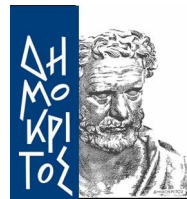




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ -
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ &
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Μελέτη της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$
με τη μέθοδο PIGE

Πασπαλάκη Γαρυφαλλιά

Επιβλέπων Καθηγητής: Μιχάλης Κόκκορης

Επιβλέπων Ερευνητής: Μιχάλης Αξιώτης

18 Ιουνίου 2014

Ευχαριστίες

Πριν ξεκινήσει η εργασία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν τεχνικά και ηθικά σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π Δρα Μιχάλη Κόκκορη για την συμπαράσταση και τις γνώσεις που μου προσέφερε σε ακαδημαϊκό και προσωπικό επίπεδο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Ε.Μ.Π Δρ Ζάννη-Βλαστού Ρόζα για τις γνώσεις και το ενδιαφέρον που μου προσέφερε. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον μεταδιδακτορικό ερευνητή Μιχάλη Αξιώτη, ο οποίος συνέβαλε ενεργά στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας προσφέροντας μου την βοήθεια του δημιουργώντας ένα παραγωγικό και ευχάριστο κλίμα.

Επίσης ευχαριστώ πολύ όλη την ομάδα Πυρηνικής Φυσικής του Πολυτεχνείου για την συμπαράστασή τους και συγκεκριμένα την υποψήφια διδάκτορα Βαλεντίνα Πανέτα η οποία συνέβαλε ενεργά στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σε όλο το ερευνητικό προσωπικό του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος για την βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον μεταπτυχιακό φοιτητή Γρηγόρη Πατέλλη για την ουσιαστική και ψυχολογική βοήθεια του όλο τον καιρό.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στηρίζει στις επιλογές μου και τους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iii
Εισαγωγή	vii
1 Θεωρητικό Μέρος	1
1.1 Πυρηνικές Αντιδράσεις	1
1.2 Μηχανισμοί πραγματοποίησης πυρηνικών αντιδράσεων . .	1
1.2.1 Άμεσες Αντιδράσεις	2
1.2.2 Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα	3
1.2.3 Ενδόθερμες και Εξώθερμες Αντιδράσεις	4
1.2.4 Ενεργός Διατομή	5
1.2.5 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας γ με την ύλη	7
2 Ανάλυση δειγμάτων με τη χρήση πυρηνικών μεθόδων	15
2.1 Ανάλυση με δέσμη φορτισμένων σωματιδίων (Ion Beam Analysis)	15
2.1.1 Φασματοσκοπία PIGE	20
2.1.2 Οι αρχές της μεθόδου	21
2.1.3 Φασματοσκοπία συντονιστικής PIGE	22
2.1.4 Εφαρμογές της PIGE	23
3 Πειραματική διάταξη	25
3.1 Ο επιταχυντής	25
3.1.1 Κλωβός Faraday (Faraday Cup)	27
3.2 Ανιχνευτικά συστήματα	29
3.2.1 Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης - Ανιχνευτές Ημιαγωγών	29
3.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανιχνευτών	34
3.2.3 Ηλεκτρονικά - Παραγωγή Σήματος	36
3.2.4 Ο στόχος του πειράματος	37
3.2.5 Διάταξη HPGe του πειράματος για τη μελέτη της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p, p\gamma)^{27}\text{Al}$	38

4	Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων	41
4.1	Ανάλυση των φασμάτων	41
4.2	Ενεργειακή βαθμονόμηση	43
4.3	Βαθμονόμηση του επιταχυντή	43
4.4	Απόδοση ανιχνευτών HPGe	46
4.5	Εμβαδομέτρηση των κορυφών	50
4.6	Προσδιορισμός του φορτίου	52
4.6.1	Αφαίρεση της απόδοσης των δύο φασμάτων	53
4.7	Συνάρτηση διέγερσης	55
4.8	Προσδιορισμός του πάχους του στόχου	61
4.9	Προσδιορισμός της διαφορικής ενεργού διατομής	62
4.10	Διεργαστηριακή Άσκηση (interlaboratory exercise)	70
4.11	Σύγκριση της διαφορικής ενεργού διατομής με την βάση δεδομένων IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library)	72
5	Συμπεράσματα - Προτάσεις για το μέλλον	75

