



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών &  
Φυσικών Επιστημών  
Τομέας Φυσικής

Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Φυσικών  
Επιστημών «Δημόκριτος»  
Ινστιτούτο Πυρηνικής & Σωματιδιακής Φυσικής  
Εργαστήριο Επιταχυντή Tandem

Μεταπτυχιακή Εργασία Δ.Π.Μ.Σ.  
«Φυσική & Τεχνολογικές Εφαρμογές»

---

**Έλεγχος Αξιοπιστίας Διαφορικών Ενεργών Διατομών  
Ελαστικής Σκέδασης Πρωτονίων σε στόχο Φυσικού  
Βορίου**

---

**Σταματόπουλος Ν. Αθανάσιος**

Επιβλέπων

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Κόκκορης Μιχαήλ

Οκτώβριος 2014





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών  
Τομέας Φυσικής

---

**Έλεγχος Αξιοπιστίας Διαφορικών Ενεργών Διατομών  
Ελαστικής Σκέδασης Πρωτονίων σε στόχο Φυσικού Βορίου**

---

**Σταματόπουλος Ν. Αθανάσιος**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Καθηγήτρια ΕΜΠ  
Βλαστού-Ζάννη Ρόζα

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ  
Κοκκορης Μιχαήλ

Ερευνητής Β, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος  
Λαγογιάννης Αναστάσιος





*"The scientist is not a person who gives the right answers,  
he is the one who asks the right questions."*

Claude Levi-Strauss



# Περιεχόμενα

|                    |    |
|--------------------|----|
| Κατάλογος Σχημάτων | vi |
|--------------------|----|

|                   |     |
|-------------------|-----|
| Κατάλογος Πινάκων | vii |
|-------------------|-----|

|          |    |
|----------|----|
| Περίληψη | ix |
|----------|----|

|          |    |
|----------|----|
| Abstract | xi |
|----------|----|

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| <b>I Στοιχεία Φυσικής</b> | <b>1</b> |
|---------------------------|----------|

|                   |                 |          |
|-------------------|-----------------|----------|
| <b>Κεφάλαιο 1</b> | <b>Εισαγωγή</b> | <b>3</b> |
|-------------------|-----------------|----------|

|       |   |   |
|-------|---|---|
| 1.1   | Διαφορική Ενεργός Διατομή                                 | 3 |
| 1.2   | Τεχνικές Φασματοσκοπίας Φορτισμένων Σωματιδίων            | 4 |
| 1.2.1 | Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford                   | 4 |
| 1.2.2 | Φασματοσκοπία Ελαστικής Οπισθοσκέδασης                    | 6 |
| 1.3   | Έλεγχος Αξιοπιστίας Ενεργών Διατομών                      | 6 |
| 1.4   | Το σύστημα $p + {}^{nat}B$                                | 7 |
| 1.5   | Τεχνική $\Delta E - E$ -Ταυτοποίηση/Αναγνώριση Σωματιδίων | 8 |

|                   |                      |           |
|-------------------|----------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 2</b> | <b>Μελέτη Στόχων</b> | <b>11</b> |
|-------------------|----------------------|-----------|

|       |                                  |    |
|-------|----------------------------------|----|
| 2.1   | Κατασκευή των στόχων             | 11 |
| 2.1.1 | Παστίλιες Φυσικού Βορίου         | 11 |
| 2.1.2 | Εξάχνωση λεπτού στρώματος Χρυσού | 11 |
| 2.2   | Χαρακτηρισμός Στόχου             | 12 |

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 3</b> | <b>Μελέτη Ανιχνευτών</b>                                  | <b>15</b> |
| 3.1               | Επιλογή βέλτιστου πάχους $\Delta E$ ανιχνευτών            | 15        |
| 3.2               | Μέτρηση πάχους $\Delta E$ ανιχνευτών                      | 16        |
| <b>Κεφάλαιο 4</b> | <b>Πειραματική Διάταξη</b>                                | <b>19</b> |
| 4.1               | Επιταχυντική Διάταξη                                      | 19        |
| 4.2               | Θάλαμος Σκέδασης-Στόχοι-Τηλεσκόπια                        | 20        |
| 4.3               | Ηλεκτρονική Διάταξη                                       | 21        |
| <b>Κεφάλαιο 5</b> | <b>Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων</b>                     | <b>23</b> |
| 5.1               | Προετοιμασία των Δεδομένων                                | 23        |
| 5.2               | Τελική Ανάλυση  | 26        |
| 5.2.1             | Ενεργειακή Βαθμονόμηση                                    | 27        |
| 5.2.2             | Μέτρηση Πάχους Χρυσού- $MgB_2$                            | 27        |
| 5.2.3             | Υπολογισμός του παράγοντα $Q\Omega$                       | 28        |
| 5.2.4             | Εύρεση λοιπών παραμέτρων                                  | 29        |
| 5.2.5             | Τελικά Αποτελέσματα                                       | 29        |
| 5.3               | Ανάλυση πειραματικών φασμάτων με αφαίρεση υποβάθρου       | 31        |
| <b>II</b>         | <b>Τεχνικά Στοιχεία</b>                                   | <b>37</b> |
| <b>Κεφάλαιο 6</b> | <b>Ανάπτυξη Συστήματος Λήψης και Καταγραφής Δεδομένων</b> | <b>39</b> |
| 6.1               | Computer Automated Measurement And Control-CAMAC          | 39        |
| 6.2               | Σύστημα καταγραφής δεδομένων-DAQ                          | 40        |
| 6.2.1             | Περιγραφή της διαδικασίας λειτουργίας του κώδικα          | 40        |
| 6.2.2             | Διαδικασία καταγραφής                                     | 41        |
| 6.2.3             | Γραφική Διεπιφάνεια Αλληλεπίδρασης-GUI                    | 43        |
| 6.2.4             | Έλεγχος σωστής λειτουργίας του συστήματος καταγραφής      | 45        |
| <b>Κεφάλαιο 7</b> | <b>Πηγαίος Κώδικας</b>                                    | <b>47</b> |
| 7.1               | DAQ   | 47        |
| 7.2               | Επιλογή Σημάτων   | 57        |
| 7.3               | Μετατροπή .ενηταρχείων σε μορφή ascii                     | 61        |
| 7.4               | Εξομάλυνση Φασμάτων                                       | 62        |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Παράρτημα α | Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη | 63 |
|-------------|---|----|

|             |                   |    |
|-------------|-------------------|----|
| Παράρτημα β | Μακροεντολές Root | 67 |
|-------------|-------------------|----|

|      |                                 |    |
|------|---------------------------------|----|
| β'.1 | Γράφημα από αρχείο μορφής ascii | 67 |
|------|---------------------------------|----|

|      |   |    |
|------|---|----|
| β'.2 | Κατασκευή Ιστογράμματος από αρχείο μορφής ascii | 69 |
|------|---|----|

|      |   |    |
|------|---|----|
| β'.3 | Κατασκευή Ιστογράμματος χρησιμοποιώντας ενεργειακή βαθμονόμηση και σκίαση | 71 |
|------|---|----|

|  |              |    |
|--|--------------|----|
|  | Βιβλιογραφία | 73 |
|--|--------------|----|



# Κατάλογος Σχημάτων

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Σχηματική αναπαράσταση της σκέδαση ενός σωματιδίου από έναν σταθερό στόχο . . . . .   | 4  |
| 1.2  | Αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής πριν και μετά την σκέδαση . . . . .  | 5  |
| 1.3  | Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford . . . . .   | 6  |
| 1.4  | Τα ενεργειακά διαγράμματα των αντιδράσεων $^{10}B(p, p_0)^{10}B$ και $^{11}B(p, p_0)^{11}B$ . . . . .   | 7  |
| 1.5  | Φάσματα ελαστικής και μη ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από $^{nat}B$ για ενέργεια $E_p = 1.5MeV$ σε γωνία $170^\circ$ . Φαίνεται χαρακτηριστικά η σημαντική συμβολή της αντίδρασης υποβάθρου $(p, \alpha)$ . Δεδομένα [6],[7],[8],[9]. . . . . | 7  |
| 1.6  | Πειραματικές διαφορικές ενεργές διατομές της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από $^{10}B$ , $^{11}B$ για γωνίες $120^\circ$ και $170^\circ$ , Δεδομένα [10],[11],[12],[13],[14] . . . . .  | 8  |
| 1.7  | Διέλευση ενός σωματιδίου από ένα τηλεσκόπιο $\Delta E - E$ . . . . .  | 8  |
| 1.8  | Απώλεια ενέργειας πρωτονίων και σωματιδίων $\alpha$ στο Πυρίτιο . . . . .   | 9  |
| 2.1  | Το χημείο και ο εξαχνωτήρας του εργαστηρίου Tandemτου Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος . . . . .   | 12 |
| 2.2  | Σχηματική αναπαράσταση της εξάχνωσης χρυσού σε παστίλια φυσικού Βορίου . . . . .  | 12 |
| 3.1  | Εμβέλεια πρωτονίων και σωματιδίων $\alpha$ στο πυρίτιο. Δεδομένα : SRIM[15]. . . . .  | 15 |
| 3.2  | Σχηματική αναπαράσταση των της γεωμετρίας τοποθέτησης των τηλεσκοπιών . . . . .   | 16 |
| 3.3  | Μέτρηση πάχους $\Delta E$ ανιχνευτών χρησιμοποιώντας τριπλή πηγή σωματιδίων $\alpha$ . . . . .  | 17 |
| 4.1  | Σχηματική αναπαράσταση του επιταχυντή TANDEMστο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» . . . . .   | 20 |
| 4.2  | Η διάταξη των τηλεσκοπιών και των στόχων μέσα στον θάλαμο σκέδασης . . . . .  | 20 |
| 4.3  | Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης, ανάγνωσης και σκανδαλισμού του σήματος . . . . .   | 21 |
| 5.1  | Σχηματικό διάγραμμα των σταδίων της προ-ανάλυσης και της τελικής ανάλυσης . . . . .   | 23 |
| 5.2  | Τυπικά φάσματα καταγραφής ενός τηλεσκοπίου $\Delta E - E$ . . . . .   | 24 |
| 5.3  | Το banana plotαπό τις αντιδράσεις $(p, p)$ και $(p, \alpha)$ . Φαίνεται επίσης και η περιοχή επιλογής των χρήσιμων δεδομένων. . . . .   | 24 |
| 5.4  | Προβληματικό φάσμα $E$ ανιχνευτή με βυθίσματα και υψώματα . . . . .   | 25 |
| 5.5  | Εξομάλυνση και ανακατανομή των προβληματικών φασμάτων . . . . .   | 25 |
| 5.6  | Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα SimNRA . . . . .   | 26 |
| 5.7  | Η ενεργειακή βαθμονόμηση των $E$ ανιχνευτών . . . . .   | 27 |
| 5.8  | Μέτρηση πάχους Χρυσού με χρήση αξιολογημένων διαφορικών ενεργών διατομών Μαγνησίου . . . . .  | 28 |
| 5.9  | Ενδεικτικό φάσμα ανάλυσης . . . . .   | 29 |
| 5.10 | Γωνιακή εξάρτηση της αντίδρασης $^{11}B(p, p)^{11}B$ για τις γωνίες $170^\circ$ και $165^\circ$ . . . . .   | 30 |

|   |    |
|---|----|
| 5.11 Φάσματα ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από πυρήνες φυσικού Βορίου για διαφορετικές διαφορικές ενεργές διατομές. . . . .  | 31 |
| 5.12 Ενδεικτική καμπύλη ταυτοποίησης των σωματιδίων $\alpha$ και προβολή της στον άξονα του ανιχνευτή $E$ . $E_p = 1.5 MeV$ , $170^\circ$ . . . . .   | 32 |
| 5.13 Ανάλυση με αφαίρεση γραμμικού υποβάθρου . . . . .  | 32 |
| 5.14 Πειραματικά και προσομοιωμένα φάσματα $^{nat}B(p,p)^{nat}B$ για γωνία σκέδασης $120^\circ$ με χρήση της τεχνικής $\Delta E - E$ (αριστερή στήλη) και γραμμικής αφαίρεσης $(p, \alpha)$ υποβάθρου(δεξιά στήλη). . . . . | 34 |
| 5.15 Πειραματικά και προσομοιωμένα φάσματα $^{nat}B(p,p)^{nat}B$ για γωνία σκέδασης $170^\circ$ με χρήση της τεχνικής $\Delta E - E$ (αριστερή στήλη) και γραμμικής αφαίρεσης $(p, \alpha)$ υποβάθρου(δεξιά στήλη). . . . . | 35 |
| 6.1 Σχηματική αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας του DAQ . . . . .  | 39 |
| 6.2 Σχηματική αναπαράσταση των της γεωμετρίας τοποθέτησης των τηλεσκοπίων . . . . .   | 41 |
| 6.3 Δημιουργία χρονικής πύλης, για την καταγραφή και λήψη δεδομένων . . . . .   | 42 |
| 6.4 Η καρτέλα Device Panel . . . . .  | 43 |
| 6.5 Η καρτέλα Editor Panel . . . . .  | 43 |
| 6.6 Η καρτέλα Control Panel . . . . .   | 44 |
| 6.7 Η καρτέλα Log . . . . .   | 45 |



# Κατάλογος Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Τα ηλεκτρονικά των μετρήσεων . . . . .   | 22 |
| 5.1 Αποτελέσματα ελέγχου αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 120° χρησιμοποιώντας την τεχνική $\Delta E - E$ . . . . .   | 31 |
| 5.2 Αποτελέσματα ελέγχου αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 170° χρησιμοποιώντας την τεχνική $\Delta E - E$ . . . . .   | 31 |
| 5.3 Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 120° χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση στην ίδια ενεργειακή περιοχή με την αντίστοιχη της τεχνικής $\Delta E - E$ . . . . . | 33 |
| 5.4 Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 170° χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση στην ίδια ενεργειακή περιοχή με την αντίστοιχη της τεχνικής $\Delta E - E$ . . . . . | 33 |
| 5.5 Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 120° χρησιμοποιώντας επιφανειακή ολοκλήρωση . . . . .  | 33 |
| 5.6 Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 170° χρησιμοποιώντας επιφανειακή ολοκλήρωση . . . . .  | 34 |



## Περίληψη

Η χρήση των υπάρχουσών τεχνικών μελέτης υλικών κατά βάθος, εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των διαθέσιμων πειραματικών διαφορικών ενεργών διατομών που αφορούν στις εμπλεκόμενες πυρηνικές αντιδράσεις. Δυστυχώς στις ήδη υπάρχουσες πειραματικές διαφορικές ενεργές διατομές δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη έλεγχος αξιοπιστίας τους. Η διαδικασία ελέγχου αξιοπιστίας, δηλαδή η επικύρωση των διαφορικών ενεργών διατομών μέσω της λήψης φάσματος παχέος, ομογενούς και γνωστής σύστασης στόχου ακολουθούμενο από λεπτομερή προσομοίωση, είναι συνεπώς υποχρεωτική. Ο εν λόγω έλεγχος μπορεί επίσης να παρέχει πληροφορίες για τις ελεύθερες παραμέτρους των εκάστοτε πυρηνικών μοντέλων, τα οποία χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση των διαφορικών ενεργών διατομών σκέδασης ή να δώσει αντίστοιχα σημαντικές πληροφορίες για τις αβεβαιότητες στις οποίες αυτές είναι ακριβείς. Η εν λόγω υψηλής ακρίβειας διαδικασία οφείλει να εφαρμοστεί στην μελέτη της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από υπέρ-ελαφρείς πυρήνες όπου είναι έντονη η συνεισφορά πυρηνικών αντιδράσεων  $(p, \alpha)$ .

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται τον έλεγχο αξιοπιστίας της ελαστικής σκέδασης  $^{nat}B(p, p)$ . Το Βόριο χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία ημιαγωγών ως πρόσμειξη σε υποστρώματα Πυριτίου και Γερμανίου καθώς και ως επίχρισμα στα κελύφη πυρηνικών αντιδραστήρων. Στο πείραμα, το οποίο έλαβε χώρα στο εργαστήριο του επιταχυντή Tandem, στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής στο Εθνικό Κέντρο Φυσικών Ερευνών «Δημόκριτος», χρησιμοποιήθηκαν παστίλιες Βορίου υψηλής πυκνότητας. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ενεργειακό εύρος  $1.5 - 3.3 MeV$  για δυο γωνίες οπισθοσκέδασης,  $170^\circ$  και  $120^\circ$ . Λεπτό στρώμα χρυσού έχει εξαχρωθεί στις παστίλιες, για λόγους κανονικοποίησης.

Τηλεσκόπια Πυριτίου  $\Delta E - E$ , τοποθετήθηκαν σε κάθε γωνία, αξιοποιώντας την διαφορετική απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής μεταξύ ελαστικά σκεδαζομένων πρωτονίων και σωματιδίων  $\alpha$ . Για να χρησιμοποιηθεί και να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική, ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη ενός συστήματος ανάγνωσης και λήψης δεδομένων. Ένα τέτοιο σύστημα αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας στην πλατφόρμα KMax της Sparrow Corporation, χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες Java. Η ίδια τεχνική, βασισμένη σε γεγονός προς γεγονός ανάγνωση και λήψη δεδομένων χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά CAMAC, θα χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά πειράματα αντιδράσεων  $(d, p)$ ,  $(d, \alpha)$ ,  $(d, d)$ .

Η ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας συγχρηματοδοτήθηκε μέσω του έργου «Υποτροφίες ΙΚΥ» από πόρους του ΕΠ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου(ΕΚΤ) του ΕΣΠΑ 2007-2013 με αριθμό σύμβασης 2013-ΕΣΠΑ-ΠΕ3-1991.





# Abstract

The implementation of the existing Ion Beam Analysis (I.B.A.) depth profiling techniques, critically depends on the accuracy of the available differential cross sections for the reactions involved. Unfortunately the existing experimentally determined differential cross-section datasets, as well as, the evaluated ones are still not adequately validated. A carefully designed benchmarking experimental procedure (i.e. the validation of differential cross-section data via the acquisition of thick target spectra from uniform targets of known composition followed by their detailed simulation) is thus mandatory. Benchmarking can also provide feedback for the adjustment of the parameters of the nuclear model used in the evaluation process and can help in assigning realistic uncertainties to the cross sections. This high precision procedure is seriously impeded in the case of the elastic scattering of protons by certain ultra-low  $Z$  nuclei by the existence of background contributions originating from  $(p, \alpha)$  reactions.

The present work deals with the benchmarking of  $^{nat}B(p, p)$  since boron is widely used in the semiconductor industry as a dopant for *Si* and *Ge* substrates let alone its use as an essential ingredient of hard coatings on the walls of thermonuclear plants. The experiment was performed using highly pressurized Boron pellets, in the energy range of 1.5 – 3.3 MeV, for two backward angles namely at 170° and 120°. A thin layer of gold was evaporated on each target for normalization purposes.

The experiment were performed in the Tandem Accelerator Laboratory, at the Institute of Nuclear and Particle Physics located at the National Center for Scientific Research "Demokritos", Athens, Greece.

A  $\Delta E - E$  silicon telescope was mounted at each angle exploiting the difference in the stopping power between elastically scattered protons and  $\alpha$ -particles. To implement this technique, a Data Acquisition System had to be developed. Such a system was built from scratch in house, using a relevant platform tool from Sparrow Corporation, KMax that is and making use of Java libraries. This technique, using event-by-event data acquisition based on standard CAMAC electronics, will be further implemented in the case of  $d$ -induced reactions in the near future.

This work has been supported by the European Community and the Greek Government through the project 'IKY scholarships' and ESPA 2007-2013 by contract no. 2013-ΕΣΠΑ-ΠΕ3-1991.





**Μέρος Ι**

**Στοιχεία Φυσικής**





# Εισαγωγή

Ο ποσοτικός και στοιχειομετρικός χαρακτηρισμός ενός δείγματος, είναι πολλές φορές απαραίτητος τόσο σε ερευνητικές όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές καθώς και σε περιπτώσεις ανάλυσης αρχαιολογικών ευρημάτων. Η πυρηνική φυσική προσφέρει σχετικές τεχνικές και μεθόδους, οι οποίες είναι μη καταστροφικές και αρκετά ακριβείς σε σχέση με άλλες υπάρχουσες, χημικές ή φυσικές (π.χ. φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων- $x$ ) καθώς πέρα από ακριβή ποσοτικό και στοιχειομετρικό χαρακτηρισμό παρέχουν πληροφορίες κατά βάθους συγκέντρωσης (depth profiling). Στην παρούσα εργασία αντικείμενο μελέτης αποτελεί ένα δείγμα φυσικού Βορίου ( $^{nat}B$ ), καθώς η χρήση του είναι ευρεία τόσο στην βιομηχανία ημιαγωγών, όπου αποτελεί υλικό πρόσμιξης υποστρωμάτων Πυριτίου ( $Si$ ) και Γερμανίου ( $Ge$ ), όσο και στην πυρηνική τεχνολογία όπου η χρήση του σαν επίχρισμα στα κελύφη των πυρηνικών αντιδραστήρων αποτελεί έναν από τους κυριότερους τρόπους επιβράδυνσης, των παραγομένων από σχάσεις, νετρονίων.

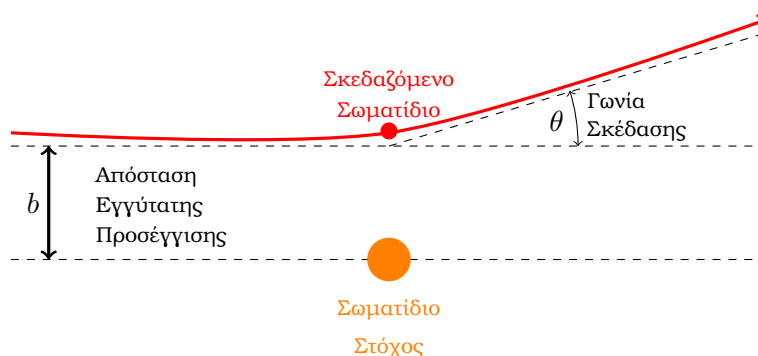
## 1.1 Διαφορική Ενεργός Διατομή

Ο χαρακτηρισμός ενός δείγματος, όπως και κάθε μελέτη ενός φυσικού συστήματος, απαιτεί αρχικά την διέγερσή του. Στην παρούσα εργασία η εν λόγω διέγερση είναι η αλληλεπίδραση σωματιδίων με το υπό εξέταση δείγμα, η πιθανότητα ανά μονάδα επιφάνειας της οποίας εκφράζεται από την διαφορική ενεργό διατομή. Ο πρώτος ο οποίος μελέτησε την σκέδαση σωματιδίων ήταν ο Νεοζηλανδός Ernest Rutherford μαζί με τους μαθητές του Hans Geiger και Ernest Marsden το 1909, στο διάσημο πείραμα σκέδασης σωματιδίων  $\alpha$  από πυρήνες χρυσού[1] όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1. Η μαθηματική έκφραση για την ομώνυμη σκέδαση δίνεται από την εξίσωση 1.1[2, σχ. 4.4], στο σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου.

$$\sigma = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4 \left[ \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta} + M_2 \cos \theta \right]^2}{M_2 \sin^4 \theta \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta}} \quad (1.1)$$

όπου

- $Z_1$ : ο ατομικός αριθμός του προσπίπτοντος σωματιδίου
- $Z_2$ : ο ατομικός αριθμός του σωματιδίου-στόχου
- $e$ : το φορτίο του ηλεκτρονίου
- $E$ : η ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου
- $M_2$ : η μάζα του σωματιδίου-στόχου
- $M_1$ : η μάζα του προσπίπτοντος σωματιδίου
- $\theta$ : η γωνία σκέδασης μεταξύ των δύο σωματιδίων



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της σκέδαση ενός σωματιδίου από έναν σταθερό στόχο

Η έκφραση 1.1, όμως είναι αναλυτική μόνο για την περίπτωση της σκέδασης Rutherford. Σε κάθε άλλη περίπτωση η διαφορική ενεργός διατομή δίνεται από την σχέση 1.2[3]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Y}{N(Q\Omega)} \quad (1.2)$$

όπου

- ο  $N$ : το πάχος του στόχου-δείγματος
- ο  $Q$ : ο αριθμός των σωματιδίων που προσπίπτουν στον στόχο
- ο  $\Omega$ : η στερεά γωνία ανίχνευσης
- ο  $Y$ : ο αριθμός των καταγεγραμμένων σωματιδίων στην στερεά γωνία  $\Omega$ .

Η ακριβής γνώση της διαφορικής ενεργής διατομής της ελαστικής σκέδασης, μεταξύ ενός σταθερού στόχου  $A$  και ενός προσπίπτοντος σωματιδίου  $x^1$  είναι αυτή που θα οδηγήσει στο ποσοτικό ή στοιχειομετρικό χαρακτηρισμό ενός δείγματος χρησιμοποιώντας σχετικές πυρηνικές τεχνικές όπως είναι η Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy-RBS) και η γενικευμένη μέθοδος-τεχνική, Φασματοσκοπία Ελαστικής Οπισθοσκέδασης (Elastic Backscattering Spectroscopy-EBS).

## 1.2 Τεχνικές Φασματοσκοπίας Φορτισμένων Σωματιδίων

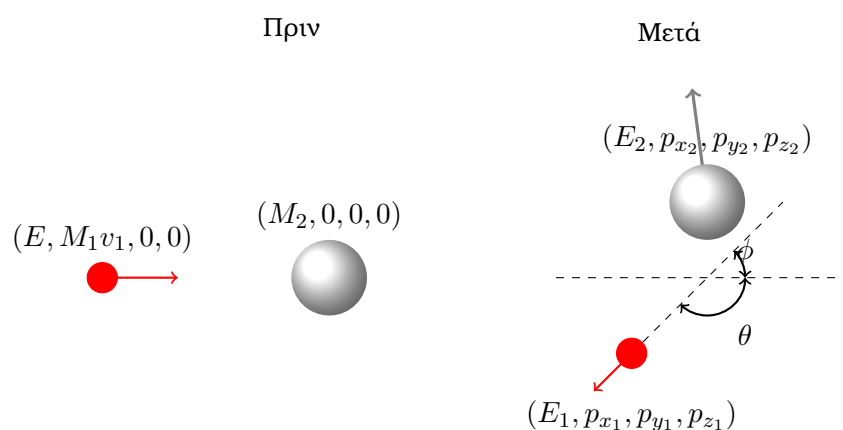
Η φασματοσκοπία φορτισμένων σωματιδίων κάνοντας χρήση δέσμης ιόντων που προέρχεται από επιταχυντή (Ion Beam Analysis-I.B.A.), υλοποιείται κάνοντας χρήση αρκετών τεχνικών, όπως Ανάλυση Πυρηνικών Αντιδράσεων (Nuclear Reaction Analysis - NRA), Ανάλυση Ανίχνευσης Ελαστικά Σκεδαζομένων Σωματιδίων (Elastic Recoil Detection Analysis - ERDA), Φασματοσκοπία Ακτίνων  $\gamma$  προερχόμενων από αλληλεπιδράσεις πρωτονίων (Proton Induced Gamma Emission - PIGE) καθώς επίσης και από τις δύο σχετικές με την παρούσα εργασία, την Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy - RBS) και την Φασματοσκοπία Ελαστικής Οπισθοσκέδασης (Elastic Backscattering Spectroscopy- EBS).

### 1.2.1 Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford

Η φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford, αφορά στην μελέτη δειγμάτων-πυρήνων με μεγάλο ατομικό αριθμό ( $Z > 60$ ) [4, σελ.:14], όταν η προσπίπτουσα δέσμη ιόντων έχει ενέργεια της τάξης των  $MeV$ . Η εν λόγω τεχνική μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με το πάχος του

<sup>1</sup>Η εν λόγω σκέδαση συμβολίζεται ως  $A(x, x)A$

υπό εξέταση δείγματος, αν είναι γνωστή η σύστασή του, καταμετρώντας το πλήθος των σκεδαζομένων σωματιδίων σε μια στερεά γωνία ανίχνευσης  $\Omega$ , για δεδομένο πλήθος προσπίπτοντων ιόντων  $Q$ , κάνοντας ένα σχετικά απλό υπολογισμό (σχ.: 1.2). Η ενεργός διατομή θα υπολογιστεί από την σχέση 1.1, συνεπώς ο μοναδικός άγνωστος στο σύστημα των δύο εξισώσεων είναι το πάχος του στόχου. Ένας άλλος τρόπος εύρεσης του πάχους, ο οποίος δίνει και πληροφορία σύστασης-στοιχειομετρίας, συμπεριλαμβάνει στον υπολογισμό την απώλεια ενέργειας στον στόχο, κάνοντας χρήση του κινηματικού παράγοντα  $K$ , ο υπολογισμός του οποίου είναι απλή εφαρμογή των βασικών αρχών διατήρησης ενέργειας και ορμής.



