρνητικό και η αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί για κάθε ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου. Στην περίπτωση που Q < 0 (ενδόθερμη αντίδραση – έχουμε απορρόφηση ενέργειας), για ενέργειες  $E_{\alpha} = E_t$ , το προσπίπτον σωματίδιο παράγει σωματίδια b στη γωνία  $\theta = 0^\circ$ . Καθώς αυξάνεται η ενέργεια  $E_{\alpha}$ , αρχίζει η παραγωγή και σε άλλες γωνίες.

Η δεύτερη σημαντική πληροφορία που λαμβάνουμε παρατηρώντας το γράφημα 2.8, έχει να κάνει με την σχέση μεταξύ των  $E_{\alpha}$  και  $E_b$ . Για κάθε ενέργεια  $E_{\alpha}$ , υπάρχει μόνο μία τιμή  $E_b$ , για κάθε γωνία θ, εκτός από την ενεργειακή περιοχή μεταξύ 8.26 MeV και 17.82 MeV. Στην πρώτη περιοχή, αντιστοιχεί η ενέργεια κατωφλίου (2.14), ενώ η δεύτερη μπορεί να υπολογιστεί θέτοντας τον αριθμητή της (2.12) ίσο με μηδέν, παίρνοντας

$$E'_{\alpha} = \frac{-m_b Q}{m_b - m_a} \tag{2.16}$$

κάτι που μας δείχνει πως η  $E_{\alpha}$  είναι ανεξάρτητη της γωνίας  $\theta$ . Για αυτό το λόγο, οι καμπύλες για κάθε γωνία τέμνουν τον οριζόντιο άξονα στο ίδιο σημείο. [Ber07].

#### 2.2.5 Ενεργός διατομή αντίδρασης

Το μέγεθος της ενεργού διατομής εκφράζει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μία πυρηνική αντίδραση υπό ορισμένες πειραματικές συνθήκες. Έστω, και πάλι, δέσμη τυχαίων σωματιδίων α προσπίπτουν σε στόχο πυρήνων A με αποτέλεσμα τη δημιουργία πυρήνων B και ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίων b (A(a,b)B). Αν υποθέσουμε ότι η δέσμη των α σωματιδίων, αμελητέου μεγέθους και ταχύτητας ν, έχει διατομή S και ότι οι πυρήνες A έχουν σφαιρικό σχήμα ακτίνας R, τότε ο κάθε πυρήνας του στόχου παρεμβάλλει στη δέσμη μια επιφάνεια εμβαδού [Rak11]:

$$\sigma = \pi R^2 \tag{2.17}$$

με πιθανότηα να ανακόψει την πορεία της δέσμης.

Θεωρώντας το πάχος του στόχου πολύ μικρό, ώστε οι πυρήνες *A* να μην επισκιάζουν ο ένας τον άλλο, η πιθανότητα πρόσκρουσης κάποιου σωματιδίου της δέσμης σε κάποιον από τους πυρήνες *A* του στόχου, δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{\sigma N_A S}{S} = \sigma N_A \tag{2.18}$$

όπου N<sub>A</sub> είναι η επιφανειακή πυκνότητα των πυρήνων A στο υλικό του στόχου.

Αν η δέσμη περιέχει *n* σωματίδια ανά μονάδα όγκου, τότε τα α σωαμτίδια που θα διαπεράσουν το στόχο ανά μονάδα χρόνου θα είναι:

$$n_a = nv \tag{2.19}$$

Επομένως, η ολική πιθανότητα ένα σωμάτιο της δέσμης να συγκρουστεί με έναν πυρήνα του στόχου είναι:

$$P_{OA} = nv\sigma N_A \tag{2.20}$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς σ μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος της ενεργού διατομής ως:

$$\sigma = \frac{P_{OA}}{nvN_A} \tag{2.21}$$

Από την παραπάνω σχέση, είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι η ενεργός διατομή έχει διαστάσεις εμβαδού και μονάδα μέτηρησής της είναι το 1 barn= 10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>.

Η σχέση (2.20) είναι ανεξάρτητη από τη γωνία που παράγονται τα σωματίδια. Αν επιθυμούμε να υπολογίσουμε την ενεργό διατομή για συγκεκριμένη γωνία εκπομπής των παραγόμενων σωαμτιδίων, τότε αναφερόμαστε στη διαφορική ενεργό διατομή, η οποία είναι πολύ πιο χρήσιμη στη φασματοσκοπία φορτισμένων σωματιδίων. Η διαφορική ενεργός διατομή, για συγκεκριμένη γωνία ανίχνευσης, υπολογίζεται απο τον τύπο:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E,\theta) = \frac{N}{N_t \Omega Q}$$
(2.22)

όπου Ν: ο αριθμός των ανιχνευόμενων φορτισμένων σωματιδίων

 $N_t$ : η επιφανειακή πυκνότητα του στόχου σε atoms/cm<sup>2</sup>

Q: το φορτίο της δέσμης των σωματιδίων που προσπίπτουν στο στόχο

Ω: η στερεά γωνία ανίχνευσης

## 2.3 Τεχνικές Χαρακτηρισμού με Ιοντικές Δέσμες

Για τις μεθόδους ανάλυσης υλικών που χρησιμοποιούν δέσμες φορτισμένων σωματιδίων, είναι εξαιρετικής σημασίας οι γνώσεις για το πώς επιβραδύνονται τα ιόντα εντός ύλης. Η μέτρηση του βάθους εξαρτάται άμεσα από την ενέργεια που χάνουν τα ιόντα της δέσμης και αυτή η απώλεια ενέργειας επηρεάζει, με τη σειρά της, τόσο την ποσοτική όσο και την ποιοτική ανάλυση. Η φυσική που κρύβεται πίσω από τα φαινόμενα απώλειας ενέργειας είναι πολύ σύνθετη, καθώς περιλαμβάνει ένα πλήθος αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα ίοντα της δέσμης, τους πυρήνες του στόχου και τα ηλεκτρόνια του στόχου. Εξαιτίας της σπουδαιότητάς τους, σε πολλούς τομείς της φυσικής, αυτά τα φαινόμενα έχουν αποτελέσει αντικείμενο ερευνών, από την αρχή του προηγούμενου αιώνα.

Έτσι, η φασματοσκοπία με ιοντικές δέσμες (Ion Beam Analysis, IBA), περλαμβάνει μία οικογένεια τέτοιων μεθόδων ανάλυσης, οι οποίες χρησιμοποιούν ιοντικές δέσμες ενέργειας της τάξης των MeV, με σκοπό τη διερεύνηση της σύνθεσης και της δομής ενός υλικού. Όλες οι μέθοδοι της IBA είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες και επιτρέπουν την ανίχνευση στοιχείων ακόμα και στην περιοχή του επιφανειακού στρώματος του στόχου.

Οι βασικές κατηγορίες της τεχνικής ΙΒΑ είναι οι ακόλουθες:

• <u>Ελαστική οπισθοσκέδαση</u>: Στην περίπτωση που ανιχνεύεται το οπισθοσκεδαζόμενο σωμάτιο της δέμης από το στόχο, η μέθοδος ονομάζεται ελαστική οπισθοσκέδαση (Elastic

Backscattering, EBS). Η EBS είναι ευαίσθητη σε ελαφρά ιόντα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται όταν η εισερχόμενη δέσμη είχε αρκετή ενέργεια, ώστε να διαπεράσει το φράγμα του δυναμικού Coulomb του πυρήνα-στόχου. Σε αυτή την περίπτωση, η ενεργός διατομή της σκέδασης γίνεται μέσω της εξίσωσης Schrödinger.

- <u>Οπισθοσκέδαση Rutherford</u>: Η οπισθοσκέδαση Rutherford (Rutherford Backscattering, RBS) είναι τεχνική φασματοσκοπίας ευαίσθητη σε βαριά στοιχεία. Η διαφορά της με την EBS είναι ότι στην RBS ακολουθείται η σχέση του Rutherford, γεγονός που εξαρτάται από το ζεύγος δέσμης-στόχου και από την ενέργεια της δέσμης. Λεπτομερής περιγραφή αυτής της τεχνικής γίνεται στην παράγραφο 2.3.
- <u>Ελαστική ανάκρουση</u>: Η ελαστική ανάκρουση (Elastic Recoil Dectecrion Analysis, ERDA) είναι, και αυτή, ευαίσθητη σε ελαφρά στοιχεία. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής, είναι το γεγονός, ότι η ενέργεια της εισερχόμενης δέσμης μπορεί να πάρει ένα εύρος τιμών, από μερικά έως εκατοντάδες MeV, ανάλογα με τον προς εξέταση στόχο. Έτσι, τα σωματίδια της δέσμης έχουν την ικανότητα να ανακρούουν τα άτομα του στόχου και είναι αυτά που εν τέλει ανιχνεύονται.
- <u>Ανάλυση πυρηνικών αντιδράσεων</u>: Η ανάλυση πυρηνικών αντιδράσεων (Nuclear Reaction Analysis, NRA) χρησιμοποείται για την ανίχνευση ελαφριών στοιχείων, είναι ευαίσθητη σε συγκεκριμένα ισότοπα και περιλαμβάνει την αναγνώριση των σωματιδίων που παράγονται από πυρηνικές αντιδράσεις.

Η μέθοδος NRA περιλαμβάνει τις εξής τεχνικές:

- <u>Φασματοσκοπία φορτισμένων σωματιδίων:</u> Τεχνική που μας επιτρέπει να ανιχνεύουμε τα φορτισμένα σωματίδια που παράγονται από τις αντιδράσεις που συμβαίνουν στο στόχο.
- <u>Φασματοσκοπία ακτίνων-Χ</u>: Η φασματοσκοπία ακτίνων-Χ (Particle Induced X-ray Emission, PIXE) χρησιμοποιεί την εκπομπή ακτίνων-Χ για τον προσδιορισμό της σύνθεσης ενός στόχου. Δηλαδή, όταν ένα υλικό εκτεθεί σε μία ιοντική δέσμη, λόγω των αλληλεπιδράσεων που γίνονται, εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, στα μήκη κύματος των ακτίνων-Χ, συγκεκριμένη για κάθε στοιχείο.
- <u>Φασματοσκοπία ακτίνων-γ</u>: Η φασματοσκοπία ακτίνων-γ (Particle Induced Gamma-ray Emission, PIGE) βασίζεται στην εκπομπή ακτίνων-γ για τον προσδιορσμό της σύστασης ενός στόχου.

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 2.9: Απεικόνιση των τεχνικών ΙΒΑ

#### 2.4 Χαρακτηρισμός με Οπισθοσκέδαση Rutherford

#### 2.4.1 Εισαγωγή

Σκέδαση Rutherford ονομάζεται η ελαστική σκέδαση των πυρήνων της δέσμης από το δυναμικό Coulomb του πυρήνα του στόχου, όταν αυτή πραγματοποιείται για ενέργειες της δέσμης αρκετά μικρότερες από το φράγμα δυναμικού του συστήματος πυρήνων στόχου – βλήματος [Rak11].

Η φασματοσκοπία με οπισθοσκέδαση Rutherford (RBS) είναι μία αρκετά διαδομένη τεχνική για να την ανάλυση του επιφανειακού στρώματος των στερεών υλικών. Αποτελεί μία τεχνική, η οποία μας παρέχει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τη στοιχειομετρία, την στοιχειώδη επιφανειακή πυκνότητα και την κατανομή των προσμείξεων σε λεπτά υμένια. Οι μετρήσεις του αριθμού και της ενεργειακής κατανομής των σκεδαζόμενων ιόντων, κοντά στην επιφάνεια των υλικών-στόχων, μας επιτρέπουν την αναγνώριση της ατομικής μάζας και τον καθορισμό της κατανομής των στοιχείων, που απαρτίζουν το στόχο ως συνάρτηση του βάθους εισχώρησης των ιόντων της δέσμης. Η μέθοδος βασίζεται στην εξής διαδικασία: ιόντα ενέργειας της τάξης των MeV (συνήθως 0.5–4 MeV) προσπίπτουν σε κάποιο στόχο και στη συνέχεια, με τη βοήθεια κατάλληλων ανιχνευτών, καταγράφεται η ενέργεια των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων του βλήματος. Το σημαντικό σε αυτή την ανάλυση είναι πως τα ιόντα σκεδάζονται ελαστικά από από τα άτομα του στόχου, με ενέργεια χαρακτηριστική για το κάθε προσπίπτον σωματίδιο. Η χαρακτηριστική ενέργεια αυτή είναι η τελική ενέργεια που έχει το σκεδαζόμενο σωματίδιο, η οποία είναι διαφορετική από την αρχική, αφού κατά την πρόσκρουσή του με το στόχο και την εισχώρησή του μέσα σε αυτόν, χάνει ενέργεια και κατά την είσοδο και κατά την έξοδο από αυτόν.