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική έγινε στα πλαίσια της συμμετοχής του Ινστιτούτου και Σωματιδιακής Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος στην επιτροπή INDC (International Nuclear Data Committee) σε μια προσπάθεια του διεθνούς οργανισμού ατομικής ενέργειας IAEA (International Atomic Energy Agency) να αναπτυχθεί η βάση δεδομένων για την τεχνική ανάλυσης υλικών με τη μέθοδο PIGE (Particle Induced g-ray Emission). Η τεχνική αυτή, όπως θα δούμε παρακάτω, βασίζεται στη φασματοσκοπία ακτίνων γ και είναι ικανή να προσδιορίσει με ακρίβεια τη σύσταση και τη δομή υλικών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται από τις αρχές του 1960 και οι εφαρμογές της ποικίλουν όπως η μελέτη αντιδράσεων σχάσης, καθώς και οι εφαρμογές στην βιοϊατρική το περιβάλλον και σε αντικείμενα αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Το γεγονός της ακρίβειας των μετρήσεων για την μελέτη του χωρικού προφίλ των υλικών σε σχέση με τις άλλες τεχνικές IBA (Ion Beam Analysis) καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη της μεθόδου καθώς δεν εφαρμόζεται ακόμα σε ευρεία κλίμακα. Υπάρχει περιορισμός της βάσης δεδομένων και των φυσικών αποτελεσμάτων καθώς επίσης δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα κώδικες ειδικοί για την PIGE.

Για να προσδιοριστεί η δομή και η σύσταση από την ανάλυση των χαρακτηριστικών ακτίνων γ που εκπέμπονται πρέπει να χρησιμοποιηθούν ποσότητες όπως το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων γ ή η συνάρτηση διέγερσης. Οι κύριες ποσότητες που πρέπει να γνωρίζουμε είναι η ενεργός διατομή και η ισχύς ανασχέσεως (Stopping Power) η οποία υπολογίζεται με την βοήθεια του προγράμματος SRIM.

Παρόλο που υπάρχουν στην βιβλιογραφία αρκετές αναφορές και δεδομένα για ενεργές διατομές ακτίνων γ στο κανάλι εξόδου, όπως η βάση δεδομένων για τις τεχνικές με χρήση φορτισμένων σωματιδίων (IBANDL), υπάρχει η ανάγκη σύνταξης και αξιολόγησης των δεδομένων από την τεχνική PIGE καθώς έχουν παρατηρηθεί διαφορές πέρα από τα όρια αβεβαιότητας στα δεδομένα δημιουργώντας αναξιοπιστία για την χρήση τους.

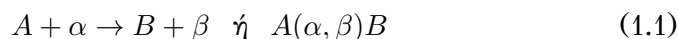
Για τους παραπάνω λόγους μελετήθηκε η πυρηνική αντίδραση $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$ επικεντρώνοντας την ανάλυσή μας σε δυο χαρακτηριστικές ακτίνες γ , την 843 keV και την 1014 keV . Ο στόχος μας ήταν αλουμίνιο Al πάνω σε βολφράμιο W ο οποίος βομβαρδίστηκε από πρωτόνια p^+ στο ενεργειακό εύρος $2600 - 5000\text{ keV}$.

Κεφάλαιο 1

Θεωρητικό Μέρος

1.1 Πυρηνικές Αντιδράσεις

Ως πυρηνική αντίδραση ορίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός προσπίπτοντος πυρήνα-βλήματος και ενός πυρήνα-στόχου. Μια πυρηνική αντίδραση αποδίδεται με σύμβολα ως εξής:



όπου α είναι το σωματίδιο της δέσμης,

A ο πυρήνας-στόχος και

$\beta + B$ μια ανακατάταξη των νουκλεονίων του συγκροτήματος $(\alpha + A)$.

Ένα σωματίδιο α με κινητική ενέργεια E_α προσπίπτει στον πυρήνα-στόχο A , με αποτέλεσμα ο πυρήνας να μετατραπεί στον πυρήνα B με ταυτόχρονη εκπομπή του σωματιδίου β .

1.2 Μηχανισμοί πραγματοποίησης πυρηνικών αντιδράσεων

Η κατηγοριοποίηση των πυρηνικών αντιδράσεων μπορεί να γίνει με βάση τον μηχανισμό με τον οποίο λαμβάνει χώρα η αντίδραση. Αν το βλήμα και ένα μέρος των νουκλεονίων του πυρήνα του στόχου αλληλεπιδράσουν τότε μιλάμε για άμεσες αντιδράσεις, ενώ αν τα προϊόντα σχηματίσουν ένα σύνθετο πυρήνα, ο οποίος διασπάται στην συνέχεια, μιλάμε για αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα.