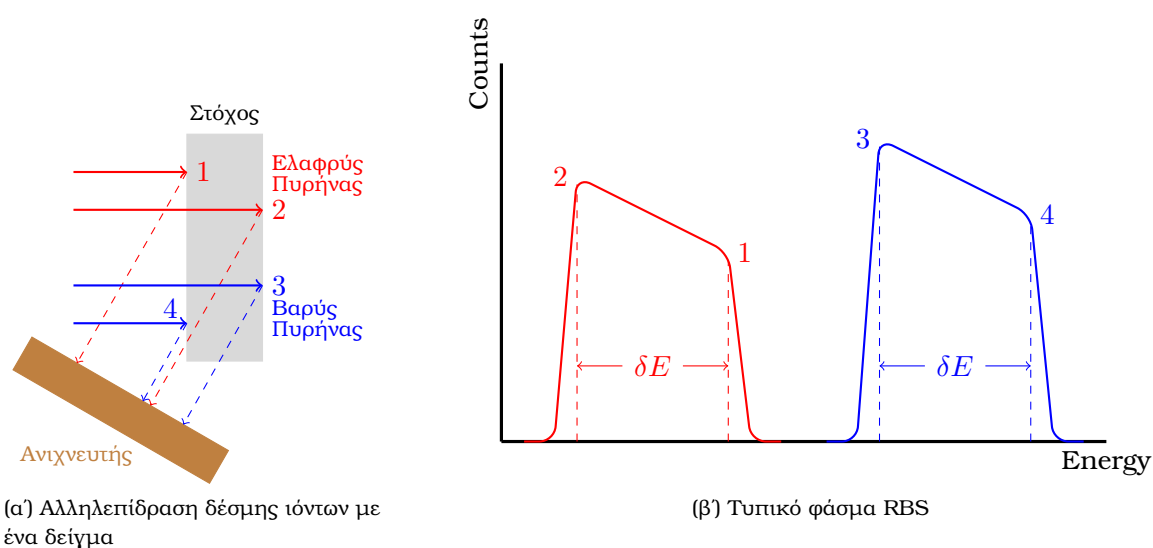
Σχήμα 1.2: Αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής πριν και μετά την σκέδαση

Συνεπώς αν πριν από την σκέδαση το εισερχόμενο σωματίδιο είχε ενέργεια  $E$ , μετά από αυτήν θα έχει ενέργεια  $E_1 = K \cdot E$  [3], όπου

$$K \equiv \frac{M_1^2}{(M_1 + M_2)^2} \left\{ \cos \theta \pm \sqrt{\left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 - \sin^2 \theta} \right\}^2 \quad (1.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το πρόσημο + εφαρμόζεται όταν  $M_1 < M_2$ , ενώ το - όταν  $M_1 > M_2$ . Η σκέδαση του σωματιδίου από τον στόχο, σε γωνία  $\theta$ , δεν θα συμβεί απαραίτητα επιφανειακά. Το σωματίδιο θα εισχωρήσει μέσα στο δείγμα, θα χάσει ενέργεια από αλληλεπιδράσεις Coulomb με τα ατομικά ηλεκτρόνια του στόχου, που περιγράφονται από την εξίσωση Bethe-Bloch (βλ. Παρ/μα α') και εν τέλει θα σκεδαστεί, στην γωνία  $\theta$ , με ενέργεια  $E_1 = K \cdot (E - \delta E)$ , όπου  $\delta E$  είναι η απώλεια ενέργειας στον στόχο και είναι ανάλογη του πάχους του υλικού που έχει διανύσει. Στο φάσμα που προκύπτει από μια τέτοια σκέδαση (εικ.: 1.36), μπορεί κανείς να πραγματοποιήσει τόσο στοιχειομετρική ανάλυση (συγκρίνοντας τα ολοκληρώματα των κορυφών) όσο και μέτρηση πάχους μεταφράζοντας το εύρος  $\delta E$  της κάθε κορυφής σε πάχος καθώς και ανάλυση σύστασης μεταφράζοντας το επιφανειακό σήμα κάθε κορυφής σε μάζα:

- Όσο μεγαλύτερη η μάζα του πυρήνα, τόσο πιο δεξιά βρίσκεται η αντίστοιχη κορυφή (κόκκινη και μπλε κορυφή, εικ. 1.36)
- Όσο παχύτερο το δείγμα, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος  $\delta E$
- Όσο περισσότερο ένα στοιχείο έναντι κάποιου άλλου, τόσο υψηλότερη θα είναι η αντίστοιχη κορυφή
- Όσο πιο επιφανειακή η σκέδαση (για το ίδιο στοιχείο), τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια σκέδασης



Σχήμα 1.3: Φασματοσκοπία Οπισθοσκέδασης Rutherford

### 1.2.2 Φασματοσκοπία Ελαστικής Οπισθοσκέδασης

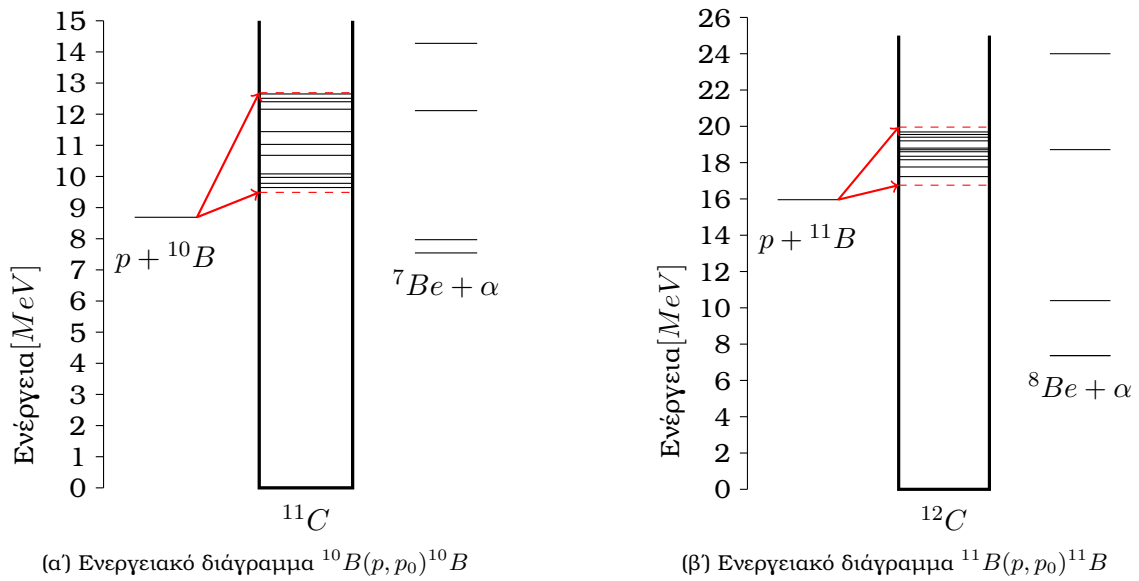
Στην περίπτωση όπου η σκέδαση δεν μπορεί να περιγραφεί κατά Rutherford, δηλαδή η ενεργός διατομή της σκέδασης δεν υπακούει στην σχέση 1.1, είναι μονόδρομος ο μεμονωμένος υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής. Μειονέκτημα είναι πως από τις σχετικές μετρήσεις δεν μπορεί να προκύψει ένας αναλυτικός και ενιαίος μαθηματικός τύπος, αλλά πρέπει να πραγματοποιηθούν μελέτες για συγκεκριμένες γωνίες, ενέργειες και συστήματα ιόντων-στόχων. Τα αποτελέσματα τέτοιων πειραμάτων, καταγράφονται στην σχετική βιβλιοθήκη της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας<sup>2</sup>, καθώς και οι εκάστοτε προσπάθειες θεωρητικής επεξεργασίας με υπολογισμούς R-Matrix, των οποίων οι παράμετροι στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις των εν λόγω πειραματικών δεδομένων. Εκτός όμως από τα πειράματα μέτρησης μη Rutherford διαφορικών ενεργών διατομών, διεξάγονται πειράματα ελέγχου αξιοπιστίας των ήδη υπάρχοντων, όπως ακριβώς συμβαίνει στην παρούσα εργασία.

## 1.3 Έλεγχος Αξιοπιστίας Ενεργών Διατομών

Τα πειράματα ελέγχου αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών ελαστικής σκέδασης, είναι προσεκτικά σχεδιασμένα πειράματα που έχουν σκοπό να επιβεβαιώσουν την ακρίβεια προγενέστερων πειραματικών δεδομένων ή να παρέχουν τις αβεβαιότητες των διαφορικών ενεργών διατομών καθώς και να δώσουν έμμεσα πληροφορία για την ισχύ πυρηνικών μοντέλων, αφού αυτά τα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται στους θεωρητικούς υπολογισμούς των παραμέτρων. Οι κύριοι λόγοι, πέρα από τα συστηματικά σφάλματα του εκάστοτε πειραματιστή και τις μεταξύ τους διαφωνίες (εικ.: 1.6α' και 1.6γ'), της μη ακριβούς μέτρησης διαφορικών ενεργών διατομών, είναι αφενός οι αβεβαιότητες στα πάχη των στόχων<sup>3</sup> και αφετέρου το ενδεχόμενο υπόβαθρο από πυρηνικές αντιδράσεις. Στην εικ.: 1.5 φαίνεται το εν λόγω υπόβαθρο που οφείλεται στην διάσπαση του  $^8\text{Be}$  ο οποίος διασπάται σε δύο πυρήνες  $^4\text{He}$ , με χρόνο ημιζωής  $6.7 \times 10^{-17}$  [5, σελ.:27] καθώς και η απ' ευθείας διάσπαση του  $^{12}\text{C}$  σε 3 σωματίδια  $\alpha$ .

<sup>2</sup>Ion Beam Analysis Nuclear Data Library

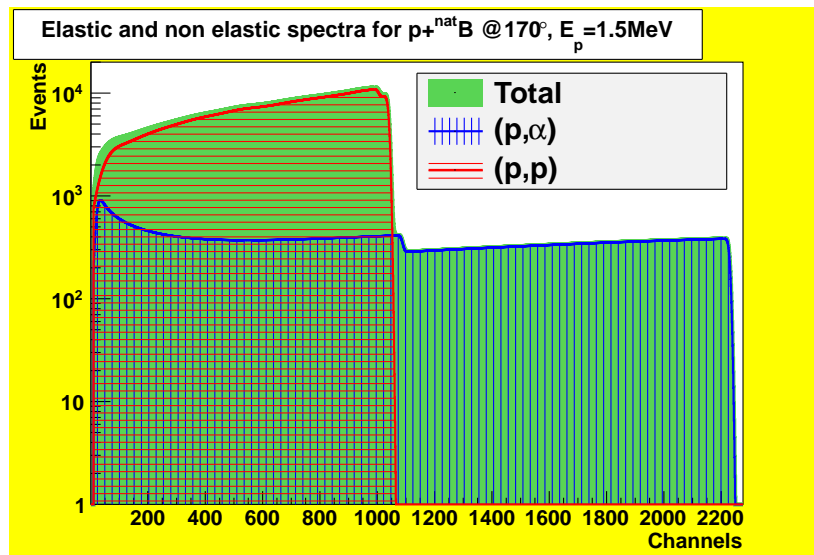
<sup>3</sup>Οι μετρήσεις ενεργών διατομών πραγματοποιούνται σε λεπτούς στόχους για να αποφεύγεται η εξάρτηση από τον ενεργειακό διασκορπισμό (energy straggling)



Σχήμα 1.4: Τα ενεργειακά διαγράμματα των αντιδράσεων  ${}^{10}B(p, p_0){}^{10}B$  και  ${}^{11}B(p, p_0){}^{11}B$

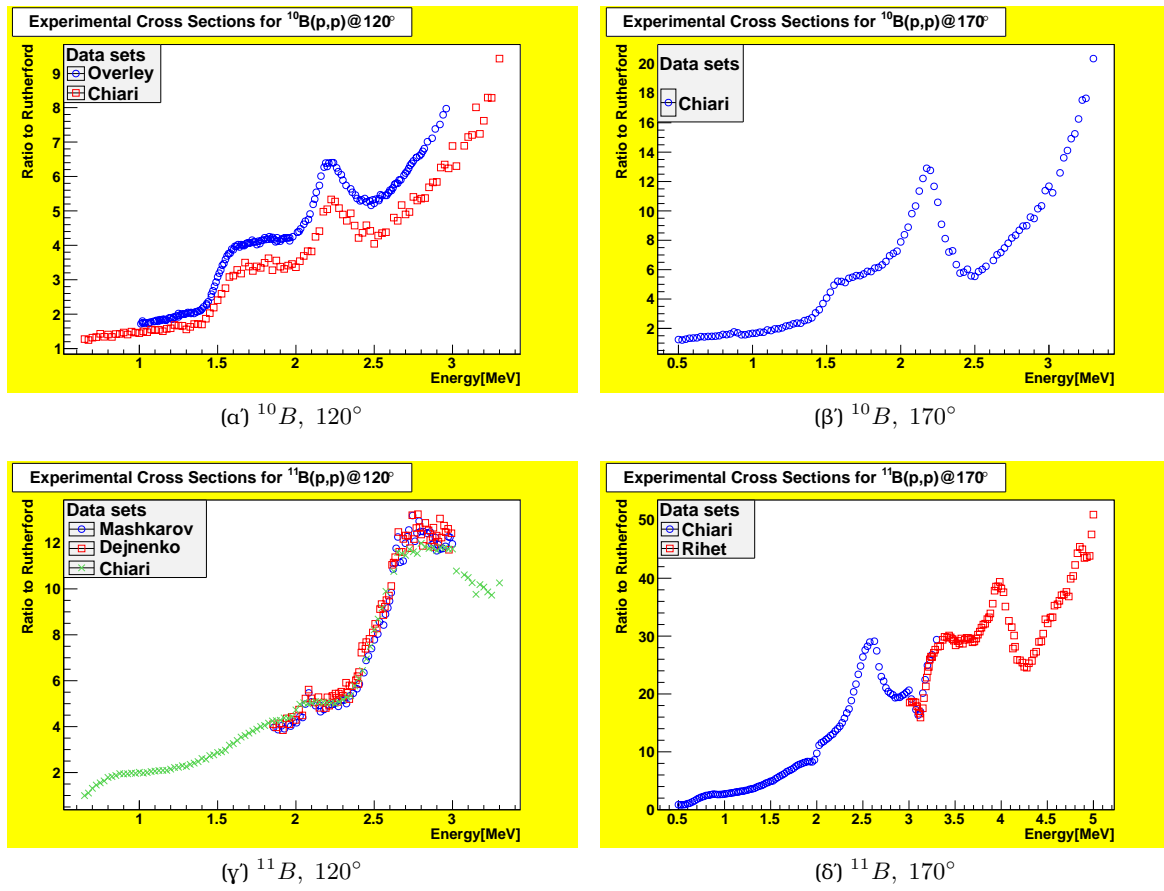
### 1.4 Το σύστημα $p + {}^{nat}B$

Το φυσικό βόριο έχει στοιχειομετρική αναλογία (19.9%, 80.1%) : ( ${}^{10}B, {}^{11}B$ ). Η ιδιαιτερότητα του, στην μέτρηση της διαφορικής ενεργής διατομής ελαστικής σκέδασης πρωτονίων<sup>4</sup>, έγκειται κυρίως στην ύπαρξη υποβάθρου από πυρηνικές αντιδράσεις ( $p, \alpha$ ). Σημαντική είναι επίσης η διάσπαση του παραγόμενου, από τον σύνθετο πυρήνα  ${}^{12}C$  (εικ.: 1.46),  ${}^8Be$  ο οποίος διασπάται σε δύο πυρήνες  ${}^4He$ , με χρόνο ημιζωής  $6.7 \times 10^{-17}$  [5, σελ.:27] καθώς και η απ' ευθείας διάσπαση του  ${}^{12}C$  σε 3 σωματίδια  $\alpha$ .



Σχήμα 1.5: Φάσματα ελαστικής και μη ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από  ${}^{nat}B$  για ενέργεια  $E_p = 1.5 MeV$  σε γωνία  $170^\circ$ . Φαίνεται χαρακτηριστικά η σημαντική συμβολή της αντίδρασης υποβάθρου ( $p, \alpha$ ). Δεδομένα [6],[7],[8],[9].

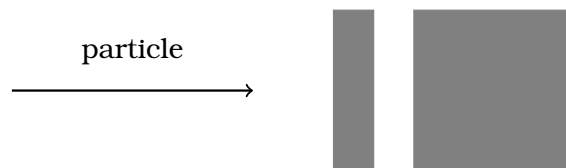
<sup>4</sup>  ${}^{10}B(p, p_0){}^{10}B$  και  ${}^{11}B(p, p_0){}^{11}B$



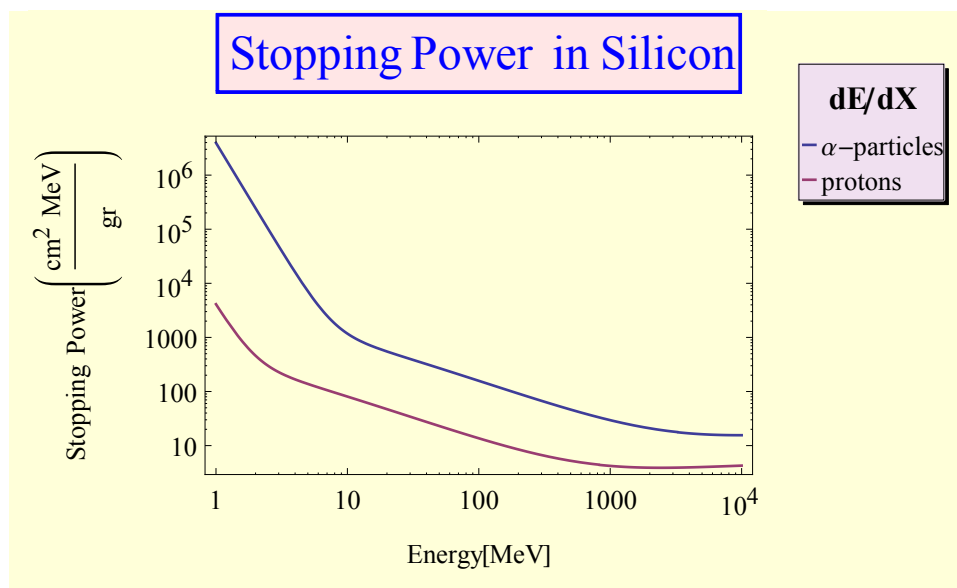
Σχήμα 1.6: Πειραματικές διαφορικές ενεργές διατομές της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  για γωνίες  $120^\circ$  και  $170^\circ$ , Δεδομένα [10],[11],[12],[13],[14]

## 1.5 Τεχνική $\Delta E - E$ - Ταυτοποίηση/Αναγνώριση Σωματιδίων

Η παρούσα εργασία, στηρίζεται αποκλειστικά στην εφαρμογή της πειραματικής μεθόδου-τεχνικής  $\Delta E - E$ . Η εν λόγω τεχνική βασίζεται στην διαφορετική εναπόθεση ενέργειας, δύο διαφορετικών σωματιδίων σε ένα δεδομένο υλικό. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.8, η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής σε ένα δεδομένο υλικό είναι χαρακτηριστική του σωματιδίου, ιδιότητα η οποία μπορεί οδηγήσει στην ταυτοποίησή του. Αυτήν η ιδιότητα θα χρησιμοποιηθεί, για τον διαχωρισμό των αντιδράσεων  $(p, p)$  και  $(p, \alpha)$ . Συγκεκριμένα, η ενέργεια που θα εναποτεθεί στον  $\Delta E$  ανιχνευτή (εικ.: 1.7), από τα δύο διαφορετικά σωματίδια που θα τον διασχίσουν, είναι αυτή η οποία θα οδηγήσει στην αναγνώρισή τους.



Σχήμα 1.7: Διέλευση ενός σωματιδίου από ένα τηλεσκόπιο  $\Delta E - E$

Σχήμα 1.8: Απώλεια ενέργειας πρωτονίων και σωματιδίων  $\alpha$  στο Πυρίτιο





# Μελέτη Στόχων

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα περιγραφεί συνοπτικά η κατασκευή των στόχων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες του πειράματος, η αιτία εξάχνωσης λεπτού στρώματος χρυσού στους στόχους καθώς και ο χαρακτηρισμός που αφορά στο πάχος του εξαχνωμένου χρυσού.

## 2.1 Κατασκευή των στόχων

Τόσο η κατασκευή όσο και η εξάχνωση λεπτού στρώματος χρυσού στους στόχους, έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Tandem, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος».

### 2.1.1 Παστίλιες Φυσικού Βορίου

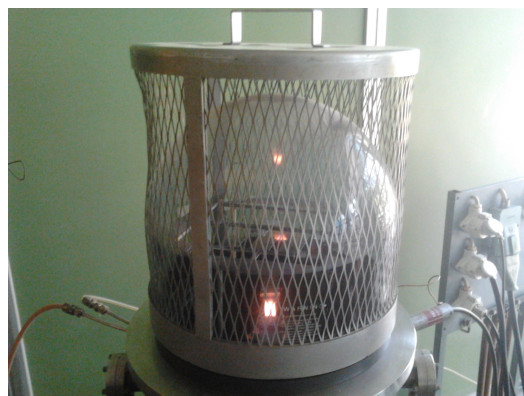
Για τις ανάγκες του πειράματος, κατασκευάστηκαν παστίλιες υψηλής καθαρότητας(99.99%) φυσικού Βορίου, το οποία παρείχε το χημείο του εργαστηρίου Tandem (εικ.: 2.1α'). Το φυσικό Βόριο, αρχικά υπό μορφή σκόνης με κόκκους διαμέτρου  $< 1\mu m$ , με χρήση ενός υδραυλικού πιεστηρίου 6 ton, σχηματίστηκε σε παστίλιες διαμέτρου 1cm και πάχους 1mm. Η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο της δέσμης ( $\equiv 1mm$ ) και το πάχος είναι τέτοιο ώστε τα ιόντα της δέσμης να εναποθέτουν όλη την ενέργειά τους στον στόχο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εμβέλεια πρωτονίων 3.5MeV σε φυσικό βόριο είναι 100 $\mu m$ [15]. Οι παστίλιες, συγκολλήθηκαν σε ειδικές υποστηρικτικές βάσεις, κατασκευασμένες από αλουμίνιο.

### 2.1.2 Εξάχνωση λεπτού στρώματος Χρυσού

Από την σχέση 1.2, είναι εμφανές ότι ο υπολογισμός της διαφορικής ενεργού διατομής, απαιτεί την καλή γνώση τόσο της στερεάς γωνίας  $\Omega$ , δηλαδή της γεωμετρίας, όσο και του πλήθους των ιόντων της δέσμης  $Q$  που προσπίπτουν στον στόχο. Αν υποθεθεί ότι η στερεά γωνία είναι γνωστή με καλή ακρίβεια, δεν συνεπάγεται το ίδιο για τον παράγοντα  $Q$  καθώς η δέσμη ιόντων που παράγεται από τον επιταχυντή, ο οποίος αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό σύστημα, υπόκειται σε αβεβαιότητες και διακυμάνσεις ως προς το πλήθος των παραγομένων ιόντων και κατ' επέκταση ως προς τον αριθμό των σωματιδίων που προσπίπτουν στον στόχο. Συνεπώς πρέπει να βρεθεί ένας πειραματικός τρόπος περιορισμού των εν λόγω αβεβαιοτήτων. Ο τρόπος αυτός, είναι η χρήση της σκέδασης Rutherford για τον Χρυσό, δηλαδή το γεγονός ότι η ενεργός διατομή της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από τον χρυσό υπακούει στην εξίσωση 1.1. Εξαχνώνοντας ένα λεπτό στρώμα Χρυσού σε έναν στόχο, και διαιρώντας τις διαφορικές ενεργές διατομές για τον χρυσό και το υλικό του στόχου, μπορεί κανείς να απαλλαγεί από τον «ενοχλητικό» παράγοντα  $Q\Omega$ , όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην σχέση 2.1

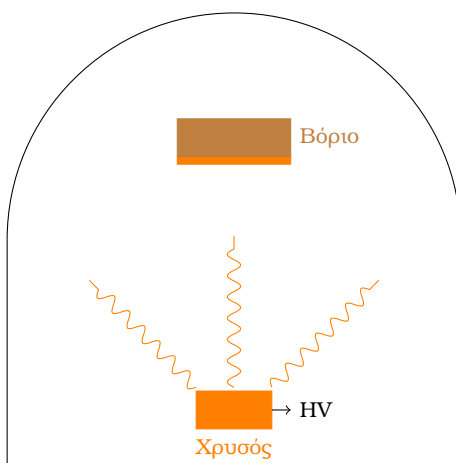


(α) Το χημείο του εργαστηρίου Tandem του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος



(β) Ο εξαχνωτήρας του εργαστηρίου Tandem του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος

Σχήμα 2.1: Το χημείο και ο εξαχνωτήρας του εργαστηρίου Tandem του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της εξαχνωσης χρυσού σε παστίλια φυσικού Βορίου

$$\frac{\frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_B}{\frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_{Au}} = \frac{\frac{Y_B}{N_B(Q\Omega)}}{\frac{Y_{Au}}{N_{Au}(Q\Omega)}} = \frac{Y_B N_{Au}}{N_B Y_{Au}} \quad (2.1)$$

Η εξαχνωση λεπτού στρώματος Χρυσού, έλαβε χώρα στον εξαχνωτήρα του εργαστηρίου Tandem (εικ.: 2.16). Η πρώτη προϋπόθεση που πρέπει να πληροί το λεπτό στρώμα χρυσού, είναι το πάχος του να μην επηρεάζει την δέσμη τόσο ως προς την απώλεια ενέργειας μέσα στο στρώμα όσο και ως προς την διεύρυνσή της. Το στρώμα χρυσού επιλέχθηκε να έχει πάχος  $1keV$ , το οποίο εξαχνώθηκε στην παστίλια φυσικού βορίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2. Το πάχος αυτό είναι τέτοιο ώστε να αγνοούνται φαινόμενα ενεργειακού διασκεδασμού.

## 2.2 Χαρακτηρισμός Στόχου

Η μάζα χρυσού που εξαχνώθηκε στην παστίλια φυσικού βορίου για δεδομένο πάχος που αντιστοιχεί σε απώλεια ενέργειας  $1keV$ , υπολογίστηκε υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή των α-

τιμών του χρυσού μέσα στον θάλαμο κενού του εξαχνωτήρα(εικ.: 2.2, σχ.: 2.2). Αυτό όμως είναι μια εξιδανίκευση, συνεπώς έπρεπε να υπολογιστεί το πάχος του χρυσού. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων- $x$ ( $x$ -ray fluorescence spectroscopy-XRF) και εδώ σε ένα πάχος χρυσού της τάξης των  $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

$$\tau = \frac{m}{2\pi d^2} \quad (2.2)$$

όπου

- $\tau$ : το πάχος του χρυσού μετά την εξάχνωση( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )
- $m$ : η μάζα του χρυσού προς εξάχνωση( $\text{mg}$ )
- $d$ : η απόσταση μεταξύ πασίλιας και χρυσού( $\text{cm}$ )

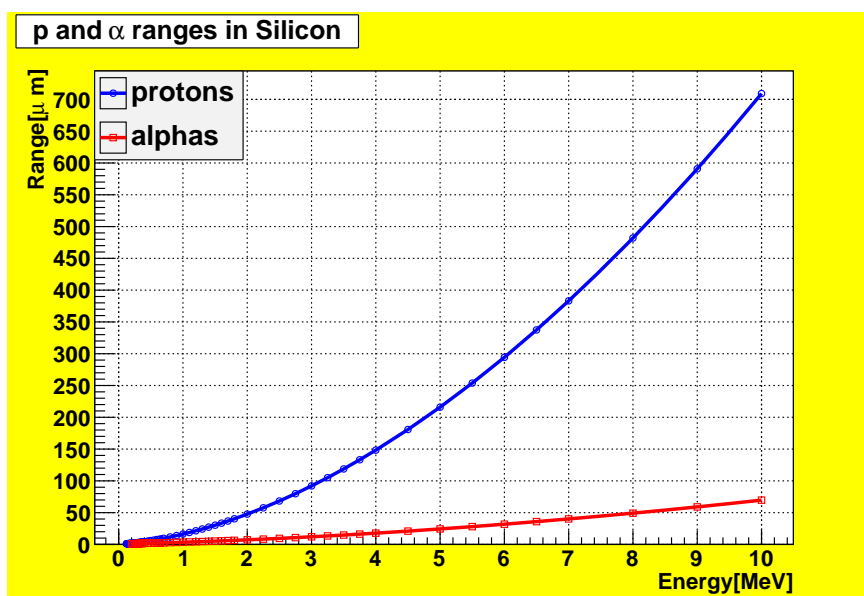


# Μελέτη Ανιχνευτών

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα κριτήρια επιλογής των παχών των  $\Delta E$  ανιχνευτών καθώς επίσης και στις μετρήσεις των εν λόγω παχών. Τέλος θα γίνει περιγραφή της τελικής πειραματικής διάταξης τόσο η γεωμετρική όσο και η ηλεκτρονική.

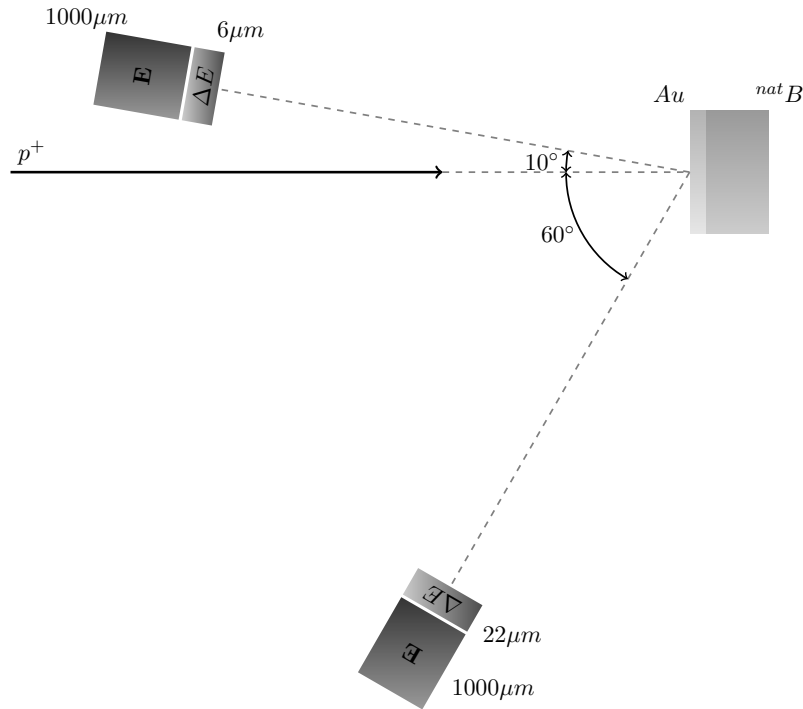
## 3.1 Επιλογή βέλτιστου πάχους $\Delta E$ ανιχνευτών

Η επιλογή του πάχους του  $\Delta E$  ανιχνευτή είναι κρίσιμη, καθώς είναι αυτή που θα οδηγήσει στον διαχωρισμό των δύο σημάτων. Η πρώτη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι το εύρος ενεργειών του πειράματος, το οποίο είναι από 1 – 3.3 MeV. Το ιδανικό σενάριο είναι όλα τα σωματίδια  $\alpha$  από τα κανάλια ( $p, \alpha$ ) να έχουν μικρότερη εμβέλεια στο πυρίτιο, στο υλικό του ανιχνευτή δηλαδή, σε σχέση με την εμβέλεια των πρωτονίων της ελαστικής σκέδασης. Πιο συγκεκριμένα, το σωματίδιο  $\alpha$  με την μέγιστη ενέργεια, πρέπει να έχει μικρότερη εμβέλεια από την αντίστοιχη του μικρότερης ενέργειας πρωτονίων. Δυστυχώς, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 δεν ικανοποιείται αυτή η προϋπόθεση, αφού η μέγιστη ενέργεια από τις ( $p, \alpha$ ) αντιδράσεις των παραγόμενων  $\alpha$  είναι 9MeV, το οποίο μεταφράζεται σε εμβέλεια 60 $\mu m$ . Αυτή η εμβέλεια, αντιστοιχεί σε πρωτόνια ενέργειας 2.50MeV, δηλαδή στο μέσο της ενεργειακής περιοχής που καλύπτει η παρούσα εργασία. Συνεπώς το ιδανικό αρχικά σενάριο για μέγιστο πάχος, δεν μπορεί να εφαρμοστεί.



Σχήμα 3.1: Εμβέλεια πρωτονίων και σωματιδίων  $\alpha$  στο πυρίτιο. Δεδομένα : SRIM[15].

Το επόμενο βήμα είναι να βρεθεί το ελάχιστο δυνατό πάχος, ώστε όλα τα πρωτόνια να διαπερνούν τον  $\Delta E$  ανιχνευτή. Για να βρεθεί αυτό, πρέπει να βρεθεί η εμβέλεια των πρωτονίων



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση των της γεωμετρίας τοποθέτησης των τηλεσκοπίων

με την ελάχιστη πιθανή ενέργεια. Αρχικά ο υπολογισμός έγινε για την ελάχιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να δώσει ο επιταχυντής και για την γωνία των  $170^\circ$ . Αυτή είναι  $850\text{keV}$ , το οποίο σημαίνει ότι η ενέργεια των ελαστικά σκεδαζομένων πρωτονίων είναι  $650\text{keV}$ , ενέργεια που αντιστοιχεί σε εμβέλεια  $9\mu\text{m}$ . Συνεπώς ο  $\Delta E$  ανιχνευτής που θα τοποθετηθεί στις  $170^\circ$ , δεν μπορεί να έχει πάχος μεγαλύτερο από  $9\mu\text{m}$ .