Για αυτό το λόγο, η RBS μας επιτρέπει να αναγνωρίσουμε ποσοτικά τη σύνθεση ενός στόχου και να καθορίσουμε σε τι βάθος βρίσκονται τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Τα

πλεονεκτήματα που μας προσφέρει αυτή η τεχνική είναι πως μας παρέχει πολύ καλές πληροφορίες όσον αφορά το ποσό και το είδος των στοιχείων που βρίσκονται στα διαφορετικά βάθη του στόχου (depth resolution) έως και της τάξης των nm και διαθέτει εξαιρετική ευαισθησία στα βαρέα ιόντα της τάξης των ppm. Στα μειονεκτήματά της ανήκει το γεγονός πως δεν διαθέτει καλή ευαισθησία σε ελαφριά ιόντα, το οποίο συχνά απαιτεί το συνδυασμό της με άλλες μεθόδους, όπως η NRA ή η ERDA [Lea95, May97].

#### 2.4.2 Γεωμετρία και κινηματική της σκέδασης Rutherford

Οι βασικές πειραματικές γεωμετρίες για τη φασματοσκοπία Rutherford, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τη γεωμετρία Cornell και τη γεωμετρία IBM, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 2.9. Και στις δύο περιπτώσεις, η δέσμη είναι οριζόντια και ο στόχος κάθετος [May97].

Στη γεωμετρία Cornell, η εισερχόμενη δέσμη, η εξερχόμενη δέσμη και ο άξονας περιστροφής του στόχου βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και η σχέση μεταξύ των γωνιών εκφράζεται από τη

$$\cos(\alpha) = -\cos(\alpha)\cos(\beta) \tag{2.23}$$

Στη γεωμετρία IMB, γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στη διεξαγωγή του πειράματός μας, η εισερχόμενη και εξερχόμενη δέσμη και η επιφάνεια του στόχου βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με

$$\alpha + \beta + \theta = 180^{\circ} \tag{2.24}$$

![](_page_29_Figure_8.jpeg)

Σχήμα 2.10: Η γεωμετρία IBM (αριστερά) και η γεωμετρία Cornell (δεξιά). Γωνία εισόδου α, γωνία εξόδου β και γωνία σκέδασης θ. [May97]

Η εφαρμογή της γεωμετρίας IBM, μπορεί να γίνει καλύτερα αντιληπτή, παρατηρώντας την εικόνα που παρατίθεται παρακάτω.

![](_page_30_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 2.11: Απεικόνιση της πειραματικής γεωμετρίας της οπισθοσκέδασης Rutherford. Εδώ,  $\theta_1 + \theta_2 + \theta = 180^\circ$ . Ο στόχος αποτελείται από δύο στοιχεία.

Θεωρούμε βλήμα μάζας *M*<sub>1</sub> και ενέργειας *E*<sub>1</sub>, το οποίο προσκρούει σε ακίνητο πυρήναστόχο μάζας *M*<sub>2</sub>. Κατά τη σκέδαση, η οποία προκαλείται μόνο από το δυναμικό Coulomb του συστήματος πυρήνα-στόχου, ένα μέρος της ενέργειας του βλήματος μεταφέρεται στο στόχο, με αποτέλεσμα το σκεδαζόμενο σωμάτιο να εκτρέπεται από την αρχική του διεύθυνση κατά γωνία *θ* (στο σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου) με ενέγεια *E*<sub>2</sub>, μικρότερη από την αρχική του.

Θεωρώντας τη σκέδαση ελαστική, η τελική ενέργεια του βλήματος, η οποία προκύπτει από τις κλασικές αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, δίνεται από από την παρακάτω σχέση:

$$E_2 = k E_1 \tag{2.25}$$

όπου k, ο κινηματικός παράγοντας

$$k = \left[\frac{\left(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta\right)^{1/2} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2}\right]^2$$
(2.26)

Από τις σχέσεις (2.24), (2.25) μπορούμε να καταλάβουμε πως η ενέργεια του σκεδαζόμενου σωματιδίου συνδέεται με τη μάζα του, την αρχική του ενέργεια, τη μάζα των πυρήνων του στόχου και τη γωνία σκέδασης. Ως αποτέλεσμα η ενέργειά του είναι μεγαλύτερη όταν η σκέδαση συμβαίνει από πυρήνες μεγαλύτερης μάζας ή για μικρότερες γωνίες [Rak11]. Στους υπολογισμούς, δεν λαμβάνουμε υπόψιν την ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα-στόχου. Τέλος, ο κινηματικός παράγοντας *k* είναι ανεξάρτητος από τη φύση των δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων, αρκεί βέβαια, πάντα να διατηρείται η ενέργεια [Lea95].

#### 2.4.3 Ενεργός διατομή Rutherford

Αν η δύναμη μεταξύ του προσπίπτοντος πυρήνα ( $M_1$ ,  $Z_1e$ ,  $E_1$ ) και του πυρήνα του στόχου ( $M_2$ ,  $Z_2e$ , αρχικά σε ηρεμία) είναι η δύναμη Coulomb

$$\vec{F}_{12} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2} \hat{r}$$
(2.27)

τότε, χρησιμοποιούμε την έκφραση

$$\sigma_{R}(E_{1},\theta) = \left(\frac{Z_{1}Z_{2}e^{2}}{4E_{1}}\right) \times \frac{2\left[\left(M_{2}^{2} - M_{1}^{2}\sin^{2}\theta\right)^{1/2} + M_{2}\cos\theta\right]^{2}}{M_{2}\sin^{4}\theta\left(M_{2}^{2} - M_{1}^{2}\sin^{2}\theta\right)^{1/2}}$$
(2.28)

η οποία είναι η ενεργός διατομή Rutherford στο σύστημα του εργαστηρίου. [Nas95]

Από τη σχέση (2.27) μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η διαφορική ενεργός διατομή αυξάνεται με την αύξηση του ατομικού αριθμού των σωματιδίων του στόχου ή του βλήματος, ενώ μειώνεται όταν αυξάνεται η ενέργεια του βήματος ή η γωνία σκέδασης [Rak11]. Παρόλα αυτά, μέσω πειραμάτων, έχει παρατηρηθεί, πως οι μετρούμενες ενεργές διατομές αποκλίνουν από τη Rutherford, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές ενέργειες. Ιδιαίτερα για τις χαμηλές, το γεγονός αυτό οφείλεται στη πυκνότητα του ηλεκτρονιακού νέφους που περιβάλει και τους πυρήνες της δέσμης, αλλά και του στόχου [May97].

#### 2.4.4 Σύνοψη

Κατά την ανάλυση των στόχων με τη μέθοδο Rutherford, υπάρχει προτίμηση στις γωνίες οπισθοσκέδασης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον παράγοντα sin<sup>4</sup>θ της σχέσης (2.28), που όπως είναι προφανές, για μεγάλες γωνίες αυξάνεται η ενεργός διατομή, δηλαδή η πιθανότητα να γίνει η αντίδραση. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιρεάζουν τη διεξαγωγή του πειράματος, οι οποίοι εξαρτώνται πάντα από το τί θέλουμε να επιτύχουμε. Δηλαδή, το είδος της δέσμης, η ενέργεια της δέσμης, οι ανιχνευτές που θα χρησιμοποιήσουμε, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ευαισθησία του πειράματος και στο πόσο καλά θα μάθουμε τη σύσταση του στόχου σε βάθος.

<u>Παράδειγμα:</u> Για έναν στόχο που αποτελείται από βαρέα στοιχεία, για να μπορέσουμε να έχουμε γνώση της σύστασής του συνατρήσει του βάθους, θα πρέπει να τον βομβαρδίσουμε με δέσμη ιόντων μεγάλης μάζας, άρα και υψηλής ενέργειας. Αυτό, αυτομάτως, συνεπάγεται, μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας, άρα και μεγαλύτερη ισχύ ανάσχεσης και μεγαλύτερο ενεργειακό διασκεδασμό εντός του στόχου, μία σειρά γεγονότων που μας δυσκολεύει στην ανάλυση του δείγματος. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, για να αποκτήσουμε μιά καλύτερη εικόνα σε ένα συγκεκριμένο βάθος, θα πρέπει να δώσουμε μία κλίση στον στόχο ως προς την εισερχόμενη δέσμη. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η διαδρομή που πρέπει να διασχίσει η δέσμη, αυξάνεται η διαφορά ενέργειας των σκεδαζόμενων σωματιδίων και κατά συνέπεια παίρνουμε πιο ευδιάκριτες κορυφές.

## 3.1 Εισαγωγή

Η διεξαγωγή του πειράματος πραγματοποιήθηκε στο Ιντστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών (Ε.Κ.Ε.Φ.Ε) "Δημόκριτος", ένα ερευνητικό κέντρο της Ελλάδας, το οποίο εστιάζει το ενδιαφέρον του σε μια σειρά από πεδία των φυσικών επιστημών και της μηχανικής.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγραφούν αναλυτικά ο επιταχυντής TANDEM Van de Graaf, ο θάλαμος σκέδασης και ο εξαχνωτήρας εναπόθεσης ατμών, πειραματικές διατάξεις του Ινστιτούτου που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπαιρέωση του πειράματος μας. Επίσης, θα παρουσιάσουμε τα πειραματικά στάδια, από την παρασκευή των στόχων έως και τη λήψη των μετρήσεων.

![](_page_32_Figure_5.jpeg)

Σχήμα 3.1 : Κάτοψη Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

## 3.2 Ο επιταχυντής TANDEM Van de Graaff

#### 3.2.1 Εισαγωγή

Οι επιταχυντές σωματιδίων είναι διατάξεις που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία για την επιτάχυνση σωματιδίων σε υψηλές ταχύτητες και ενέργειες περιορίζοντας τα σε μια καλά καθορισμένη δέσμη [Liv62].

Υπάρχουν δύο βασικά είδη επιταχυντών, οι ηλεκτροστατικοί επιταχυντές και οι επιταχυντές εναλλασσόμενων πεδίων. Η λειτουργία των ηλεκτροστατικών επιταχυντών βασίζεται στην επιτάχυνση φορτισμένων σωματιδίων μέσω σταθερής διαφοράς δυναμικού. Δηλαδή, αν σωματίδιο με φορτίο q και μάζα m κινηθεί μέσω διαφοράς δυναμικού ΔV, θα αποκτήσει κινητική ενέργεια ίση με  $mv^2/2 = qV$ . Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι γεννήτριες Cockcroft-Walton και Van de Graaff. Σε αυτές τις συσκευές, οι κινητικές ενέργειες που μπορούμε να επιτύχουμε περιορίζονται από τις ηλεκτρικές αντοχές των κυκλωμάτων της μηχανής. Οι επιταχυντές εναλλασσόμενων πεδιών χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για να ξεπεράσουν αυτό το πρόβλημα. Η ανάπτυξή τους ξεκίνησε τη δεκαετία του 1920 και αποτελούν βάση για τους μοντέρνους ανιχνευτές [Wal94].

#### 3.2.2 Τα βασικά τμήματα του επιταχυντή

Ο επιταχυντής του Ινστιτούτου είναι γραμμικός, βασίζεται στη λειτουργία της γεννήτριας Van de Graaff και έχει μέγιστη τάση 5.5 MV.

![](_page_33_Figure_7.jpeg)

Σχήμα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση της επιταχυντικής διάταξης. Πηγή: [Dia05]

Τα βασικά τμήματα του επιταχυντή TANDEM είναι οι πηγές των ιόντων στην αρχή της γραμμής, η γεννήτρια Van de Graaff στο κέντρο, η οποία δίνει τη μέγιστη επιτάχυνση στα ιόντα,

#### Κ. Τσαμπά

και οι πέντε πειραματικές γραμμές όπου καταλήγει. Σε αυτές τις γραμμές γίνεται η σύγκρουση των ιόντων με τους στόχους και η συλλογή των δεδομένων από τους ανιχνευτές που βρίσκονται εκεί. Η κάθε γραμμή

έχει διαφορετική διάταξη και γεωμετρία. Η επιλογή και η διαμόρφωση της γραμμής γίνεται ανάλογα με τους σκοπούς και τις ανάγκες του κάθε πειράματος.

Τα ιόντα, ανάλογα με το είδος τους, παράγονται σε μία από τις δύο πηγές, Sputter ή Duoplasmatron off-axis. Στη Sputter παράγονται τα βαρέα ιόντα, όπως <sup>12</sup>C και <sup>16</sup>O, ενώ στη Duoplasmatron παράγονται τα ελαφρά ιόντα, όπως <sup>1</sup>H και <sup>2</sup>H. Και οι δύο πηγές παράγουν αρνητικά ιόντα. Σε όλη τη γραμμή, από την έξοδο των πηγών μέχρι τους στόχους, διατηρείται υψηλό κενό τάξης τωνγ  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  torr  $\approx 10^{-6}$  mbar για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης των ιόντων με τα μόρια του αέρα, γεγονός που θα προκαλούσε την εξασθένιση της δέσμης [Dia05].