1.2.1 Άμεσες Αντιδράσεις

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των άμεσων αντιδράσεων (direct reactions) είναι ότι η όλη διεργασία συντελείται σε σχετικά μικρό χρόνο (σε χρόνο της τάξης των 10^{-22} sec), δηλαδή το προσπίπτον σωματίο α διανύει σχετικά γρήγορα το πεδίο του πυρήνα A . Μερικές από τις αλληλεπιδράσεις που μπορούμε να διακρίνουμε είναι:

- **Ελαστική Σκέδαση (elastic scattering)**

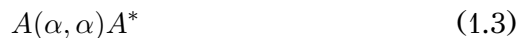
Αν η συνολική κινητική ενέργεια διατηρείται πριν και μετά την σκέδαση τότε η σκέδαση ονομάζεται ελαστική. Κατά την διεργασία αυτή ισχύει ότι $\beta = \alpha$ και $B = A$, δηλαδή μπορεί να συμβολιστεί:



Το μόνο που αλλάζει κατά την ελαστική σκέδαση είναι η κινητική ενέργεια και η διεύθυνση του σωματιδίου α .

- **Μη Ελαστική Σκέδαση (Inelastic Scattering)**

Αν η κινητική ενέργεια του συστήματος δεν διατηρείται τότε η σκέδαση ονομάζεται ανελαστική. Και σε αυτή την περίπτωση τα αντιδρώντα και τα προϊόντα παραμένουν ίδια, αλλά ο πυρήνας που θα παραχθεί δεν βρίσκεται πλέον στην βασική του κατάσταση, αλλά σε κάποια διεγερμένη. Στην διεργασία αυτή το $\beta = \alpha$ και $B = A^*$, δηλαδή έχουμε:



Ο αστερίσκος (*) υποδηλώνει ότι ο αρχικός πυρήνας, μετά την αλληλεπίδραση με το προσπίπτον σωματίδιο, βρέθηκε σε διεγερμένη κατάσταση.

- **Αντιδράσεις Απογύμνωσης (stripping reactions)**

Κατά τη διέλευση ενός σωματιδίου α από το πεδίο του πυρήνα A , είναι δυνατόν ένα ή δύο νουκλεόνια του βλήματος να αλληλεπιδράσουν με ένα ή δύο νουκλεόνια του στόχου, αφήνοντας τα λοιπά νουκλεόνια του πυρηνικού συστήματος ανεπηρέαστα.

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ3

- Αντιδράσεις Υφαρπαγής (pick up reactions)

Αναφέρονται στην αντίστροφη διαδικασία, κατά την οποία το βλήμα συλλαμβάνει και απομακρύνει ένα ή δύο νουκλεόνια από τον πυρήνα A .

1.2.2 Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα

Οι αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα (compound nucleus reactions) αποτελούν ένα διαφορετικό σενάριο σχετικά με την όλη διεργασία της αντίδρασης $A(\alpha, \beta)B$. Σε αυτή την περίπτωση ο πυρήνας-βλήμα αλληλεπιδρά αρχικά με ένα μέρος από τα νουκλεόνια του πυρήνα-στόχου, με αποτέλεσμα το βλήμα να ενσωματωθεί στο στόχο. Η ενέργεια αυτή στη συνέχεια διαμοιράζεται μέσω διαδοχικών κρούσεων στα νουκλεόνια του συσσωματώματος.

Μία διαδικασία πυρηνικής αντίδρασης μέσω σύνθετου πυρήνα περιγράφεται με σύμβολα ως εξής:



Γίνεται σαφές πως στο σχηματισμό του σύνθετου πυρήνα υπάρχουν δύο στάδια, όπου στο πρώτο γίνεται η σύλληψη του βλήματος από τον πυρήνα ώστε να σχηματιστεί σύνθετος πυρήνας και στο δεύτερο πραγματοποιείται η διάσπαση του σύνθετου πυρήνα με εξάχνωση ή/και εκπομπή ακτίνων γ .

Συγκεκριμένα, το σωματίο α , μετά από πολλαπλές σκεδάσεις, απορροφάται από τον πυρήνα A διαμορφώνοντας προσωρινά ένα σύνθετο πυρηνικό σύστημα C με ατομικό και μαζικό αριθμό αντίστοιχα ίσο προς το άθροισμα των ατομικών και μαζικών αριθμών του βλήματος και του πυρήνα του στόχου.

Έπειτα ο πυρήνας C^* , που όπως φαίνεται, σχηματίζεται σε κάποια διεγερμένη ενεργειακή του κατάσταση, αποδιεγείρεται εκπέμποντας ένα σωματίδιο β και έτσι δημιουργείται ο πυρήνας B .

Οι αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα δεν ανήκουν στην κατηγορία των άμεσων αντιδράσεων, γιατί ακόμα και οι ταχύτεροι χρόνοι διαφυγής ενός σωματίου (β) από έναν πυρήνα (B), είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από το χρόνο διάρκειας των άμεσων αντιδράσεων. Στον σχετικά μεγάλο

χρόνο που διαρκεί η διεργασία της αλληλεπίδρασης, τα νουκλεόνια ανακατατάσσονται δραστικά, χάνουν κάθε μνήμη σχετικά με την προέλευσή τους και τα δύο βήματα της αντίδρασης συντελούνται ουσιαστικά ανεξάρτητα.