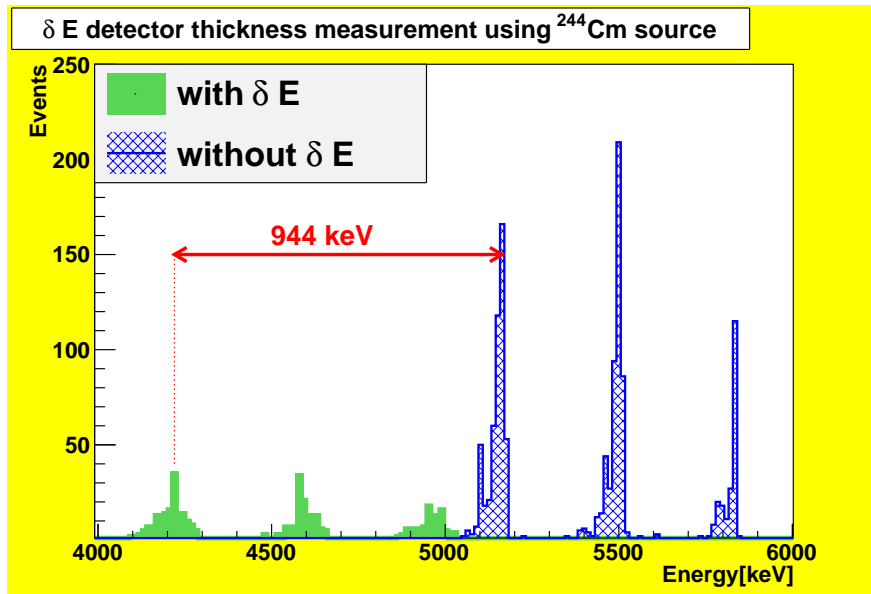
Αντίστοιχοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τις  $150^\circ$  και βάσει αυτών και των διαθέσιμων παχών ανιχνευτών επιλέχθηκαν τα πάχη και η τοποθέτηση που φαίνεται στην εικόνα 6.2. Αξίζει να σημειωθεί πως τα πάχη που φαίνονται στην εικόνα 6.2 είναι αυτά που δηλώνει ο εκάστοτε κατασκευαστής. Λόγω της ευαισθησίας των μετρήσεων, κρίνεται σκόπιμο και αναγκαίο να μετρηθούν πειραματικά τα πάχη των διαθέσιμων ανιχνευτών.

### 3.2 Μέτρηση πάχους $\Delta E$ ανιχνευτών

Η μέτρηση του πάχους των  $\Delta E$  ανιχνευτών πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση μιας τριπλής πηγής  $\alpha$   $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ . Το σκεπτικό της μέτρησης είναι σχετικά απλό: Η λήψη ενός φάσματος από έναν «παχύ» ανιχνευτή<sup>1</sup> προηγείται της λήψης φάσματος από ένα τηλεσκόπιο  $\Delta E - E$ , με ακριβώς τις ίδιες ρυθμίσεις. Ο  $\Delta E$  είναι ο προς μέτρηση πάχους ανιχνευτής. Οι κορυφές των δύο φασμάτων αναμένεται να απέχουν μεταξύ τους τόσο όσο η απώλεια ενέργειας στο  $\Delta E$  ανιχνευτή. Αυτή η ενέργεια μπορεί σχετικά εύκολα να μεταφραστεί σε μήκος και με αυτόν τον τρόπο να έχει υπολογιστεί το πάχος τους προς μελέτη ανιχνευτή. Η τριπλή πηγή που χρησιμοποιήθηκε, είναι μια πηγή σωματιδίων  $\alpha$  με 3 κύριες ενέργειες αποδιέγερσης:

1.  $5884.7\text{ keV}$  με ένταση 12%
2.  $5927.2\text{ keV}$  με ένταση 18%
3.  $5939.0\text{ keV}$  με ένταση 70%

<sup>1</sup>Τέτοιου μήκους ώστε το ανιχνευόμενο σωματίδιο να εναποθέσει όλη του την ενέργεια σε αυτόν



Σχήμα 3.3: Μέτρηση πάχους  $\Delta E$  ανιχνευτών χρησιμοποιώντας τριπλή πηγή σωματιδίων  $\alpha$

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3, τα δύο διαφορετικά φάσματα απέχουν μεταξύ τους  $944\text{keV}$ . Αυτή η απώλεια ενέργειας αντιστοιχεί σε μήκος  $6.45\mu\text{m}$ . Το μήκος αυτό υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον κώδικα SRIM[15]. Αξίζει να σημειωθεί πως πέρα από την μετατόπιση προς τα αριστερά του φάσματος, παρατηρείται και ποιοτική διαφορά, στην μορφή των κορυφών, οι οποίες παρουσιάζονται περισσότερο διευρυμένες λόγω του ενεργειακού διασκεδασμού. Αντίστοιχη μέτρηση πραγματοποιήθηκε και για τον  $\Delta E$  ανιχνευτή στις  $120^\circ$  ο οποίος βρέθηκε, δεδομένης της ακρίβειας της μέτρησης, να έχει πάχος  $22\mu\text{m}$ , όσο δηλαδή δηλώνει ο κατασκευαστής.

Η τεχνική αυτή της μέτρησης πάχους, εκμεταλλεύεται το γεγονός πως η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής των σωματιδίων  $\alpha$  είναι μεγάλη, συνεπώς το φάσμα που προκύπτει είναι αξιοποιήσιμο. Σημαντικό είναι επίσης πως πρόκειται για μια συσχετισμένη μέτρηση ως προς τις 3 κορυφές, γεγονός που οδηγεί σε περιορισμό των σφαλμάτων. Μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου αποτελεί ο ρυθμός καταγραφής, ο οποίος εξαρτάται από την ενεργότητα της πηγής και δεν μπορεί να ρυθμιστεί από τον εκάστοτε πειραματιστή.





# Πειραματική Διάταξη

Μετά την κατασκευή των στόχων, την μέτρηση του πάχους χρυσού, την τοποθέτηση των στόχων σε ειδικές βάσεις, την επιλογή των κατάλληλων ανιχνευτών καθώς και τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας τους, σειρά έχει το στήσιμο της πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο του επιταχυντή Tandem, στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής, στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος».

## 4.1 Επιταχυντική Διάταξη

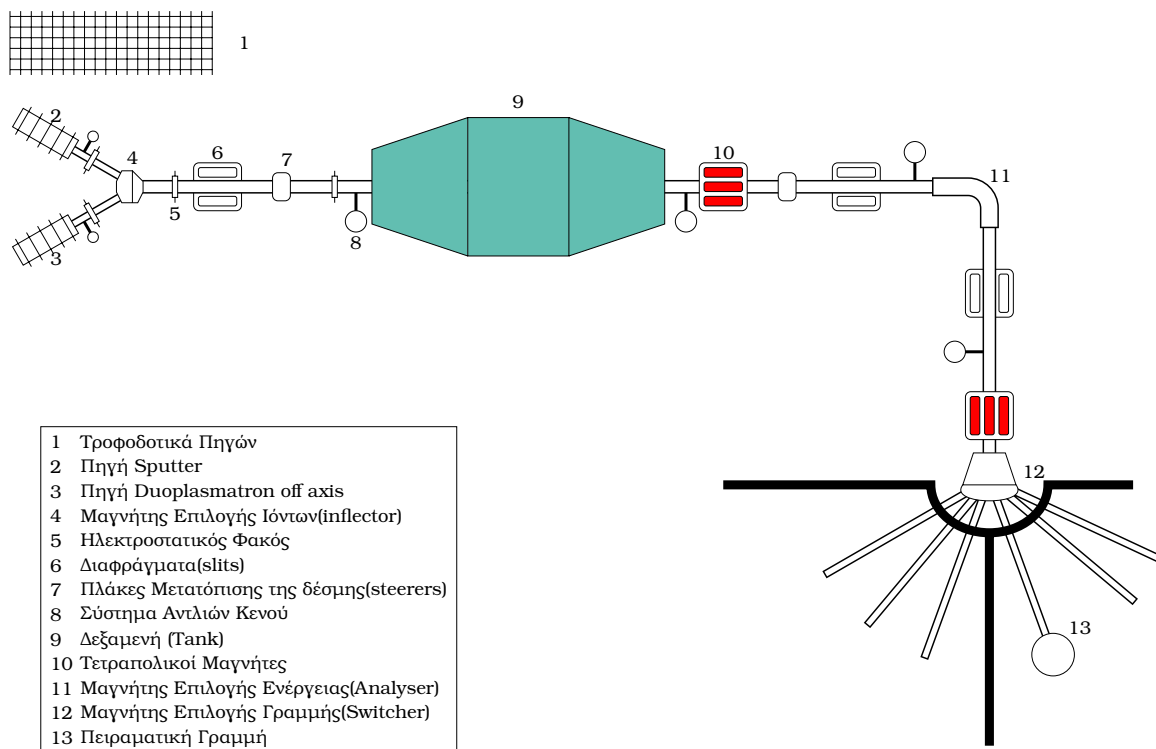
Το πείραμα διεξήχθη στον μοναδικό ηλεκτροστατικό επιταχυντή Tandem  $5.5MV$  στην Ελλάδα, τα βασικά μέρη του οποίου φαίνονται στην εικόνα 4.1 και είναι συνοπτικά τα εξής:

- Πηγές Ιόντων και τα αντίστοιχα τροφοδοτικά
- Οπτικά, δηλαδή οι κατάλληλοι μαγνήτες για κατεύθυνση και εστίαση της δέσμης καθώς και για την επιλογή των κατάλληλων ιόντων μαζί με τους ηλεκτροστατικούς φακούς και τα κατάλληλα διαφράγματα
- Η κύρια δεξαμενή του επιταχυντή
- Τα συστήματα κενού
- Οι πειραματικές γραμμές
- Οι δύο πειραματικές αίθουσες

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα, ο επιταχυντής Tandem είναι ένας ηλεκτροστατικός επιταχυντής η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην γεννήτρια Van Der Graaf. Πιο συγκεκριμένα, τα αρνητικά ιόντα που παράγονται από την πηγή <sup>1</sup> πλάσματος (duoplasmatron source) με έγχυση αερίου υδρογόνου, οδηγούνται στον προ-επιταχυντικό σωλήνα από μια διαφορά δυναμικού της τάξης των  $50kV$  για να εισέλθουν εν συνέχεια στο κύριο κομμάτι της επιτάχυνσης τους, στον κύριο επιταχυντικό σωλήνα, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται εγκατεστημένη μια διπλή <sup>2</sup> γεννήτρια σε τάση  $5.5MV$ . Στο πρώτο τμήμα αυτής, τα αρνητικά ιόντα θα επιταχυνθούν από το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο στην παρούσα φάση τα έλκει. Εν συνεχεία θα διέλθουν από λεπτά φύλλα άνθρακα, τα οποία απογυμνώνουν από ηλεκτρόνια τα αρνητικά ιόντα, μετατρέποντάς τα σε θετικά. Την ίδια ακριβώς στιγμή, το ηλεκτρικό πεδίο που έλκυε τα ιόντα, τώρα τα απωθεί με αποτέλεσμα την περαιτέρω επιτάχυνσή τους. Όλη αυτή η διαδικασία δημιουργεί μια σχετικά μονοενεργειακή δέσμη. Η επιλογή της κατάλληλης ενέργειας πραγματοποιείται κάνοντας χρήση ενός μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο μαγνήτης επιλογής ενέργειας (analyser). Τέλος η δέσμη ιόντων, με την κατάλληλη πλέον ενέργεια, οδηγείται μέσω του μαγνήτη επιλογής γραμμής στην κατάλληλη πειραματική γραμμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι το επιταχυντικό σύστημα βρίσκεται υπό υψηλό κενό της τάξης των  $10^{-6}mbar$ .

<sup>1</sup>Μπορούν να παραχθούν πολλά είδη ιόντων όπως  $H, He, C, Cu, Li$  κ.λπ.

<sup>2</sup>Εξού και το όνομα Tandem κατ' αναλογία με το διπλό ποδήλατο

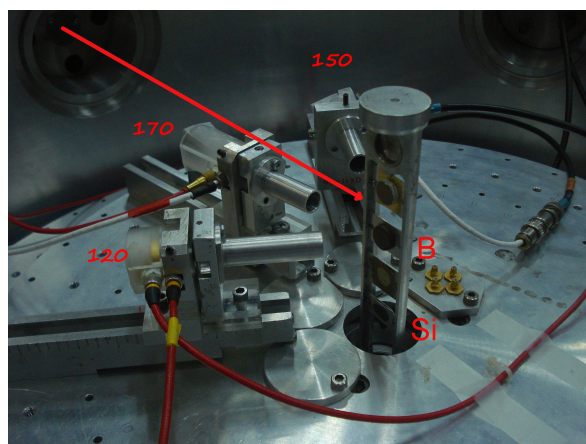


Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση του επιταχυντή TANDEM στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

## 4.2 Θάλαμος Σκέδασης-Στόχοι-Τηλεσκόπια

Η διεξαγωγή του πειράματος, πραγματοποιήθηκε σε έναν θάλαμο σκέδασης, ο οποίος βρισκόταν σε υψηλό κενό της τάξης των  $10^{-6} \text{ mbar}$ . Μέσα στον θάλαμο τοποθετήθηκαν τα 3 τηλεσκόπια, η παστίλια φυσικού Βορίου με τον εξαχνωμένο Χρυσό καθώς και τα απαραίτητα ομοαξονικά καλώδια τύπου  $\mu - dot$  για την μεταφορά των σημάτων από τους ανιχνευτές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.

Για την στήριξη των τηλεσκοπίων, χρησιμοποιήθηκαν ειδικές υποστηρικτικές θήκες από Μεθυλική Μεθακρυλάτη (PMMA) οι οποίες εκτός από την ασφαλή στήριξη των τηλεσκοπίων, προσφέρουν και ηλεκτρική μόνωση μεταξύ τους καθώς και μεταξύ του θαλάμου σκέδασης. Αυτό είναι απαραίτητο, καθώς ο θάλαμος κατά την ακτινοβολήση φορτίζεται από τα σκεδαζόμενα,



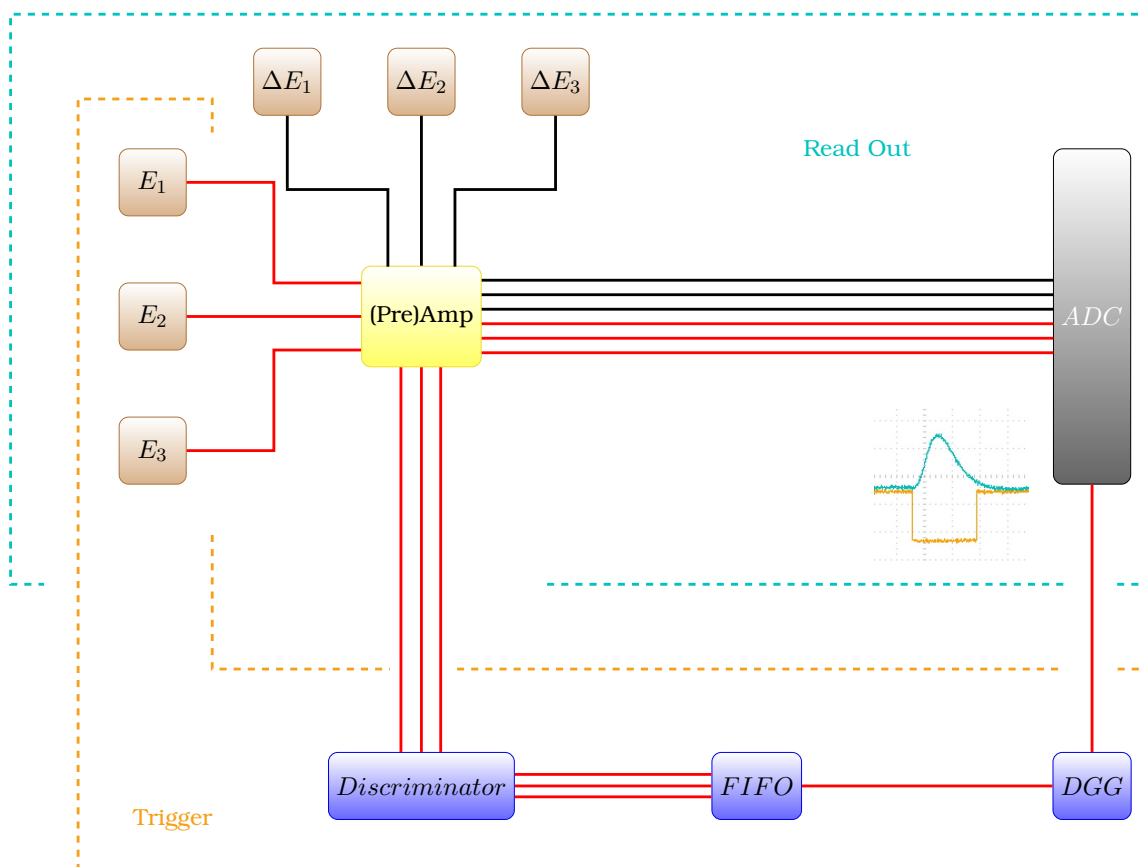
Σχήμα 4.2: Η διάταξη των τηλεσκοπίων και των στόχων μέσα στον θάλαμο σκέδασης

από τους στόχους, ηλεκτρόνια και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διατάραξη του μηδενικού δυναμικού της γείωσης. Οι εν λόγω θήκες είναι κοχλιωμένες σε ειδικές μεταλλικές βάσεις, οι οποίες καθορίζουν τόσο την απόσταση των ανιχνευτών από τους στόχους και κυρίως την γωνία ανίχνευσης, αφού αυτές είναι τοποθετημένες σε προκαθορισμένες γωνίες ανά  $5^\circ$  εντός του θαλάμου.






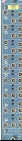


Οι στόχοι βρίσκονται τοποθετημένοι, σε ειδική βάση χωρητικότητας 4 στόχων, η οποία δύναται να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά συμμετρίας της καθώς και να μετακινείται κάθετα ως προς την δέσμη. Η περιστροφή και κατακόρυφη μετατόπιση πραγματοποιούνται χειροκίνητα από τον εκάστοτε πειραματιστή.

### 4.3 Ηλεκτρονική Διάταξη

Μετά την τοποθέτηση των στόχων και των ανιχνευτών στον θάλαμο σειρά έχει η σύνδεση των ηλεκτρονικών διατάξεων. Το πως επιλέχθηκε αυτή, θα περιγραφεί αναλυτικά στην υποενότητα 6.2.2. Στην παρούσα φάση, απλώς θα γίνει μια παράθεση της ηλεκτρονικής διάταξης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.3. Τέλος στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα βασικά τους χαρακτηριστικά.



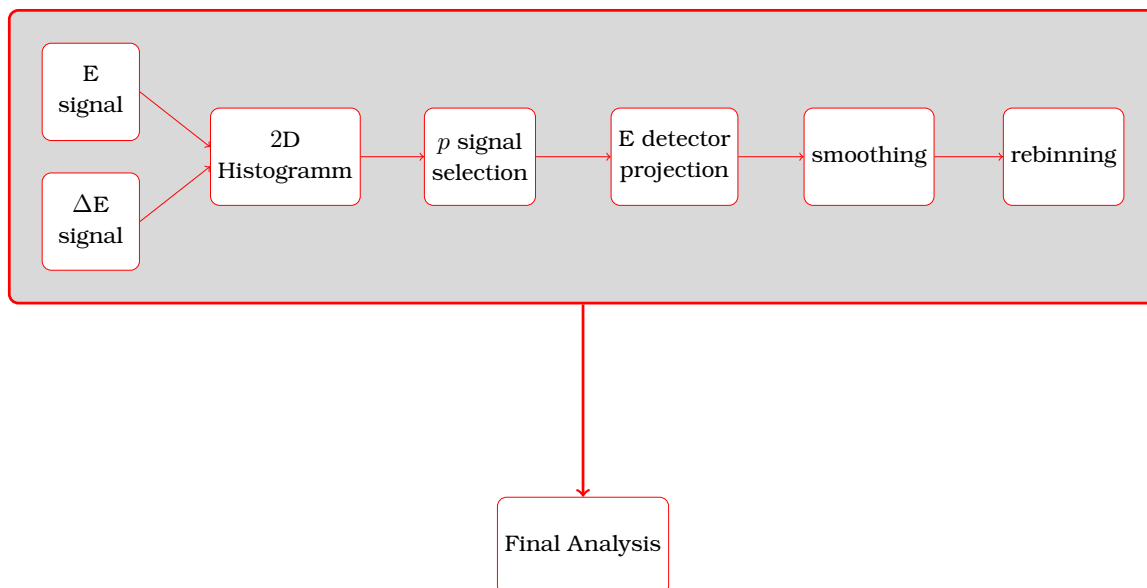
Σχήμα 4.3: Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης, ανάγνωσης και σκανδαλισμού του σήματος

| <b>NIM Module</b>                                | <b>Χρήσιμα Χαρακτηριστικά</b>   | <b>Εικόνα</b>   | <b>URL</b>                      |
|--|---|---|---------------------------------|
| PSU<br>Mesytec MHV-4                             | 4 channels<br>+/- Output Polarity<br>Maximum Output<br>400V   |    | <a href="#">MHV-4</a>           |
| 8 channell<br>PreAmp/Amp<br>Mesytec MSI-8        | <b>Sensitivity</b><br>0.3 – 15MeV/V<br><b>Risetime</b><br>20 – 50ns<br><b>Input Capacity</b><br>< 100pF<br><b>Gain</b><br>5<br><b>Shapping time</b><br>0.25μs |    | <a href="#">MSI-8</a>           |
| CAMAC ADC<br>Phillips 7164                       | range= 4V<br># channels= 4096<br>Gate : Negative<br>Input : Uni/Bi-polar  |   | <a href="#">Phillips 7164</a>   |
| CAMAC crate<br>controller<br>Sparrow SCM-301     | level I FastCAMAC<br>7.5 MB/s<br>24-bit LAM mask<br>register  |  | <a href="#">Sparrow SCM-301</a> |
| CAMAC LIST Pro-<br>cessor<br>HYTEC LP-1342<br>1k | Internal clock trig-<br>gers<br>0.01Hz – 100KHz   |  | <a href="#">Sparrow SCM-301</a> |
| LeCroy 623B<br>OCTAL DISCRIM-<br>INATOR          | 8-channels  |  | <a href="#">LeCroy 623B</a>     |
| LeCroy 429A<br>Fan In Fan Out                    | 16-channels   |  | <a href="#">LeCroy 429A</a>     |
| LRS 222<br>Dual Gate Gener-<br>ator              | gate durations<br>< 100 ns to > 11 sec  |  | <a href="#">LRS 222</a>         |

Πίνακας 4.1: Τα ηλεκτρονικά των μετρήσεων

# Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο, το οποίο ουσιαστικά είναι η σωστή προετοιμασία τους για την τελική ανάλυση, περιλαμβάνει την επιλογή των χρήσιμων σημάτων καθώς και την διόρθωση τους λόγω ηλεκτρονικών δυσλειτουργιών. Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης, πραγματοποιείται ο έλεγχος αξιοπιστίας της διαφορικής ενεργής διατομής για την ελαστική σκέδαση πρωτονίων από φυσικό Βόριο. Στο παρόν κεφάλαιο δεν θα αναλυθεί ο σχεδιασμός του συστήματος καταγραφής, καθώς αυτό αναλύεται στο κεφάλαιο 6.

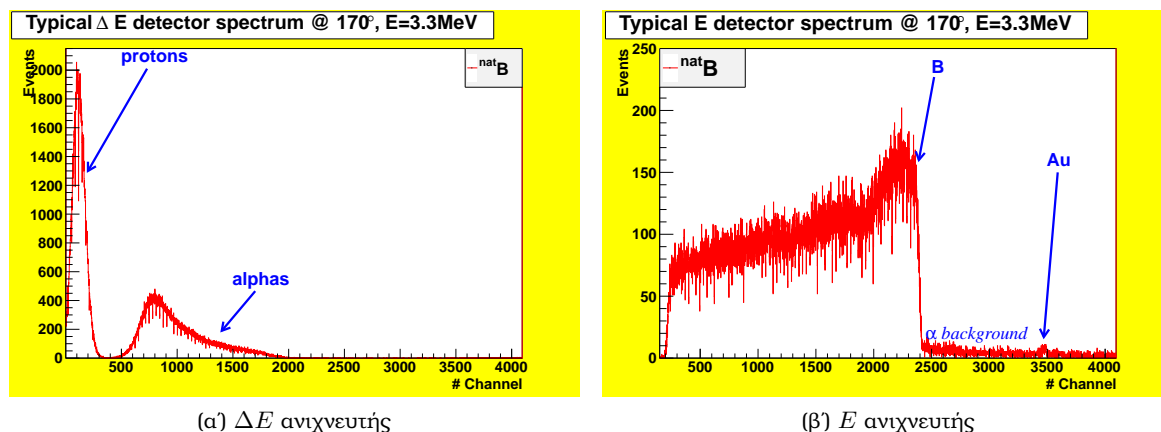


Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα των σταδίων της προ-ανάλυσης και της τελικής ανάλυσης

## 5.1 Προετοιμασία των Δεδομένων

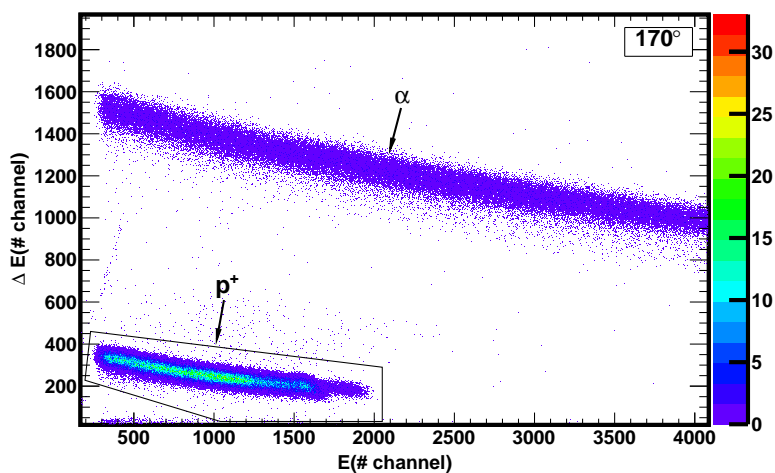
Το πρώτο βήμα στο στάδιο της προ-ανάλυσης είναι η επιλογή των χρήσιμων σημάτων. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ελαστική σκέδαση πρωτονίων. Συνεπώς είναι χρήσιμο, να απορριφθούν τα σήματα υποβάθρου, τα οποία είναι ο ηλεκτρονικός θόρυβος και τα σήματα από τις αντιδράσεις  $(p, \alpha)$ . Για να γίνει αυτό, σχεδιάστηκε ένα σύστημα ανάγνωσης και καταγραφής του σήματος, το οποίο δύναται να καταγράφει «γεγονός προς γεγονός»<sup>1</sup>. Τα σήματα από τους δύο ανιχνευτές που απαρτίζουν το κάθε τηλεσκόπιο(εικ.:5.2), ταξινομούνται σε ένα δισδιάστατο ιστόγραμμα(εικ.:5.3). Η περιοχή επιλογής αποτελείται από 5 σημεία, τα οποία καλύπτουν πλήρως το επιλεγόμενο σήμα.

<sup>1</sup> event by event data acquisition

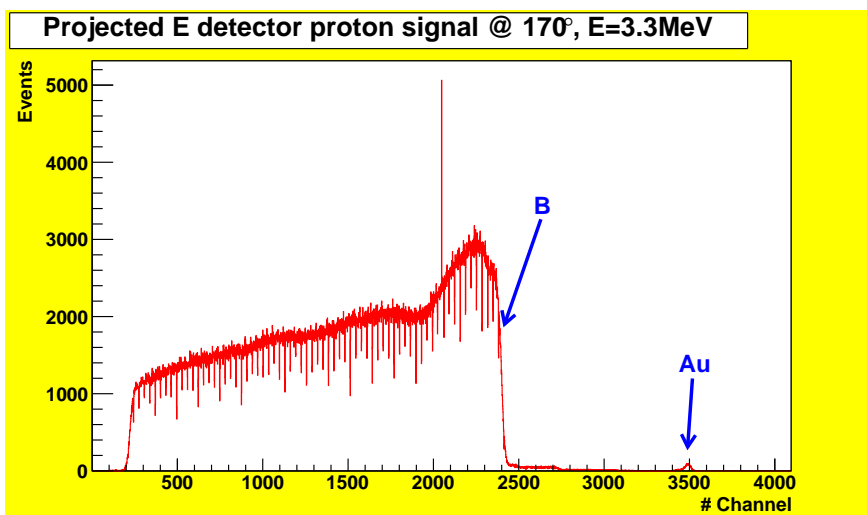


Σχήμα 5.2: Τυπικά φάσματα καταγραφής ενός τηλεσκοπίου  $\Delta E - E$

Στην συνέχεια, τα δεδομένα που βρίσκονται εντός της περιοχής, προβάλλονται στον άξονα του ανιχνευτή  $E$  (εικ.: 5.4). Η αιτία επιλογής της εν λόγω προβολής έγκειται στην διαφορά της ενεργειακής βαθμονόμησης των δύο ανιχνευτών που απαρτίζουν το εκάστοτε τηλεσκόπιο. Μια επίσης σημαντική παρατήρηση αφορά στο πόσο η περιοχή οριοθέτησης επηρεάζει το προκύπτον φάσμα υπό την έννοια της διεύρυνσης ή συρρίκνωσής της. Η αρχική ένδειξη έδειξε ότι εφόσον η περιοχή αυτή, είναι κοντά στην καμπύλη των πρωτονίων, μια μικρή αλλαγή στο εύρος της επιφέρει μια διαφορά εντός στατιστικού σφάλματος. Δεδομένου ότι το πλήθος των συνολικών γεγονότων είναι της τάξης των 500000 γεγονότων για κάθε RUN, το στατιστικό σφάλμα θεωρείται αμελητέο, αφού είναι της τάξης του 0.1%. Αναλύοντας προσεκτικά δύο φάσματα που έχουν προκύψει από δύο διαφορετικές προβολές, οι διαφορές μεταξύ τους παραμένουν της ίδιας τάξης. Συνεπώς η επιλογή της περιοχής οριοθέτησης, δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, αρκεί να πραγματοποιηθεί περιμετρικά και εφαπτομενικά στην καμπύλη ενδιαφέροντος. Αφού έχουν επιλεγεί τα χρήσιμα δεδομένα και έχουν προβληθεί, σειρά έχει η ανάλυση του προκύπτοντος φάσματος. Εξ' αιτίας όμως κάποιων τεχνικών δυσλειτουργιών του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό(ο ρυθμός καταγραφής δεδομένων ήταν μεγάλος με αποτέλεσμα η σε πραγματικό χρόνο μετατροπή να εκτελείται μερικώς και να χάνονται χρήσιμα σήματα), κρίθηκε απαραίτητο να τροποποιηθούν περαιτέρω τα φάσματα.