#### 3.2.3 Πηγή Duoplasmatron off-axis

Η πηγή Duoplasmatron χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της δέσμης δευτερίου στο παρόν πείραμα. Αναπτύχθηκε από τον von Ardenne (1956) ως μια ισχυρή πηγή για ιόντα αερίου [Wal94]. Αποτελείται από ένα μεταλλικό σωληνοειδές εντός του οποίου περιέχεται ομοαξονικός κύλινδρος (ενδιάμεσο ηλεκτρόδιο). Σε αυτόν τον κύλινδρο διοχετεύεται το αέριο που πρόκειται να ιονιστεί. Εξωτερικά της βάσης του σωληνοειδούς, στην οποία καταλήγει το ενδιάμεσο ηλεκτρόδιο, τοποθετείται η άνοδος, η οποία έχει στο κέντρο της μια οπή διαμέτρου μικρότερης των 0.5 mm. Αμέσως μετά την άνοδο τοποθετείται το ηλεκτρόδιο εξαγωγής. Η πλαϊνή επιφάνεια του σωληνοειδούς περιβάλλεται από ένα πηνίο, το οποίο με παροχή ρεύματος δημιουργεί μαγνητικές γραμμές κατά μήκος του σωληνοειδούς. Από την άλλη πλευρά του σωλήνα, βρίσκεται το ηλεκτρόδιο καθόδου, το οποίο είναι κατασκευασμένο από πλατίνα με ανθρακούχο βάριο (BaCO<sub>3</sub>) και το θερμαίνουμε με ρεύμα μερικών δεκάδων Ampère. Όταν θερμανθεί το ανθρακούχο βάριο χάνει ηλεκτρόνια από την επιφάνεια του, τα οποία συγκρουόμενα με τα μόρια του αερίου δημιουργούν ένα βολταϊκό τόξο ρεύματος λίγων Ampère. Η χαμηλή πίεση του αερίου σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία που προκαλεί το τόξο, δημιουργούν την κατάσταση πλάσματος. Το ισχυρό ομοαξονικό μαγνητικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί από το πηνίο σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του χώρου περιορίζει το πλάσμα στο κεντρικό τμήμα του σωλήνα προς τη μεριά της ανόδου. Σε κατάσταση πλάσματος, τα θετικά ιόντα συγκεντρώνονται στο κέντρο και τα αρνητικά το περιβάλλουν [Dia05]. Επειδή όμως εμείς θέλουμε να εξάγουμε τα αρνητικά ιόντα, ο κεντρικός άξονας που ενώνει την άνοδο με το ηλεκτρόδιο εξαγωγής μετατοπίζεται περίπου 1mm από τον άξονα του ενδιάμεσου ηλεκτροδίου. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρήθηκε ότι παράγονται αρνητικά ιόντα πιο μαζικά [Wol95]. Για αυτό η πηγή ονομάζεται off-axis, δηλαδή εκτός άξονα. Τα ιόντα που βγαίνουν από την μικρή οπή της ανόδου έλκονται από το ηλεκτρόδιο εξαγωγής, το οποίο έχει θετική τάση περίπου 20kV.

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 3.3 : Σχηματική περιγραφή της πηγής Duoplasmatron.

Αφού εξέλθουν τα ιόντα από την πηγή εισέρχονται στον προεπιταχυντικό σωλήνα στον οποίο αποκτούν επιτάχυνση 60kV. Αμέσως μετά εστιάζονται από ενα σύστημα ηλεκτροστατικού φακού (gridded box lens). Η γραμμή της κάθε πηγής με την πηγή, τον προεπιταχυντικό σωλήνα και το ηλεκτροστατικό φακό, βρίσκεται σε γωνία 30° εκατέρωθεν του άξονα της κύριας γραμμής του επιταχυντή. Για να εισέλθουν τα κατάλληλα κάθε φορά ιόντα σε αυτή τη γραμμή χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρομαγνήτης μεταβλητού μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται στο σημείο τομής των τριών γραμμών και ονομάζεται μαγνήτης επιλογής ιόντων (inflector) [Dia05].

## 3.2.4 Η δεξαμενή του επιταχυντή

Στο μέσο της κύριας γραμμής βρίσκεται η δεξαμενή (tank) του επιταχυντή και περιέχει τη γεννήτρια Van de Graaff. Τα βασικά μέρη της γεννήτριας είναι μια μεγάλη μεταλλική κοίλη σφαίρα στο μέσο της δεξαμενής, η οποία φορτίζεται στο υψηλότερο δυναμικό και ένας κατακόρυφος ιμάντας από μονωτικό υλικό που τη φορτίζει μεταφέροντας σε αυτή θετικά φορτία. Όταν τα αρνητικά ιόντα εισέρχονται στη δεξαμενή, έλκονται από τη θετική τάση της μεταλλικής σφαίρας (τερματικό) που βρίσκεται στο κέντρο της. Μέσα στη σφαίρα βρίσκεται ο ιονιστής, ο οποίος περιέχει μια σειρά λεπτών φύλλων άνθρακα, παρατεταγμένων κυκλικά με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε φορά μόνο ένα να βρίσκεται με την επιφάνειά του στην πορεία της δέσμης. Τα ιόντα περνώντας μέσα από το φύλλο άνθρακα απογυμνώνονται από το επιπλέον ηλεκτρόνιο, που τα καθιστά αρνητικά καθώς και από άλλα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να μετατρέπονται σε θετικά ιόντα. Έτσι, απωθούνται από το ηλεκτρικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί λόγω της υψηλής τάσης, προς την έξοδο του επιταχυντή.

![](_page_36_Figure_0.jpeg)

![](_page_36_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 3.4: Εσωτερικό δεξαμενής επιταχυντικού συστήματος. Πηγή: [Gal05]

## 3.2.5 Οι πειραματικές γραμμές

Καθώς τα ιόντα εξέρχονται από τον επιταχυντή, συνεχίζουν την πορεία τους μέσα στη γραμμή και στρέφονται κατά 90° από έναν ηλεκτρομαγνήτη που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής ενέργειας (analyzer). Το μαγνητικό πεδίο αυτού του μαγνήτη στρέφει μόνο τα ιόντα με την κατάλληλη ενέργεια, ενώ όλα τα υπόλοιπα εκτρέπονται έξω από τη γραμμή εξασφαλίζοντας έτσι την καθαρότητα της δέσμης τόσο ως προς είδος του ιόντος όσο και ως προς την ενέργεια του. Στη συνέχεια, η δέσμη εισέρχεται με τη βοήθεια ενός τρίτου ηλεκτρομαγνήτη, που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής συνέχεια, η δέσμη εισέρχεται με τη βοήθεια ενός τρίτου ηλεκτρομαγνήτη, που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής ται ζεασφαλίζοντας έτοι της χεια, η δέσμη εισέρχεται με τη βοήθεια ενός τρίτου ηλεκτρομαγνήτη, που ονομάζεται μαγνήτης επιλογής πειραματικής γραμμής (switcher) σε μια από τις πέντε πειραματικές γραμμές-διατάξεις ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε πειράματος. Οι γραμμές αυτές καταλήγουν σε δύο ξεχωριστούς χώρους, εκτός της αίθουσας του επιταχυντή.

#### 3.2.6 Μόνωση κτηρίου ως προς την ακτινοβολία

Οι πειραματικοί χώροι στους οποίους βρίσκεται το επιταχυντικό σύστημα και οι πειραματικές γραμμές πρέπει να μονωθούν ειδικά για να μη διαφεύγει επικίνδυνη ακτινοβολία προς τον χώρο του εργαστηρίου. Για αυτόν το λόγο οι τοίχοι είναι κατασκευασμένοι με μπετόν εμπλουτισμένο με βόριο, ένα ελαφρύ στοιχείο με μεγάλη ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίων. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη και ταχύτερη απώλεια ενέργειας των νετρονίων, που είναι και ένα επικίνδυνο είδος ακτινοβολίας για την υγεία.

#### 3.3 Κατασκευή και προετοιμασία των δειγμάτων και στόχων

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο βασικοί στόχοι. Ο στόχος του <sup>112</sup>Cd και ο στόχος του <sup>nat</sup>Ag (<sup>107</sup>Ag και <sup>109</sup>Ag). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο στόχος του <sup>nat</sup>Ag παρασκεύαστηκε πλήρως στον εξαχνωτήρα του Ιντστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Η αξιοπιστία και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το πόσο λεπτοί και χωρίς προσμείξεις είναι οι στόχοι που κατασκευάζουμε. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούμε την κατάλληλη μέθοδο που θα μας εξασφαλίσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των στόχων, τη διαδικασία φυσικής εναπόθεσης ατμών (Physical Vapor Deposition, PVD)

Η διαδικασία PVD είναι μία γενική τεχνική, η οποία περιγράφει οποιοδήποτε τρόπο κατασκευής λεπτών φιλμ με την εξάχνωση υλικών και την υγροποιήση τους πάνω στο επιθυμητό υπόστρωμα. Παρόλο που υπάρχουν πολλές παραλλαγές της PVD, η πιο γνωστή και αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι η *Εναπόθεση με Εξάτμιση (Evaporative Deposition)*.

#### 3.3.2 Θέρμανση μέσω ηλεκτρικής αντίστασης

Ο πιο απλός τύπος εναπόθεσης ατμών σε υψηλό κενό είναι η θέρμανση μέσω ηλεκτρικής αντίστασης (electrical resistance heating). Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος δεκάδων ή εκατοντάδων Ampère, μέσω ενός χάλκινου αγωγού-υποδοχέα σε μία ειδική μεταλλική βάση με υψηλό σημείο τήξης (<sup>183</sup>W, <sup>180</sup>Ta, <sup>95</sup>Mo). Καθώς θερμαίνεται η βάση, το υλικό που έχουμε προς εξάχνωση, σταδιακά υγροποιείται και εν τέλει εξατμίζεται.

![](_page_37_Figure_8.jpeg)

Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση της μεταλλικής βάσης με το προς εξάχνωση υλικό. Ως Ι συμβολίζεται το ρεύμα που διαπερνά τους χάλκινους υποδοχείς. Πηγή: [Sch10]

#### 3.3.3 Η διάταξη του εξαχνωτή

Η βασική μορφολογία του εξαχνωτή 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<sup>-6</sup> torr ≈ 10<sup>-6</sup> mbar με τη βοήθεια τριών αντλιών, των οποίων η λειτουργία αναλύεται στην παράγραφο 3.3.3.1. 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 ≈ 3290K. Σε ύψος 15 cm από τη βάση τοποθετείται μεταλλική "εξέδρα" με ειδικά γυάλινα πλακίδια στα οποία θα εναποτεθεί το εξαχνωμένο υλικό, σχηματίζοντας λεπτά υμένια.

![](_page_38_Picture_3.jpeg)

Σχήμα 3.6 : Αριστερά: Φωτογραφία του εξαχνωτήρα Δεξιά: Ο πίνακας ελέγχου του εξαχνωτήρα Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος"

#### 3.3.3.1 Οι αντλίες

Ζωτικής σημασίας για τη σωστή διεξαγωγή της τεχνικής PVD είναι η διατήρηση υψηλού κενού, καθώς το περιβάλλον αυτό επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή εξατμιζόμενου υλικού και την αποφυγή επιμόλυνσης των υμενίων. Στο σύστημα, λοιπόν, χρησιμοποιούνται τρεις αντλίες, η περιστροφική αντλία (rotary pump), η στροβιλοαντλία (turbo pump) και η ιοντική αντλία (ion pump).

<u>Περιστροφική αντλία (rotary pump)</u> [Dia05]: Αποτελείται από δύο κυλίνδρους, τον εξωτερικό που είναι ακίνητος και τον εσωτερικό που περιστρέφεται περί τον άξονά του, οι οποίοι έρχονται σε επαφή σε ένα σημείο. Ο εσωτερικός κύλινδρος φέρει στην επιφάνειά του πτερύγια με μεταβλητό

μήκος, που αυξάνεται και μειώνεται όσο περιστρέφεται ως προς το εξωτερικό με τη βοήθεια ελατηρίων, όπως φαίνεται σχηματικά παρακάτω.

Η κίνηση του εσωτερικού κυλίνδρου γίνεται σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στη θέση Α γίνεται η είσοδος του αέρα ως εξής: όσο περιστρέφεται ο εσωτερικός κύλινδρος αυξάνεται ο όγκος του τμήματος που βρίσκεται στη θέση αυτή και έτσι μειώνεται η πίεση στο εσωτερικό του και έλκει τα μόρια του αέρα για να την αυξήσει. Αντίστοιχα, όταν το ίδιο τμήμα βρεθεί στη θέση Β επειδή ο όγκος του μειώνεται, λόγω περιστροφής, η πίεση του αέρα αυξάνεται και έχει την τάση να εκτονωθεί. Εξέρχεται λοιπόν από την αντλία στο περιβάλλον. Η αντλία αυτή μπορεί να επιτύχει μέχρι 10<sup>-3</sup> mbar, το οποίο δεν είναι ικανοποιητικό για τις απαιτήσεις της εξάχνωσης, γι'αυτό το λόγο συνδυάζεται με άλλες αντλίες.