Σύμφωνα με τον Bohr, ο σύνθετος πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, επομένως μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από ένα κατάλληλο θερμοδυναμικό σύστημα σε ισορροπία. Η βασικότερη ιδιότητα ενός τέτοιου θερμοδυναμικού συστήματος είναι ότι η συμπεριφορά του δεν εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο δημιουργήθηκε. Άρα, ένας πυρήνας που έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας, θα αποδιεγερθεί με τρόπο ανεξάρτητο από τον τρόπο διέγερσής του.

1.2.3 Ενδόθερμες και Εξώθερμες Αντιδράσεις

Μια πυρηνική αντίδραση χαρακτηρίζεται:

- Εξώθερμη, αν κατά την διεξαγωγή της εκλύεται ενέργεια. Μία εξώθερμη αντίδραση πραγματοποιείται αυθόρμητα, καθώς τα προϊόντα βρίσκονται σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο από τα αντιδρώντα. Δηλαδή θεωρητικά, μπορεί να συμβεί ακόμα και με μηδενική κινητική ενέργεια του βλήματος. Παρόλα αυτά, το βλήμα χρειάζεται κάποια ενέργεια για να περάσει το φράγμα Coulomb και να μπορέσει να αλληλεπιδράσει με τον πυρήνα.

- Ενδόθερμη, αν κατά την διεξαγωγή της απορροφάται ενέργεια. Σε μία ενδόθερμη αντίδραση τα προϊόντα βρίσκονται σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο από τα αντιδρώντα. Για το λόγο αυτό, απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, που παρέχεται υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας του βλήματος.

Το κριτήριο με το οποίο κατατάσσεται μία αντίδραση $\alpha + A \rightarrow \beta + B$, σε μία από τις δύο κατηγορίες είναι η διαθέσιμη ενέργεια, αναφερόμενη ως τιμή Q (Q -value), η οποία προέρχεται από τη διαφορά των μαζών στην αρχική και στην τελική κατάσταση, και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = (m_A + m_B - m_\alpha - m_\beta)c^2 \quad (1.5)$$

όπου m η μάζα του ουδέτερου ατόμου σε ατομικές μονάδες μάζας

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ5

(amu) και

A, α, B, β ο μαζικός αριθμός του ατόμου σε ατομικές μονάδες μάζας

→ Αν $Q > 0$, τότε η αντίδραση είναι εξώθερμη. Η αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί θεωρητικά ακόμα και με μηδενική κινητική ενέργεια του βλήματος.

→ Αν $Q < 0$, τότε η αντίδραση είναι ενδόθερμη. Σε αυτή την περίπτωση για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση απαιτείται μια ενέργεια βομβαρδισμού πάνω από κάποιο συγκεκριμένο όριο. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ενέργεια κατωφλίου (E_{th}) και δίνεται από τον τύπο:

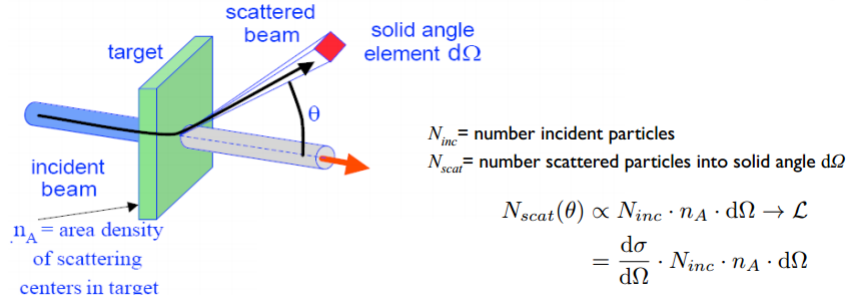
$$E_{th} = -Q \frac{m\beta + mB}{m\beta + mB - m\alpha} \quad (1.6)$$

Παρατηρούμε πως η ενέργεια κατωφλίου είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της Q-value. Αυτό συμβαίνει διότι τα προϊόντα της αντίδρασης που εκτρέπονται σε γωνία διάφορη του μηδενός πρέπει να έχουν μη μηδενική ενέργεια.

→ Αν $Q = 0$, τότε πρόκειται για ελαστική σκέδαση (τα προϊόντα είναι ίδια με τα αντιδρώντα).

1.2.4 Ενεργός Διατομή

Η ενεργός διατομή (cross section) μιας συγκεκριμένης αντίδρασης $A(\alpha, \beta)B$ εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί η αντίδραση κάτω από ορισμένες πειραματικές συνθήκες. Έστω μια πειραματική διάταξη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου μια δέσμη σωματιδίων προσπίπτει σε ένα συγκεκριμένο πυρήνα A , τον οποίο θέλουμε να μελετήσουμε.