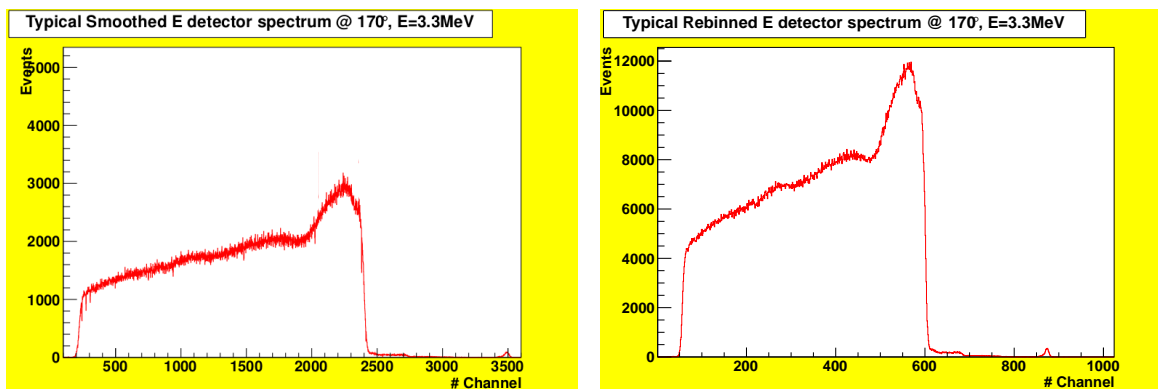


Σχήμα 5.3: Το banana plot από τις αντιδράσεις  $(p, p)$  και  $(p, \alpha)$ . Φαίνεται επίσης και η περιοχή επιλογής των χρήσιμων δεδομένων.



Σχήμα 5.4: Προβληματικό φάσμα  $E$  ανιχνευτή με βυθίσματα και υψώματα

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4, υπάρχουν βυθίσματα και υψώματα τα οποία ενδεχομένως να επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα. Καθώς η διαδικασία ελέγχου αξιοπιστίας είναι πολύ ευαίσθητη και ακριβής, είναι απαραίτητο και αναγκαίο να εξαλειφθούν όλοι οι παράγοντες που δύναται να καταστήσουν την ανάλυση ανακριβή, αναξιόπιστη και αδιαφανή. Η σημαντικότερη τροποποίηση που πρέπει να υλοποιηθεί είναι η εξάλειψη των παραμορφώσεων του φάσματος. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή στην βιβλιογραφία ως *smoothing*. Τα υψώματα και τα βυθίσματα εξομαλύνονται παίρνοντας νέες τιμές. Οι νέες αυτές τιμές επιλέγονται να απέχουν από τις ομαλές γειτονικές τους ένα ποσοστό εντός του στατιστικού σφάλματος. Η εν λόγω εξομάλυνση υλοποιήθηκε φάσμα προς φάσμα μέσω ενός σχετικού κώδικα(7.4). Τέλος, ένας δεύτερος τρόπος εξομάλυνσης του φάσματος αλλά και ορθότερης παρουσίας του, είναι η ανακατανομή των καναλιών σε 1024 αντί για 4096 αφού περισσότερα κανάλια δεν προσφέρουν στην διακριτική ικανότητα του ανιχνευτικού συστήματος. Όλη αυτή η επεξεργασία των φασμάτων αφήνει αναλλοίωτο το ολικό ολοκλήρωμα εντός του στατιστικού σφάλματος.



(α) Τυπικό εξομαλυμένο φάσμα  $E$  ανιχνευτή

(β) Τυπικό ανακατανομημένο φάσμα  $E$  ανιχνευτή

Σχήμα 5.5: Εξομάλυνση και ανακατανομή των προβληματικών φασμάτων

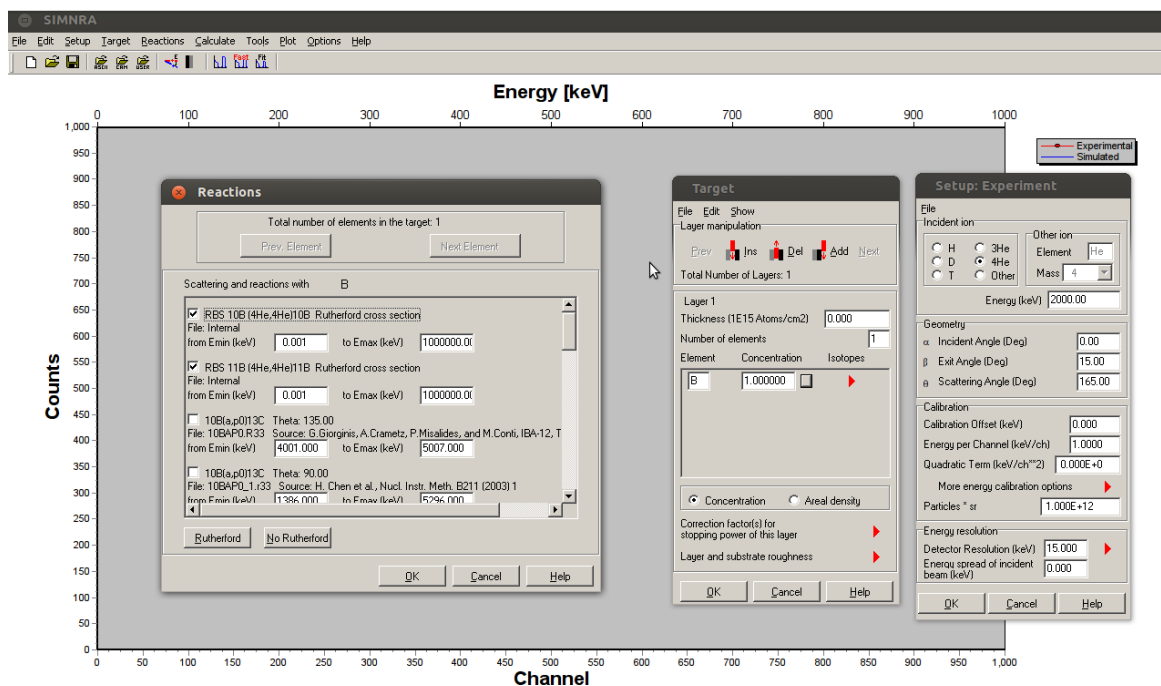
## 5.2 Τελική Ανάλυση

Τα τελικά διορθωμένα φάσματα που έχουν προκύψει είναι συνάρτηση πολλών φυσικών μηχανισμών:

1. Απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής του ιόντος στο υλικό του στόχου(Stopping Power)
2. Συνάρτηση ενεργειακού διασκεδασμού (Straggling function)
3. Ενεργειακή Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή(Detector's Energy Resolution)
4. Ενεργός διατομή της αντίδρασης που μελετάται η οποία συμπεριλαμβάνει το προσπίπτον ιόν, σε συγκεκριμένο στόχο, με συγκεκριμένη ενέργεια και σε συγκεκριμένη γωνία
5. Πολλαπλές σκεδάσεις στον στόχο(Dual and Multiple scattering)
6. Η ενδεχόμενη τραχύτητα του στόχου(roughness).

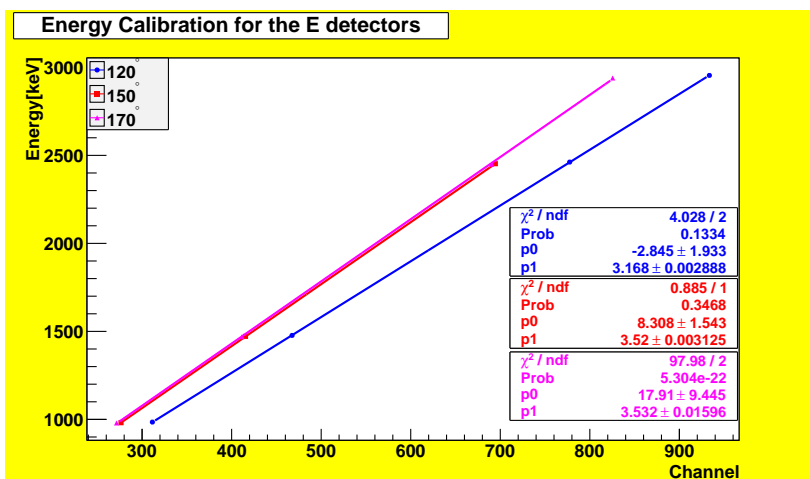
Σειρά έχει η φόρτωσή των φασμάτων στο πρόγραμμα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση-προσομοίωση. Το εν λόγω πρόγραμμα ονομάζεται SimNRA[16] και η όλη ανάλυση έγκειται στην αναπαραγωγή των πειραματικών φασμάτων λαμβάνοντας σοβαρά υπ' όψιν τους παραπάνω μηχανισμούς. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται[17, ενότ. 3.3] ότι τα πιο έγκυρα μοντέλα αναπαραγωγής των πειραματικών φασμάτων είναι το μοντέλο των Ziegler - Biersack - Littmark[18] για την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής πρωτονίων και το αντίστοιχο των Chu-Yang[19] για τον ενεργειακό διασκεδασμό. Και τα δύο αυτά μοντέλα, παρέχονται από το simNRA για τους σχετικούς υπολογισμούς. Σε όλους τους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπ' όψιν τόσο η διπλή σκέδαση σε μεγάλες γωνίες σκέδασης όσο και η πολλαπλή σε μικρές γωνίες. Αφού έχουν καθοριστεί τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν, για να πραγματοποιηθεί η αναπαραγωγή των πειραματικών φασμάτων απαιτούνται οι εξής παράμετροι :

1. Ενεργειακή βαθμονόμηση
2. Γεωμετρία του πειράματος
3. Χαρακτηριστικά των ανιχνευτών και των λεπτών φύλλων που έχουν χρησιμοποιηθεί
4. Αριθμός σωματιδίων που έχουν προσπέσει στον στόχο ανά μονάδα στερεάς γωνίας
5. Ενεργός(ές) διατομή(ές) της αντίδρασης που μελετάται



Σχήμα 5.6: Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα SimNRA



Σχήμα 5.7: Η ενεργειακή βαθμονόμηση των  $E$  ανιχνευτών

### 5.2.1 Ενεργειακή Βαθμονόμηση

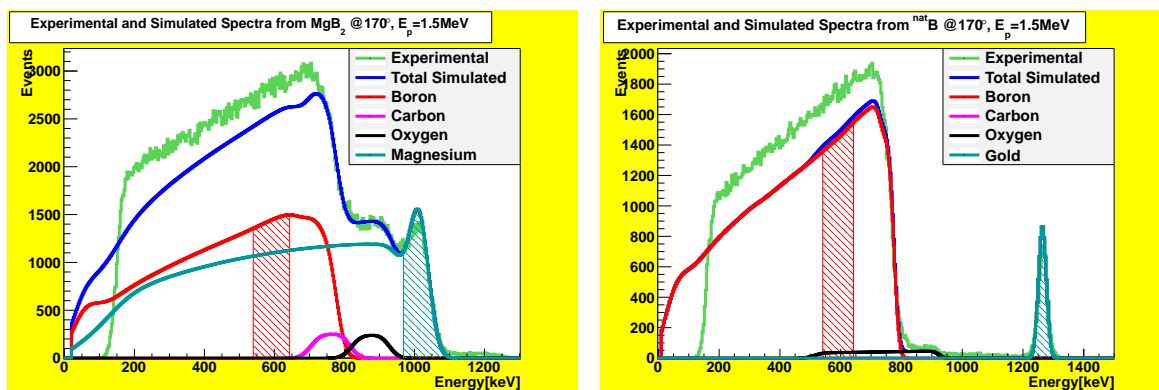
Για την ενεργειακή βαθμονόμηση των  $E$  ανιχνευτών, χρησιμοποιήθηκε η κορυφή του χρυσού για τις 4 ενέργειες του πειράματος. Χρησιμοποιώντας κινηματική, η ενέργεια των σκεδαζομένων πρωτονίων από τους πυρήνες χρυσού θα δίνεται από την σχέση 1.3. Για να υλοποιηθεί η ενεργειακή βαθμονόμηση, αρκεί να εντοπιστεί το κανάλι όπου βρίσκεται το κεντροειδές της κορυφής του χρυσού και να υπολογιστεί η ενέργεια της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από πυρήνες χρυσού. Η βαθμονόμηση ήταν γραμμική και συγκεκριμένα η

$$\text{Ενέργεια}[keV] = p_1[keV/ch]\text{κανάλι} + p_0[keV] \quad (5.1)$$

Στην εικόνα 5.7, φαίνεται η ενεργειακή βαθμονόμηση για 3 γωνίες : 120°, 150° και 170°. Στην ανάλυση αγνοήθηκε η γωνία των 150° καθώς η γεωμετρία του ανιχνευτή που ήταν τοποθετημένος εκεί, ήταν τέτοια που καθιστούσε τον ρυθμό καταγραφής, υψηλό για τις μετρήσεις ακριβείας που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Επίσης λόγω απουσίας ισχυρών λεπτών συντονισμών στην αντίδραση  ${}^{\text{nat}}B(p, p_0)$  (εικ.: 1.6), πιθανές ανακρίβειες του επιταχυντή δεν αναμένεται να επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα.

### 5.2.2 Μέτρηση Πάχους Χρυσού-MgB<sub>2</sub>

Η μέτρηση πάχους χρυσού με την τεχνική XRF, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα σε υλικά με υψηλό ατομικό αριθμό  $Z$ . Στην περίπτωση υλικών χαμηλού  $Z$  υπάρχει μεγάλο σφάλμα ( $\sim 10\%$ ) λόγω σκεδαζομένων φωτονίων στο ίδιο το υλικό. Συνεπώς πρέπει να πραγματοποιηθεί εκ νέου μια μέτρηση του πάχους του εξαχνωμένου χρυσού, το οποίο είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό του παράγοντα  $Q \cdot \Omega$ . Θέλοντας να μετρηθεί το πάχος του εν λόγω λεπτού στρώματος, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένας άλλος τρόπος, περισσότερο ακριβής. Ο τρόπος αυτός έγκειται στην εκμετάλλευση του γεγονότος πως έχει πραγματοποιηθεί έλεγχος αξιοπιστίας του Μαγνησίου[20] στην ενέργεια των  $1500keV$  για την γωνία των  $170^\circ$ . Αυτό που συνέβη, ήταν μια πειραματική μέτρηση στην ενέργεια των  $1500keV$  για γωνία  $170^\circ$  ενός στόχου που ιδανικά περιέχει φυσικό Βόριο και Μαγνήσιο. Χρησιμοποιήθηκε λοιπόν μια παστίλια  $MgB_2$  και το πειραματικό φάσμα φαίνεται στην εικόνα 5.8α'. Δυστυχώς η παστίλια του διβοριδίου του Μαγνησίου, περιείχε κάποιες προσμίξεις οξυγόνου οι οποίες δυσκόλεψαν περαιτέρω την ανάλυση. Παρ' όλ' αυτά λόγω καλής στατιστικής, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ακολουθούνται από μικρό στατιστικό σφάλμα.

(α) Φάσμα ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από  $MgB_2$ (β) Φάσμα ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από  $^{nat}B$ 

Σχήμα 5.8: Μέτρηση πάχους Χρυσού με χρήση αξιολογημένων διαφορικών ενεργών διατομών Μαγνησίου

Το πρώτο βήμα ήταν να βρεθεί το πλήθος των φορτισμένων σωματιδίων που προσέπεσαν στον στόχο ανά μονάδα στερεάς γωνίας, δηλαδή η παράμετρος  $Q\Omega$ . Αυτή βρέθηκε, εξισώνοντας το πειραματικό ολοκλήρωμα στην περιοχή του μαγνησίου με το αντίστοιχο του προσομοιωμένου στην ίδια ακριβώς περιοχή (κυανή σκιασμένη περιοχή) το οποίο έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δεδομένα ενεργών διατομών τα οποία έχουν αξιολογηθεί [20] με ακρίβεια της τάξης του 5%. Στην συνέχεια έγινε σύγκριση του πειραματικού ολοκληρώματος στην περιοχή του βορίου (κόκκινη σκιασμένη περιοχή στην εικόνα 5.8α), αφαιρώντας την συνεισφορά του μαγνησίου, η συμπεριφορά του οποίου είναι Rutherford, με το αντίστοιχο προσομοιωμένο στην ίδια περιοχή το οποίο έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δεδομένα ενεργών διατομών από την βιβλιογραφία [10]. Η απόκλιση αυτή βρέθηκε να είναι 17% και θα χρησιμοποιηθεί για τον ακριβή υπολογισμό του πάχους του λεπτού στρώματος χρυσού, χρησιμοποιώντας το φάσμα της ελαστικής σκέδασης πρωτονίων σε στόχο φυσικού Βορίου, για την ίδια ενέργεια και στην ίδια γωνία.

Σε αυτό το φάσμα, ο παράγοντας  $Q\Omega$  ρυθμίστηκε ώστε τα ολοκληρώματα (πειραματικό και προσομοίωσης) στην ίδια ακριβώς ενεργειακή περιοχή με το φάσμα του  $MgB_2$  (κόκκινη σκιασμένη περιοχή στην εικόνα 5.8β) να διαφέρουν κατά 17%. Σειρά έχει η μέτρηση του πάχους του χρυσού. Αυτή η παράμετρος της προσομοίωσης, ρυθμίζεται έτσι ώστε το πειραματικό ολοκλήρωμα να ταυτιστεί με το αντίστοιχο της προσομοίωσης στην περιοχή του χρυσού (κυανή σκιασμένη περιοχή στην εικόνα 5.8β). Αυτή η απαίτηση έδωσε ένα πάχος χρυσού

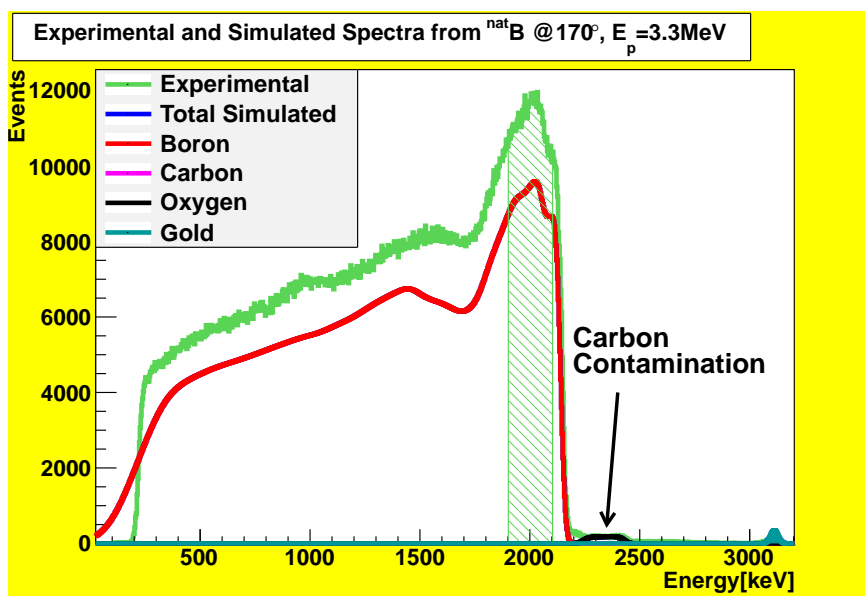
$$Au_{thickness} = 40.230 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^3$$

Εν συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική XRF για την ίδια ακριβώς μέτρηση η οποία έδωσε  $40 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^3$ , συνεπώς οι δύο κεντρικές τιμές δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους παρά μόνον 0.6%, παρά το μεγαλύτερο σχετικό σφάλμα της XRF τεχνικής.

### 5.2.3 Υπολογισμός του παράγοντα $Q\Omega$

Σειρά για την ολοκλήρωση της ανάλυσης έχει ο αριθμός των προσπίπτοντων σωματιδίων ανά μονάδα στερεάς γωνίας στον στόχο. Αυτή η παράμετρος υπολογίζεται εξισώνοντας τα δύο ολοκληρώματα, πειραματικό και προσομοίωσης στην περιοχή του χρυσού, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9. Αυτή η διαδικασία, επαναλαμβάνεται για όλα τα κατά περίπτωση φάσματα. Αξίζει να σημειωθεί πως σε όλα τα φάσματα ήταν παρούσες κορυφές άνθρακα και οξυγόνου, οι οποίες δεν επηρεάζουν την τελική ανάλυση καθώς βρίσκονται ενεργειακά μακριά τόσο από την περιοχή

του χρυσού, όσο και από την περιοχή ολοκλήρωσης του Βορίου. Η κορυφή του άνθρακα είναι παρούσα καθώς η χρήση φύλλων άνθρακα είναι αυτή που δίνει θετικά ιόντα(ενότ.: 4.1) και συνεπώς τα ιόντα δύναται να παρασύρουν άτομα άνθρακα στον θάλαμο σκέδασης. Όσο αφορά στο οξυγόνο, η παρουσία του οφείλεται στο γεγονός ότι είναι ένα αρκετά ηλεκτραρνητικό άτομο και σχηματίζει πολύ εύκολα ενώσεις (οξείδια) τόσο στα τμήματα της επιταχυντικής διάταξης (επιταχυντικοί σωλήνες) όσο και στους στόχους.



Σχήμα 5.9: Ενδεικτικό φάσμα ανάλυσης

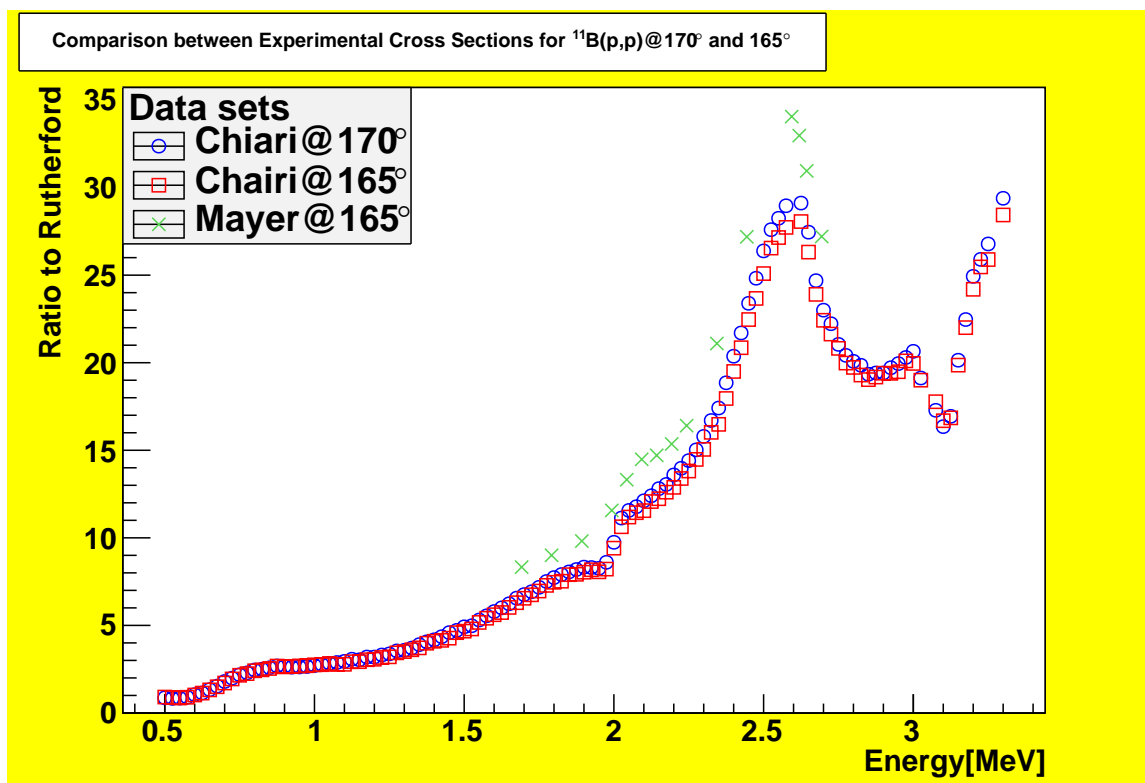
#### 5.2.4 Εύρεση λοιπών παραμέτρων

Οι δύο τελευταίες παράμετροι προς υπολογισμό είναι η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή και το πάχος του  $\Delta E$  ανιχνευτή. Η διακριτική ικανότητα του εκάστοτε ανιχνευτή, υπολογίζεται ταυτίζοντας τις κλίσεις των δύο φασμάτων στην περιοχή που ξεκινά η συνεισφορά του βορίου. Τυπικές τιμές για την διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών είναι τα  $15\text{keV}$ . Το πάχος του  $\Delta E$  ανιχνευτή, έχει υπολογιστεί με τρόπο που περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 3.2. Αξίζει να σημειωθεί πως στην προσομοίωση ο ανιχνευτής έχει τοποθετηθεί σαν ένα λεπτό στρώμα (foil) μπροστά από τον  $E$  ανιχνευτή, χωρίς να μπορεί να γίνει αναπαραγωγή του φάσματος που έχει καταγραφεί από αυτόν. Τα μοντέλα όμως της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής και του ενεργειακού διασκεδασμού λαμβάνουν υπ' όψιν την διέλευση των ελαστικά σκεδαζομένων πρωτονίων στον ανιχνευτή  $\Delta E$ .

#### 5.2.5 Τελικά Αποτελέσματα

Αφού έχουν υπολογιστεί όλες οι παράμετροι, μένει να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αξιοπιστίας των διαφορικών ενεργών διατομών που υπάρχουν στην βιβλιογραφία για τις γωνίες και τις ενέργειες που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Στην βιβλιογραφία βρέθηκαν δεδομένα τα οποία καλύπτουν όλο το ενεργειακό και γωνιακό εύρος ([10, Chiari]) τόσο για το  $^{10}\text{B}$  όσο και για το  $^{11}\text{B}$ . Βρέθηκαν επίσης δεδομένα τα οποία καλύπτουν για την γωνία των  $120^\circ$  τις ενέργειες  $2250, 2800\text{keV}$  για το  $^{11}\text{B}$  ([12, Mashkarov], [13, Dejneko]) και όλο το ενεργειακό εύρος για το  $^{10}\text{B}$  ([11, Overlay]). Για την γωνία των  $170^\circ$  βρέθηκαν δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών που αφορούν στο  $^{11}\text{B}$  στην ενέργεια των  $3300\text{keV}$  ([14, Rihet]). Τέλος, λόγω έλλειψης πληθώρας δεδομένων στην γωνία των  $170^\circ$ , ο έλεγχος αξιοπιστίας πραγματοποιήθηκε με δεδομένα  $165^\circ$

για την ενέργεια των  $2250 \text{ keV}$  ([21, Mayer]). Η επιλογή των εν λόγω δεδομένων είναι ασφαλής καθώς δεν υπάρχει ένδειξη έντονης γωνιακής εξάρτησης μεταξύ  $170^\circ$  και  $165^\circ$  παρά μόνο πειραματικές διαφωνίες, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10. Παρά τις αποκλίσεις μεταξύ [21, Mayer] και [10, Chiari], οι οποίες είναι πειραματικές, η απόδειξη της μη έντονης γωνιακής εξάρτησης φαίνεται από τα δεδομένα του [10, Chiari], καθώς αποκλίνουν εντός 3% μεταξύ τους και προέρχονται από το ίδιο πείραμα, συνεπώς η πειραματική διάταξη είναι κοινή τόσο τοπικά όσο και χρονικά και η ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί με την ίδια ακριβώς διαδικασία.



Σχήμα 5.10: Γωνιακή εξάρτηση της αντίδρασης  $^{11}\text{B}(p,p)^{11}\text{B}$  για τις γωνίες  $170^\circ$  και  $165^\circ$

Ο έλεγχος αξιοπιστίας έγκειται στον προσδιορισμό της διαφοράς του πειραματικού ολοκληρώματος με το αντίστοιχο της προσομοίωσης, στην περιοχή της επιφάνειας<sup>2</sup> του Βορίου[17, εν. 3.3], όπως φαίνεται στην σκιασμένη επιφάνεια της εικόνας 5.9. Η επιφανειακή αυτή ολοκλήρωση είναι μονόδρομος καθώς τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται αποκλίνουν σε μεγάλα βάθη[17, εικ. 2].

Στους πίνακες 5.1 και 5.2 φαίνονται οι εν λόγω διαφορές για τις  $120^\circ$  και  $170^\circ$  αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.11 φαίνονται ενδεικτικά οι διαφορές στα φάσματα, οι οποίες προκύπτουν από την χρησιμοποίηση διαφορετικών διαφορικών ενεργών διατομών. Η ανάλυση αναδεικνύει μια ενδιαφέρουσα αλλά ταυτόχρονα άξια για περαιτέρω διερεύνηση συμπεριφορά.

Αρχικά οι αποκλίσεις των πειραματικών φασμάτων με τα φάσματα που έχουν βασιστεί στις υπό αξιολόγηση πειραματικές διατομές κυμαίνονται από  $+2 - 51\%$  για τις  $120^\circ$  και  $+2\%$  έως  $-23\%$  για τις  $170^\circ$ . Το πρόσημο  $+$  δηλώνει πως οι διαφορικές ενεργές διατομές είναι υπερεκτιμημένες και η ολοκλήρωση των φασμάτων που αναπαράχθηκαν από αυτές είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πειραματικό, ενώ το αρνητικό πρόσημο  $-$ , το αντίθετο. Συνεπώς παρατηρείται μια αντίθετη συμπεριφορά για τις δυο γωνίες, αφού στην μία περίπτωση οι ενεργές διατομές υπερεκτιμούν το ολοκλήρωμα (εικ.: 5.11a) ενώ στην άλλη το υποτιμούν(εικ.: 5.11b).