![](_page_39_Picture_3.jpeg)

Σχήμα 3.7 : Η περιστροφική αντλία (rotary pump). Πηγή: [Dia05]

<u>Στροβιλοαντλία (turbo pump)</u> [Wei79] : Χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει και να διατηρήσει υψηλό κενό ( $10^{-4}$  torr  $\approx 10^{-4}$  mbar). Αποτελείται από μία αλληλουχία δίσκων τοποθετημένοι ομοαξονικά. Κάθε-δίσκος διαθέτει μεγάλο αριθμό λεπτών λεπίδων, οι οποίες περιστρεφόμενες με μεγάλη συχνότητα αναγκάζουν τον αέρα να κινηθεί με τη φορά που επιβάλλει η αντλία. Τέλος, χρησιμοποιείται πάντα ως δευτερεύουσα αντλία, δηλαδή όταν έχει δημιουργηθεί προκενό από κάποια άλλη. Στην περίπτωσή μας, από την περιστροφική αντλία.

![](_page_40_Picture_1.jpeg)

Σχήμα 3.8 : Η στροβιλοαντλία (turbo pump). Πηγή: [Wei79]

Ιοντική αντλία (ion pump) [Dia05] : Χρησιμοποιείται στο τελευταίο στάδιο για να φτάσουμε στο πολύ υψηλό κενό (10<sup>-5</sup> mbar). Μια τέτοια αντλία αποτελείται από δύο καθόδους και μία άνοδο, τοποθετημένες εντός ισχυρού μόνιμου μαγνήτη. Καθώς οι κάθοδοι θερμαίνονται, εκπέμπουν ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται εντός της αντλίας προς τη θετικά φορτισμένη άνοδο. Κατά την κίνησή τους αυτή, συγκρούονται με τα άτομα του αέρα και τα ιονίζουν. Λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου όμως δεν κινούνται σε ευθείες αλλά σε ελικοειδείς τροχιές και έτσι αυξάνεται η πιθανότητα σύγκρουσης με τα μόρια του αέρα και συνεπώς η απόδοση άντλησης του αέρα. Επίσης, κατά τους ιονισμούς των ατόμων του αέρα ελευθερώνονται και άλλα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται προς την άνοδο λόγω της έλξης και αυτά με τη σειρά τους ιονίζουν άτομα που θα συναντήσουν. Τα θετικά ιόντα του αέρα που δημιουργούνται οδηγούνται στις καθόδους και κατά την πρόσκρουσή τους σε αυτή γίνεται: πρώτον, απόσταση ατόμων του υλικού της καθόδου, δηλαδή ατόμων τιτανίου. Τα άτομα τιτανίου εναποτίθενται στην εσωτερική δομή της αντλίας, όπου συνδέονται με χημικές διαδικασίες με τα μόρια του αέρα και αυτά μετατρέπονται σε στερεά. Έτσι λοιπόν, αντλούνται τα μόρια του αέρα από τον χώρο. Και δεύτερον, γίνεται εμφύτευση στο εσωτερικό της καθόδου των ιόντων του αέρα που προσκρούουν σε αυτή με μεγάλη ταχύτητα. Έτσι δεν επανασυνδέονται σε άτομα και δεν ξαναγίνονται αέρια. Αυτή λοιπόν είναι μια πρόσθετη διαδικασία άντλησης. Η αντλία αυτή δεν είναι σχεδιασμένη να αντλεί μεγάλους όγκους αερίων μαζών, για αυτό χρησιμοποιείται μόνο για την επίτευξη πολύ υψηλού κενού ( $10^{-11}$  mbar) σε θάλαμο που έχει ήδη αδειάσει από το μεγαλύτερο μέρος των μορίων του αέρα με άλλη αντλία.

![](_page_41_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 3.9 : Η ιοντική αντλία (ion pump). Πηγή: [Dia05]

## 3.3.4 Προετοιμασία εξάχνωσης

#### 3.3.4.1 Υλικό προς εξάχνωση

Ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού της μάζας *m* του υλικού που πρόκειται να εξαχνωθεί είναι ο παρακάτω: Έστω ξ η επιθυμητή επιφανειακή πυκνότητα του στόχου εκφρασμένη σε *mg/cm*<sup>2</sup> και *m* η μάζα του υλικού σε *mg* που θέλουμε να προσδιοριστεί. Υποθέτουμε η μάζα *m* εξαχνώνεται και κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια *S* ενός ημισφαιρίου που έχει κέντρο τη μήτρα στην οποία έχει τοποθετηθεί η μάζα *m* και ακτίνα *r* ίση με την απόσταση της μάζας από την απλή σχέση

$$m = \xi \cdot S = \xi \cdot 2\pi r^2$$

εφόσον η απόσταση *r* μετριέται σε *cm*. Η παραπάνω σχέση δεν προσφέρει ακρίβεια στον υπολογισμό του πάχους των στόχων, δίνει όμως μια πρώτη εκτίμηση της ποσότητας του υλικού που απαιτείται για εξάχνωση, ώστε να μην έχουμε άσκοπη κατανάλωσή του [Gal05].

Για το παρόν πείραμα, απαίτησή μας ήταν να κατασκευάσουμε στόχους <sup>*nat*</sup>Ag επιφανειακής πυκνότητας  $\xi \approx 2mg/cm^2$ . Σύμφωνα, λοιπόν, με τη παραπάνω σχέση, υπολογίσαμε τη μάζα του προς εξάχνωση υλικού  $\approx 2g$ , τμήμα που αποκόψαμε από μια ράβδο αργύρου ( $\approx 100g$ ) στο μηχανουργείο του Ινστιτούτου.

Επιφανειακή πυκνότητα ( <i>mg/cm²</i> )	r( <i>cm</i> )	Μάζα <sup>nat</sup> Ag προς εξάχνωση (g)
2	15	2.86
3	15	4.23
4	15	5.65

Πίνακας 3.1 : Υπολογισμός της προς εξάχνωση μάζας <sup>nat</sup>Ag, βάσει της απαιτούμενης επιφανειακής πυκνότητας.

#### 3.3.4.2 Μήτρα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υλικό που πρόκειται να εξαχνωθεί τοποθετείται σε μια μήτρα ("βαρκάκι") με υψηλό σημείο τήξης, ώστε να επιτυγχάνεται η τήξη του υλικού και όχι της βάσης αυτής. Λόγω της αρκετά μεγάλης μάζας του αργύρου, κατασκευάσαμε ένα σκαφίδιο από ταντάλιο, υλικό ιδιαίτερα εύκαμπτο, ικανό να αντέξει στην κοιλότητά του το βάρος του τηγμένου αργύρου.

![](_page_42_Picture_3.jpeg)

Σχήμα 3.10 : Φωτογραφία της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε στην εξάχνωση.

#### 3.3.4.3 Προετοιμασία υποστρώματος

Λόγω της απαίτησής μας οι στόχοι να έχουν σχετικά μικρό πάχος, αναπτύσσονται με εξάχνωση σε κατάλληλο υπόστρωμα-πλακίδια. Συνήθως, αυτά τα πλακίδια είναι κατασκευασμένα από γυαλί (γυαλάκια μικροσκοπίου), καθώς το γυαλί είναι ουδέτερο σε χημική συμπεριφορά στη μέθοδο αυτή.

Πριν την εξάχνωση, επαλοίφουμε τα πλακίδια με ειδικό λιπαντικό σύστασης 10% Betaine, 90% κορεσμένο ζαχαρόνερο (25 ml απεσταγμένο νερό, 20 ml Betaine (C<sub>5</sub>H<sub>11</sub>NO<sub>2</sub>), 3.8 g ζάχαρη). Συγκεκριμένα, τοποθετούμε μια σταγόνα λιπαντικού στην άκρη του πλακιδίου και την απλώνουμε όσο πιο ομοιόμορφα γίνεται, προσέχοντας να μην υπάρχουν τριχίδια ή σκόνες στην επιφάνειά του, για να μην προκαλέσουμε ανομοιογένεια στο στόχο. Έπειτα, χρησιμοποιώντας ένα στεγνωτήρα θερμού αέρα (thermo gun), μονιμοποιούμε το στρώμα λιπαντικού στο πλακίδιο, διαδικασία που ενδεχομένως να μην είναι αναγκαία, λόγω της σύστασης του λιπαντικού [Mai72]. Η μέθοδος αυτή διευκολύνει την αποκόλληση του υμενίου από το πλακίδιο, διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.6.

### 3.3.4.4 Καθαρισμός

Σημαντικό βήμα πριν τη διαδικασία της εξάχνωσης είναι ο διεξοδικός καθαρισμός του θαλάμου του εξαχνωτή. Ο καθαρισμός αυτός έχει σκοπό την απομάκρυνση τυχόν προσμίξεων από την επιφάνειά του, για την αποφυγή επιμόλυνσης του στόχου. Οι προσμίξεις συνήθως οφείλονται σε υπολείμματα από προηγούμενες εξαχνώσεις. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος καθαρισμού είναι με τη χρήση ασετόν ή κάποιου ασθενούς οξέος.

#### 3.3.5 Η διαδικασία της εξάχνωσης

Έχοντας ολοκληρώσει όλα τα απαιτούμενα βήματα για την προετοιμασία των δειγμάτων, μπορούμε να ξεκινήσουμε τη διαδικασία εξάχνωσης. Αρχικά, στηρίζουμε τη μήτρα στις ειδικές υποδοχές του εξαχνωτήρα και τη μάζα αργύρου στο κέντρο της. Σε ύψος  $r \approx 15$  cm από τη διάταξη αυτή, τοποθετείται η ειδική μεταλλική βάση με τα πλακίδια, με την επικαλλυμένη με λιπαντικό επιφάνειά τους να "κοιτάει" προς το κέντρο της διάταξης. Στη συνέχεια, στερεώνουμε το θάλαμο του εξαχνωτήρα και ασφαλίζουμε την ειδική στρόφιγκα που διαθέτει. Τέλος, θέτουμε σε λειτουργία τις αντλίες κενού με σειρά ακολουθίας: περιστροφική, στροβιλοαντλία και εν τέλει την ιοντική. Το στάδιο αυτό διαρκεί περίπου 12 ώρες, χρόνος ανάλογος με τον όγκο του θαλάμου εξάχνωσης.

Μετά το πέρας του απαιτούμενου χρόνου, το σύστημά μας έχει φτάσει σε κενό της τάξης των 4x10<sup>-6</sup> torr ≈ 4x10<sup>-6</sup> mbar, επιθυμητό για την έναρξη της εξάχνωσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θέρμανση της μήτρας γίνεται μέσω ηλεκτρικής αντίστασης. Ξεκινώντας από ένταση ρεύματος 42 Ampère και σταδιακά αυξάνοντας την ένταση του ρεύματος, επιτατυγχάνουμε την πυράκτωση της βάσης και συνεπώς την υγροποίηση και την εξάτμιση του αργύρου.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι για ένταση ρεύματος 180 Ampère, η μήτρα περιέχει άργυρο σε δύο φάσεις, υγρή και στερεή. Παρατηρήσαμε λοιπόν, το άτηκτο κομμάτι αργύρου να περιστρέφεται. Αυτό οφείλεται στο ότι, οι μεταλλικοί υποδοχείς, στους οποίους προσαρτάται η μήτρα, είναι μαγνήτες. Έτσι, το δημιουργούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο πολώνεται. Επειδή λοιπόν, ο άργυρος βρίσκεται εντός του πεδίου, τείνει να προσανατολιστεί με αυτό και περιστρέφεται.

Η διαδικασία της εξάχνωσης διήρκησε περίπου μία ώρα, χωρίς όμως να έχει εξαχνωθεί όλο το κομμάτι του αργύρου. Λόγω της μεγάλη μάζας του και της παροχής υψηλής έντασης ρεύματος, προκλήθηκε βλάβη στα περιφερειακά τμήματα του ηλεκτρονικού συστήματος του εξαχνωτή, γεγονός που μας οδήγησε στον τερματισμό της διαδικασίας. Αυτό, προφανώς, επηρεάζει τις μετέπειτα μετρήσεις μας, διότι οδηγεί σε μη συμφωνία θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Για το τέλος της διαδικασίας, απενεργοποιούμε τις αντλίες ακολουθώντας την αντίστροφη σειρά ενεργοποίησης, δηλαδή την ιοντική, την στροβιλοαντλία και εν τέλει την περιστροφική. Ανοίγουμε σταδιακά τη στρόφιγκα του θαλάμου, ώστε να αυξηθεί η πίεση εντός αυτού και να έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον. Τέλος, βγάζουμε τους στόχους από το θάλαμο και είναι έτοιμοι για το επόμενο στάδιο, την αποκόλληση, η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.6.

![](_page_44_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 3.11 : Φωτογραφίες από την εξάχνωση. (α) Μερικώς πυρακτωμένη μήτρα και "καθαρά" πλακίδια. (β) Πλήρως πυρακτωμένη μήτρα. (γ) Πλακίδια επικαλυμένα με άργυρο. (δ) Ο θάλαμος του εξαχνωτή, μετά την εξάχνωση, που έχει γίνει σαν καθρέφτης.