Αφού γίνει η αντίδραση μεταξύ των σωματιδίων της δέσμης και των πυρήνων A του στόχου, εκπέμπονται σωματίδια β (σε γωνία θ σε σχέση με την διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης), τα οποία καταγράφονται από έναν ανιχνευτή, που δέχεται σωματίδια σε στερεά γωνία $\Delta\Omega$. Τότε, η ενεργός διατομή της αντίδρασης δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{R_\beta}{I_\alpha N} \quad (1.7)$$

όπου R_β ο ρυθμός των εξερχόμενων σωματιδίων β ,

I_α η ροή των σωματιδίων α που προσπίπτουν στο στόχο, στη μονάδα του χρόνου και N ο αριθμός των πυρήνων του στόχου ανά μονάδα επιφάνειας.

Η μονάδα μέτρησης της ενεργού διατομής είναι το barn (b), όπου $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$.

Αν ζητείται ο αριθμός των εκπεμπόμενων σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου που ανιχνεύονται από το παράθυρο του ανιχνευτή σε μια στερεά γωνία $d\Omega$, στην κατεύθυνση της εισερχόμενης δέσμης, είναι φανερό πως αυτός ο αριθμός θα είναι ανάλογος της στερεάς γωνίας $d\Omega$. Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για την διαφορική ενεργό διατομή $d\sigma/d\Omega$. Η διαφορική ενεργός διατομή θα έχει διαστάσεις επιφάνειας ανά στερεά γωνία δηλαδή barn/steradian. Η διαφορική ενεργός διατομή δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_0 N} \quad (1.8)$$

όπου $r(\theta, \phi)$ η γωνιακή κατανομή των εκπεμπόμενων σωματιδίων και I_N ο αριθμός των σωματιδίων που ανιχνεύονται σε κάποια γωνία θ ανά μονάδα χρόνου.

Για να προσδιοριστεί η ενεργός διατομή της αντίδρασης αρκεί η ολοκλήρωση της διαφορικής ενεργού διατομής σε όλες της γωνίες:

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ7

$$\sigma = \int_0^{4\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^\pi \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (1.9)$$

Διαφορική Ενεργός Διατομή εκτός συντονισμού

Στις περιοχές εκτός συντονισμού, το πλήθος των ακτίνων- γ που παράγονται σε ενέργεια E και γωνία θ , η $Y(E, \theta)$, δίνεται από τη σχέση:

$$Y(E, \theta) = N_p N_t \Delta\Omega \epsilon_{int} \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) \quad (1.10)$$

όπου N_p το πλήθος των πυρήνων της δέσμης που προσπίπτουν στο στόχο, N_t το πάχος του στόχου σε μονάδες αριθμού ατόμων ανά επιφάνεια, $\Delta\Omega$ η στερεά γωνία, ϵ_{int} η ενδογενής απόδοση του κάθε ανιχνευτή και $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ η διαφορική ενεργός διατομή για κάθε ενέργεια και γωνία θ .

Η ενδογενής απόδοση ενός ανιχνευτή ορίζεται ως ο λόγος των σωματιδίων που ανιχνεύονται, προς το συνολικό αριθμό αυτών που προσπίπτουν στον ανιχνευτή. Έτσι, προκύπτει ότι:

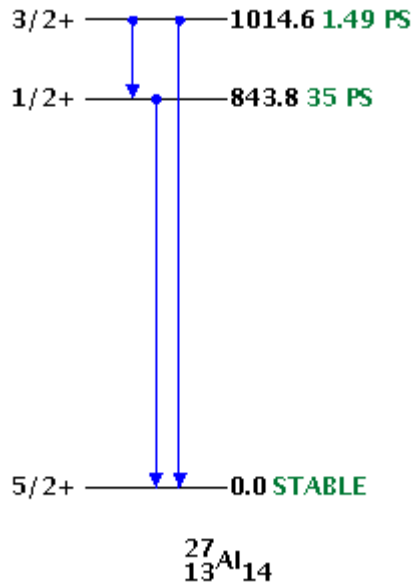
$$\Delta\Omega \epsilon_{int} = 4\pi \epsilon_{abs} \quad (1.11)$$

όπου ϵ_{abs} είναι η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή. Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι η διαφορική ενεργός διατομή δίνεται από την σχέση

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Y(E, \theta)}{N_p N_t 4\pi \epsilon_{abs}} \quad (1.12)$$

1.2.5 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας γ με την ύλη

Η ακτινοβολία γ παράγεται από διεγερμένους πυρήνες κατά την μετάπτωσή τους σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες. Μια τέτοια διεργασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα στην περίπτωση του αλουμινίου για την πυρηνική αντίδραση που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική.