<sup>2</sup>Ως επιφάνεια θεωρείται η ενεργειακή περιοχή  $250 \text{ keV}$

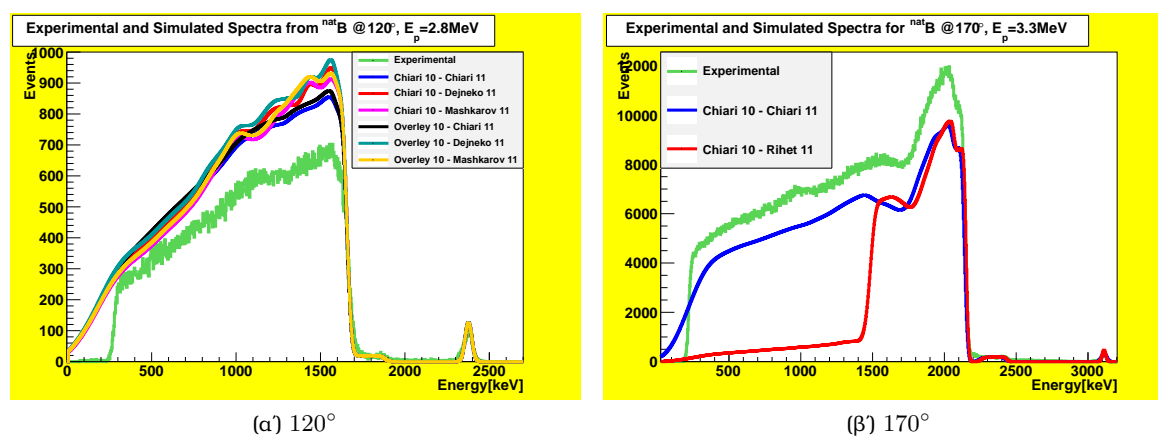
Η εν λόγω συμπεριφορά χρήζει περισσότερης διερεύνησης, καθώς αφενός τα στάδια της ανάλυσης είναι πολλά και κρίσιμα(επιλογή δεδομένων, τροποποίηση φασμάτων) και αφετέρου η προσομοίωση των πειραματικών φασμάτων περιέχει ένα πολύ κρίσιμο και λεπτό σημείο : την ύπαρξη των ανιχνευτών  $\Delta E$ , η οποία εισάγει έντονα την εξάρτηση των αποτελεσμάτων από την συνάρτηση διασκεδασιμότητας. Συνεπώς, πρέπει να προσδιοριστεί αν οι διαφορές αυτές οφείλονται στις ίδιες τις διαφορικές ενεργές διατομές ή αποτελούν πειραματική αστοχία.

| Energy | Chiari 10[10]<br>Chiari 11[10] | Chiari 10[10]<br>Mashkarov 11[12] | Chiari 10[10]<br>Dejneko 11[13] | Overley 10[11]<br>Chiari 11[10] | Overley 10[11]<br>Mashkarov 11[12] | Overley 10[11]<br>Dejneko 11[13] |
|--------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 2250   | +42%                           | +40%                              | +45%                            | +48%                            | +46%                               | +51%                             |
| 2800   | +27%                           | +37%                              | +38%                            | +30%                            | +40%                               | +21%                             |
| 3300   | +25%                           | —                                 | —                               | +2%                             | —                                  | —                                |

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα ελέγχου αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 120° χρησιμοποιώντας την τεχνική  $\Delta E - E$

| Energy | Chiari 10[10]<br>Chiari 11[10] | Chiari 10[10]<br>Mayer(165°) 11[21] | Chiari 10[10]<br>Chiari(165°) 11[10] | Chiari 10[10]<br>Rihet 11[14] |
|--------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1500   | -17%                           | —                                   | —                                    | —                             |
| 2250   | -25%                           | -10%                                | -26%                                 | —                             |
| 2800   | +2%                            | —                                   | —                                    | —                             |
| 3300   | -23%                           | —                                   | —                                    | -23%                          |

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ελέγχου αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις 170° χρησιμοποιώντας την τεχνική  $\Delta E - E$

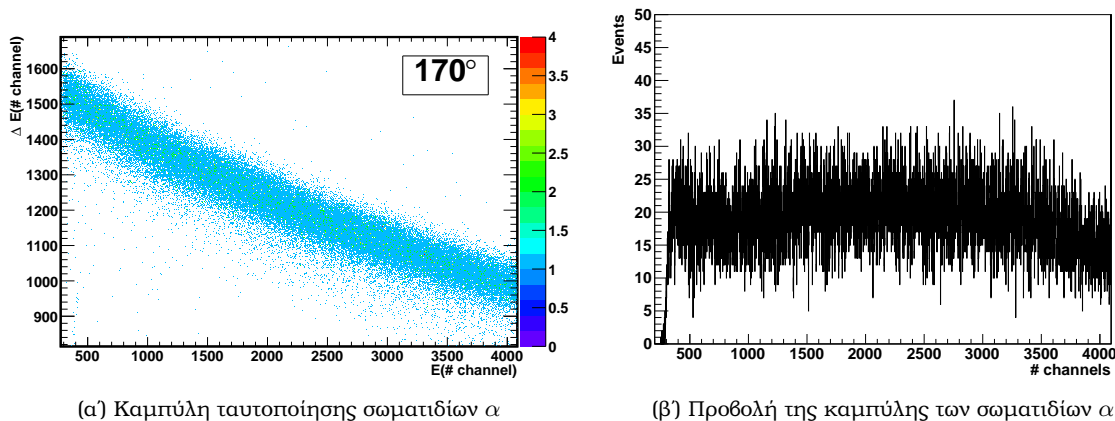


Σχήμα 5.11: Φάσματα ελαστικής σκέδασης πρωτονίων από πυρήνες φυσικού Βορίου για διαφορετικές διαφορικές ενεργές διατομές.

### 5.3 Ανάλυση πειραματικών φασμάτων με αφαίρεση υποβάθρου

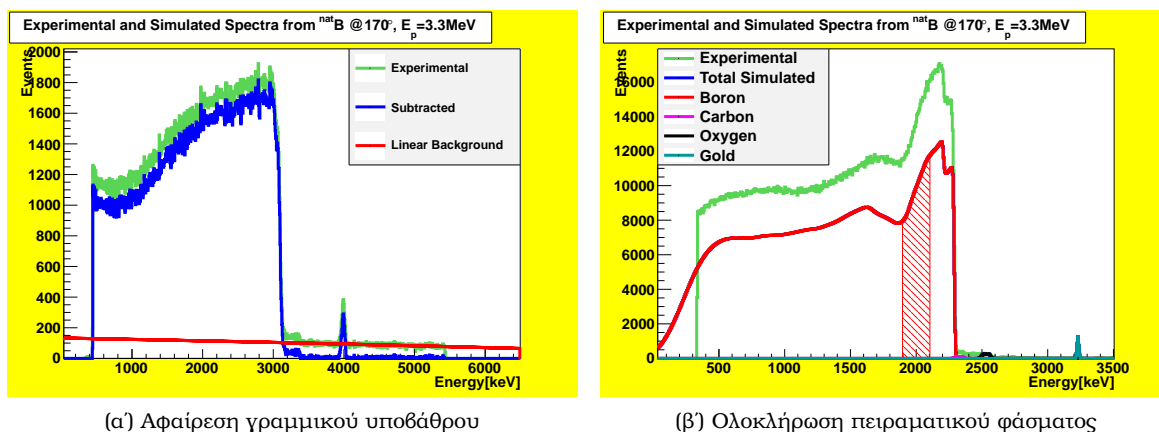
Για να ευρεθούν τυχόντα πειραματικά σφάλματα εκτός από την καταγραφή γεγονός προς γεγονός, έγινε λήψη φασμάτων χρησιμοποιώντας αναλογικά ηλεκτρονικά που δεν δίνουν τέτοια δυνατότητα. Η ιδέα είναι να αφαιρεθεί η συνεισφορά των αντιδράσεων ( $p, \alpha$ ), αφαιρώντας ένα γραμμικό υπόβαθρο από το πειραματικό φάσμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.13α'. Η επιλογή γραμμικού υποβάθρου δικαιολογείται από την προβολή του σήματος των αντιδράσεων

( $p, \alpha$ ) (εικ.: 5.3, 5.12α) στον άξονα του ανιχνευτή  $E$ . Αυτή η διαδικασία δεν μπορεί να συγκριθεί με την επιλογή του σήματος, όπως ακριβώς συνέβη στην προηγούμενη ενότητα, αλλά ουσιαστικά η υπόθεση ενός γραμμικού υποβάθρου δεν απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα (εικ.: 5.12β).



Σχήμα 5.12: Ενδεικτική καμπύλη ταυτοποίησης των σωματιδίων  $\alpha$  και προβολή της στον άξονα του ανιχνευτή  $E$ .  $E_p = 1.5\text{MeV}$ ,  $170^\circ$

Για να συγκριθούν οι δύο διαφορετικοί τρόποι ανάλυσης, πρέπει είτε η τελική ολοκλήρωση να πραγματοποιηθεί στην ίδια ακριβώς ενεργειακή περιοχή ή να γίνει επιφανειακά ώστε να αναδειχθεί η ενδεχόμενη επιρροή τους πάχους των ανιχνευτών  $\Delta E$ . Και στις δύο περιπτώσεις η συνάρτηση του διασκεδασμού είναι κρίσιμη. Στην πρώτη περίπτωση η ενεργειακή περιοχή ολοκλήρωσης, απουσία του  $\Delta E$  ανιχνευτή, είναι αρκετά βαθιά στο υλικό ενώ στην δεύτερη θα φανεί αν και πως η συνάρτηση του διασκεδασμού επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα κατά την διέλευση των ελαστικά σκεδαζομένων πρωτονίων και πυρήνων Ηλίου στον ανιχνευτή  $\Delta E$ .



Σχήμα 5.13: Ανάλυση με αφαίρεση γραμμικού υποβάθρου

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.14, στην περίπτωση των  $120^\circ$  η ανάλυση δεδομένων που προέκυψαν κάνοντας χρήση της τεχνικής  $\Delta E - E$  δίνει συστηματικά υπερτιμημένα ολοκληρώματα σε σχέση με την αφαίρεση γραμμικού υποβάθρου η οποία δίνει συστηματικά υποτιμημένα. Αντίθετα, στην περίπτωση των  $170^\circ$  (εικ.: 5.15), οι δύο μέθοδοι, δίνουν συστηματικά υποτιμημένα ολοκληρώματα με εξαίρεση την ενέργεια των  $2800\text{ keV}$  όπου το ελαφρώς υπερτιμημένο ολο-

κλήρωμα στην τεχνική  $\Delta E - E$  βρίσκεται εντός πειραματικής ακρίβειας. Όσο αφορά στην αφαίρεση του γραμμικού υποβάθρου οι επιφανειακές ολοκληρώσεις<sup>3</sup> δίνουν διαφορετικές αποκλίσεις, στην ίδια όμως κατεύθυνση με τις πιο βαθιές.

Ευτυχές είναι το γεγονός, πως υπάρχει ποιοτική συμφωνία μεταξύ των προσομοιωμένων και των πειραματικών φασμάτων τόσο στις δύο γωνίες όσο και στις δυο μεθόδους. Στην περίπτωση των  $120^\circ$  οι δύο μέθοδοι δίνουν αποκλίσεις σε διαφορετική κατεύθυνση. Η τεχνική  $\Delta E - E$  δίνει αποκλίσεις της τάξης του  $+2 - 51\%$ (πιν.: 5.1), η αφαίρεση του γραμμικού υποβάθρου με ολοκλήρωση στην ίδια ενεργειακή περιοχή δίνει ετερόσημη απόκλιση  $+1\%$  έως  $-22\%$ (πιν.: 5.3) ενώ με επιφανειακή ολοκλήρωση από  $-5\%$  έως  $-17\%$ (πιν.: 5.5) με εξαίρεση ένα σημείο στην ενέργεια των 2250, στα  $+27\%$ . Αντίθετα στην περίπτωση των  $170^\circ$ , οι αποκλίσεις είναι ομόσημες της τάξης του  $+2\%$  έως  $-23\%$  για την τεχνική  $\Delta E - E$ (πιν.: 5.2) ενώ η αφαίρεση του γραμμικού υποβάθρου με ολοκλήρωση στην ίδια ενεργειακή περιοχή δίνει ομόσημες αποκλίσεις  $-7\%$  έως  $-39\%$ (πιν.: 5.4). Η επιφανειακή ολοκλήρωση δίνει συγκρίσιμες αποκλίσεις της τάξης του  $-8\%$  έως  $-27\%$ (πιν.: 5.6).

| Energy | Chiari 10[10] | Chiari 10[10]    | Chiari 10[10]  | Overley 10[11] | Overley 10[11]   | Overley 10[11] |
|--------|---------------|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
|        | Chiari 11[10] | Mashkarov 11[12] | Dejneko 11[13] | Chiari 11[10]  | Mashkarov 11[12] | Dejneko 11[13] |
| 2250   | -18%          | -22%             | -18%           | +10%           | -18%             | -13%           |
| 2800   | -11%          | -12%             | -8%            | -8%            | -9%              | -6%            |
| 3300   | +1%           | -                | -              | -17%           | -                | -              |

Πίνακας 5.3: Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις  $120^\circ$  χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση στην ίδια ενεργειακή περιοχή με την αντίστοιχη της τεχνικής  $\Delta E - E$

| Energy | Chiari 10[10] | Chiari 10[10]      | Chiari 10[10]       | Chiari 10[10] |
|--------|---------------|--------------------|---------------------|---------------|
|        | Chiari 11[10] | Mayer(165°) 11[21] | Chiari(165°) 11[10] | Rihet 11[14]  |
| 1500   | -7%           | -                  | -                   | -             |
| 2250   | -19%          | -10%               | -21%                | -             |
| 2800   | -15%          | -                  | -                   | -             |
| 3300   | -39%          | -                  | -                   | -39%          |

Πίνακας 5.4: Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις  $170^\circ$  χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση στην ίδια ενεργειακή περιοχή με την αντίστοιχη της τεχνικής  $\Delta E - E$

| Energy | Chiari 10[10] | Chiari 10[10]    | Chiari 10[10]  | Overley 10[11] | Overley 10[11]   | Overley 10[11] |
|--------|---------------|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
|        | Chiari 11[10] | Mashkarov 11[12] | Dejneko 11[13] | Chiari 11[10]  | Mashkarov 11[12] | Dejneko 11[13] |
| 2250   | -15%          | -16%             | -13%           | +27%           | -14%             | -10%           |
| 2800   | -15%          | -9%              | -7%            | -14%           | -7%              | -6%            |
| 3300   | -5%           | -                | -              | -17%           | -                | -              |

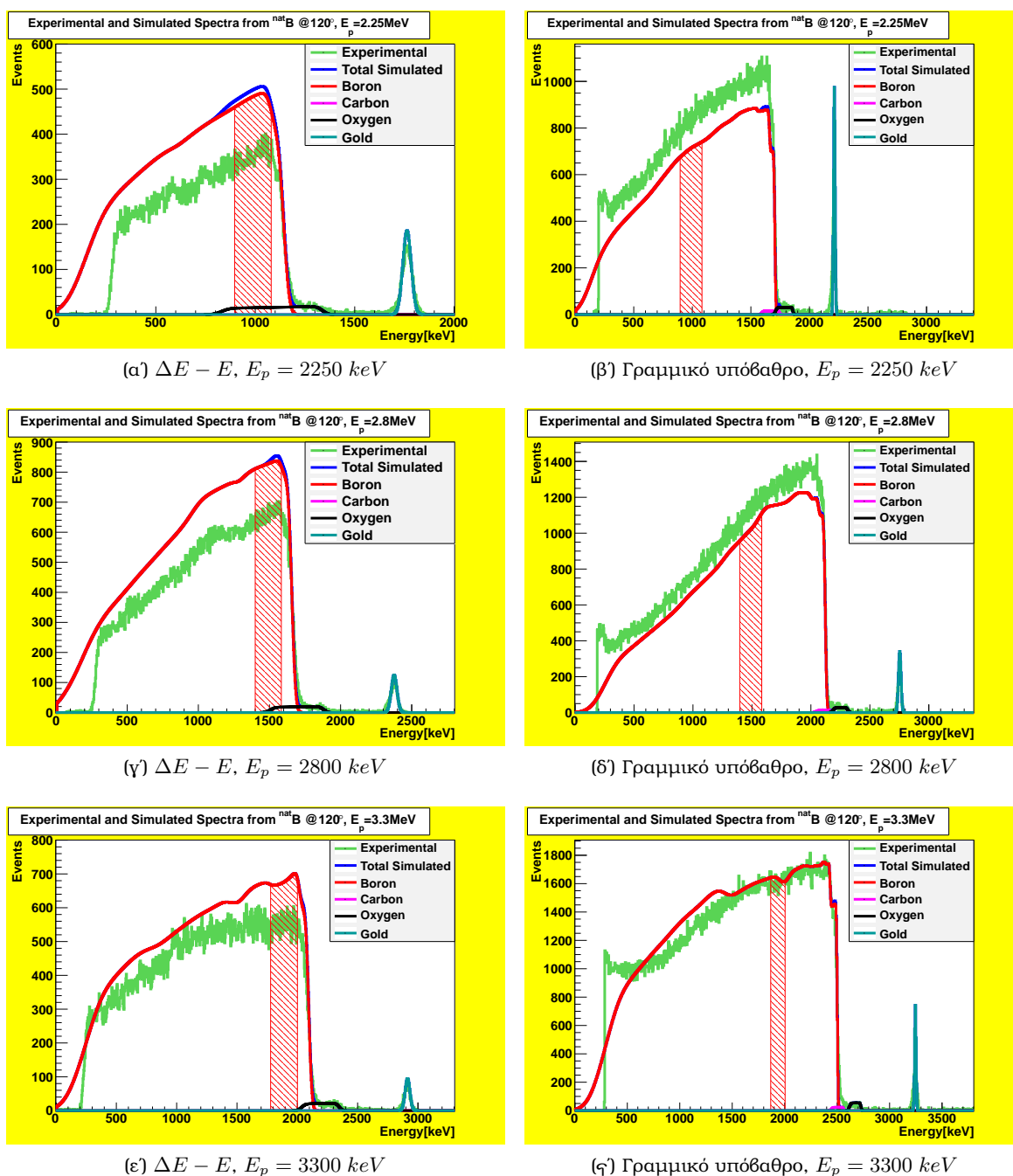
Πίνακας 5.5: Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορικών ενεργών διατομών για τις  $120^\circ$  χρησιμοποιώντας επιφανειακή ολοκλήρωση

<sup>3</sup>Στα αντίστοιχα γραφήματα, δεν φαίνονται οι επιφανειακές ολοκληρώσεις για λόγους απλότητας



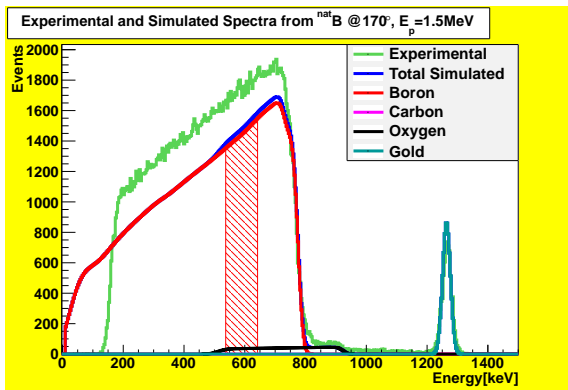
| Energy | Chiari 10[10]<br>Chiari 11[10] | Chiari 10[10]<br>Mayer(165°) 11[21] | Chiari 10[10]<br>Chiari(165°) 11[10] | Chiari 10[10]<br>Rihet 11[14] |
|--------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1500   | —                              | —                                   | —                                    | —                             |
| 2250   | -20%                           | -8%                                 | -22%                                 | —                             |
| 2800   | -23%                           | —                                   | —                                    | —                             |
| 3300   | -27%                           | —                                   | —                                    | -27%                          |

Πίνακας 5.6: Έλεγχος αξιοπιστίας διαφορετικών ενεργών διατομών για τις  $170^\circ$  χρησιμοποιώντας επιφανειακή ολοκλήρωση

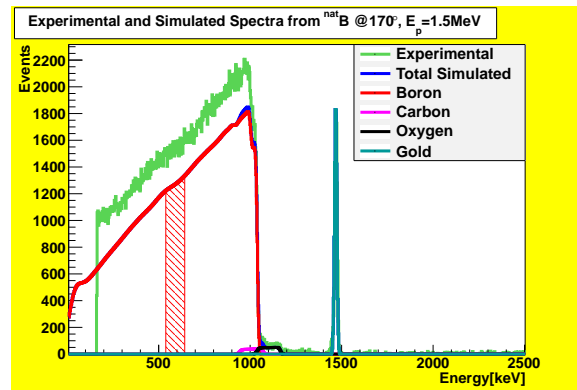


Σχήμα 5.14: Πειραματικά και προσομοιωμένα φάσματα  ${}^{nat}B(p,p){}^{nat}B$  για γωνία σκέδασης  $120^\circ$  με χρήση της τεχνικής  $\Delta E - E$  (αριστερή στήλη) και γραμμικής αφαίρεσης ( $p, \alpha$ ) υποβάθρου(δεξιά στήλη).

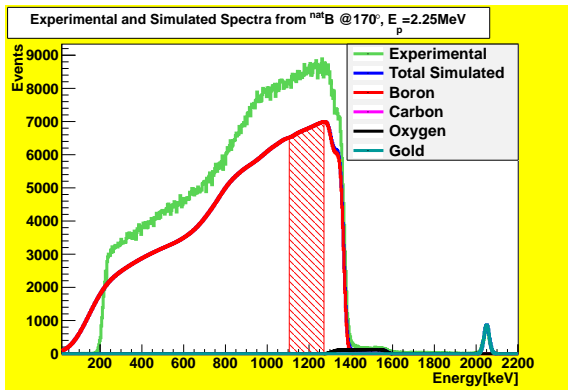




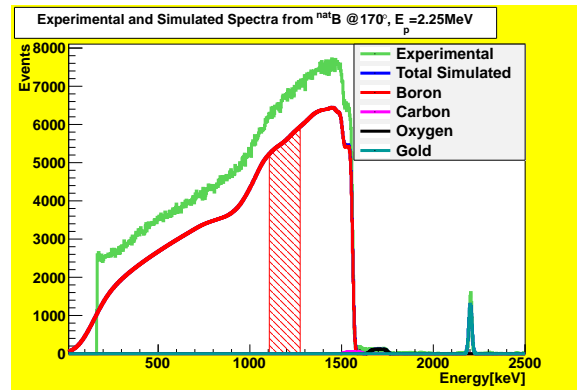
(α)  $\Delta E - E$ ,  $E_p = 1500 \text{ keV}$



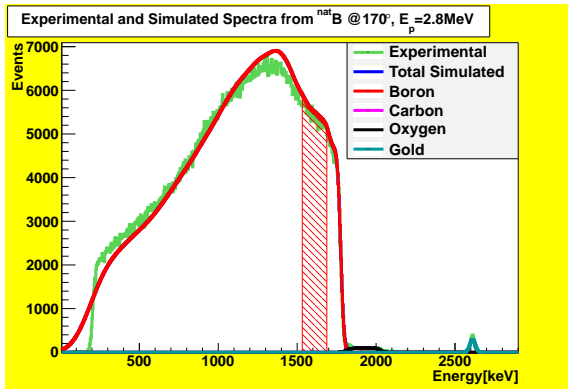
(β) Γραμμικό υπόβαθρο,  $E_p = 1500 \text{ keV}$



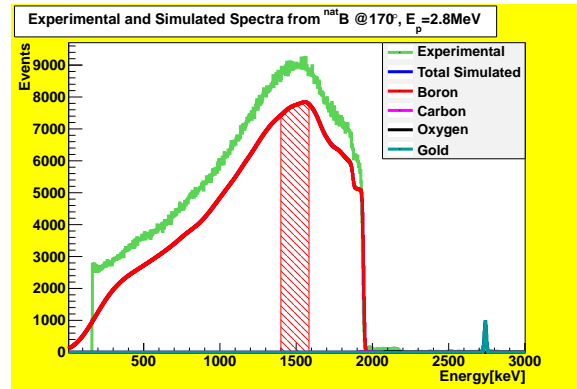
(γ)  $\Delta E - E$ ,  $E_p = 2250 \text{ keV}$



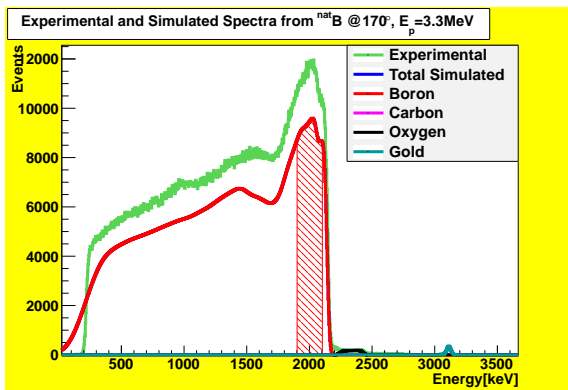
(δ) Γραμμικό υπόβαθρο,  $E_p = 2250 \text{ keV}$



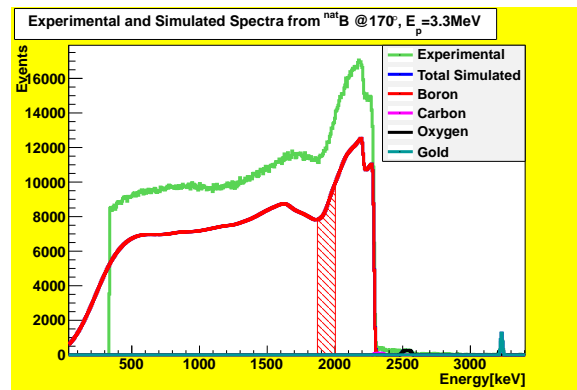
(ε)  $\Delta E - E$ ,  $E_p = 2800 \text{ keV}$



(ς) Γραμμικό υπόβαθρο,  $E_p = 2800 \text{ keV}$



(ζ)  $\Delta E - E$ ,  $E_p = 3300 \text{ keV}$



(η) Γραμμικό υπόβαθρο,  $E_p = 3300 \text{ keV}$

Σχήμα 5.15: Πειραματικά και προσομοιωμένα φάσματα  $^{nat}B(p, p)^{nat}B$  για γωνία σκέδασης  $170^\circ$  με χρήση της τεχνικής  $\Delta E - E$  (αριστερή στήλη) και γραμμικής αφαίρεσης  $(p, \alpha)$  υποβάθρου(δεξιά στήλη).

Συμπερασματικά, αυτό που μπορεί να ειπωθεί με ασφάλεια και τεκμηριώνεται από την παρούσα εργασία, είναι πως η συνάρτηση του διασκεδασμού επηρεάζει καθοριστικά την διαδικασία αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της τεχνικής  $\Delta E - E$  απαιτεί την χρήση λεπτού ανιχνευτή  $\Delta E$  για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του ενεργειακού διασκεδασμού. Όσο μικρότερο είναι το πάχος του εν λόγω ανιχνευτή, τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι η αξιολόγηση των διαφορικών ενεργών διατομών. Στην περίπτωση που δεν μπορεί να υλοποιηθεί η τεχνική  $\Delta E - E$ , η αφαίρεση γραμμικού υποβάθρου που αφορά στην συνεισφορά των αντιδράσεων  $(p, \alpha)$  που προέρχονται από  $^{nat}B$ , διαφαίνεται πως μπορεί να δώσει αξιοποιήσιμα και έγκυρα αποτελέσματα.

## **Μέρος II**

# **Τεχνικά Στοιχεία**

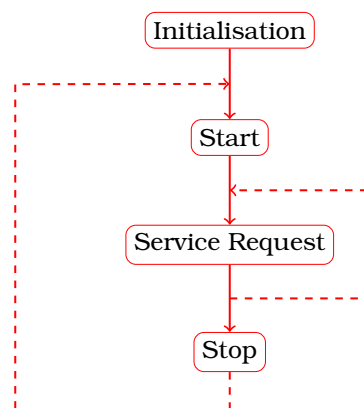


# Ανάπτυξη Συστήματος Λήψης και Καταγραφής Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα περιγραφεί η ανάπτυξη του συστήματος ανάγνωσης και λήψης δεδομένων για τις ανάγκες του πειράματος καθώς και μερικά εισαγωγικά στοιχεία του τρόπου λειτουργίας ενός συστήματος καταγραφής βασισμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

## 6.1 Computer Automated Measurement And Control-CAMAC

Ένα σύστημα καταγραφής βασισμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ήταν απαραίτητο για την διεξαγωγή του πειράματος, καθώς απαιτείται επιλογή δεδομένων και γεγονότων με κάποια συγκεκριμένα κριτήρια, συνεπώς η χρήση ηλεκτρονικών CAMAC ήταν μονόδρομος. Τα ηλεκτρονικά CAMAC διαφέρουν από τα αντίστοιχα NIM στο γεγονός ότι υπάρχει ένας επεξεργαστής ο οποίος διαχειρίζεται τις διάφορες λειτουργίες. Συγκεκριμένα υπάρχει ένας crate controller ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία των μονάδων μεταξύ τους. Εκείνη η μονάδα είναι επίσης υπεύθυνη για τον καθορισμό της μεταφοράς και αποθήκευσης δεδομένων σε έναν προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή με ρυθμούς μεταφοράς της τάξης των  $3MB/s$ [22]. Τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας List Processor ο οποίος αφενός αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και αφετέρου προσφέρει μνήμη ώστε να αποθηκεύονται προσωρινά τα δεδομένα, με σκοπό την μείωση του νεκρού χρόνου του καταγραφικού συστήματος κατά την διάρκεια της μεταφοράς των δεδομένων. Τέλος, απαραίτητη μονάδα είναι ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ο οποίος για να λειτουργήσει πρέπει να του έχει δοθεί ένα χρονικό σήμα καταγραφής ή χρονικό παράθυρο ή χρονική πύλη όπως είναι γνωστό στην βιβλιογραφία. Να σημειωθεί πως όλες οι παραπάνω λειτουργίες πρέπει να υλοποιηθούν προγραμματιστικά μέσω την πλατφόρμας ανάγνωσης και λήψης δεδομένων, δηλαδή του Data Acquisition Software-DAQ. Μια τέτοια πλατφόρμα αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας του DAQ

## 6.2 Σύστημα καταγραφής δεδομένων-DAQ

Το εν λόγω σύστημα, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα KMax της εταιρίας Sparrow. Αυτή η πλατφόρμα, παρέχει βιβλιοθήκες για την χρήση αντικειμένων (objects) που χρησιμοποιούνται στην δημιουργία ενός γραφικού περιβάλλοντος αλληλεπίδρασης μεταξύ χρήστη και υπολογιστή (Graphical User Interface-GUI). Μερικά από αυτά τα αντικείμενα περιλαμβάνουν κουμπιά, ιστογράμματα, διαγράμματα, πεδία εισαγωγής δεδομένων από τον χρήστη κ.ο.κ.. και όλα αυτά δημιουργούνται χρησιμοποιώντας την προγραμματιστική γλώσσα Java της Oracle Μέσω αυτής της πλατφόρμας πραγματοποιείται και ο προγραμματισμός των μονάδων CAMAC.

### 6.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας λειτουργίας του κώδικα

Η βασική δομή λειτουργίας του κώδικα φαίνεται στην εικόνα 6.1. Σε αυτήν την υποενότητα, θα περιγραφούν συνοπτικά οι λειτουργίες που επιτελούνται από την στιγμή που ξεκινά μέχρι την στιγμή που σταματά η καταγραφή δεδομένων.

#### 6.2.1.1 Αρχικοποίηση-Initialisation

Κατά την αρχικοποίηση η οποία λαμβάνει χώρα μόλις ο χρήστης εκκινήσει το πρόγραμμα, όλα τα αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί, καταλαμβάνουν μια φυσική διεύθυνση και κατ'επέκταση την ποσότητα μνήμης που τους αναλογεί. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται προσβάσιμα από τον μετέπειτα κώδικα, ώστε να επιτελέσουν τις λειτουργίες για τις οποίες έχουν κατασκευαστεί (καταγραφή δεδομένων σε ιστόγραμμα, πάτημα ενός κουμπιού κ.λπ.).

#### 6.2.1.2 Εκκίνηση-Start

Κατά την εκκίνηση, την οποία προκαλεί ο χρήστης πιέζοντας το σχετικό κουμπί, λαμβάνει χώρα η αρχικοποίηση των συσκευών CAMAC. Επιτελούνται λειτουργίες όπως ανάγνωση (read) και έλεγχος ορθής λειτουργίας των συσκευών (test), καθαρισμός της μνήμης τους (clear), επαναφορά στην αρχική τους κατάσταση (reset), εισαγωγή των δεικτών ανάγνωσης και εγγραφής μνήμης (read/write pointers) στις αρχικές θέσεις και αρχικοποίηση του δείκτη καταγραφής γεγονός(LAM-Look At Me pointer). Τέλος αρχικοποιούνται και όσα αντικείμενα, στην γραφική διεπιφάνεια αλληλεπίδρασης χρήστη-υπολογιστή, αναγράφουν τιμές ή δεδομένα (π.χ. διαγραφή των δεδομένων που απεικονίζονται σε ένα ιστόγραμμα).