#### 3.3.6 Αποκόλληση υμενίων και κατασκευή στόχων

3.3.6.1 Διαχωρισμός υμενίου - υποστρώματος

Η διάσταση των υμενίων (φιλμ) από τα γυάλινα υποστρώματα πραγματοποιείται με την εμβύθιση των πλακιδίων σε νερό. Συγκεκριμένα, γεμίζουμε μια μεταλλική δεξαμενή με νερό και την τοποθετούμε σε έναν ανυψωτήρα, ώστε να μπορούμε να μεταβάλουμε το ύψος ανάλογα με το στάδιο της αποκόλλησης. Σταθεροποιούμε το πλακίδιο με μια τσιμπίδα ώστε να βρίσκεται υπό κλίση περίπου 45° στο νερό. Λόγω της επιφανειακής τάσης του νερού και της διάλυσης του λιπαντικού στο υγρό, επιτυγχάνουμε το διαχωρισμό του υμενίου από το πλακίδιο. Όσο αυξάνουμε το ύψος της δεξαμενής, τόσο μεγαλύτερο τμήμα του υμενίου αποκόπτεται από το υπόστωμα, έως ότου η στάθμη του νερού να φτάσει στην κορυφή του πλακιδίου και το υμένιο να επιπλεύσει στο νερό.

Η διαδικασία της αποκόλλησης πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός 48 ωρών, καθώς οι δυνάμεις συνάφειας μεταξύ πλακιδίων και υμενίων αυξάνονται με το χρόνο [Dea60].

![](_page_45_Picture_5.jpeg)

Σχήμα 3.12 : Η εμβύθιση των πλακιδίων στο νερό.

#### 3.3.6.2 Κατασκευή στόχων

Ο δακτύλιος του στόχου (target holder) είναι από αλουμίνιο και έχει μήκος 245 mm, πλάτος 190 mm, πάχος 1 mm και διάμετρο εσωτερικής οπής 125 mm (βλ. σχήμα 3.13). Βυθίζουμε, λοιπόν, το holder στο νερό και με το υμένιο να επιπλέει από πάνω, το ανυψώνουμε κάθετα. Έτσι, το υμένιο μένει στην περιφέρεια του δακτυλίου. Προσπαθούμε πάντα να εκτελέσουμε αυτή τη διαδικασία με όσο πιο ήρεμες κινήσεις γίνεται, γιατί η επιφανειακή τάση του νερού μπορεί να καταστρέψει το στόχο.

Έτοιμος ο στόχος πλέον, τοποθετείται σε μια πλαστική θήκη. Στη βάση της υπάρχει πλαστελίνη, ώστε να στρεωθεί το holder χωρίς φόβο τραυματισμού, μακριά από ρεύματα αέρα ή

αλλαγή πίεσης, για να στεγνώσει. Η φύλαξη των στόχων για μεγάλα χρονικά διαστήματα, γίνεται σε κενό  $10^{-2}$  mbar –  $10^{-3}$  mbar.

![](_page_46_Picture_2.jpeg)

Σχήμα 3.13 : Τα target holders και η αποθήκευσή τους.

### 3.4 Το πείραμα με το θάλαμο σκέδασης RBS

Η ακτινοβόληση των στόχων και η ανίχνευση των εκπεμπόμενων σωματιδίων με τη μέθοδο οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS) πραγματοποιήθηκε στο θάλαμο σκέδασης που φαίνεται στο σχήμα 3.14, σε συνθήκες υψηλού κενού της τάξης των 10<sup>-6</sup> mbar.

![](_page_47_Picture_3.jpeg)

#### 3.4.1 Ο θάλαμος σκέδασης

Σχήμα 3.14: Φωτογραφία του θαλάμου σκέδασης RBS

Στο κέντρο του θαλάμου σκέδασης βρίσκεται ο μεταλλικός υποδοχέας στον οποίο προσαρμόζουμε τους στόχους μας. Ο μεταλλικός υποδοχέας προσαρμόζεται σε ειδική υποδοχή ρομποτικού βραχίονα που βρίσκεται μέσα στο θάλαμο και μπορεί να καθορίσει το ύψος καθώς και την κλίση ως προς την προσπίπτουσα δέσμη μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή που βρίσκεται εκτός του πειραματικού χώρου. Στην μεταλλική βάση μπορούμε να προσαρμόσουμε μέχρι τέσσερις διαφορετικούς στόχους και με τις κατάλληλες ρυθμίσεις του ρομποτικού βραχίονα μπορούμε να έχουμε την πρόσπτωση της δέσμης στον επιθυμητό στόχο. Επίσης, μέσα στον θάλαμο υπάρχει μια μικρή κάμερα, ειδικά διαμορφωμένη για λήψη εικόνων και βίντεο στο κενό, δίνοντας μας εικόνα του εσωτερικού σε υπολογιστή έξω από τον πειραματικό χώρο, χωρίς να χρειάζεται να βρισκόμαστε κοντά στον θάλαμο σκεδάσεων κατά την εκτέλεση του πειράματος. Ένα σετ τριών λυχνίων LED φωτίζει τον θάλαμο όταν είναι ανάγκη, με βασική προϋπόθεση το σύστημα να είναι εκτός λειτουργία, καθώς υπάρχει κίνδυνος βλάβης.

#### 3.4.2 Ο ανιχνευτής SSB

Για την ανίχνευση των σωματιδίων χρησιμοποιήσαμε ανιχνευτή επιφανειακού φράγματος πυριτίου (Silicon Surface Barrier Detector, SSB) που το τοποθετήσαμε σε γωνία 170° προς τη διεύθυνση της διερχόμενης δέσμης και σε απόσταση r = 20 cm από το στόχο.

Οι ανιχνευτές SSB αποτελούνται από μία δίοδο πυριτίου και μία επαφή p-n. Στην επαφή p-n εφαρμόζεται ανάστροφη τάση πόλωσης, ώστε να εξασφαλιστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο κατα μήκος της συσκευής. Η ανάστροφη πόλωση δημιουργεί μία περιοχή απεμπλουτισμού, όπου δεν υπάρχουν υπάρχουν ελεύθερα φορτία. Για να είναι δυνατή η ανίχνευση των σωματιδίων, θα πρέπει το πάχος αυτής της περιοχής να είναι μεγαλύτερο από την εμβέλεια εισχώρησης των προς ανίχνευση σωματιδίων. Κατά τη διαδικασία ανίχνευσης, το προσπίπτον ιόν, που σταματά εντός της περιοχής εμπλουτισμού, δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής που εξαρτάται από την ενέργεια του. "οσο μεγαλύτερη ενέργεια έχουν τα προσπίπτοντα ιόντα, τόσο περισσότερα ζεύγη δημιουργούνται. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, τα φορτία προσανατολίζονται, δηλαδή γίνεται συσσώρευση ηλεκτρονίων στην άλλη, δημιουργώντας μικρά ρεύματα ιονισμού. Αυτά τα ρεύματα-παλμοί είναι που εν τέλει καταμετρώνται στον προενισχυτή [Det]

![](_page_48_Picture_4.jpeg)

Σχήμα 3.15 : Ο ανιχνευτής SSB.

Στην μπροστινή πλευρά του ανιχνευτή τοποθετήθηκε ορθογώνια μάσκα (slit) τανταλίου με σκοπό τη μείωση του σφάλματος στην αζιμουθιακή κατανομή των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Στο πίσω μέρος της μάσκας τοποθετήθηκε το πλαστικό κάλυμμά της με σκοπό την προστασία από πιθανή έκθεση του πίσω μέρους της σε σκεδάσεις της δέσμης και σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης με τα διαφράγματα τανταλίου (collimators) κατά την είσοδό της στο θάλαμο. Ο ανιχνευτής είναι έτσι επιλεγμένος, ώστε το πάχος του να είναι αρκετό (≈ 250 nm) για να σταματήσει το προς ανίχνευση σωματίδιο μέσα στον ανιχνευτή, προκειμένου να καταγραφεί όλη η ενέργειά του και όχι ένα μέρος της [Rak11].

#### 3.4.3 Οι στόχοι

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι προς ακτινοβόληση στόχοι στηρίζονται σε έναν μεταλλικό υποδοχέα. Ο υποδοχέας αυτός φέρει επίσης ένα κρύσταλλο χαλαζία (quartz), ο οποίος ακτινοβολεί όταν προσπέσει πάνω του η δέσμη, δίνοντας μας τη δυνατότητα βάση αυτού να προσδιορίσουμε τις θέσεις των υπολοίπων στόχων.

![](_page_49_Picture_3.jpeg)

Σχήμα 3.16 : Ο μεταλλικός υποδοχέας με τους στόχους. (α) Ο κρύσταλλος quartz (λευκό) και ο στόχος Cd (κίτρινο). (β) Ο στόχος Ag (κόκκινο) και ο στόχος Pd (μπλε).

## 3.5 Συλλογή και επεξεργασία φασμάτων

Το συλλεγόμενο φορτίο από τον ανιχνευτή μετατρέπεται μέσα από ένα σύστημα ηλεκτρονικών στην τελική μορφή του φάσματος. Τα στάδια της επεξεργασίας του συλλεγόμενου φορτίου, ώστε να φτάσει ως παλμός στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, φαίνονται στο σχήμα 3.17.

Η πρωτογενής πληροφορία συλλέγεται από μια σειρά ανιχνευτών που παρατηρούν στο χώρο τις αλληλεπιδράσεις της δέσμης με ένα στόχο. Η πληροφορία αυτή έχει τη μορφή ηλεκτρικού σήματος που συνήθως είναι αρκετά ασθενές για να καταγραφεί και να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Έτσι, ένα πρώτο σημαντικό στάδιο είναι η ενίσχυση του σήματος με προσπάθεια διατήρησης όλων των πληροφοριών που συνέλεξαν οι ανιχνευτές. Στο στάδιο αυτό, το φορτίο που συλλέγεται, αρχικά περνάει από έναν προενισχυτή, ο οποίος μετατρέπει το συλλεγόμενο φορτίο σε παλμό και του δίνει μια αρχική ενίσχυση με σκοπό την αύξηση του λόγου σήματος προς το θόρυβο. Η προενίσχυση του σήματος είναι πολύ σημαντική αφού, όχι μόνο ελαχιστοποιεί τον ηλεκτρονικό θόρυβο στο σήμα που δημιουργείται κατά την μεταφορά του, αλλά έχουμε την δυνατότητα επιλογής του χρήσιμου εύρους ζώνης του σήματος και αποφυγής της απόσβεσής του στις μακρές γραμμές μεταφοράς. Στη συνέχεια, το σήμα, αφού του έχει δοθεί μια μικρή ενίσχυση από τον

προενισχυτή, διοχετεύεται στον ενισχυτή όπου και πραγματοποιείται η κύρια ενίσχυσή του. Ο κυρίως ενισχυτής μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα διαφορίσεως του σήματος, με στόχο τη δημιουργία στην έξοδο ενός συμμετρικού παλμού με πεπερασμένο εύρος όσο είναι το δυνατόν. Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας ενός σήματος περιλαμβάνει τη μετατροπή του σε ψηφιακή μορφή ώστε να είναι δυνατή η ταξινόμηση και η καταγραφή της πληροφορίας που αντιπροσωπεύει το σήμα. Η μονάδα, η οποία μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό, καλείται ADC. Τέλος, πριν την άφιξη του σήματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, διοχετεύεται στον πολυκαναλικό αναλυτή (MCA), ο οποίος αποτελεί μια πολύπλοκη ψηφιακή μονάδα που διαχωρίζει τους παλμούς, τους κατατάσσει ανά ύψος σε ένα από τα 1024 κανάλια και τους απαριθμεί [Rak]. Τελικά, το σήμα καταγράφονται τα κανάλια (channel) και στον άξονα y ο αριθμός των γεγονότων (counts), απεικονίζοντας το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων που φτάνουν στον ανιχνευτή.

![](_page_50_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 3.17 : Σχηματική αναπαράσταση για τη μετάδοση και καταγραφή του σήματος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Δεδομένων και Αποτελέσματα

## 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των δεδομένων, που συλλέχθηκαν από τους ανιχνευτές του πειράματός μας και τελικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματά μας.

## 4.2 Επεξεργασία Φασμάτων

Τα βασικά στάδια στην επεξεργασία των φασμάτων είναι τα εξής: η βαθμονόμηση των φασμάτων, ο υπολογισμός του γινομένου  $Q \cdot \Omega$ , δηλαδή το γινόμενο του φορτίου και της στερεάς γωνίας που καλύπτει ο κάθε ανιχνευτής, το οποίο στην ουσία είναι το ρεύμα της δέσμης και η εύρεση του πάχους κάθε στοιχείου του στόχου.

#### 4.2.1 Ενεργειακή Βαθμονόμηση

Τα φάσματα που λαμβάνουμε από το πείραμά μας είναι καμπύλες αποτελούμενες από διακριτά σημεία. Κάθε σημείο αντιστοιχεί ένα γεγονός σε ένα κανάλι. Επειδή όμως, ο όρος κανάλι αναφέρεται στα ηλεκτρονικά του πειράματος και δεν έχει άμεση φυσική σημασία, βαθμονομούμε το φάσμα ενεργειακά. Με την ενεργειακή βαθμονόμηση λοιπόν, δημιουργούμε μία σύνδεση μεταξύ ενέργειας και καναλιών, σύνδεση αναγκαία για την επεξεργασία και αναγνώριση των φασμάτων είναι το πρόγραμμα SIMNRA. Μέσω αυτού, γίνονται όλες οι κατάλληλες διεργασίες για τον χαρακτηρισμό τους.