Οι βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας γ και ύλης είναι τρεις:

- Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο
- Σκέδαση Compton
- Δίδυμη Γέννηση

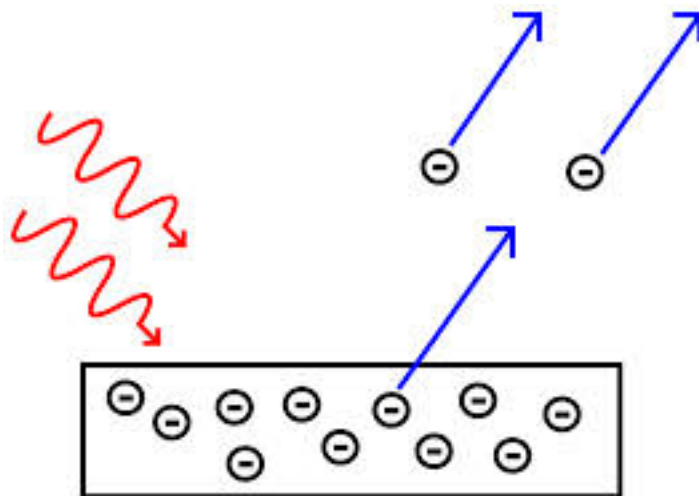
Και οι τρεις αυτές διαδικασίες οδηγούν στην ολική ή μερική μετατροπή της ενέργειας του φωτονίου σε ενέργεια ηλεκτρονίου, καταλήγοντας στην εξαφάνιση ή στη σκέδαση μέσω μιας μεγάλης μέσης γωνίας του αρχικού φωτονίου. Στις χαμηλές ενέργειες, μέχρι 500 keV, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αυτό που κυριαρχεί ενώ στις ενέργειες πάνω από 5MeV επικρατεί η δίδυμη γέννηση. Ανάμεσα σ' αυτές τις τιμές η σκέδαση Compton είναι η πιο πιθανή εξέλιξη. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και ο ατομικός αριθμός του υλικού με το οποίο συμβαίνει η αλληλεπίδραση, ασκώντας ισχυρή επιρροή στις σχετικές πιθανότητες μεταξύ των τριών φαινομένων. Οι βασικές αρχές των τριών μηχανισμών αναλύονται αμέσως παρακάτω.

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ9

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

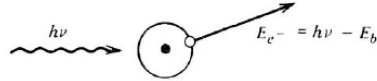
Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, που αναφέρεται συνήθως και ως φωτοηλεκτρική απορρόφηση (photoelectric absorption), αποτελεί την αλληλεπίδραση που οδηγεί στην ολική εξαφάνιση του αρχικού φωτονίου και στη θέση αυτού την εμφάνιση ενός ηλεκτρονίου που προέρχεται από μία από τις ηλεκτρονιακές στοιβάδες του ατόμου-απορροφητή. Για συνηθισμένες ενέργειες η πιθανότερη στοιβάδα που θα δώσει το ηλεκτρόνιο είναι η K, για την οποία οι τυπικές τιμές για την ενέργεια σύνδεσης κυμαίνονται από μερικά keV, για υλικά με μικρό ατομικό αριθμό, μέχρι μερικές δεκάδες keV για υλικά με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό. Αξίζει να σημειωθεί πως η αλληλεπίδραση έχει να κάνει συνολικά με ολόκληρο το άτομο και δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποιο ελεύθερο ηλεκτρόνιο.

Η παραπάνω διεργασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου που αποδεσμεύεται είναι ίση με την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου, μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης της στοιβάδας από την οποία προήλθε, δηλαδή:

$$E_e = \frac{1}{2}mu^2 = h\nu - E_\beta \quad (1.13)$$



όπου E_β η ενέργεια σύνδεσης του φωτοηλεκτρονίου στην αρχική του στοιβάδα,

m η μάζα του ηλεκτρονίου,

u η ταχύτητά του,

h η σταθερά του Planck και

ν η συχνότητα του φωτονίου.