#### 6.2.1.3 Καταγραφή Δεδομένων-System Request-SRQ

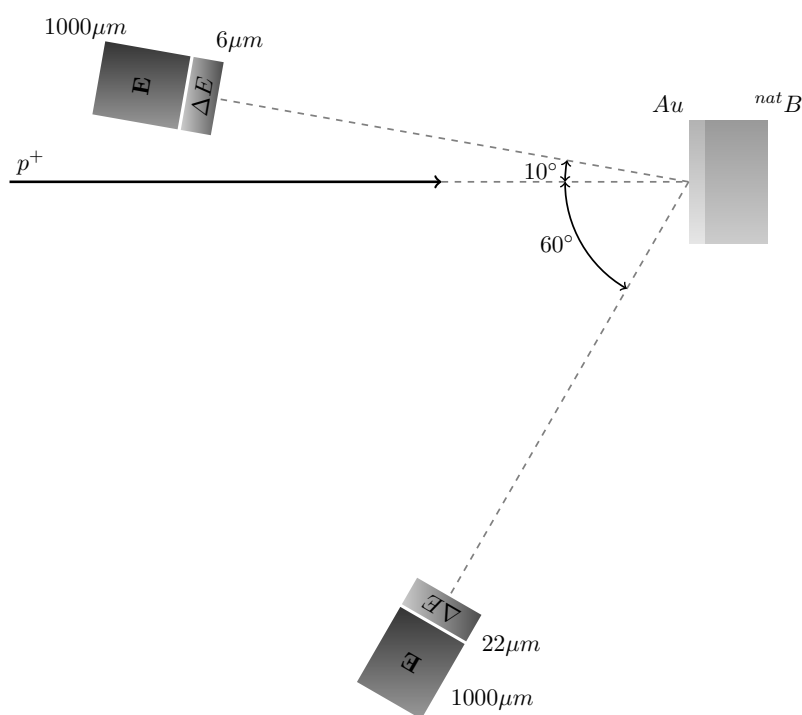
Αυτό το στάδιο, αποτελεί ουσιαστικά την καρδιά της καταγραφής. Όταν ένα γεγονός, πληροί ορισμένες προϋποθέσεις, δηλαδή είναι ικανό να προκαλέσει σκανδαλισμό (trigger), τότε ενεργοποιείται ο δείκτης LAM, ο οποίος ενεργοποιεί τον δείκτη ανάγνωσης και οι δείκτες καταγραφής γεμίζουν την μνήμη. Ο δείκτης πληρότητας της μνήμης (buffer pointer) «μετακινείται» μέχρι να πληρωθεί η μνήμη. Μόλις συμβεί αυτό, τα δεδομένα μεταφέρονται σε έναν αποθηκευτικό χώρο και ο buffer pointer παίρνει την αρχική του θέση. Όλη αυτή η διαδικασία αποτελεί έναν κύκλο. Μόλις ολοκληρωθεί ένας κύκλος, το σύστημα ξεκινάει τον επόμενο. Τέλος κατά την καταγραφή δεδομένων, ανανεώνονται (update) όλες οι πληροφορίες που αναγράφονται στα αντικείμενα (π.χ. ανανέωση των δεδομένων που απεικονίζονται σε ένα ιστόγραμμα, ανανέωση του χρόνου καταγραφής κ.λπ.).

### 6.2.1.4 Παύση-Stop

Μόλις ο χρήστης πιάσει το κουμπί λήξης της καταγραφής, μεταφέρονται όσα δεδομένα δεν έχουν μεταφερθεί λόγω της θέσης του buffer pointer. Αν για παράδειγμα ο buffer pointer βρίσκεται στην μέση της μνήμης, με το πάτημα του κουμπιού λήξης, θα σταματήσει η καταγραφή, θα μεταφερθούν όσα δεδομένα έχουν απομείνει και θα «παγώσει» η εικόνα του γραφικού παραθύρου.

### 6.2.2 Διαδικασία καταγραφής

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το καταγραφικό σύστημα σε συνεργασία με το ανιχνευτικό. Αυτή η περιγραφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας γεγονότα από το πείραμα καθώς και την αντίστοιχη γεωμετρία (εικ.: 6.2)



Σχήμα 6.2: Σχηματική αναπαράσταση των της γεωμετρίας τοποθέτησης των τηλεσκοπίων

Έστω ότι το πρώτο γεγονός που θα καταγραφεί είναι ένα ελαστικά σκεδαζόμενο πρωτόνιο στην γωνία των  $120^\circ$ . Αυτό το πρωτόνιο θα εναποθέσει ενέργεια τόσο στον  $\Delta E$  όσο και στον  $E$ . Το καταγραφικό σύστημα χρειάζεται μια «σημαία» (flag), ένα ιδιαίτερο σήμα δηλαδή, το οποίο θα εκκινήσει την εν λόγω καταγραφή. Αυτό το ιδιαίτερο σήμα είναι το λεγόμενο σήμα σκανδαλισμού ή trigger όπως είναι γνωστό στην βιβλιογραφία. Για τις ανάγκες του πειράματος, επιλέχθηκε σαν συνθήκη σκανδαλισμού η παραγωγή σήματος από τους  $E$  ανιχνευτές. Αυτή η επιλογή είναι η πιο ασφαλής από την άποψη χαμένων γεγονότων, αφού αν ένα πραγματικό γεγονός έχει καταγραφεί από τον  $E$  ανιχνευτή τότε σίγουρα θα έχει καταγραφεί και από τον  $\Delta E$ , εφόσον δεν υπάρχει διαφορά - διόρθωση στερεάς γωνίας λόγω της τοποθέτησης των ανιχνευτών σε «επαφή». Βέβαια, το τίμημα είναι πως αν υπάρχει ένας θορυβώδης ανιχνευτής τότε το καταγραφικό σύστημα θα βρίσκεται σε κατάσταση εγγραφής από μη πραγματικά γεγονότα. Αυτό το εμπόδιο μπορεί να παρακαμφθεί αφενός με την χρήση discriminator, ο οποίος αποκόπτει σήματα που δεν ξεπερνούν μια στάθμη και αφετέρου με την επιλογή των χρήσιμων σημάτων, offline από κατάλληλο κώδικα.

Συνεπώς τα σήματα που θα καταγραφούν, θα είναι τουλάχιστον όλα τα πραγματικά. Αυτά ταξινομούνται σε έναν πίνακα με τον εξής τρόπο: Έστω ότι το πρώτο γεγονός που θα καταγραφεί είναι ένα ελαστικά σκεδαζόμενο πρωτόνιο στην γωνία των  $120^\circ$ . Αυτό το πρωτόνιο θα εναποθέσει ενέργεια τόσο στον  $\Delta E$  όσο και στον  $E$ , συνεπώς θα δημιουργηθεί σήμα σκανδαλισμού (κυανό σήμα εικ.:6.3) το οποίο θα δημιουργήσει μια χρονική πύλη (πορτοκαλί σήμα εικ.:6.3) ώστε να καταγραφούν τα χρήσιμα αυτά σήματα. Στον πίνακα θα αναγραφούν τα εξής :

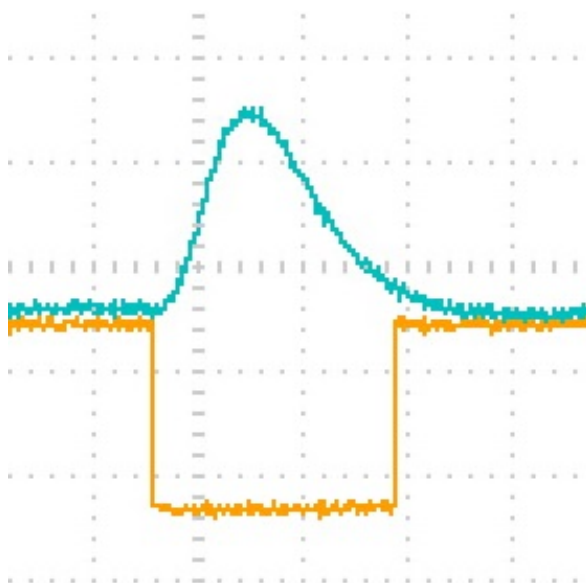
| # | DE120 | E120 | DE170 | E170 |
|---|-------|------|-------|------|
| 1 | 50    | 532  | 0     | 0    |

Οι τιμές που αναγράφονται στον πίνακα, αντιπροσωπεύουν το συνολικό φορτίο που δημιουργήθηκε στον ανιχνευτή και οι διαστάσεις τους είναι τυχαίες. Έστω ότι το δεύτερο γεγονός, ανιχνευτεί ξανά από τον τηλεσκόπιο στις  $120^\circ$  αλλά αυτή την φορά, εναποθέτει όλη του την ενέργεια σε αυτόν. Ο πίνακας τώρα θα πάρει την μορφή

| # | DE120 | E120 | DE170 | E170 |
|---|-------|------|-------|------|
| 1 | 50    | 532  | 0     | 0    |
| 2 | 853   | 0    | 0     | 0    |

Τέλος, έστω ένα τρίτο υψηλοενεργειακό γεγονός, το οποίο ανιχνεύεται στις  $170^\circ$  και εναποθέτει ενέργεια και στους δύο ανιχνευτές. Η τρίτη γραμμή του πίνακα θα πάρει ενδεικτικά τις εξής τιμές

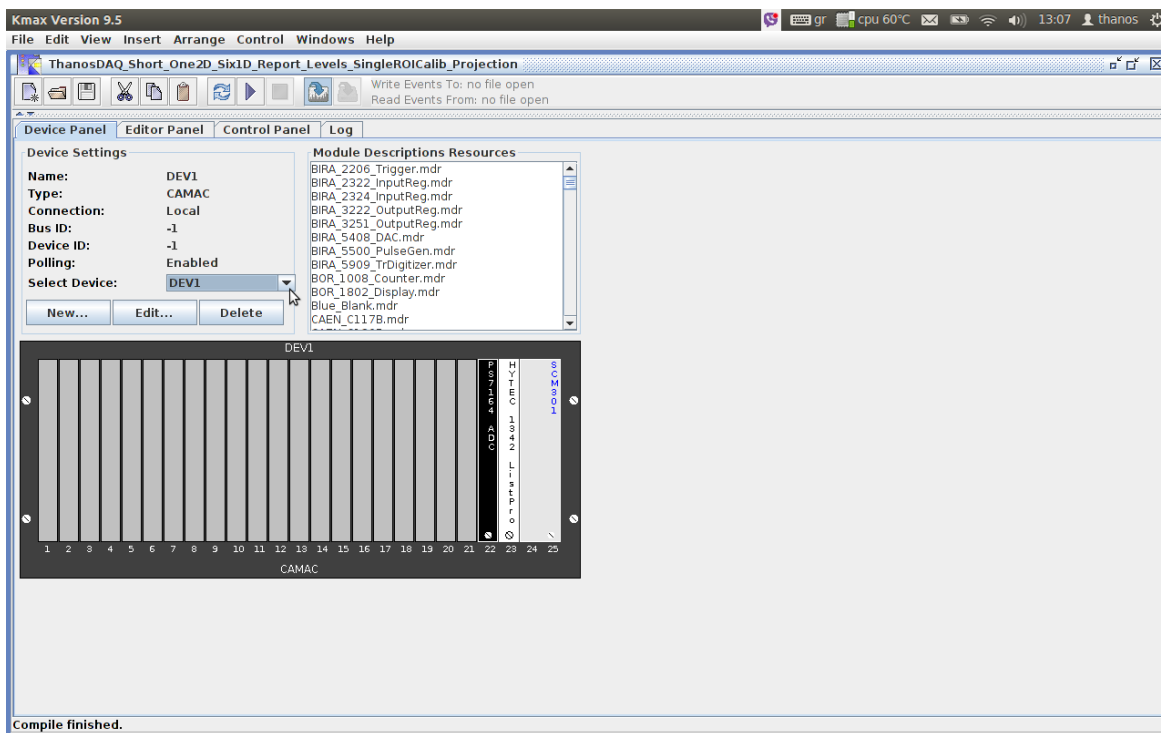
| # | DE120 | E120 | DE170 | E170 |
|---|-------|------|-------|------|
| 1 | 50    | 532  | 0     | 0    |
| 2 | 853   | 0    | 0     | 0    |
| 3 | 0     | 0    | 531   | 1049 |



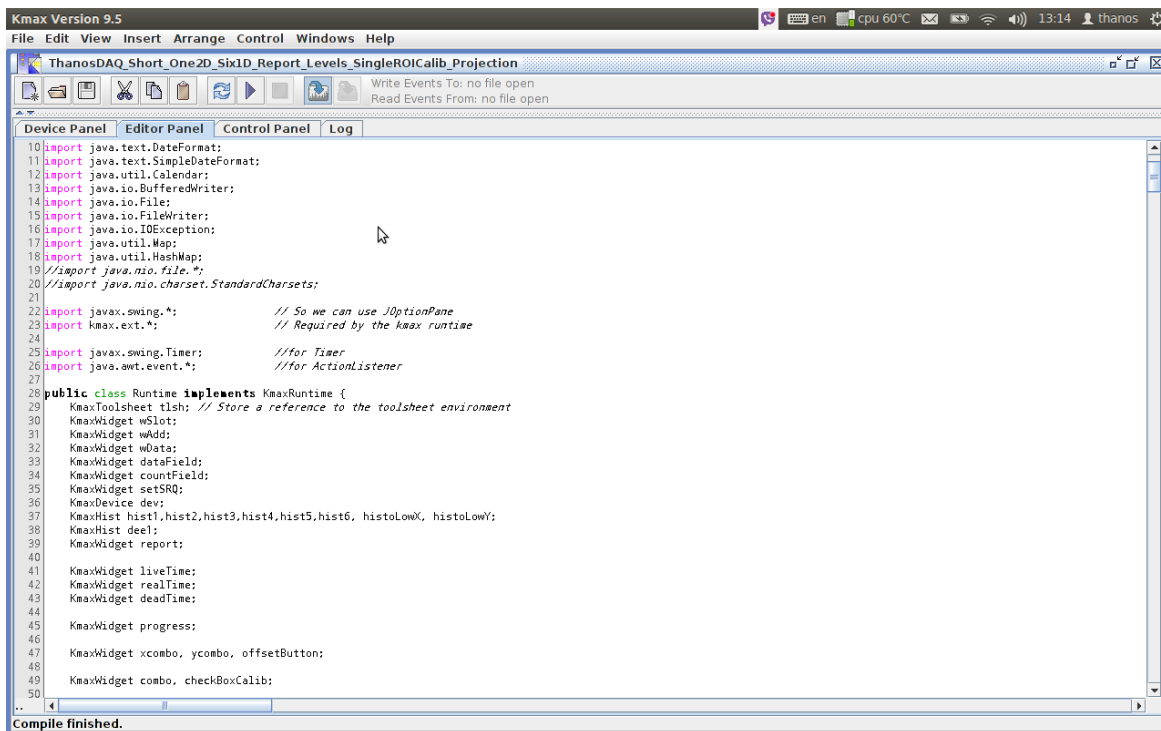
Σχήμα 6.3: Δημιουργία χρονικής πύλης, για την καταγραφή και λήψη δεδομένων



## 6.2.3 Γραφική Διεπιφάνεια Αλληλεπίδρασης-GUI

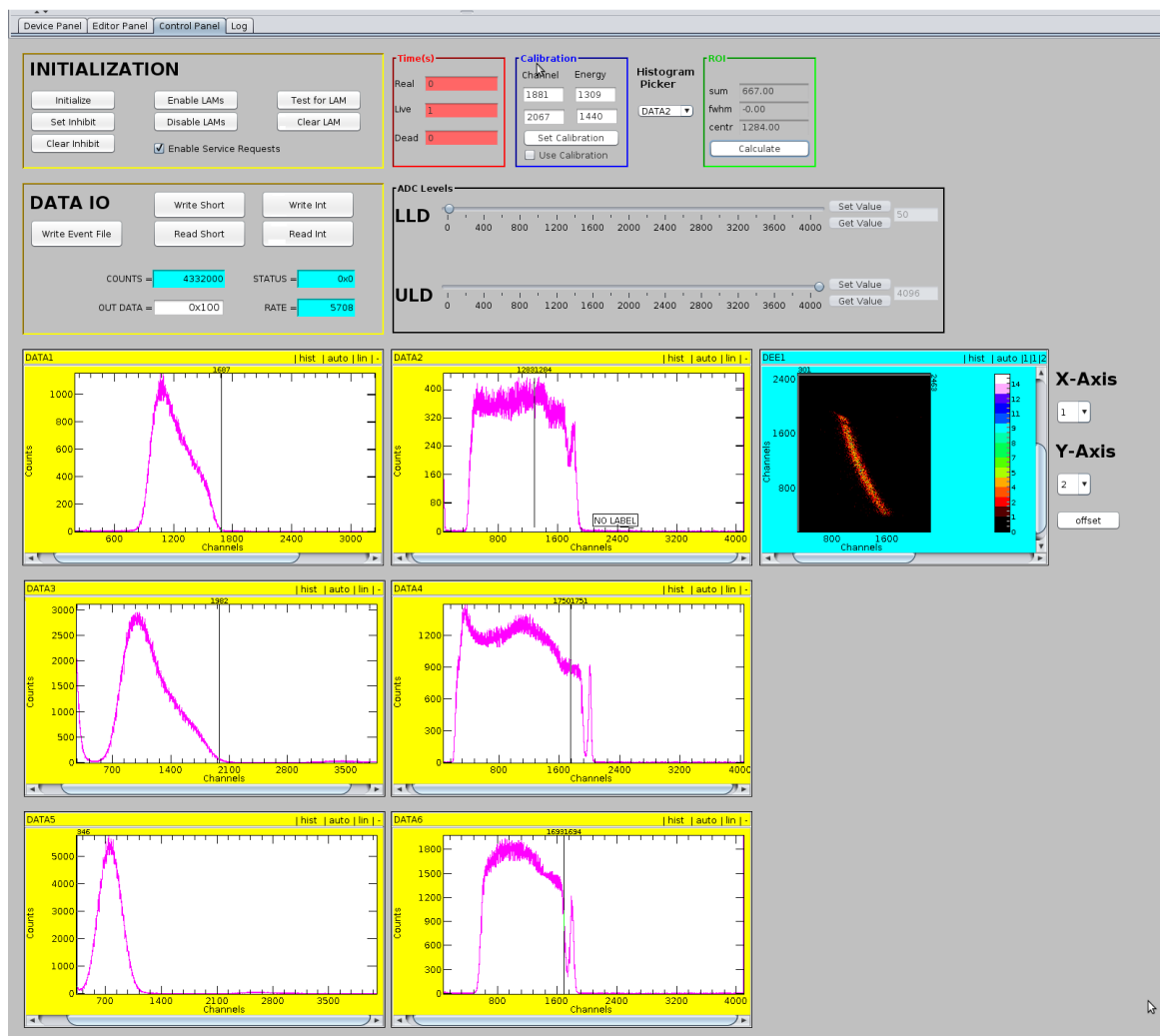


Σχήμα 6.4: Η καρτέλα Device Panel



Σχήμα 6.5: Η καρτέλα Editor Panel

Παρακάτω θα παρουσιαστεί η Γραφική Διεπιφάνεια Αλληλεπίδρασης χρήστη με προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο σχεδιασμός της γραφικής πλατφόρμας υλοποιήθηκε με γνώμονα τις μέγιστες δυνατές παροχές και ευκολίες προς τον χρήστη. Η κύρια πλατφόρμα αποτελείται από 4 κύριες καρτέλες. Στην πρώτη (εικ.: 6.4) η οποία ονομάζεται Device Panel, μπορεί κανείς να δει μια αναπαράσταση του CAMAC Crate και των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν στην καταγραφή και λήψη των δεδομένων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα προσθήκης ή αφαίρεσης συσκευών. Η επόμενη κατά σειρά καρτέλα (εικ.: 6.5), αφορά στην τροποποίηση του κώδικα ώστε να δίδεται η δυνατότητα άμεσης και online τροποποίησης του κώδικα. Το κύριο μέρος της γραφική διεπιφάνειας αφορά στην καρτέλα Control Panel (εικ.: 6.6), όπου πραγματοποιείται η απεικόνιση των καταγεγραμμένων γεγονότων και ο χρήστης αλληλεπιδρά με το σύστημα.



Σχήμα 6.6: Η καρτέλα Control Panel

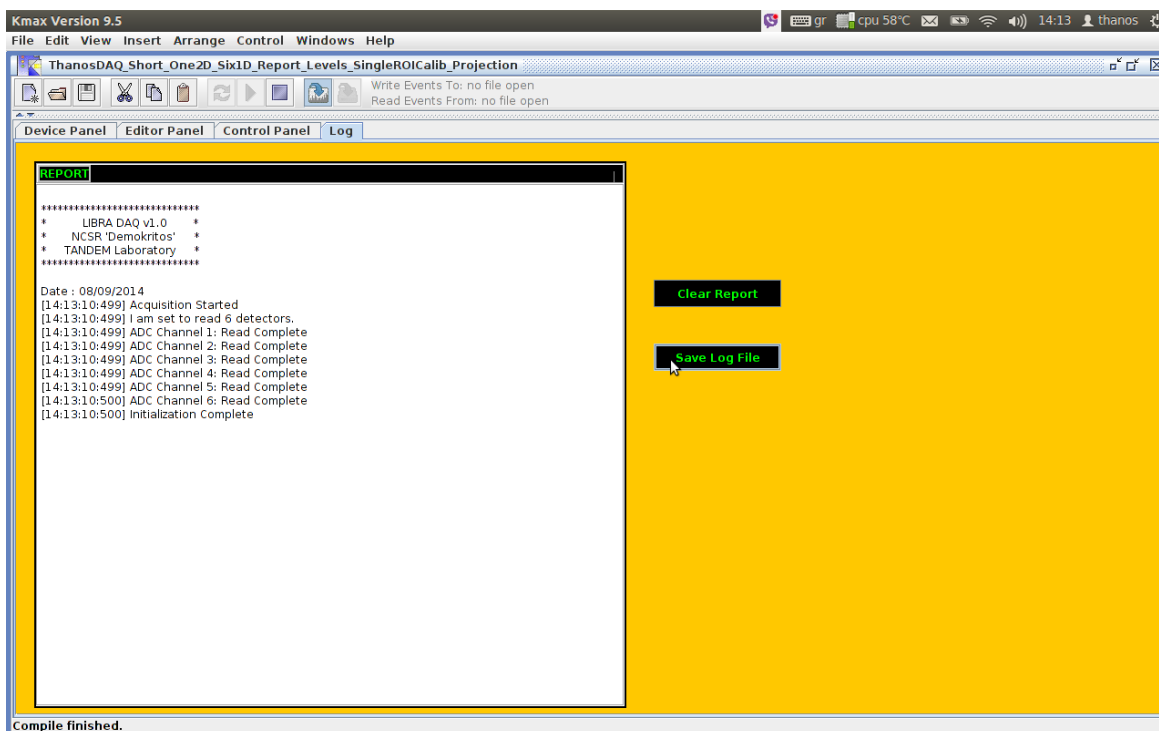
Στην εν λόγω καρτέλα έχουν ενσωματωθεί 6 ιστογράμματα μιας διάστασης (κίτρινο χρώμα) τα οποία καταγράφουν τα δεδομένα απ' ευθείας από τους ανιχνευτές. Εκτός από αυτά, υπάρχει 1 ιστόγραμμα (κυανό χρώμα) στο οποίο ο χρήστης επιλέγει 2 κίτρινα ιστογράμματα, χρησιμοποιώντας τα drop down menus που βρίσκονται στα δεξιά με σκοπό την δημιουργία και την online παρακολούθηση των banana plots. Σε αυτό το διδιάστατο ιστόγραμμα, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει μια περιοχή και να την προβάλει online στο τελευταίο ζεύγος ιστογραμμάτων (πράσινο χρώμα).

Στα ιστογράμματα, ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει διάφορες λειτουργίες. Χρησιμοποιεί-

ώντας το μπλε κουτί στο πάνω μέρος της καρτέλας, μπορεί να εφαρμόσει γραμμική ενεργειακή βαθμονόμηση, επιλέγοντας μέσω του σχετικού μενού πιο ιστόγραμμα επιθυμεί να βαθμονομήσει. Έχει δοθεί η δυνατότητα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της βαθμονόμησης ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μια περιοχή στο ιστόγραμμα που τον ενδιαφέρει, χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους κέρσορες που βρίσκονται ενσωματωμένοι στα ιστογράμματα και να εφαρμόσει διάφορες συναρτήσεις, όπως ολοκλήρωση, εύρεση του κεντροειδούς μια κορυφής και του πλήρους πλάτους στο μέγιστο ύψος επιλέγοντας στο πράσινο κουτί που βρίσκεται στο άνω μέρος της καρτέλας το ιστόγραμμα που τον ενδιαφέρει.

Τέλος εκτός από διαγνωστικές λειτουργίες, λειτουργίες χειροκίνητης αρχικοποίησης και διάφορα πεδία παρακολούθησης της καταγραφής, όπως είναι για παράδειγμα ο συνολικός χρόνος καταγραφής, το συνολικό πλήθος των καταγεγραμμένων γεγονότων, ο ρυθμός καταγραφής κ.λπ., έχει προστεθεί η δυνατότητα τροποποίησης των ορίων απόρριψης σήματος στον ADC, μετακινώντας τις ειδικές μπάρες κύλισης που βρίσκονται στο μαύρο πλαίσιο.

Η τελευταία καρτέλα (εικ.: 6.7), αφορά στην ενημέρωση των λειτουργιών και της κατάστασης του καταγραφικού συστήματος. Όλες οι λειτουργίες που αφορούν στις μονάδες καταγραφής, δίνουν ένα μήνυμα επιτυχίας ή αποτυχίας, το οποίο καταγράφεται στην 4η κατά σειρά καρτέλα. Επίσης κάθε πάτημα κουμπιού από τον χρήστη καταγράφεται για μελλοντική αναφορά. Σε όλες τις καταγραφές αναγράφεται η ημερομηνία και η ώρα. Κατά την λήξη της καταγραφής τυπώνεται ο συνολικός χρόνος της, ο νεκρός χρόνος της και το πλήθος των γεγονότων που έχουν καταγραφεί. Τέλος έχει δοθεί η δυνατότητα αποθήκευσης της αναφοράς καθώς και διαγραφής της, αν το επιθυμεί ο χρήστης.



Σχήμα 6.7: Η καρτέλα Log

#### 6.2.4 Έλεγχος σωστής λειτουργίας του συστήματος καταγραφής

Αφού έχει γίνει ο προγραμματισμός των CAMAC συσκευών και δεν υπάρχουν συντακτικά λάθη στον κώδικα, σειρά έχει ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας του. Αρχικά έγινε λήψη φασμάτων χρησιμοποιώντας γεννήτριες σημάτων για να διαπιστωθεί ότι το σύστημα λειτουργεί και σε

πρώτο στάδιο καταγράφει. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι για να διαπιστωθεί αν ο ρυθμός των δεδομένων που προέρχεται από τους ανιχνευτές, διαφέρει σημαντικά από αυτόν που καταγράφεται στον υπολογιστή. Υπήρξε όντως μια απώλεια, αλλά ήταν μικρότερη από 1% σε ρυθμούς καταγραφής έως  $10kHz$ .

Το κύριο πρόβλημα όμως ήταν τα βυθίσματα και τα υψώματα που παρουσίαζαν τα ιστογράμματα σε υψηλούς ρυθμούς καταγραφής  $> 1kHz$ . Έγιναν διάφορες προσπάθειες, αρχικά κατανόησης της πηγής του προβλήματος. Το πρώτο που ελέγχθηκε ήταν αν υπάρχει απώλεια δεδομένων ή αν αυτές οι ανωμαλίες είναι ανακατανομή των παλμών. Για να ελεγχθεί αυτό συγκρίθηκαν οι παλμοί πριν από το CAMAC κομμάτι, δηλαδή πριν από τον ADC, με αυτούς που καταγράφει το σύστημα λήψης δεδομένων. Οι διαφορές βρέθηκαν να είναι μικρότερες από 1% σε ρυθμούς καταγραφής έως  $10kHz$ . Συνεπώς αυτό που συμβαίνει είναι ανακατανομή των παλμών. Για να ελεγχθεί αν το πρόβλημα προέρχεται από τον ADC και την επικοινωνία του με τον List Processor ή από τον κώδικα, έγινε ανάπτυξη ενός νέου, απλουστευμένου κώδικα ο οποίος εξαναγκάζει τον ADC να στείλει τα δεδομένα απ' ευθείας στον υπολογιστή. Αυτός ο έλεγχος έδειξε πως το πρόβλημα έγκειται στον ADC και όχι στον τρόπο που έχει υλοποιηθεί ο κώδικας.

# Πηγαίος Κώδικας

Στο παρόν κεφάλαιο, δίδεται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος ανάγνωσης και λήψης δεδομένων, ο οποίος πραγματοποιεί on-line απεικόνιση των σημάτων καθενός τηλεσκοπίου, σε ένα ιστογράμμα δύο διαστάσεων και on-line προβολή του διδιάστατου ιστογράμματος σε 2 ιστογράμματα μίας διάστασης. Ο κώδικας αυτός, συνοδεύεται από έναν δεύτερο κώδικα, με τον οποίο πραγματοποιείται η επιλογή των χρήσιμων σημάτων.