Υπάρχουν δύο τρόποι ενεργειακής βαθμονόμησης, ανάλογα με τη μορφή του φάσματος, δηλαδή αν θα είναι λεπτή κορυφή ή αν θα είναι υπό την μορφή "σκαλοπατιού", μορφές που εξαρτώνται από το πάχος κάθε στόχου [Lag12]. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το φάσμα του <sup>197</sup>Au (σχ. 4.1), το οποίο έχει τη μορφή "σκαλοπατιού". Η διαδικασία έχει ως εξής: Επιλέγουμε δύο σημεία στην καμπύλη. Το πρώτο σημείο είναι το μηδέν, δηλαδή 0 channel-0 keV και το δεύτερο είναι το μέσο του "σκαλοπατιού". Η σχέση αυτών των δύο σημείων είναι γραμμική και συνδέονται με την εξίσωση: *E(keV)=A·channel+B*. Η κλίση A είναι η ζητούμενη βαθμονόμηση και χρημοποιείται στην προσομίωση των φασμάτων. Ένας άλλος τρόπος εύρεσης, είναι μέσω της επιλογής kinematics του SIMNRA.

#### 4.2.2. Το γινόμενο Q·Ω

Το δεύτερο βήμα, είναι η εύρεση του αριθμού των σκεδαζόμενων φορτίων που συλλέγεται από τον ανιχνευτή, δηλαδή το φορτίο που εκπέμπεται από το στόχο. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται από το γινόμενο Q·Ω, όπου Q, το φορτίο των σωματιδίων της δέσμης και Ω, η στερεά γωνία που καλύπτει ο ανιχνευτής, με μονάδες *particles·sterad*. Κατά την επεξεργασία των φασμάτων, το μέγεθος αυτό το βρίσκουμε "χειροκίνητα" στο πρόγραμμα SIMNRA, με επαναλήψεις, έως ότου η προσομοίωση να ταυτιστεί με τη καμπύλη του φάσματος.

#### 4.2.3 Ένταση δέσμης

Εξίσου σημαντικό με το φορτίο που εκπέμπεται από το στόχο είναι και η ένταση της δέσμης που προσπίπτει σε αυτόν. Παρόλο που έχουμε μία πρώτη εικόνα για την έντασή της από τα χαρακτηριστικά του πειράματος (πίν. 4.1), μπρούμε να πετύχουμε έναν ακριβέστερο υπολογισμό της. Αυτό γίνεται εφικτό με τη χρήση του τύπου :

$$I = \frac{particles \cdot sr}{\frac{\Omega \cdot d\sigma}{d\theta} \cdot t}$$

όπου:

- $\Omega = \frac{\pi r^2}{4\pi d^2}$ , η στερεά γωνία με r: η ακτίνα του ανιχνευτή και d: απόσταση ανιχνευτή στόχου
- στόχου •  $\frac{(part \cdot sr)}{\Omega}$ , ο ολικός αριθμός σκεδαζόμενων ιόντων (α)
- $\frac{(a)}{d\sigma/d\theta}$ , ο ολικός αριθμός προσπίτοντων ιόντων, με  $d\sigma/d\theta$  τη διαφορική ενεργό διατομή Rutherford (b)
- $\frac{(b)}{t}$ , αριθμός προσπίπτοντων ιόντων ανά μονάδα χρόνου, με *t* ο χρόνος που έτρεξε το πείραμα (c)
- $(c) \cdot e^{-} = I$ , η ζητούμενη ένταση

#### 4.2.4 Πάχος στόχων

Το πάχος των στόχων είναι αποτέλεσμα της προσομοίωσης των φασμάτων. Δηλαδή, αφού έχουμε εισάγει στο SIMNRA τα απαραίτητα στοιχεία (βλ. Παράρτημα), εισάγουμε τιμές για το πάχος έως ότου η προσομοίωση να ταιριάξει απόλυτα με το πειραματικό φάσμα.

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Δεδομένων και Αποτελέσματα

Το πάχος κάθε στοιχείου στο στόχο είναι ανάλογο με το εύρος της κορυφής που το αντιπροσωπεύει, δηλαδή ανάλογο με το ποσό της ενέργειας που έχασε η δέσμη όταν προσέπεσε στον στόχο. Για αυτό το λόγο, σε ορισμένους στόχους, το πάχος τους χαρακτηρίζεται "άπειρο", το οποίο σημαίνει ότι τα σωματίδια της δέσμης που εισχώρησαν σε αυτόν, έχασαν όλη την κινητική τους ενέργεια λόγω επαναληπτικών σκεδάσεων μέσα στο υλικό με αποτέλεσμα τη μη διαφυγή τους από αυτό.

Χαρακτηριστικά σκέδασης							
Είδος δέσμης	Δευτέριο (d)						
Ενέργεια δέσμης	1500 keV						
Ένταση δέσμης	20 nA						
Γωνία σκέδασης	170°						

Πίνακας 4.1	:	Χα	ρακτηρ	οιστικά	σκέδασι	Iς
-------------	---	----	--------	---------	---------	----

#### 4.3 Ανάλυση Φασμάτων

Τα φάσματα που λάβαμε αφορούν τους εξής στόχους: <sup>197</sup>Au, <sup>nat</sup>Ag, <sup>112</sup>Cd και <sup>106</sup>Pd, για δέσμη δευτερίων d ενέργειας  $E_d$  = 1500 keV, για γωνία ανιχνευτή 170° και για ένταση δέσμης στα 20 nA. Τα φάσματα αυτά αναλύνονται παρακάτω.

#### 4.3.1 <u>Φάσμα <sup>197</sup>Au</u>

Το φάσμα αυτό λήφθηκε με δέσμη δευτερίου για ενέργεια E=1500 keV, για χρόνο μέτρησης t=237 sec και χρησιμοποιήθηκε ως φάσμα αναφοράς για την ενεργειακή βαθμονόμηση και την εύρεση φορτίου. Μέσω της σχέσης  $E = A \cdot channel + B$ , όπως περιγράφθηκε και προηγουμένως, βρήκαμε την αντιστοίχηση των καναλιών σε ενέργεια, δηλαδή A = 2.432 keV/ch. Το φάσμα του <sup>197</sup>Au παρουσιάζεται παρακάτω.

![](_page_54_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 4.1: Φάσμα <sup>197</sup>Au με δέσμη d ενέργειας  $E_d$ =1500 keV για γωνία σκέδασης 170°

Παρατηρώντας, λοιπόν, το φάσμα του <sup>197</sup>Au, βλέπουμε ότι η μορφή του είναι μία εκτενής κορυφή (σκαλοπάτι), με την αιχμή του χρυσού να παρουσιάζεται στα  $E_{Au} = 1427 \ keV$ . Αυτό θεωρητικά σημαίνει πως το πάχος του στόχου είναι άπειρο. Πρακτικά όμως, μας δείχνει πως η δέσμη δεν έχει την απαιτούμενη ενέργεια ώστε να διαπεράσει πλήρως το στόχο.

Λόγω της ισχυρής άπωσης Coulomb από το Au, η ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης δευτερίων ενέργειας μικρών MeV, θεωρείται ότι ικανοποιείται απο την εξ. Rutherford (εξ. 2.27), δηλαδή ακολουθεί πλήρως τη συμπεριφορά που υπαγορεύεται από την ενεργό διατομή Rutherford. Η ενεργός διατομή για την οπισθοσκέδαση Rutherford υπολογίζεται στα  $\sigma_{Au}(170^\circ) = 3.607 \text{ barns.}$ 

Με την επεξεργασία του φάσματος προκύπτει ότι το φορτίο που εκπέμπεται από το στόχο είναι  $Q = 10^{14}$  particles και το πάχος του στα d = 3.89 μm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Δεδομένων και Αποτελέσματα

#### 4.3.2 <u>Φάσμα <sup>106</sup>Pd</u>

Το φάσμα αυτό λήφθηκε με δέσμη δευτερίου για ενέργεια E = 1500 keV, για χρόνο μέτρησης t=337 sec, για γωνία σκέδασης  $170^{\circ}$  και παρουσιάζεται παρακάτω.

![](_page_55_Figure_3.jpeg)

Σχήμα 4.2: Φάσμα <sup>106</sup>Pd με δέσμη d ενέργειας  $E_d$ =1500 keV για γωνία σκέδασης 170°

Ο στόχος του <sup>106</sup>Pd αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα Pd και ένα παχύ υπόστρωμα <sup>197</sup>Au. Λόγω λάθος τοποθέτησης του στόχου στο μεταλλικό υποδοχέα, έγινε ακτιβόληση του χρυσού και όχι του παλλαδίου. Το φάσμα παρουσιάζεται καθαρά για σύγκριση με το φάσμα του <sup>197</sup>Au που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο (βλ. 4.3.1) και δεν αναφέρεται στον συγκεντρωτικό πίνακα 4.2.

Παρατηρώντας το φάσμα, διακρίνουμε την εκτενή κορυφή του <sup>197</sup>Au, με έναρξη στα E = 1420 keV. Όπως υποδεικνύεται από τη μορφή της καμπύλης, το πάχος του υποστρώματος του <sup>197</sup>Au χαρακτηρίζεται "άπειρο" και συγκεκριμένα είναι στα  $d = 3.85 \mu m$ . Το φορτίο που προσπίπτει στον ανιχνευτή είναι  $Q = 1.84 \cdot 10^{14}$  particles.

Εκτελώντας πάλι τη διαδικασία βαθμονόμησης, βρίσκουμε A = 2.431 keV/ch, το οποίο έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τη τιμή που υπολογίσαμε στην παράγραφο 4.3.1.

#### 4.3.3 <u>Φάσμα <sup>nat</sup>Ag</u>

Το φάσμα αυτό λήφθηκε στο θάλαμο σκέδασης με δέσμη δευτερίου σε ενέργεια E = 1500 keV, για γωνία σκέδασης 170°, χρόνο μέτρησης t = 622 sec και κατασκευάστηκε στον εξαχνωτή του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

![](_page_56_Figure_3.jpeg)

Σχήμα 4.3: Φάσμα <sup>nat</sup>Ag με δέσμη d ενέργειας  $E_d$ =1500 keV για γωνία σκέδασης 170°

'Οπως παρατηρούμε, διακρίνεται μία καθαρή κορυφή για ενέργεια  $E_{Ag} = 1354 \text{ keV}$ . Το σχετικά μεγάλο ύψος της κορυφής οφείλεται στο ότι ο φυσικός άργυρος αποτελείται από τα ισότοπα <sup>107</sup>Ag και <sup>109</sup>Ag με ποσοστό 51% και 49% αντίστοιχα, και έτσι στο φάσμα παρουσιάζεται το άθροισμα των επιμέρους κορυφών. Για ενέργεια E = 984 keV παρουσιάζεται σκαλοπάτι, που εκτείνεται μέχρι τα μικρά keV, γεγονός που μας υποδεικνύει τη παρουσία υποστρώματος "άπειρου" πάχους στο στόχο. Το υπόστρωμα αυτό, οφείλεται στην ύπαρξη <sup>28</sup>Si, που προέρχεται από τον τρόπο κατασκευής των στόχων και συγκεκριμένα από τα ειδικά γυαλάκια που χρησιμοποιήθηκαν στην εξάχνωση. Οι δύο μικρότερες κορυφές που εμφανίζονται οφείλονται στο <sup>16</sup>O και στο <sup>nat</sup>C. Συγκεκριμένα, η πρώτη κορυφή, από τα μεγάλα κανάλια στα μικρότερα, σε ενέργεια  $E_C = 654 \text{ keV}$ , σε οργανικά κατάλοιπα που επικάθισαν στο στόχο σε περίπτωση που ήρθε σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα.

Κ. Τσαμπά

Ο Ag ακολουθεί την συμπεροφορά Rutherford και η ενεργός διατομή υπολογίζεται στα  $\sigma_{Ag}(170^\circ) = 1283.50 \text{ mb/sr}$ . Το φορτίο που εκπέμπεται από το στόχο υπολογίζεται στα  $Q = 3.570 \cdot 10^{14}$  particles.

Καταλήγουμε, λοιπόν, στα εξής πάχη:

- Στρώμα <sup>nat</sup>Ag πάχους  $\sigma_1 = 0.4 \text{ mg/cm}^2$ , δηλαδή  $d_1 = 0.43 \mu m$
- Στρώμα <sup>16</sup>Ο πάχους  $\sigma_2 = 0.00929 \text{ mg/cm}^2$ , δηλαδή  $d_2 = 81.4 \text{ nm}$
- Στρώμα <sup>nat</sup>C πάχους σ<sub>3</sub> = 0.2493 mg/cm<sup>2</sup>, δηλαδή d<sub>3</sub>=110.3 nm
- Στρώμα <sup>28</sup>Si "άπειρου" πάχους  $\sigma_4 = 1.7 \text{ mg/cm}^2$ , δηλαδή  $d_4 = 7 \mu m$

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, το θεωρητικό πάχος για τον στόχο του Ag, σύμφωνα με την προς εξάχνωση ποσότητα (Πίν. 3.1), αναμενόταν στα 1.3 mm, αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το πειραματικό. Αυτό οφείλεται πρώτον, στο ότι οι υπολογισμοί για τη μάζα του Ag έγιναν για σφαιρική γεωμετρία, ενώ ο εξαχνωτής έχει ημικυλινδρική και δεύτερον, στο ότι διακόψαμε τη διαδικασία της εξάχνωσης λόγω βλάβης στα περιφερειακά τμήματα του ηλεκτρονικού συστήματος του εξαχνωτή, χωρίς να έχει εξαχνωθεί όλη τη μάζα του Ag.