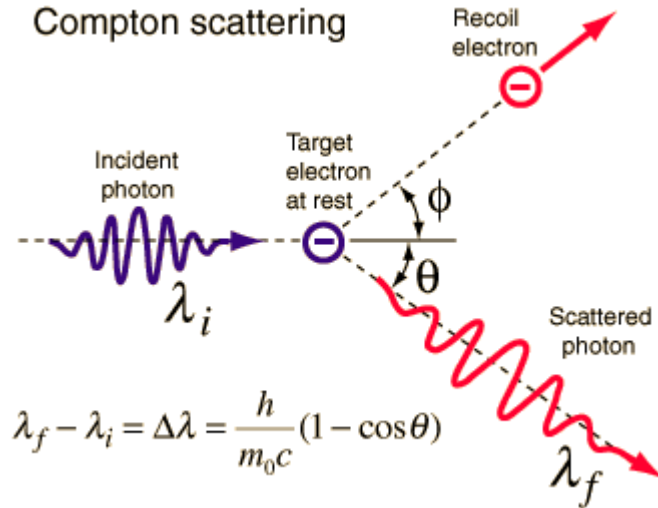
Από αυτήν τη σχέση γίνεται φανερό πως για την πραγματοποίηση του φαινομένου υπάρχει κατώφλι ενέργειας του φωτονίου, δηλαδή θα πρέπει $h\nu > E_\beta$. Για ενέργειες λοιπόν της ακτινοβολίας μερικών εκατοντάδων keV το φωτοηλεκτρόνιο φέρει το μεγαλύτερο μέρος του αρχικού φωτονίου.

Το κενό, τώρα, που έχει δημιουργηθεί από την εκπομπή του ηλεκτρονίου αναπληρώνεται σύντομα από κάποιο ελεύθερο ηλεκτρόνιο ή από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στο άτομο. Γι' αυτόν το λόγο το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συνοδεύεται και από την εκπομπή μιας ή και περισσότερων χαρακτηριστικών ακτίνων X. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές οι ακτινοβολίες απορροφούνται ξανά κοντά στην περιοχή δημιουργίας τους μέσω φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, εμπλέκοντας στοιβάδες χαμηλότερων ενεργειών σύνδεσης.

Σκέδαση Compton

Ο μηχανισμός της σκέδασης Compton λαμβάνει χώρα μεταξύ του προσπίπτοντος φωτονίου (incident photon) και ενός ηλεκτρονίου από το υλικό πρόσπτωσης. Το αποτέλεσμα είναι η κίνηση του σκεδασμένου φωτονίου (scattered photon), με μικρότερη πλέον ενέργεια από αυτή που είχε αρχικά, κατά μία γωνία θ σε σχέση με την αρχική του κατεύθυνση και η εκτίναξη του ηλεκτρονίου (recoil electron), που αρχικά θεωρείται ακίνητο, απορροφώντας μέρος από την ενέργεια του φωτονίου. Ο μηχανισμός αυτός φαίνεται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα.

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ11



Το φαινόμενο μπορεί να θεωρηθεί σαν ελαστική σκέδαση του φωτονίου με ελεύθερο ηλεκτρόνιο και χρησιμοποιώντας τις αρχές διατήρησης της ορμής και της ενέργειας, η ενέργεια του σκεδασμένου φωτονίου αποδεικνύεται πως δίνεται από τη σχέση :

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1.14)$$

όπου m_0c^2 είναι η ενέργεια του ηλεκτρονίου σε κατάσταση ηρεμίας, με τιμή 0.511MeV .

Επομένως, η κινητική ενέργεια που αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο ισούται με:

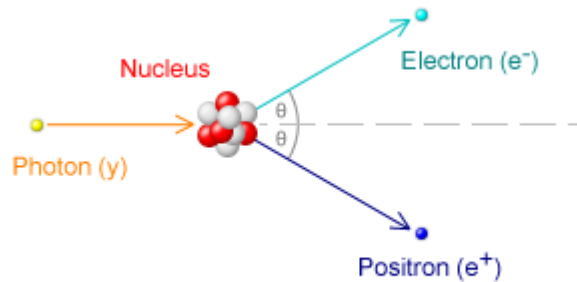
$$E_e = h\nu - h\nu' = h\nu \left[\frac{\frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \right] \quad (1.15)$$

Στις ακραίες περιπτώσεις, δηλαδή για $\theta \simeq 0 \text{ rad}$ όπου το φωτόνιο συνεχίζει να κινείται στην ίδια σχεδόν διεύθυνση η ενέργεια που μεταφέρεται είναι η ελάχιστη, ενώ για $\theta = \pi \text{ rad}$ όπου το φωτόνιο οπισθοσκεδάζεται παρατηρείται η μέγιστη δυνατή μεταφορά ενέργειας που μπορεί να συμβεί μέσω του μηχανισμού Compton (Compton edge).

Δίδυμη Γέννηση

Ο τρίτος σημαντικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης είναι η δίδυμη γέννηση. Σύμφωνα με αυτόν η αλληλεπίδραση του φωτονίου με την ύλη

οδηγεί στην εξαφάνιση του πρώτου και στην δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Καθώς η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία αυτού του ζεύγους είναι $2m_0c^2$ συνεπάγεται πως για να είναι ενεργειακά πιθανό αυτό το φαινόμενο, χρειάζεται η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον 1,02MeV.