## 7.1 DAQ

```

1  /** ===== SCM 301 Kmax ToolSheet =====
2  * These sequences provide a toolsheet to use the SCM_301 driver in Kmax.
3  * Standard Functions have been used, as indicated in the units' manuals.
4  * The control Panel features many basic and useful functions for a medium user.
5  * In this way the DAQ remains as low as possible in memory demand.
6  *
7  * This code was developed at National Center for Scientific Research "Demokritos"
8  * at the TANDEM Laboratory located at the Institute of Nuclear and Particle Physics
9  */
10
11 import java.util.Date;
12 import java.text.DateFormat;
13 import java.text.SimpleDateFormat;
14 import java.util.Calendar;
15 import java.io.BufferedWriter;
16 import java.io.File;
17 import java.io.FileWriter;
18 import java.io.IOException;
19 import java.util.Map;
20 import java.util.HashMap;
21 //import java.nio.file.*;
22 //import java.nio.charset.StandardCharsets;
23
24 import javax.swing.*; // So we can use JOptionPane
25 import kmax.ext.*; // Required by the kmax runtime
26
27 import javax.swing.Timer; //for Timer
28 import java.awt.event.*; //for ActionListener
29
30 public class Runtime implements KmaxRuntime {
31     KmaxToolsheet tlsh; //Store a reference to the toolsheet environment
32     KmaxWidget wSlot;
33     KmaxWidget wAdd;
34     KmaxWidget wData;
35     KmaxWidget dataField;
36     KmaxWidget countField;
37     KmaxWidget setSRQ;
38     KmaxDevice dev;
39     KmaxHist hist1,hist2,hist3,hist4,hist5,hist6, histoLowX, histoLowY;
40     KmaxHist deel;
41     KmaxWidget report;
42
43     KmaxWidget liveTime;
44     KmaxWidget realTime;

```

```

45     KmaxWidget deadTime;
46
47     KmaxWidget progress;
48
49     KmaxWidget xcombo, ycombo, offsetButton;
50
51     KmaxWidget combo, checkBoxCalib;
52
53     /** ADC Levels */
54     KmaxWidget lld;
55     KmaxWidget setLLD;
56     KmaxWidget getLLD;
57     KmaxWidget lldText;
58     KmaxWidget uld;
59     KmaxWidget setULD;
60     KmaxWidget getULD;
61     KmaxWidget uldText;
62
63     /** Calibration - Check Box(use calibration) */
64     boolean eventFileOn = true;
65
66     int slotADC = 22; // Change CAMAC controller's backpanel jumper, accordingly
67     int count = 0;
68     int[] data = new int[1];
69     int[] offset = {0, 0};
70     int[] in = {1, 2};
71     int[] ones = {1,1};
72     int points = 10;
73     int[] region = new int[points];
74     int timeTicks;
75     int totalTime;
76     int LiveTime = 0;
77     int totcount;
78     int evType = 1; //The Type ID for these kinds of events
79     SimpleDateFormat today = new SimpleDateFormat("dd/MM/yyyy");
80     SimpleDateFormat now = new SimpleDateFormat("HH:mm:ss:SSS");
81
82     Map<String, KmaxHist> histograms = new HashMap<String, KmaxHist>();
83
84     static final int evSize = 6; //The num of parameters per event of this type
85     static final int BUF_SIZE = evSize*1000; // Buffer size
86     static final int LP_MEM_TOP = 0xFFFF00; //Memory size 16MB
87     static final int READ_START = LP_MEM_TOP - BUF_SIZE; //We start the
88     ↪ read/write pointer 1 buffer before the end
89
90     int[] blkData = new int[BUF_SIZE];
91     /**
92     * The 'init' method is executed at compile time.
93     */
94     public void init(KmaxToolsheet toolsheet) {
95         tlsh = toolsheet; //Save this reference for use in the toolsheet
96
97         dev = tlsh.getKmaxDevice("DEV1");
98         dataField = tlsh.getKmaxWidget("$R_DATA");
99         countField = tlsh.getKmaxWidget("$R_COUNT");
100        liveTime = tlsh.getKmaxWidget("LIVE_TIME"); //Live Time
101        realTime = tlsh.getKmaxWidget("REAL_TIME"); //Real Time
102        deadTime = tlsh.getKmaxWidget("DEAD_TIME"); //Dead Time
103        hist1 = tlsh.getKmaxHist("DATA1");
104        hist2 = tlsh.getKmaxHist("DATA2");
105        hist3 = tlsh.getKmaxHist("DATA3");
106        hist4 = tlsh.getKmaxHist("DATA4");
107        hist5 = tlsh.getKmaxHist("DATA5");
108        hist6 = tlsh.getKmaxHist("DATA6");
109        histoLowX = tlsh.getKmaxHist("HIST_LOW_X");
110        histoLowY = tlsh.getKmaxHist("HIST_LOW_Y");
111
112        histograms.put("DATA1", hist1);
113        histograms.put("DATA2", hist2);
114        histograms.put("DATA3", hist3);

```

```

114         histograms.put("DATA4", hist4);
115         histograms.put("DATA5", hist5);
116         histograms.put("DATA6", hist6);
117
118         deel = tlsh.getKmaxHist("DEE_1");
119         deel.setParameterID(in);
120         deel.setSortScaleOffsets(offset);
121
122         /** Calibration-Initialize check box: use calibration-default
123         ↔ value=1(use calibration) */
124
125         checkBoxCalib = tlsh.getKmaxWidget("CHECK_BOX_CALIB");
126         tlsh.getKmaxWidget("CHECK_BOX_CALIB").setProperty("VALUE", "1");
127
128         report = tlsh.getKmaxWidget("REPORT");
129
130         lld = tlsh.getKmaxWidget("LLD");
131         setLLD = tlsh.getKmaxWidget("SET_LLD");
132         getLLD = tlsh.getKmaxWidget("GET_LLD");
133         lldText = tlsh.getKmaxWidget("LLD_TEXT");
134         uld = tlsh.getKmaxWidget("ULD");
135         setULD = tlsh.getKmaxWidget("SET_ULD");
136         getULD = tlsh.getKmaxWidget("GET_ULD");
137         uldText = tlsh.getKmaxWidget("ULD_TEXT");
138         xcombo = tlsh.getKmaxWidget("X_COMBO");
139         xcombo.setProperty("ITEM", "1");
140         ycombo = tlsh.getKmaxWidget("Y_COMBO");
141         ycombo.setProperty("ITEM", "2");
142         offsetButton = tlsh.getKmaxWidget("OFFSET");
143
144         combo = tlsh.getKmaxWidget("COMBO");
145
146         /** The region to project the banana plot*/
147         region[0] = 1800;
148         region[1] = 3490;
149         region[2] = 2500;
150         region[3] = 2660;
151         region[4] = 3450;
152         region[5] = 1740;
153         region[6] = 3610;
154         region[7] = 2710;
155         region[8] = 3720;
156         region[9] = 570;
157
158         deel.addRegion("LOW_REGION", region);
159         deel.setRegionLabel("LOW_REGION", "LOW_REGION");
160     } //init
161
162     /** The 'GO' method.*/
163     public void GO(KmaxToolsheet toolsheet) {
164
165         timeTicks = (int) (System.currentTimeMillis());
166         totalTime = (int) (System.currentTimeMillis());
167         totcount = 0;
168
169         hist1.clear();
170         hist2.clear();
171         hist3.clear();
172         hist4.clear();
173         hist5.clear();
174         hist6.clear();
175         histoLowX.clear();
176         histoLowY.clear();
177         deel.clear();
178         hist1.update();
179         hist2.update();
180         hist3.update();
181         hist4.update();
182         hist5.update();
183         hist6.update();
184         histoLowX.update();

```

```

184         histoLowY.update();
185         deel.update();
186
187         dataField.setProperty("LABEL", String.valueOf(totcount));
188         liveTime.setProperty("LABEL", String.valueOf(0));
189         realTime.setProperty("LABEL", String.valueOf(0));
190         deadTime.setProperty("LABEL", String.valueOf(0));
191         report.setProperty("TEXT", "");
192         report.setProperty("INSERT", "\n");
193         report.setProperty("INSERT", "*****\n");
194         report.setProperty("INSERT", "*          LIBRA DAQ v1.0          *\n");
195         report.setProperty("INSERT", "*          NCSR 'Demokritos'          *\n");
196         report.setProperty("INSERT", "*          TANDEM Laboratory          *\n");
197         report.setProperty("INSERT", "*****\n");
198         report.setProperty("INSERT", "\n");
199         report.setProperty("INSERT", "Date : "+today.format(new Date())+"\n");
200         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Acquisition
↵ Started\n");
201         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] I am set to
↵ read "+evSize+" detectors.\n");
202         Initialize();
203
204     } //GO
205
206     /** The "$INIT" method.*/
207     public void Initialize() {
208
209         dev.writeInt(28, 8, 26, null, 0, 0); //CAMAC Command Z-Initialize
210         dev.writeInt(28, 9, 26, null, 0, 0); //CAMAC Command C-Clear
211         dev.writeInt(30, 9, 26, null, 0, 0); //CAMAC Command I-Inhibit
212         dev.writeInt(23, 9, 24, null, 0, 0); //Remove Inhibit
213         data[0] = 4194304; // Read LAM from LP(Sets as "1" the bit/slot to read
↵ from) or 1 << (slotLP-1)
214         dev.writeInt(30, 0, 16, data, 0, 1); //Read LAM from slot "data"
215         dev.writeInt(23, 0, 27, null, 0, 0); //LP - book Module
216         dev.writeInt(23, 9, 24, null, 0, 0); //HYTEC 1342 LP:Disable Trigger
217         data[0] = 15; // Clear GO bit (manual)
218         dev.writeInt(23, 12, 23, data, 0, 1); //Clear LAM Status Register
219         dev.writeInt(23, 13, 23, data, 0, 1); //Clear LAM Mask Register
220         data[0] = 245;
221         dev.writeInt(23, 13, 19, data, 0, 1); //Selective set LAM Mask Register
222         data[0] = 6;
223         dev.writeInt(23, 0, 17, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr
224
225
226         data[0] = naf(slotADC, 0, 0, 0); //Read ADC Channel 1
227         dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr:
228         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ADC Channel
↵ 1: Read Complete\n");
229         data[0] = naf(slotADC, 1, 0, 0); //Read ADC Channel 2
230         dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr:
231         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ADC Channel
↵ 2: Read Complete\n");
232         data[0] = naf(slotADC, 2, 0, 0); //Read ADC Channel 3
233         dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr:
234         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ADC Channel
↵ 3: Read Complete\n");
235         data[0] = naf(slotADC, 3, 0, 0); //Read ADC Channel 4
236         dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr:
237         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ADC Channel
↵ 4: Read Complete\n");
238         data[0] = naf(slotADC, 4, 0, 0); //Read ADC Channel 5
239         dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr:
240         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ADC Channel
↵ 5: Read Complete\n");
241         data[0] = naf(slotADC, 5, 0, 0); //Read ADC Channel 6
242         dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1); //Write Instruction Ptr:
243         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ADC Channel
↵ 6: Read Complete\n");
244

```



```

245     data[0] = naf(slotADC,3,11,1);           //Reset Hit Pattern, LAM and
        ↳ Data
246     dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1);//Write Instruction Ptr:
        ↳
247     data[0] = naf(slotADC,0,26,1);//Enable ADC LAM
248     dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1);//Write Instruction Ptr
249     data[0] = 57344;// Unconditional Jump to 0
250     dev.writeInt(23, 0, 16, data, 0, 1);//Write Instruction Ptr
251     data[0] = 0;//Instruction pointer to 0
252     dev.writeInt(23, 0, 17, data, 0, 1);//Write Instruction
        ↳ Ptr
253
254     data[0] = READ_START;
255     dev.writeInt(23, 2, 17, data, 0, 1);//Send Read Ptr to the beggining
        ↳ of buffer
256
257     dev.writeInt(23, 0, 26, null, 0, 0);//Enable LP Trigger
258
259     dev.writeInt(slotADC, 3, 11, null, 0, 0);//Reset ADC Hit Pattern, LAM
        ↳ and Data
260     dev.writeInt(slotADC, 0, 26, null, 0, 0);//Enable ADC LAM
261
262     report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
        ↳ Initialization Complete\n");
263 }//INIT
264
265
266
267 /**
268  * The setMode() method sets the MODE pseudo-register. This register is used
        ↳ as the
269  * mode bits in the SCSI I/O calls that communicate with the controller (see
        ↳ the manual).
270  */
271 public void setMode( int mode) {
272     int[] modeArray = new int[1];
273     modeArray[0] = mode;
274     int error = dev.writeInt( 0, 0, 2, modeArray, 0, 1);//Write the MODE
        ↳ register
275     if (error != 0) {
276         tlsh.setProperty("STATUSSTR", "In setMode:: writeInt, error ::
        ↳ "
277         + dev.getErrorMessage(error));
278     }
279 }//setMode
280
281
282
283 /** The "SRQ" method is executed. */
284
285 public void SRQ(KmaxDevice device) {
286     dev.writeInt(23, 0, 24, null, 0, 0);//LP disable
        ↳ trigger
287     setMode(0);
288     dev.readInt(23, 2, 1, data, 0, 1);//Read 'Read Data' Ptr
289     int count = data[0] - READ_START;
290     setMode(2);
291     if (count <=0) return;//Pretty bad error
292     if (count > BUF_SIZE) count = BUF_SIZE;// Correct for the
        ↳ overflows
293     if (count < BUF_SIZE) count--;
294
295     data[0] = READ_START;
296     dev.writeInt(23, 1, 17, data, 0, 1);//Send Write Ptr to buffer
        ↳ start
297     dev.writeInt(23, 2, 17, data, 0, 1);//Send Read Ptr to buffer
        ↳ start
298
299     dev.readInt(23, 2, 0, blkData, 0, count);//Read buffer from LP with
        ↳ read Ptr
300

```

```

301         timeTicks = (int) (System.currentTimeMillis()) - timeTicks;
302         countField.setProperty("LABEL", String.valueOf(1000*count/timeTicks));
303         liveTime.setProperty("LABEL", String.valueOf(timeTicks/1000));
304         LiveTime = timeTicks + LiveTime;
305         timeTicks = (int) (System.currentTimeMillis());
306         totcount=totcount+count;
307
308         dataField.setProperty("LABEL", String.valueOf(totcount/evSize));
309
310         tlsh.addEventBlock(tlsh.PRIMARY_BUFFER, evType, evSize, count/evSize,
311         ↪ blkData);//Put data into PRIMARY_BUFFER
312
313         data[0] = READ_START;
314         dev.writeInt(23, 1, 17, data, 0, 1);//Send Write Ptr to buffer start
315         dev.writeInt(23, 2, 17, data, 0, 1);//Send Read Ptr to buffer
316         ↪ start
317
318         data[0] = 245;
319         dev.writeInt(23, 12, 23, data, 0, 1);//Selective clear LAM Status
320         ↪ Register
321
322         data[0] = 0;
323
324         dev.writeInt(23, 0, 17, data, 0, 1);//Send Instr Ptr to
325         ↪ 0
326         dev.writeInt(23, 0, 26, null, 0, 0);//Enable LP
327         ↪ Trigger
328
329         dev.writeInt(slotADC, 3, 11, null, 0, 0);//Reset ADC module
330         dev.writeInt(slotADC, 0, 26, null, 0, 0);//Enable ADC
331         ↪ LAM
332
333         tlsh.sortEventBuffer(tlsh.PRIMARY_BUFFER);//sort event buffer
334         tlsh.saveEventBuffer(tlsh.PRIMARY_BUFFER);//save buffer to file
335         tlsh.clearEventBuffer(tlsh.PRIMARY_BUFFER);//clear event buffer
336
337         hist1.update();
338         hist2.update();
339         hist3.update();
340         hist4.update();
341         hist5.update();
342         hist6.update();
343         dee1.update();
344
345         /** ON line Projection */
346         dee1.projectRegion("LOW_REGION", "HIST_LOW_X", 1);
347         histoLowX.update();
348         dee1.projectRegion("LOW_REGION", "HIST_LOW_Y", 2);
349         histoLowY.update();
350
351     }//SRQ
352
353     public int naf(int NN, int AA, int FF, int Q) {
354         int test = FF + 0x20*AA + 0x200 * NN;
355         if ( Q == 1) {
356             test += 0x4000;
357         }
358         return test;
359     }//naf
360
361     /**
362     * The "HALT" method is executed at when the HALT button is clicked.
363     * It also stops the timer.
364     */
365     public void HALT(KmaxToolsheet toolsheet){
366
367         SRQ(dev);
368         dev.writeInt(23, 15, 25, null, 0, 0);//Disable LP trigger, unbook
369         ↪ LP
370         dev.writeInt(30, 9, 26, null, 0, 0);//Set CAMAC Inhibit
371         totalTime = (int) (System.currentTimeMillis()) - totalTime;

```

```

365         realTime.setProperty("LABEL", String.valueOf(totalTime/1000));
366         deadTime.setProperty("LABEL",
        ↪ String.valueOf(getValueFrom("LIVE_TIME")/timeTicks));
367         tlsh.setProperty("STATUSSTR", "HALT event!");
368         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Acquisition
        ↪ Stopped\n");
369         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Total
        ↪ events recorded : "+totcount+"\n");
370         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Total time
        ↪ of acquisition : "+totalTime/1000+" s\n");
371         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Live time
        ↪ of acquisition : "+LiveTime/1000+" s\n");
372         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Dead time
        ↪ of acquisition : "+(1-LiveTime/totalTime)*100+" %\n");
373         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ParamID 1 :
        ↪ "+deel.getParameterID()[0]+" Offset
        ↪ "+deel.getSortScaleOffsets()[0]+" \n");
374         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ParamID 2:
        ↪ "+deel.getParameterID()[1]+" Offset
        ↪ "+deel.getSortScaleOffsets()[1]+" \n");
375     } // HALT
376
377     /** ----- Usefull Methods ----- */
378
379     public static boolean stringToBool(String s){//A simple string2Boolean
        ↪ converter
380         if (s.equals("1"))
381             return true;
382         if (s.equals("0"))
383             return false;
384         return true;
385     }//stringToBool
386
387     public void setValueTo(String widgName, double val) {
388         String str = String.format("%.2f", val);
389         KmaxWidget widg = tlsh.getKmaxWidget(widgName);
390         widg.setProperty("TEXT", str);
391     }//setValueTo
392
393     public double getValueFrom(String widgName){/** Read data from user input text
        ↪ fields */
394         KmaxWidget widg = tlsh.getKmaxWidget(widgName);
395         String str = widg.getProperty("TEXT");
396         double num = 0;
397         num = Double.parseDouble(str);
398         return num;
399     }//getValueFrom
400
401     /** ----- Combo Boxes ----- */
402
403     public void COMBO(KmaxWidget widget){//histogram picker
404         //report.setProperty("INSERT", "The selected value is"+
        ↪ combo.getProperty("ITEM")+" \n");
405     }
406
407     /** Each object MUST have it's own method. Each method is bound to the object
        ↪ with the same name. */
408
409     /** ----- Calibration -----*/
410
411     public void CHECK_BOX_CALIB(KmaxWidget widget) {
412         String desiredHistogram = combo.getProperty("ITEM");
413         KmaxHist histogramToUse = histograms.get(desiredHistogram);
414         histogramToUse.setUseXAxisCalibration(stringToBool(widget.getProperty
        ↪ ("VALUE")));
415         histogramToUse.update();
416     }//CHECK_BOX_CALIB
417
418     public void SET_CALIB (KmaxWidget widget){
419         String desiredHistogram = combo.getProperty("ITEM");
420         KmaxHist histogramToUse = histograms.get(desiredHistogram);

```

```

421     double C0 = (getValueFrom("Ch2")*getValueFrom("En1") -
422     ↪  getValueFrom("Ch1")*getValueFrom("En2"))/(getValueFrom("Ch2") -
423     ↪  getValueFrom("Ch1"));
424     double C1 = (getValueFrom("En2") -
425     ↪  getValueFrom("En1"))/(getValueFrom("Ch2") - getValueFrom("Ch1"));
426     double C2 = 0;
427     double[] coef = {C0, C1, C2};
428
429     histogramToUse.setXCalibration(coef);
430     histogramToUse.setUseXAxisCalibration(true);
431     histogramToUse.update();
432
433     String coef0 = String.format("%.3f", coef[0]);
434     String coef1 = String.format("%.3f", coef[1]);
435     String coef2 = String.format("%.3f", coef[2]);
436     report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
437     ↪  "+desiredHistogram+" {c0, c1, c2} : {"+coef0+", "+coef1+",
438     ↪  "+coef2+"} \n");
439
440 }//SET_CALIB
441
442 /** ----- ROI ----- */
443 public void ROI(KmaxWidget widget){
444     String desiredHistogram = combo.getProperty("ITEM");
445     KmaxHist histogramToUse = histograms.get(desiredHistogram);
446
447     setValueTo("SUM", histogramToUse.getRegionSum(null));
448     double[] coef = histogramToUse.getXCalibration();
449     if (Integer.parseInt(tlsh.getKmaxWidget("CHECK_BOX_CALIB").getProperty
450     ↪  ("VALUE"))==0){
451         setValueTo("CENTROID",
452         ↪  histogramToUse.getRegionCentroid(null)[0]);
453         setValueTo("FWHM", histogramToUse.getRegionFWHM(null)[0]);
454     }
455     else if
456     ↪  (Integer.parseInt(tlsh.getKmaxWidget("CHECK_BOX_CALIB").getProperty
457     ↪  ("VALUE"))==1){
458         setValueTo("CENTROID",
459         ↪  coef[1]*histogramToUse.getRegionCentroid(null)[0]+coef[0]);
460         setValueTo("FWHM",
461         ↪  coef[1]*histogramToUse.getRegionFWHM(null)[0]);
462     }
463 }
464 }//ROI
465
466 /** ----- Write Event File ----- */
467 public void EVENT_FILE(KmaxWidget widget){
468     if (eventFileOn == true){
469         eventFileOn = false;
470         widget.setProperty("LABEL", "Close Event File");
471         String filePath = tlsh.showFileChooser("Create new event
472         ↪  file", "evnt", "New");
473
474         if (filePath ==null) {
475             tlsh.setProperty("STATUSSTR", "The file chooser
476             ↪  returned null.");
477             return;
478         }
479         int error = tlsh.newEventFile(filePath);
480         tlsh.setProperty("STATUSSTR", "error = " + error);
481         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
482         ↪  Event file is open \n");
483         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
484         ↪  Saved at "+filePath+"\n");
485     }
486     else if (eventFileOn== false){
487         eventFileOn = true;
488         widget.setProperty("LABEL", "Write Event File");
489         tlsh.closeEventFile(1);
490         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
491         ↪  Event file is closed\n");

```

```

476         }
477     } //EVENT_FILE
478
479     /** ----- Report ----- */
480     public void CLEAR_REPORT(KmaxWidget widget) { //clear
481         report.setProperty("TEXT", "");
482     } //CLEAR_REPORT
483
484     public void SAVE_REPORT(KmaxWidget widget) throws IOException { //save
485         totalTime = (int)(System.currentTimeMillis()) - totalTime;
486         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Acquisition
487         ↪ Stopped\n");
488         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Total
489         ↪ events recorded : "+totcount+"\n");
490         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Total time
491         ↪ of acquisition : "+totalTime/1000+" s\n");
492         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Live time
493         ↪ of acquisition : "+LiveTime/1000+" s\n");
494         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Dead time
495         ↪ of acquisition : "+(1-LiveTime/totalTime)*100+" %\n");
496         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ParamID 1 :
497         ↪ "+deel.getParameterID()[0]+" Offset
498         ↪ "+deel.getSortScaleOffsets()[0]+" \n");
499         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] ParamID 2:
500         ↪ "+deel.getParameterID()[1]+" Offset
501         ↪ "+deel.getSortScaleOffsets()[1]+" \n");
502
503         try{
504             String content = report.getProperty("TEXT");
505             File file = new File("/logKMAX.txt");
506             report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] 3. The
507             ↪ value of file.getAbsolutePath() is : "+file.getAbsolutePath()+"
508             ↪ \n");
509
510             //if file doesn't exists, then create it
511             if (!file.exists()) {
512                 file.createNewFile();
513             }
514
515             report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] 5.
516             ↪ The value of file.getAbsolutePath() is :
517             ↪ "+file.getAbsolutePath()+" \n");
518             FileWriter fw = new FileWriter(file.getAbsolutePath());
519             BufferedWriter bw = new BufferedWriter(fw);
520             bw.write(content);
521             bw.close();
522             report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] 4.
523             ↪ The value of file.getAbsolutePath() is :
524             ↪ "+file.getAbsolutePath()+" \n");
525             report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
526             ↪ Inside try \n");
527         }
528         catch (IOException e){
529             e.printStackTrace();
530             report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"]
531             ↪ Inside catch : \n");
532         }
533     } //SAVE_REPORT
534
535     /** ----- ADC Levels ----- */
536     public void SET_LLD(KmaxWidget widget){
537         lld.setProperty("VALUE", lldText.getProperty("TEXT"));
538         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Lower ADC
539         ↪ threshold set to "+lld.getProperty("VALUE")+"\n");
540     } //SET_LLD
541     public void GET_LLD(KmaxWidget widget){
542         lldText.setProperty("TEXT", lld.getProperty("VALUE"));
543         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Lower ADC
544         ↪ threshold set to "+lld.getProperty("VALUE")+"\n");
545     } //GET_LLD

```

```

527     public void SET_ULD(KmaxWidget widget){
528         uld.setProperty("VALUE", uldText.getProperty("TEXT"));
529         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Upper ADC
        ↳ threshold set to "+uld.getProperty("VALUE")+"\n");
530     } //SET_ULD
531     public void GET_ULD(KmaxWidget widget){
532         uldText.setProperty("TEXT", uld.getProperty("VALUE"));
533         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Upper ADC
        ↳ threshold set to "+uld.getProperty("VALUE")+"\n");
534     } //GET_ULD
535     public void LLD(KmaxWidget widget) {
536         data[0] = Integer.valueOf(lld.getProperty("VALUE"));
537         dev.writeInt(slotADC, 1, 17, data, 0, 1); //set LLD
538         dev.writeInt(slotADC, 0, 20, data, 0, 1); //set LLD for channel 1
539     } //LLD
540     public void ULD(KmaxWidget widget) {
541         data[0] = Integer.valueOf(uld.getProperty("VALUE"));
542         dev.writeInt(slotADC, 2, 17, data, 0, 1); //set ULD
543         dev.writeInt(slotADC, 0, 20, data, 0, 1); //set LLD for channel 1
544     } //ULD
545     public void OFFSET(KmaxWidget widget){
546         in[0] = Integer.parseInt(xcombo.getProperty("ITEM"));
547         in[1] = Integer.parseInt(ycombo.getProperty("ITEM"));
548         offset[0] = (1-in[0])*4096; // (1-deel.getParameterID()[0])*4096;
549         offset[1] = (1-in[1])*4096; //idx; //
        ↳ (1-in[1])*4096; // (1-deel.getParameterID()[1])*4096;
550         deel.setParameterID(in);
551         deel.setSortScaleOffsets(offset);
552         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Offset
        ↳ BUTTON X ----> Parameter : "+deel.getParameterID()[0]+", Scale
        ↳ Offset : "+deel.getSortScaleOffsets()[0]+", Input Array :
        ↳ "+offset[0]+" \n");
553         report.setProperty("INSERT", "["+now.format(new Date())+"] Offset
        ↳ BUTTON Y ----> Parameter : "+deel.getParameterID()[1]+", Scale
        ↳ Offset : "+deel.getSortScaleOffsets()[1]+", Input Array :
        ↳ "+offset[1]+" "+deel.setSortScaleOffsets(offset)+" \n");
554     } //OFFSET
555 } //End of the runtime object

```

## 7.2 Επιλογή Σημάτων

```

1  #include "Riostream.h"
2  void selectionCAMACRuns(char * file_c) {
3
4  /*****
5   *   First executes the script "evnt2dat".
6   *   The script accepts as an input a .evnt file
7   *   and creates a .dat file.
8   *   Then root creates the ntuple, histogram from each detector
9   *   and the DE-E scatter plot
10  *
11  *   Execute it using
12  *   root -l 'ntuple.C("filename")'
13  *   Note that the extension .evnt MUST NOT be used
14  *   and evnt2dat script must be on the same directory as
15  *   this macro.
16  *****/
17
18  TString file(file_c);
19  gSystem->Exec(TString::Format("./evnt2dat %s",file.Data()));//Executes the script
20  ↪ evnt2dat
21  TString dir = gSystem->UnixPathName(gInterpreter->GetCurrentMacroName());
22  dir.ReplaceAll("selectionCAMACRuns.C","");
23  dir.ReplaceAll("./","/");
24  ifstream in;
25  in.open(TString::Format("%s%s_Processed.dat",dir.Data(),file.Data()));
26
27  gROOT->SetStyle("Plain");
28  gStyle->SetOptStat(0000);
29  gStyle->SetOptFit(1111);
30  gStyle->SetOptTitle(0);
31  TPaveText *t = new TPaveText(0.7, 0.85, 0.85, 0.75, "brNDC");//left-up
32  t->AddText("170#circ");
33  t->SetBorderSize(1);
34  t->SetFillColor(gStyle->GetTitleFillColor());
35
36  Float_t de1,e1,de2,e2,de3,e3;
37  Int_t events = 0;
38  Int_t channels=4096;//Change it according to the acquisition channels
39  TFile *f = new TFile(TString::Format("%s.root",file.Data()),"RECREATE");
40  //Create the histograms
41  TH1F *histo_de1 = new TH1F("histo_de1", "#Delta E_{1}", channels,1,channels);
42  TH1F *histo_e1 = new TH1F("histo_e1", "E_{1}", channels,1,channels);
43  TH1F *histo_de2 = new TH1F("histo_de2", "#Delta E_{2}", channels,1,channels);
44  TH1F *histo_e2 = new TH1F("histo_e2", "E_{2}", channels,1,channels);
45  TH1F *histo_de3 = new TH1F("histo_de3", "#Delta E_{3}", channels,1,channels);
46  TH1F *histo_e3 = new TH1F("histo_e3", "E_{3}", channels,1,channels);
47  TH2F *dee1 = new TH2F("dee1", "#Delta E_{1} vs
48  ↪ E_{1}", channels,1,channels,channels,1,channels);
49  TH2F *dee2 = new TH2F("dee2", "#Delta E_{2} vs
50  ↪ E_{2}", channels,1,channels,channels,1,channels);
51  TH2F *dee3 = new TH2F("dee3", "#Delta E_{3} vs
52  ↪ E_{3}", channels,1,channels,channels,1,channels);
53
54  //Create the ntuple
55  TNtuple *ntuple = new TNtuple("ntuple","DE/E analysis","de1:e1:de2:e2:de3:e3");
56
57  //Fill the histos and the ntuple
58  while (1) {
59    in >> de1 >> e1 >> de2 >> e2 >> de3 >> e3;
60    if (!in.good()) break;
61    histo_de1->Fill(de1);
62    histo_e1->Fill(e1);
63    histo_de2->Fill(de2);
64    histo_e2->Fill(e2);
65    histo_de3->Fill(de3);
66    histo_e3->Fill(e3);
67    dee1->Fill(e1, de1);

```

```

64     dee2->Fill(e2, de2);
65     dee3->Fill(e3, de3);
66     ntuple->Fill(del,e1,de2,e2,de3,e3);
67     events++;
68 }
69 printf("Found %d events\n",events);
70
71 TCanvas *c1 = new TCanvas("c1", "c1",225,219,700,530);
72 TCutG *cut120 = new TCutG("cut120",5);
73 cut120->SetVarX("");
74 cut120->SetVarY("");
75 cut120->SetTitle("Graph120");
76 cut120->SetFillColor(1);
77
78 cut120->SetPoint(0,140,2120);
79 cut120->SetPoint(1,4030,750);
80 cut120->SetPoint(2,4040,30);
81 cut120->SetPoint(3,1650,250);
82 cut120->SetPoint(4,180,480);
83 cut120->SetPoint(5,140,2120);
84
85 TH1D *proj_e1 = dee1->ProjectionX("proj_e1",1,4096);
86 proj_e1->Draw();
87 //proj_e1->Smooth(1000);
88 //proj_e1->SetBins(proj_e1->GetNbinsX(), 0, 1024);
89 c1->Update();
90 //proj_e1->Draw();
91 //proj_e1->Rebin(4);
92 TString histfilename120 =TString::Format("%s_Projected_120.dat",file.Data());
93 SingleExportAscii(proj_e1,histfilename120);
94
95 //TString histfilename2D120
96 ↪ =TString::Format("%s_2D_Projected_120.dat",file.Data());
97 //SingleExportAscii(dee1,histfilename2D120);
98 TCanvas *c11 = new TCanvas("c11", "c11",225,219,700,530);
99 //dee1->Draw("[cut120]");
100 dee1->Draw("COLZ");
101 cut120->Draw("L");
102 dee1->GetXaxis()->SetTitle("E(# channel)");
103 dee1->GetYaxis()->SetTitle("#Delta E(# channel)");
104 gPad->SetFrameLineWidth(3);
105 gPad->SetTicks(1, 1);
106 t->Draw();
107 c11->Modify();
108 c11->Update();
109
110 TCanvas *c2 = new TCanvas("c2", "c2",225,219,700,530);
111 TCutG *cut170 = new TCutG("cut170",6);
112 cut170->SetVarX("");
113 cut170->SetVarY("");
114 cut170->SetTitle("Graph170");
115 cut170->SetFillColor(1);
116 cut170->SetPoint(0,90,2323);
117 cut170->SetPoint(1,4030,750);
118 cut170->SetPoint(2,4040,30);
119 cut170->SetPoint(3,1650,335);
120 cut170->SetPoint(4,100,610);
121 cut170->SetPoint(5,90,2323);
122
123 TH1D *proj_e2 = dee2->ProjectionX("proj_e2",1,4096, "[cut170]");
124 proj_e2->Draw();
125 //proj_e2->Smooth(1000);
126 //proj_e2->SetBins(proj_e2->GetNbinsX(), 0, 1024);
127 c2->Update();
128 //proj_e2->Draw();
129 //proj_e2->Rebin(4);
130 TString histfilename170 =TString::Format("%s_Projected_170.dat",file.Data());
131 SingleExportAscii(proj_e2,histfilename170);
132 TCanvas *c22 = new TCanvas("c22", "c22",225,219,700,530);
133 //dee2->Draw("[cut170]");
134 dee2->Draw("COLZ");