## 4.3.4 <u>Φάσμα <sup>112</sup>Cd</u>

Το φάσμα αυτό λήφθηκε με δέσμη δευτερίου σε ενέργεια E = 1546 keV, για γωνία σκέδασης 170° και χρόνο μέτρησης t = 890 sec.

Ο στόχος του <sup>112</sup>Cd κατασκευάστηκε από συναδέλφους στο Ινστιτούτο "Δημόκριτος" μέσω της

τεχνικής εξάχνωσης και αποτελείται από τέσσερα στρώματα. Πρώτον, ένα επιφανειακό στρώμα <sup>112</sup>Cd, δεύτερον, ένα παχύ στρώμα <sup>209</sup>Bi, ενωμένο, μέσω λεπτού στρώματος <sup>114</sup>In, με στρώμα <sup>63</sup>Cu.

Τα αρχικά πάχη ήταν τα εξής:

- Στρώμα <sup>112</sup>Cd πάχους  $\sigma_{Cd}$  = 1.2 mg/cm<sup>2</sup>
- Στρώμα <sup>209</sup>Bi πάχους  $\sigma_{Bi} = 40 \text{ mg/cm}^2$
- Στρώμα <sup>114</sup>In πάχους  $\sigma_{In} = 1 \text{ mg/cm}^2$
- Στρώμα  $^{63}$ Cu πάχους  $\sigma_{Cu}$  = 18 mg/cm<sup>2</sup>

Παρατηρώντας, λοιπόν, το φάσμα που μας δίνει ο ανιχνευτής, από τα μεγάλα κανάλια προς τα μικρά, βλέπουμε πως σχηματίζεται ένα "γόνατο" σε ενέργεια E = 1427 keV και ένα δεύτερο για ενέργεια E = 1384 keV. Και σε αυτή την περίπτωση, κρίνοντας από την εκτεταμένη μορφή της κορυφής του φάσματος, καταλήγουμε στο ότι, η δέσμη σταματά μέσα στο στόχο χωρίς να μπορεί να τον διαπεράσει.

![](_page_58_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 4.5: Φάσμα <sup>112</sup>Cd με δέσμη d ενέργειας  $E_d$  = 1546 keV για γωνία σκέδασης 170°

Η πρώτη κορυφή ανήκει στο <sup>112</sup>Cd και η δεύτερη στο <sup>209</sup>Bi, όπως μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα στο σχήμα 4.6. Κύριο μέλημά μας ήταν η αναγνώριση του πάχους του <sup>112</sup>Cd, για αυτό προσπαθήσαμε την όσο δυνατόν καλύτερη εύρεση αυτής της κορυφής. 'Οπως φαίνεται, η προσομοίωση, για μεσαία και μικρά keV, δεν ταυτίζεται με το πειραματικό φάσμα, καθώς λόγω του μεγάλου πάχους του <sup>209</sup>Bi δεν μπορούμε να αναγνωρίσουμε επακριβώς το στρώμα του <sup>63</sup>Cu. Επίσης, όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τα αποτελέσματα, επειδή ο στόχος έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές ακτινοβολήσεις, έχουν αλλοιωθεί τα χαρακτηριστικά του και κυρίως τα στρώματα του <sup>112</sup>Cd και του <sup>209</sup>Bi.

Ετσι, λοιπόν, μέσω της προσομοίωσης, καταλήγουμε στα εξής δεδομένα :

- Στρώμα <sup>112</sup>Cd πάχους  $\sigma_{Cd} = 0.448 \text{ mg/cm}^2$ , δηλαδή  $d = 0.51 \mu m$
- Στρώμα <sup>209</sup>Bi πάχους σ<sub>Bi</sub> = 0.062 mg/cm<sup>2</sup>, δηλαδή d = 0.063 μm
- Στρώμα <sup>114</sup>In πάχους  $\sigma_{In} = 1 mg/cm^2$ , δηλαδή  $d = 0.136 \mu m$
- Στρώμα <sup>63</sup>Cu πάχους  $\sigma_{Cu} = 18 mg/cm^2$ , δηλαδή  $d = 20 \mu m$

To <sup>112</sup>Cd ακολουθεί την συμπεριφορά Rutherford και η ενεργός διατομή του υπολογίζεται στα  $\sigma_{Cd}(170^\circ) = 1260.30 \text{ mb/sr}$ . Το φορτίο που εκπέμπεται από το στόχο είναι  $Q = 3.3 \cdot 10^{14}$  particles.

![](_page_59_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 4.6 : Μεγέθυνση κορυφής στο φάσμα του  $^{112}Cd$ 

Παρατηρήσεις	'Απειρο πάχος Χρησιμοποιείται για την εύρεση φορτίου		Άπειρο πάχος	Περιέχει 4 στρώματα υλικών, Ag, O, C, Si			Άπειρο πάχος Περιέχει 4 στρώματα υλικών, Cd, Bi, In, C				
Πάχος (μm)	3.89	0.43	0.0814	0.110	7	0.51	0.063	0.136	20		
oς (mg/cm²)	7.52	0.45	0.00929	0.24	1.7	0.448	0.062	<del>, -</del> 1	18		
Πάχ		${}^{\rm nat}Ag$	$^{16}O$	$^{12}\text{C}$	<sup>28</sup> Si	<sup>112</sup> Cd	$^{209}Bi$	$^{114}$ In	63Cu		
I (nA)	20		00	70			00	70			
E (keV)	1500		1500	DOCT			1 E A C	10 <b>4</b> 0			
Δέσμη	p		τ	כ			τ	כ			
Στόχος	<sup>197</sup> Au		nat A G	8V			112CA	Cu			

![](_page_60_Figure_1.jpeg)

## 4.4 Αποτελέσματα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα

Η κατασκευή και η χαρακτηρισμός των στόχων έγινε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος". Ο επιταχυντής του ιδρύματος είναι ένας Van de Graaff Tandem γραμμικός επιταχυντής με μέγιστη ενέργεια σωματιδίων τα 5,5 MV.

Για τις ανάγκες του πειράματος, κατασκευάσαμε στόχους φυσικού αργύρου <sup>nat</sup>Ag με τη μέθοδο της εξάχνωσης με εναπόθεση ατμών. Επίσης, χρησιμοποιήσαμε και άλλους στόχους, που ήταν ανάγκη να φασματοσκοπηθούν, όπως <sup>112</sup>Cd και <sup>106</sup>Pd, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί από συναδέλφους με παρόμοιες μεθόδους κατασκευής στόχων.

Η τεχνική φασματοσκοπίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν η RBS. Μία δέσμη δευτερίων ενέργειας 1500 keV δημιουργείται στον επιταχυντή Van de Graaff Tandem 5.5 MV, και μέσω μαγνητών οδηγείται στον θάλαμο σκέδασης. Εντός θαλάμου, βρίσκονται οι στόχοι και ο SSB ανιχνευτής, σε γωνία 170°, ο οποίος συλλέγει τις πληροφορίες της σκέδασης. Το σήμα από τον ανιχνευτή ενισχύεται και παράγονται τα δεδομένα του πειράματος. Τα φάσματα που λήφθηκαν, αναλύθηκαν με το πρόγραμμα simNRA.

Ο στόχος του <sup>nat</sup>Ag αποτελείται από τέσσερα στρώματα υλικών, Ag, O, C και Si. Τα τρία τελευταία στρώματα δεν γνωρίζαμε πως περιέχονταν στον στόχο, αλλά αναγνωρίστηκαν μέσω της φασματοσκοπίας. Το οξυγόνο πιθανώς προέρχεται από την πρότερη έκθεση του στόχου στον ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ ο άνθρακας από οργανικές ύλες που υπάρχουν εντός του θαλάμου σκέδασης, πχ ατμοί ορυκτέλαιου από τη λειτουργία της αντλίας.

Ο στόχος του <sup>112</sup>Cd αποτελείται και αυτός από τέσσερα στρώματα. Το Cd είχε χαρακτηριστεί στο παρελθόν και γνωρίζαμε τα αρχικά πάχη κάθε στρώματος. Μετά την δική μας ακτινοβόληση, καταφέραμε να διεξάγουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για το επιφανειακό στρώμα, του οποίου το πάχος έχει διαφορά 1 τάξης μεγέθους σε σχέση με το αρχικό, υποδεικνύοντας σημαντική αλλοίωση αυτού του στρώματος από την έκθεσή του σε δέσμη ιόντων σε προηγούμενες πειραματικές διεργασίες.

Τα στοιχεία που συνθέτουν τους στόχους που ακτινοβολήθηκαν στο θάλαμο οπισθοσκέδασης Rutherford ακολουθούν εν γένει τη συμεριφορά Rutherford, πράγμα που συμφωνεί με τη θωρία λόγω του υψηλού ατομικού τους αριθμού Ζ.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Το πρόγραμμα simNRA

Το πρόγραμμα simNRA χρησιμοποιείται για την προσομοίωση φασμάτων σκέδασης και οπισθοσκέδασης για ιοντικές δέσμες της τάξης των MeV. Συγκεκριμένα, στοχεύει στη προσομοίωση φασμάτων με ενεργές διατομές Rutherford και non-Rutherford, φασμάτων με πυρηνικές αντιδράσεις και αντιδράσεις μέσω της τεχνικής ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). Στο πρόγραμμα υπάρχουν καταχωρημένες πολλές ενεργές διατομές Rutherford και πάνω από 300 διαφορετικές για non-Rutherford και πυρηνικές αντιδράσεις, για προσπίπτουσες δέσμες πρωτονίων, δευτερίων, <sup>3</sup>He και ιόντων <sup>4</sup>He. Τέλος, το SIMNRA, μπορεί να υπολογίσει και να προσομοιώσει φάσματα για κάθε συνδυασμό δέσμης-στόχου, ακόμα και για δέσμη βαρέων ιόντων και για κάθε γεωμετρία πειράματος [May97].

#### Π.Α.1. Χαρακτηριστικά δέσμης και γεωμετρία πειράματος

							SIMNE							
<u>F</u> ile <u>E</u> dit	<u>S</u> etup	Target <u>R</u> eactions	<u>Calculate</u> Too <u>i</u> s	Plot Options	<u>H</u> elp									
] 🗅 🖻		🖥 🛱 😹 📩 📲	Ы 🕅 🛍 🛛											
	Energy [keV]													
	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	
	1,000													- Evnermental
	950 -					tr Set	tup: Experim	ient – 🗆 🗙						Simulated
	900 -					File Incicent io	n		T					
	850 -					Он	C 3He C	)ther ion						
	800-					ΟD	C 4He	Element						
	750 -						OUther							
	700 -						Energy (kev	) 1500.00						
	650 -					Geometru		0.00	T					
	600 -					a Inciden	itAngle (Deg)	0.00						
ŝ	550 -					p Exit-An	ino Anola (Deo)	170.00						
Ę	500 -					B Joaner	ing Angle (Degi	1170.00						
ō	450 -					Calibration	Offset (ke\/)	0.000	1					
U	400					Energy per	r Shannel (keV/	oh) [2.1320						
	250					Quadratic	Term (keV/ch**	2) 0.000E+0						
	350-					More e	nergy calibration	options						
	300 -					Particles "	a	1.000E+12						
	250 -					Energy res	clution		T					
	200 -					Detector R	Resolution (keVI	15.000						
	150-					Energy spr bean (keV	ead of incident	0.000						
	100-					OK	1 c	11-16						
	50 -													
	0													
	U	50 100	150 200	250 300	1 350 4	400 450	Channe	550 600	650 /0	0 /50	800 850	900 95	0 1,000	
								1						

Σχήμα Π.1: Παράθυρο "Setup"

Ξεκινώντας να κάνουμε μια οποιαδήποτε προσομοίωση στο SIMNRA, πρώτος σκοπός είναι να καταχωρήσουμε τα δεδόμενα του πειράματός μας.

Επιλέγοντας την ένδειξη "Setup – Experiment", εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπου μπορούμε να ελέγξουμε τις αρχικές παραμέτρους. Από την κατηγορία "Incident Beam" προσδιορίζουμε το είδος των σωματιδίων και την ενέργεια της δέσμης. Από την κατηγορία "Geometry" ορίζουμε την γωνία πρόσπτωσης και τη γωνία οπισθοσκέδασης. Από την κατηγορία "Calibration" μπορούμε να

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Το πρόγραμμα simNRA

ρυθμίσουμε την ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή που χρησιμοποιούμε, όπως την έχουμε υπολογίσει με τη βοήθεια του φάσματος του <sup>197</sup>Au. Μέσω της επλογής "Particles·sr", με επαναλήψεις, βρίσκουμε το γινόμενο Q·Ω (βλ. Παρ 4.2.2). Τέλος, από την κατηγορία "Energy resolution" καθορίζουμε την ευαισθησία του ανιχνευτή.