```



```

134 cut170->Draw("L");
135 c22->Modify();
136 c22->Update();
137
138 TCanvas *c3 = new TCanvas("c3", "c3",225,219,700,530);
139 TCutG *cut150 = new TCutG("cut150",6);
140 cut150->SetVarX("");
141 cut150->SetVarY("");
142 cut150->SetTitle("Graph150");
143 cut150->SetFillColor(1);
144 cut150->SetPoint(0,150,4096);
145 cut150->SetPoint(1,4090,4096);
146 cut150->SetPoint(2,4040,30);
147 cut150->SetPoint(3,1650,250); //250 instead of 150 for F/150 Boron
148 cut150->SetPoint(4,114,662); //for F (4,114,662), for B (4,131,495)
149 cut150->SetPoint(5,150,4096);
150 TH1D *proj_e3 = dee3->ProjectionX("proj_e3",1,4096,"[cut150]");
151 proj_e3->Draw();
152 //proj_e3->Smooth(1000);
153 //proj_e3->SetBins(proj_e3->GetNbinsX(), 0, 1024);
154 c3->Update();
155 //proj_e3->Draw();
156 //proj_e3->Rebin(4);
157 TString histfilename150 = TString::Format("%s_Projected_150.dat",file.Data());
158 SingleExportAscii(proj_e3,histfilename150);
159 TCanvas *c33 = new TCanvas("c33", "c33",225,219,700,530);
160 //dee3->Draw("[cut150]");
161 dee3->Draw("COLZ");
162 cut150->Draw("L");
163 c33->Modify();
164 c33->Update();
165 in.close();
166 f->Write();
167
168 //myhist.Print("all"); > myhist.dat
169 //c3->SaveAs(TString::Format("%s.pdf",file.Data()));
170 //TCanvas *c4 = new TCanvas("c4", "c4",225,219,700,530);
171 //dee3->Draw("[cut3]");
172 //dee3->Draw("COLZ");
173
174 //TCanvas *c2 = new TCanvas("c2", "c2",225,219,700,530);
175 //dee1->Draw("COLZ");
176
177 gSystem->Exec(TString::Format("./copy %s",file.Data()));
178
179 }
180
181 /**
182  * \brief Export Single Histogram into ASCII file
183  */
184 Bool_t SingleExportAscii(TH1* hist, TString &filename, TString folder="", TString
↵ separator="\t")
185 {
186     Int_t i,j;
187     Double_t xcenter, xwidth;
188     Bool_t success=kFALSE;
189     //filename = folder + hist->GetName() + ".dat";
190     ofstream file_out(filename);
191     //file_out << "# Output " << hist->ClassName() << ": " << hist->GetName() << " ("
↵ << hist->GetTitle() << ") \n";
192     if (hist->GetDimension()==1)
193     {
194         //file_out << "# BinCenter" << separator << "Content\n";
195         for (i=1; i<=hist->GetNbinsX(); i++)
196             file_out << int(hist->GetBinCenter(i)) << separator << hist->GetBinContent(i)
↵ << endl;
197         if (i>1)
198             success=kTRUE;
199     }
200     else if (hist->GetDimension()==2)

```

```
201 {
202     file_out << "# xBinCenter" << separator << "yBinCenter" << separator <<
    ↪ "Content" << separator << "xBinHalfWidth" << separator << "yBinHalfWidth" <<
    ↪ separator << "Error" << endl;
203     for (i=1; i <= hist->GetNbinsX(); i++)
204     {
205         xcenter = hist->GetXaxis()->GetBinCenter(i);
206         xwidth = hist->GetXaxis()->GetBinWidth(i)/2;
207         for (j=1; j <= hist->GetNbinsY(); j++)
208             file_out << xcenter << separator << hist->GetYaxis()->GetBinCenter(j) <<
    ↪ separator << hist->GetBinContent(i,j) << separator << xwidth <<
    ↪ separator << hist->GetYaxis()->GetBinWidth(j)/2 << separator <<
    ↪ hist->GetBinError(i,j) << endl;
209         if (j>1)
210             file_out << endl; // produce a blank line after each set of Ybins for a
    ↪ certain Xbin. Gnuplot likes this.
211     }
212     if (i>1)
213         success=kTRUE;
214 }
215 file_out.close();
216 if (success == kTRUE)
217     cout << "*** TRemiHistExport: Histogram " << hist->GetName() << " written to "
    ↪ << filename << endl;
218     return success;
219 }
```

## 7.3 Μετατροπή .evnt αρχείων σε μορφή ascii

```
1 #!/bin/bash
2 #sed '1,2d' $1* > testScript.evnt
3 if test $1 ; then
4     if [ -f $1.evnt ] ; then
5         rm -f $1.dat
6         sed -n '2p' $1.evnt | (read v1 v2 v3
7         for filename in $1*.evnt ; do
8             echo -e "Processing file $filename"
9             sed '$d' < $filename > $1_tmp
10            sed -i '/Kmax/d' $1_tmp
11            sed -i '/^"$v1"' '"$v2"' /d' $1_tmp
12            cat $1_tmp >> $1.dat
13        done
14        v3=`wc -l $1.dat | awk '{print $1}'` \
15        echo -e "$v1 $v2 $v3" > .$1.dat
16        rm -f $1_tmp)
17    else
18        echo -e "\a!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!"
19        echo -e " Event file $1.evnt doesn't exist !!!!!!"
20        echo -e "!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!"
21    fi
22 else
23     echo -e "\a!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!"
24     echo -e "!!!!!! Give name for event files !!!!!!"
25     echo -e "!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!"
26 fi
27 detectors=$(
28     awk -v channels=4096 '
29         {for (i=1;i<=NF;i++) $i=$i-(i-1)*channels; print}
30         END {print NF > "/dev/stderr"}
31     ' $1.dat 2>&1 >$1_Processed.dat
32 )
33 #detectors=$( awk 'NR==2 {print $2; exit}' $1.evnt )
34 #awk -v channels=4096 '{for (i=1;i<=NF;i++) $i=$i-(i-1)*channels} END{printf "There are %d
35 #detectors\n ",detectors=NF;}1' $1.dat >$1_Processed.dat
36 printf "Found $detectors detectors\n"
37 rm -f $1.dat
38 exit 0
```

## 7.4 Εξομάλυνση Φασμάτων

```

1  REAL E(5000),R(5000),B,C,D,F,H
2  INTEGER Y(5000)
3  OPEN(UNIT=15,FILE='aBP3300150.dat',STATUS='OLD')
4  DO 40, I=1,4095
5  READ(15,*) E(I),Y(I)
6  R(I)=Y(I)*1.
7  40  ENDDO
8  CLOSE(15)
9  OPEN(UNIT=25,FILE='aBS3300150.dat',STATUS='UNKNOWN')
10 DO 60 I=1,600
11 WRITE(25,*) E(I),R(I)
12 60  ENDDO
13 DO 50 K=600,2400
14 J=K
15 B=1.13
16 C=0.87
17 D=R(K+1)/R(K)
18 IF(D.GE.B.OR.D.LE.C)THEN
19 C F=(R(K-6)+R(K-5)+R(K-4))/3.
20 C H=(R(K+6)+R(K+5)+R(K+4))/3.
21 C R(J+1)=(F+H)/2
22 R(J+1)=(R(K-2)+R(K-1)+R(K))/3.
23 ENDIF
24 WRITE(25,*) E(J+1),R(J+1)
25 50  ENDDO
26 DO 70 I=2402,4095
27 WRITE(25,*) E(I),R(I)
28 70  ENDDO
29 CLOSE(25)
30 STOP
31 END

```

# Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη

Κατά την διέλευση μιας δέσμης φορτισμένων σωματιδίων μέσα στην ύλη, δύο βασικοί τρόποι είναι υπεύθυνοι για την απώλεια ενέργειάς της:

- Απώλεια ενέργειας του σωματιδίου
- Απομάκρυνση του σωματιδίου από την αρχική του διεύθυνση

Τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα των εξής βασικών φυσικών μηχανισμών:

1. Ανελαστικές σκεδάσεις από ατομικά ηλεκτρόνια
2. Ελαστικές σκεδάσεις από τους πυρήνες
3. Εκπομπή ακτινοβολίας *Čerenkov*
4. Πυρηνικές Αντιδράσεις
5. Ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung)
6. Ακτινοβολία sychrotron

Από όλες αυτές τις διαδικασίες η περισσότερο πιθανή, είναι η ανελαστική σκέδαση με τα ατομικά ηλεκτρόνια ( $\sigma = 10^{-17} - 10^{-16} \text{ cm}^2$ ) [23, σελ. 21], η οποία μελετήθηκε πρώτα από τον Niels Bohr[24], ο οποίος χρησιμοποίησε την κλασική θεωρία για να εξάγει τον μαθηματικό τύπο (σχ. α΄.1) που περιγράφει την απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων. Ο τύπος αυτός είναι γνωστός σαν τύπος του Bohr

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \ln \frac{\gamma^2 m v^3}{z e^2 \bar{\nu}} \quad (\alpha'.1)$$

όπου

- $z$ : το φορτίο του εισερχόμενου σωματιδίου σε μονάδες φορτίου του ηλεκτρονίου
- $e$ : το φορτίο του ηλεκτρονίου
- $m_e$ : η μάζα του ηλεκτρονίου
- $v$ : η ταχύτητα του εισερχόμενου σωματιδίου
- $N_e$ : η πυκνότητα ηλεκτρονίων του υλικού απορροφητή
- $\gamma$ : ο παράγοντας  $\gamma$  της σχετικιστικής μηχανικής
- $m$ : η μάζα του εισερχόμενου σωματιδίου
- $\bar{\nu}$ : η συχνότητα περιστροφής των ηλεκτρονίων του στόχου

Η πλήρης και κβαντομηχανικά ορθότερη εκδοχή του υπολογισμού του Bohr πραγματοποιήθηκε αρχικά από τους Hans Bethe και Julius Ashkin[25] και εν συνεχεία διορθώθηκε από

τον Felix Bloch. Η σχετικιστική εξίσωση *Bethe* μαζί με τις κατά καιρούς διορθώσεις φαίνεται παρακάτω:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \underbrace{\delta(I, \eta)}_{\text{density correction}} - 2 \frac{\overbrace{C(I, \eta)}^{\text{Shell correction}}}{Z} \right] \quad (\alpha'.2)$$

όπου

- $2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2/\text{gr}$
- $r_e$ : η «ακτίνα» του ηλεκτρονίου =  $2.817 \times 10^{-13} \text{ cm}$
- $m_e$ : η μάζα του ηλεκτρονίου
- $N_A$ : ο αριθμός Avogadro =  $6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $c$ : η ταχύτητα του φωτός στο κενό =  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- $\rho$ : η πυκνότητα του απορροφητή
- $z$ : το φορτίο του εισερχόμενου σωματιδίου σε μονάδες φορτίου του ηλεκτρονίου
- $A$ : ο μαζικός αριθμός του απορροφητή
- $Z$ : ο ατομικός αριθμός του απορροφητή
- $\beta$ : η ταχύτητα  $v/c$  του εισερχόμενου σωματιδίου
- $\gamma$ : ο παράγοντας  $\gamma$  της σχετικιστικής μηχανικής =  $1/\sqrt{1-\beta^2}$
- $W_{max}$ : η μέγιστη μεταφορά ενέργειας σε μια σύγκρουση
- $I$ : το μέσο δυναμικό ιονισμού
- $N_e$ : η πυκνότητα ηλεκτρονίων του υλικού απορροφητή
- $\delta$ : ο παράγοντας διόρθωσης πυκνότητας
- $C$ : Ο παράγοντας διόρθωσης φλοιών

Η μέγιστη ενέργεια που μεταφέρεται σε μια μετωπική κρούση ηλεκτρονίου και σωματιδίου μάζας  $M$  δίνεται από την σχέση

$$W_{max} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \eta^2 + s^2}} \quad (\alpha'.3)$$

όπου  $s = m_e/M$  και  $\eta = \beta\gamma$ .

Το μέσο δυναμικό ιονισμού, είναι χαρακτηριστικό του υλικού απορροφητή και ισούται με

$$\frac{I}{Z} = 12 + \frac{7}{Z} \text{ [eV]}, \quad Z < 13$$

$$\frac{I}{Z} = 9.76 + 58.8Z^{-1.19} \text{ [eV]}, \quad Z \geq 13 \quad (\alpha'.4)$$

Η παράμετρος  $\delta$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο των Sternheimer, Berger, Seltzer [26]

$$\delta = \begin{cases} 0 & , X < X_0 \\ 4.6052 X + C_0 + \alpha(X_1 - X)^m & , X_0 < X < X_1 \\ 4.6052 X + C_0 & , X > X_1 \end{cases} \quad (\alpha'.5)$$

όπου  $X = \log_{10}(\beta\gamma)$  Οι παράμετροι,  $X_0, X_1, C_0, \alpha, m$  εξαρτώνται από το υλικό απορροφητή. Υπολογισμοί για διάφορα υλικά έχουν πραγματοποιηθεί από τους Sternheimer, Berger, Seltzer [26]. Η παράμετρος  $C_0$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο

$$C_0 = - \left( 2 \ln \frac{I}{h\nu_p} + 1 \right) \quad (\alpha'.6)$$

όπου  $\nu_p$  η συχνότητα πλάσματος του υλικού η οποία υπολογίζεται από

$$\nu_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\pi m_e}} = \sqrt{80.617 \times 10^6 \text{ cm}^3 N_e \text{ Hz}} \quad (\alpha'.7)$$

όπου  $N_e$  = πυκνότητα ηλεκτρονίων =  $N_A \rho Z/A$ .

Τέλος, η διόρθωση των φλοιών  $C$ , αίρει την κακή ακρίβεια της [α'.2](#) για ταχύτητες συγκρίσιμες με την ταχύτητα περιστροφής των ηλεκτρονίων του απορροφητή. Η διόρθωση αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο :

$$C(I, \eta) = (0.422377\eta^{-2} + 0.0304043\eta^{-4} - 0.00038106\eta^{-6}) \times 10^{-6} I^2 + (3.850190\eta^{-2} - 0.1667989\eta^{-4} + 0.00157955\eta^{-6}) \times 10^{-9} I^3 \quad (\alpha'.8)$$

όπου  $\eta = \beta\gamma$  και  $I$  = το δυναμικό ιονισμού του υλικού.





# Μακροεντολές Root

## β΄.1 Γράφημα από αρχείο μορφής ascii

```

1  #include "Riostream.h"
2  #include <cstdio>
3  #include <iostream>
4  #include <fstream>
5
6  # include "TROOT.h"
7  # include "TGraphErrors.h"
8  # include "TStyle.h"
9  # include "TMultiGraph.h"
10 # include "TFL.h"
11 # include "TLegend.h"
12 # include "TPaveStats.h"
13 # include "TArrow.h"
14 # include "TLatex.h"
15 # include "TPaveText.h"
16 # include "TText.h"
17 # include "TPavesText.h"
18
19 #include "TString.h"
20 #include "TSystem.h"
21 #include "TInterpreter.h"
22 #include "TFile.h"
23 #include "TH1.h"
24 #include "TNTuple.h"
25 #include "TCanvas.h"
26 void BoronElevenSeventy() {
27
28     gROOT->SetStyle("Plain");
29     gStyle->SetOptStat(1111);
30     gStyle->SetOptFit(1111);
31
32     TCanvas *c = new TCanvas("c", "c");
33     c->SetFillColor(5);
34     c->SetFrameFillColor(10);
35
36     TMultiGraph * mg = new TMultiGraph("mg", "Experimental Cross Sections for
↵  ^{11}B(p,p)@170#circ");
37
38     TGraph *g1=new TGraph("11B_170_Chiari.txt", "%lg %lg");//Plot the first two columns
↵  of the ascii file;If you want to skip a column use %*lg i.e. plot 1st and 3rd
↵  column "%lg %*lg %lg"
39     g1->SetMarkerColor(kBlue);
40     g1->SetMarkerStyle(24);
41     g1->SetFillStyle(0);
42     g1->SetTitle("Chiari");
43
44     TGraph *g2=new TGraph("11B_170_Rihet.txt", "%lg %lg");
45     g2->SetMarkerColor(kRed);
46     g2->SetMarkerStyle(25);
47     g2->SetFillStyle(0);
48     g2->SetTitle("Rihet");
49
50     mg->Add(g1);

```

```
51     mg->Add(g2);
52     mg->Draw("AP");
53
54     mg->GetXaxis()->SetTitle("Energy[MeV]");
55     mg->GetYaxis()->SetTitle("Ratio to Rutherford");
56
57     leg = new TLegend(0.1,0.75,0.27,0.9);
58     leg->SetHeader("Data sets");
59     leg->AddEntry(g1,"Chiari");
60     leg->AddEntry(g2,"Rihet");
61     leg->SetTextSize(0.05);
62     leg->Draw();
63
64     //c->SetLogy();
65     c->SaveAs("11B170.pdf");
66 }
```

## β.2 Κατασκευή Ιστογράμματος από αρχείο μορφής ascii

```

1  #include "Riostream.h"
2  #include "TArrow.h"
3  #include "TLatex.h"
4
5  void telescopeThickness() {
6
7      gROOT->SetStyle("Plain");
8      gStyle->SetOptStat(0000);
9      gStyle->SetOptFit(1111);
10     gStyle->SetOptTitle(0);
11
12     TPaveText *t = new TPaveText(0.005, 0.995, 0.85, 0.925, "brNDC");//left-up
13     t->AddText("#delta E detector thickness measurement using ^{244}Cm source");
14     t->SetBorderSize(1);
15     t->SetFillColor(gStyle->GetTitleFillColor());
16
17     TCanvas *c = new TCanvas("c", "c");
18     c->SetFillColor(5);
19     c->SetFrameFillColor(10);
20
21     TString dir = gSystem->UnixPathName(gInterpreter->GetCurrentMacroName());
22     dir.ReplaceAll("telescopeThickness.C", "");
23     dir.ReplaceAll("./", "/");
24     ifstream in;
25     in.open(Form("%stelescopeThickness.dat", dir.Data()));
26
27     Float_t x,y,z;
28     Int_t nlines = 0;
29     Int_t channels=1024;
30
31
32     Double_t xlow = 1.0;
33     TH1F *h1 = new TH1F("h1", "Total", channels, xlow, (channels + xlow));
34     TH1F *h2 = new TH1F("h2", "#alpha background", channels, xlow, (channels + xlow));
35     //TH1F *h1 = new TH1F("h1", "with #delta E", channels, 1024, channels);
36     //TH1F *h2 = new TH1F("h2", "without #delta E", channels, 1024, channels);
37
38     while (1) {
39         in >> x >> y >> z;
40         if (!in.good()) break;
41         if (nlines == 494) printf("x=%8f, y=%8f, z=%8f\n", x, y, z);
42         //h1->Fill(x*10.624400-99.018100, y);
43         //h2->Fill(x*10.624400-99.018100, z); (x + 99.018100) / 10.624400 + xlow - 0.5
44         h1->Fill((x + 99.018100) / 10.624400 + xlow - 0.5, y);
45         h2->Fill((x + 99.018100) / 10.624400 + xlow - 0.5, z);
46         nlines++;
47     }
48     printf("Found %d points\n", nlines);
49
50     in.close();
51
52     h1->SetLineColor(8);
53     h1->SetFillColor(8);
54     h1->SetLineWidth(4);
55     h1->Draw();
56     h1->GetXaxis()->SetTitle("Energy [keV]");
57     h1->GetYaxis()->SetTitle("Events");
58     h1->GetYaxis()->SetRangeUser(1, 250);
59     h1->GetXaxis()->SetRangeUser(4000, 6000);
60
61     h2->SetLineColor(kBlue);
62     h2->SetFillColor(kBlue);
63     h2->SetFillStyle(3013);
64     h2->SetLineWidth(2);
65     h2->Draw("same");
66
67     leg = new TLegend(0.1, 0.7, 0.48, 0.9);

```

```
68     leg->AddEntry("h1", "with #delta E");
69     leg->AddEntry("h2", "without #delta E");
70     leg->Draw();
71     //c->SetLogy();
72     t->Draw();
73
74     TLatex *text= new TLatex(4500,155, "#color[2]{944 keV}");
75     text->Draw();
76
77     TArrow *arrow = new TArrow(4220,150,5164,150,0.02, "<>");
78     arrow->SetLineColor(kRed);
79     arrow->SetFillColor(4);
80     arrow->SetLineWidth(3);
81     arrow->SetLineStyle(1);
82     arrow->Draw();
83
84     TArrow *arrow1 = new TArrow(4220,40,4220,150,0.02, "");
85     arrow1->SetLineColor(kRed);
86     arrow1->SetFillColor(4);
87     arrow1->SetLineWidth(1);
88     arrow1->SetLineStyle(3);
89     arrow1->Draw();
90
91     //c->Modified();
92     //c->Update();
93
94     //c->SaveAs("telescopeThickness.pdf");
95 }
```

### β.3 Κατασκευή Ιστογράμματος χρησιμοποιώντας ενεργειακή βαθμονόμηση και σκίαση

```

1  #include "Riostream.h"
2  #include "TArrow.h"
3  #include "TLatex.h"
4
5  void Boron2250170CAMAC () {
6
7      gROOT->SetStyle("Plain");
8      gStyle->SetOptStat(0000);
9      gStyle->SetOptFit(1111);
10     gStyle->SetOptTitle(0);
11
12     TPaveText *t = new TPaveText(0.005, 0.995, 0.85, 0.915, "brNDC");//left-up
13     t->AddText("Experimental and Simulated Spectra from  $^{nat}B @170\#circ,$ 
14     ↵  $E_{p}=2.25MeV$ ");
15     t->SetBorderSize(1);
16     t->SetFillColor(gStyle->GetTitleFillColor());
17
18     TCanvas *c = new TCanvas("c", "c");
19     c->SetFillColor(5);
20     c->SetFrameFillColor(10);
21
22     TString dir = gSystem->UnixPathName(gInterpreter->GetCurrentMacroName());
23     dir.ReplaceAll("Boron2250170CAMAC.C", "");
24     dir.ReplaceAll("./", "/");
25     ifstream in;
26     in.open(Form("%sBoron2250170CAMAC.dat", dir.Data()));
27
28     Float_t x,y,z,w,k,l,m;
29     Int_t nlines = 0;
30     Int_t channels=1031;
31     Double_t xlow = 1.0;
32     Double_t a=3.539;
33     Double_t b=13;
34
35     TH1F *h1 = new TH1F("h1", "Experimental", channels, a*xlow+b, a*channels+b);
36     TH1F *h2 = new TH1F("h2", "Total Simulated", channels, a*xlow+b, a*channels+b);
37     TH1F *h3 = new TH1F("h3", "Boron", channels, a*xlow+b, a*channels+b);
38     TH1F *h4 = new TH1F("h4", "Carbon", channels, a*xlow+b, a*channels+b);
39     TH1F *h5 = new TH1F("h5", "Oxygen", channels, a*xlow+b, a*channels+b);
40     TH1F *h6 = new TH1F("h6", "Gold", channels, a*xlow+b, a*channels+b);
41
42     while (1) {
43         in >> x >> y >> z >> w >> k >> l >> m;
44         if (!in.good()) break;
45         if (nlines == 494) printf("x=%8f, y=%8f, z=%8f\n",x,y,z);
46
47         h1->Fill(a*x+b, y);
48         h2->Fill(a*x+b, z);
49         h3->Fill(a*x+b, w);
50         h4->Fill(a*x+b, k);
51         h5->Fill(a*x+b, l);
52         h6->Fill(a*x+b, m);
53         nlines++;
54     }
55     printf("Found %d points\n",nlines);
56
57     in.close();
58
59     h1->SetLineColor(8);
60     h1->SetLineWidth(4);
61     h1->Draw();
62     h1->GetXaxis()->SetTitle("Energy [keV]");
63     h1->GetYaxis()->SetTitle("Events");
64     h1->GetYaxis()->SetTitleOffset(1.2);
65     h1->GetXaxis()->SetRangeUser(0,2200);

```

```
65     h2->SetLineColor(kBlue);
66     h2->SetLineWidth(4);
67     h2->Draw("same");
68
69
70     h3->SetLineColor(kRed);
71     h3->SetLineWidth(4);
72     h3->Draw("same");
73
74     TH1F *h3c = (TH1F*)h3->Clone();
75     h3c->SetFillColor(kRed);
76     h3c->SetLineWidth(1);
77     h3c->SetFillStyle(3004);
78     h3c->GetXaxis()->SetRangeUser(1108,1271);
79     h3c->Draw("same");
80
81     h4->SetLineColor(kMagenta);
82     h4->SetLineWidth(4);
83     h4->Draw("same");
84
85     h5->SetLineColor(kBlack);
86     h5->SetLineWidth(4);
87     h5->Draw("same");
88
89     h6->SetLineColor(kCyan+2);
90     h6->SetLineWidth(4);
91     h6->Draw("same");
92
93     leg = new TLegend(0.6,0.6,0.9,0.9);
94     leg->AddEntry("h1",h1->GetTitle());
95     leg->AddEntry("h2",h2->GetTitle());
96     leg->AddEntry("h3",h3->GetTitle());
97     leg->AddEntry("h4",h4->GetTitle());
98     leg->AddEntry("h5",h5->GetTitle());
99     leg->AddEntry("h6",h6->GetTitle());
100    leg->Draw();
101
102    t->Draw();
103
104    //c->Modified();
105    //c->Update();
106
107    c->SaveAs("Boron2250170CAMAC.pdf");
108 }
```

## Βιβλιογραφία

- [1] E. Rutherford et al. “The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom”. *Philosophical Magazine* 21.6 (May 1911), p. 669.
- [2] Yongqiang Wang and Michael Nastasi. *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis*. 2nd. Materials Research Society, 2009.
- [3] Matej Mayer. *SIMNRA User’s Guide*. Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, 1997.
- [4] Βαλεντίνα Πανέτα. ‘Μελέτη του συστήματος  $p+^{12}C$  για ενέργειες πρωτονίων έως  $7\text{ MeV}$ ’. Μεταπτυχ/κή διπλ. εργασ. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος/Ιούλιος 2012.
- [5] G. Audi et al. “The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties”. *Nuclear Physics A* 729.1 (Dec. 2003), pp. 3–128.
- [6] M. Youn et al. “The  $^{10}B(p, \alpha_0)^7Be$  reaction in the thermonuclear energy region”. *Nuclear Physics A* 533.2 (Oct. 1991), pp. 321–332. ISSN: 0375-9474. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474\(91\)90493-P](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474(91)90493-P). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037594749190493P>.
- [7] J.W.Cronin. “Excitations functions and angular distributions of alpha particles leading to the ground and first excited states of  $^7Be$  in the reaction  $^{10}B(p, \alpha)^7Be$ ”. *Journal of Physical Review* 101 (1956), p. 298.
- [8] G.D. Symons and P.B. Treacy. “The  $^{11}(p, \alpha)^8Be$  reaction and  $^{12}C$  states between 15 and  $20\text{MeV}$ ”. *Nuclear Physics* 46 (1963), pp. 93–107. ISSN: 0029-5582. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5582\(63\)90567-4](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5582(63)90567-4). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029558263905674>.
- [9] Jiarui Liu et al. “Cross-sections of  $^{11}B(p, \alpha)^8Be$  reaction for boron analysis”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 190.1–4 (2002), pp. 107–111. ISSN: 0168-583X. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)01272-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01272-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X01012721>.
- [10] M. Chiari et al. “Proton elastic scattering cross-section on boron from 0.5 to 3.3 MeV”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 184.3 (Nov. 2001), pp. 309–318.
- [11] J. C. Overley and Ward Whaling. “Highly Excited States in  $^{11}C$ . Elastic Scattering of Protons by  $^{10}B$ ”. *Phys. Rev.* 128 (1 Oct. 1962), pp. 315–324. DOI: [10.1103/PhysRev.128.315](https://doi.org/10.1103/PhysRev.128.315). URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.128.315>.
- [12] Ju.G.Mashkarov et al. “Investigation of the proton elastic scattering and the  $(p, \alpha_0)$  reaction on the  $^{11}B$  nucleus”. *Jour. Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser.Fiz.* 39 (1975), p. 1736.
- [13] A.S.Dejneko et al. “Polarization of Protons Scattered Elastically by  $^7Li$  and  $^{11}B$ ”. *Jour. Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser.Fiz.* 38 (1974), p. 1694.

- [14] Y. Rihet et al. “States in  $^{12}\text{C}$  from resonant proton scattering”. *Journal de physique* 38.1 (1977), pp. 17–19. ISSN: 0168-583X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/jphys:0197700380101700>. URL: [http://jphys.journaldephysique.org/articles/jphys/abs/1977/01/jphys\\_1977\\_\\_38\\_1\\_17\\_0/jphys\\_1977\\_\\_38\\_1\\_17\\_0.html](http://jphys.journaldephysique.org/articles/jphys/abs/1977/01/jphys_1977__38_1_17_0/jphys_1977__38_1_17_0.html).
- [15] James F. Ziegler. “SRIM-2003”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 219–220 (2004), pp. 1027–1036. ISSN: 0168-583X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.208>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X04002587>.
- [16] SIMNRA, a simulation program for the analysis of NRA, RBS and ERDA. Vol. 475. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 1999, p. 541.
- [17] V. Paneta et al. “Benchmarking experiments for the proton backscattering on  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{31}\text{P}$  and  $^{nat}\text{S}$  up to 3.50 MeV”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 328 (2014), pp. 1–7. ISSN: 0168-583X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.02.010>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X14002316>.
- [18] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark. *The Stopping and Range of Ions in Matter*. Springer US, 1985. ISBN: 978-1-4615-8105-5. DOI: 10.1007/978-1-4615-8103-1\_3.
- [19] Chu W. K. “Calculation of energy straggling for protons and helium ions”. *Phys. Rev. A* 13 (6 June 1976), pp. 2057–2060. DOI: 10.1103/PhysRevA.13.2057. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.13.2057>.
- [20] A.F. Gurbich and C. Jeynes. “Evaluation of non-Rutherford proton elastic scattering cross-section for magnesium”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 265.2 (2007), pp. 447–452.
- [21] M. Mayer et al. “The  $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$  nuclear reaction and  $^{11}\text{B}(p, p)^{11}\text{B}$  backscattering cross sections for analytical purposes”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 143.3 (1998), pp. 244–252. ISSN: 0168-583X. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00383-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00383-8). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X98003838>.
- [22] *Design Of The Data Acquisition System For The Nuclear Physics Experiments At Vecc*. CERN, 2012. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pcapac2012/papers/proceed.pdf>.
- [23] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, A How-to Approach*. Second Revised Edition. Springer International Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Nov. 1993.
- [24] Niels Bohr. “On the decrease of velocity of swiftly moving electrified particles in passing through matter”. *Philosophical Magazine Series 6* 30.178 (1915), pp. 581–612.
- [25] Hans Bethe and Julius Ashkin. “Passage of Radiations through through matter”. *Experimental Nuclear Physics Volume 1.Part II* (Dec. 1952), pp. 166–357.
- [26] R. M. Sternheimer, M. J. Berger, and S. M. Seltzer. “Density Effect for the Ionization Loss of Charged Particles in Various Substances”. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 30 (1984), pp. 261–271.