#### Π.Α.2. Στόχος

Σε αυτό το στάδιο, σκοπός μας είναι να καθορίσουμε τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε στόχου, όπως, στοιχειομετρία, πάχος και προσμείξεις.

	SIMNRA – D															
<u>F</u> ile	<u>E</u> dit	<u>S</u> etup	<u>T</u> arget	Reactions	<u>C</u> alculate Too <u>i</u> s	Plot Options	<u>H</u> elp									
Ľ	I 🗃 (	<b>-</b>		1 🤜 📕	<b>LII 🛍 🛍</b>											
								Ei	nergy [ke	V]						
		(	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	
	1	- 000, 1					_							I		
		950 -						-k	Target	- 🗆 🗙						Simulated
		900 -						<u>File Edit S</u>	how							
		850 -						Layer manipula	ation							
		800 -						Brev 👖	ļns 💼 <u>D</u> el 🔳	Cod Next						
		750 -						Total Number	of Layers: 1							
		700 -						Layer 1 Thickness (1E	1F Atoms/cm2)	0.000						
		650 -						Number of eler	ments	2						
		600 -						Element	Cencentration	Isotopes						
	fs	550 -						X	0.000000							
	5	500 -							0.000000	•						
	Ŭ	450 -														
		400 -														
		350 -														
		300 -						Concent	ration C Are	al density						
		250 -						Correction fact	tor(s) for er of this layer	•						
		200 -						Lajer and sub	istrate roughness							
		150 -														
		100-						<u>о</u> к	Cancel	Help						
		50 -														
		0_	J 50	J 100	150 200	250 300	350	400 45	0 500 5	50 600	650 /	00 /50	800 850	900 9	50 1,000	1
									Channel							

Σχήμα Π.2: Παράθυρο "Target"

Επιλέγοντας την ένδειξη "Target", εμφανίζεται ένα παράθυρο από το οποίο μπορούμε να βρούμε τις παραμέτρους του στόχου. Από την κατηγορία "Layer Manipulation" μας επιτρέπεται να προσθέτουμε ή να αφαιρούμε στρώματα από το στόχο, ανάλογα με τη σύστασή του. Από την κατηγορία "Thickness" ελέγχουμε το πάχος κάθε στρώματος, έχοντας υπόψιν πως το μέγεθος δίνεται σε μονάδες 10<sup>15</sup> atoms/cm<sup>2</sup>. Τέλος, μέσω της επιλογής "Number of elements", προσδιορίζουμε τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται κάθε στρώμα, προσέχοντας ότι το άθροισμα της συγκέντρωσης όλων των στοιχείων σε κάθε στρώμα πρέπει να είναι ίσο με 1.00.

#### Π.Α.3 Ενεργές διατομές

Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των φασμάτων, μας ζητάται να επιλέξουμε τις ενεργές διατομές που χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση του φάσματος.

Energy [keV]												
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400												
State       100       200       300       400       500       600       700       800       900       1000       1100       1200       1300       1400         2000       2000       2000       2000       1000       1100       1200       1300       1400         2000       2000       2000       2000       2000       10000       10000       100000       1000000       10000000       10000000       100000000       100000000       100000000       100000000       100000000       1000000000 <td< th=""><th>11 D4</th></td<>	11 D4											

Σχήμα Π.3: Παράθυρο "Reactions"

Πατώντας την επιλογή "Reactions", εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου επιλέγουμε το είδος της ενεργού διατομής, ανάλογα με το στόχο που προσομοιώνουμε. Όπως έχουμε αναφέρει, το πρόγραμμα διαθέτει μία μεγάλη βιβλιοθήκη ενεργών διατομών για Ruherford και non-Rutherford σκεδάσεις. Με την επιλογή "Next Element",καθορίζουμε ξεχωριστά για κάθε στοιχείο του φάσματος τη συμπεριφορά που θα ακολουθήσει.

Τέλος, παρουσιάζονται κάποιοι βασικοί υπολογισμοί που γίνονται μέσω του προγράμματος:

- "Calculate Spectrum": Υπολογίζει το προς προσομοίωση φάσμα
- "Kinematics": Επιτρέπει τον υπολογισμό των ενεργειών των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων και των προϊόντων πυρηνικών αντιδράσεων
- Stopping": Υπολογίζει τη δύναμη ανάσχεσης (stopping power) για κάθε βλήμα εντός οποιουδήποτε στοιχείου του στόχου και της απώλειας ενέργειας στα διαφορετικά στρώματα
- "Cross Section": Υπολογίζει την ενεργό διατομή κατά Rutherfor των οπισθοσκεδαζόμενων σωματιδίων

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Το χρονικό της εξάχνωσης του <sup>nat</sup>Ag

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο χρόνος διάρκειας της εξάχνωσης του <sup>nat</sup>Ag, η ένταση ρεύματος που διαρρέει του μεταλλικούς υποδοχείς και η τάξη του κενού, κατά τη διαδικασία της εξάχνωσης.

Χρόνος (min)	Ampère	Κενό (Torr)	Ρεύμα αντλιών (mA)	Παρατηρήσεις
00	42	$4 \cdot 10^{-6}$		
10	54	3.10-6		
15	63			
16	72			
17	78	3.2·10 <sup>-6</sup>		
18	90			
20	99	4.2·10 <sup>-6</sup>	35	
22	108	$5 \cdot 10^{-6}$		
24	114	8·10 <sup>-6</sup>		Η μήτρα αρχίζει να πυρρακτώνεται
25	120	10 <sup>-5</sup>	75	
32	126			
35	132			Μερική πυρράκτωση μήτρας
36	138			
37	144	10 <sup>-5</sup>		
38	150	10 <sup>-5</sup>		Αρχίζει η τήξη του Ag
46	180	2.5·10 <sup>-5</sup>		Ο Ag περιστρέφεται
65	160	3·10 <sup>-5</sup>		Ο θάλαμος έχει γίνει σαν καθρέφτης
66	84			Διακοπή εξάχνωσης

Πίνακας Π.1 : Λεπτομέρειες από τη διαδικασία της εξάχνωσης

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Εύρεση πάχους στόχων

'Οπως αναφέρθηκε και στο Παράρτημα A (βλ. Π.Α.2.), στο πρόγραμμα SIMNRA, το μέγεθος "Thickness" δίνεται σε μονάδες 10<sup>15</sup> atoms/cm<sup>2</sup>. Πρέπει, λοιπόν, με τη βοήθεια απλών πράξεων, να μετατρέψουμε αυτές τις μονάδες, σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας (*mg/cm<sup>2</sup>*) και σε μονάδες μήκους (μm). Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω.

Οι παράμετροι που χρειάζονται για αυτόν τον υπολογισμό είναι οι εξής:

- Η τιμή του "Thickness" ( *10<sup>15</sup> atoms/cm<sup>2</sup>*)
- Αριθμός Avogadro :  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$  atoms/mol
- Μοριακή μάζα στοιχείου (g/mol)
- Πυκνότητα στοιχείου (g/cm<sup>3</sup>)

Για την εύρεση της επιφανειακής πυκνότητας σ

$$\sigma = \frac{\text{Thickness} \cdot Mopia\kappa \acute{\eta} \mu \acute{\alpha} \zeta \alpha}{N_A} = \frac{\frac{atoms}{cm^2} \cdot \frac{g}{mol}}{\frac{atoms}{mol}} = \frac{g}{cm^2}$$

Για την εύρεση του μήκους *x* 

$$x = \frac{\varepsilon \pi i \varphi \alpha v \varepsilon i \alpha \kappa \eta \pi i \kappa v \delta \tau \eta \tau \alpha}{\pi i \kappa v \delta \tau \eta \tau \alpha} = \frac{\sigma}{p} = \frac{\frac{g}{cm^2}}{\frac{g}{cm^3}} = cm = 10^4 \, \mu m$$

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [Ber07] Bertulani, C., *Nuclear Physics in a Nutshell*, Princeton University Press (2007) ISBN-13: 978-0-691-12505-3
- [Boh36] Bohr, N. Nature, 137, 344 (1936)
- [Cab16] Cabanelas, P., Galaviz, D., Henriques, A., Sánchez-Benîtez, A., Teubig, P., Velho, P., Preparation of Silver and Silver-backing self-supported thin targets by high vaccuum evaporation, arXiv:1602.07172 (2016)
- [Dea60] Dearnaley, G. Preparation of Thin Self-Supporting Carbon Films, Review of Scientific Instruments 31, 197 (1960)
- [Det] *Detection of charged particles with silicon detectors*, National University of Singapore, Department of Physics, Faculty of Science
- [Dia05] Διακάκη, Μ. Ο επιταχυντής Van de Graaf Tandem (T11 5.5 MV) του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος". Εγχειρίδιο εισαγωγής στις βασικές έννοιες λειτουργίας του επιταχυντή (2005)
- [Fan08] Fan, Q., Xu, G., *Preparation of multilayer targets for g-factor measurement of rotational levels*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 590, 96, (2008)
- [Gal05] Γαλανόπουλος, Ε., Μετρήσεις ενεργών διατομών πυρηνικών αντιδράσεων πρωτονικής σύλληψης των ισοτόπων του Sr με σημασία στην πυρηνοσύνθεση, (ΕΜΠ Διδακτορική διατριβή, 2005)
- [Gal72] Gallant, J.L., Special techniques in target preparation for Chalk River nuclear physics experiments, Nucl. Instrum. Meth., 102, 477 (1972)
- [Goy15] Goyal, S., Abhilash, S.R., Kabiraj, D., Kalkal, S., Mandal, S., Fabrication of selfsupporting targets of lead (<sup>206, 208</sup> Pb) using evaporation technique, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 777, 70 (2015)
- [Glo13] Glover, K.M., Preparation of Nuclear Targets for Particle Accelerators, Jaklovsly Josef, (Springer, 2013)
- [IUP97] IUPAC Technical Report, K. J. R. Rosman, K.J.R. and Taylor, P.D.P., *Isotopic compositions of the elements (1997)*
- [Lag12] Λαγάκη, Β. Χαρακτηρισμός πυρηνικών στόχων με χρήση ιοντικών δεσμών (IBA), (ΕΚΠΑ, Διπλωματική εργασία, 2012)

Κ. Τσαμπά

- [Lea95] Leavitt, J.A., McIntyre, Jr., L.C., Weller, M.R., Handbook of Modern Ion Beam Material Analysis, Tesmer, J.R, Nastasi, M., Materials Research Society, Pittsburg, Pennsylvania, (1995), ISBN 1-55899-254-5
- [Liv62] Livingston, M.S., Blewett, J. Particle Accelerators, New York, McGraw-Hill, (1962) ISBN 11-144-4384-0
- [Mai72] Maier-Komor, P., *A simple technique of producing thin carbon films*, Nuclear Instruments and Methods 102, 485 (1972)
- [Mar94] Maréchal, N., Quesnel, E., Pauleau, Y., *Characterization of silver films deposited by radio frequency magnetron sputtering*, J Vac. Sci. Tech. A 12, 707 (1994)
- [Mat10] Mattox, D.D., Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Chap. 1&6, (Elsevier Inc., 2010) ISBN 978-0-8155-2037-5
- [May97] Mayer, M. SIMNRA User's Guide, Max-Plank-Institut für Plasmaphysik, IPP 9/13, April (1997)
- [Nas15] Nastasi M, Mayer J.W., Wang Y., *Ion Beam Analysis Fundamentals and Applications*, (CRC Press, 2015)
- [Our13] Ourabah, S., Amokrane, A., Abdesselam, M., *Experimental determination of layers film thicknesses*, Int. J. Phys. Sci. 8, 1537 (2013)
- [Pan15] Πανέτα, Β., Μελέτη διαφορικών ενεργών διατομών κατάλληλων για EBS και NRA (ΕΜΠ Διδακτορική διατριβή, 2015)
- [Rak11] Ρακόπουλος, Β. Μελέτη των ενεργών διατομών των αντιδράσεων  ${}^{19}F(d,p){}^{20}F$  και  ${}^{20}F(d,a){}^{17}O$ , (ΕΜΠ Μεταπτυχιακή εργασία, 2011)
- [Sch10] Schmitt, C.J. Equilibrium charge state distributions of low-z ions incident on thin selfsupporting foils, (PhD Thesis, Notre Dame, Indiana, 2010)
- [Sug97] Sugai, I., *An application of a new type deposition method to nuclear target preparation*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 397, 81 (1997)
- [Val71] Valenzuela, A., Eckhardt, J.C., Preparation of Extremely Thin Self-Supporting Metal Foils, Rev. Sci. Instr. 42, 127 (1971)
- [Wal94] Waloschek, P. The Infancy of Particle Accelerators: Life and Work of Rolf Wideröe, Vieweg, (1994)

Κ. Τσαμπά

[Wei79] Weissler, G.L., Carlson, R.W. Methods of Experimental Physics, Volume 14, Vacuum Physics and Technology Academic Press Inc. (1979), pp 180

[Wol95] Wolf, B. Handbook of Ion Sources, (CRC Press, 1995) pp 47-, ISBN 978-0-8493-2502-1