Στην περίπτωση που ικανοποιείται αυτή η συνθήκη η επιπλέον ενέργεια του φωτονίου θα αποδοθεί ως κινητική ενέργεια στο ζεύγος, δηλαδή

$$E_{e^+} + E_{e^-} = h\nu + 2m_0c^2 \quad (1.16)$$

Μετά την γένεσή τους, το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο επιβραδύνονται με διαδοχικές συγκρούσεις με τα άτομα του υλικού και η απόσταση που διανύουν μέσα σ' αυτό είναι το πολύ μερικά χιλιοστά.

Φασματοσκοπία γ

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μέτρηση της γ -ακτινοβολίας είναι η γ -φασματοσκοπία. Όλα σχεδόν τα υλικά περιέχουν έστω και ελάχιστες ποσότητες ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν γ -ακτινοβολία. Το ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό (αποτελεί ταυτότητα) του πυρήνα που την εκπέμπει. Από το χαρακτηριστικό φάσμα που εκπέμπει το ραδιενεργό ισότοπο μπορούμε να διαγνώσουμε την παρουσία ακόμα και ελαχίστων ποσοτήτων κάποιου στοιχείου σε υλικό. Αν πάλι το υλικό δεν περιέχει ραδιενεργό ισότοπο του υπόψη στοιχείου, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ενεργοποίησης (πχ με νετρόνια, δείγμα του υλικού βομβαρδίζεται με νετρόνια) οπότε παράγονται ραδιενεργά ισότοπα που συνήθως εκπέμπουν γ -ακτινοβολία. Από τα φάσματα των ακτινοβολιών αυτών προσδιορίζεται η παρουσία συγκεκριμένων στοιχείων στο υλικό.

Η γ -φασματοσκοπία λοιπόν εφαρμόζεται ευρύτατα ως ένα εργαλείο για

1.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ¹³

την ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος και συγκεκριμένα τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ισοτόπων που υπάρχουν σ' αυτό. Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν τομείς όπως: παρακολούθηση πυρηνικών εγκαταστάσεων, ακτινοφυσική, πυρηνική ιατρική, επιστήμη περιβάλλοντος, έρευνα υλικών, βιοεπιστήμες και βιομηχανικές εφαρμογές ραδιοϊσοτόπων.

Μία συντηρητική εκτίμηση δείχνει ότι περισσότερα από 200000 συστήματα γ -φασματομετρίας χρησιμοποιούνται σε ακαδημαϊκό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο παγκοσμίως. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 10 με 15 χρόνων έχουν κατασκευαστεί ανιχνευτές, ηλεκτρονικά και λογισμικό μεταφοράς και απεικόνισης δεδομένων για διατάξεις γ -φασματοσκοπίας που μπορούν με ευκολία να αναπτυχθούν σε εξωτερικούς χώρους. Στον χώρο των ανιχνευτών, τα συστήματα φορητών ανιχνευτών γερμανίου γνωρίζουν ιδιαίτερη άνθιση στις μέρες μας, με χρήση κρυστάλλων υπερκαθαρού γερμανίου HPGe (high purity Ge), που εξασφαλίζουν πέρα από τη δυνατότητα επιτόπιας φασματοσκοπίας, την πολύ καλή διακριτική ικανότητα, αλλά και τη δυνατότητα "θέρμανσης" του κρυστάλλου χωρίς να υπάρξει καταστροφή αυτού.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση δειγμάτων με τη χρήση πυρηνικών μεθόδων

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότεροι μέθοδοι ιοντικών δεσμών για την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση ενός δείγματος. Οι μέθοδοι πυρηνικής φυσικής έχουν κυριαρχήσει έναντι των άλλων μεθόδων (χημική ανάλυση, τεχνικές στερεάς κατάστασης), διότι είναι ελάχιστα καταστροφικές για τον στόχο και γιατί παρουσιάζουν μεγάλη διακριτική ικανότητα μεταξύ των διάφορων στοιχείων που αποτελείται ο στόχος. Γίνεται φανερό πως οι μέθοδοι αυτές είναι κατάλληλες για την ανίχνευση των στοιχείων που αποτελείται ο στόχος, για τον στοιχειομετρικό προσδιορισμό του, και ορισμένες φορές για την εις βάθος μελέτη της κατανομής ενός στοιχείου στον στόχο. Για την μελέτη γίνεται χρήση δέσμης φορτισμένων σωματιδίων (πρωτόνια, δευτέρια, ^4He , κ.α.) που προκαλούν πυρηνικές αντιδράσεις στον στόχο. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται φορτισμένα σωματίδια ή και αφόρτιστα όπως φωτόνια και νετρόνια. Το υπό μελέτη υλικό που χρησιμοποιείται σαν στόχος καθορίζει και την μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί.

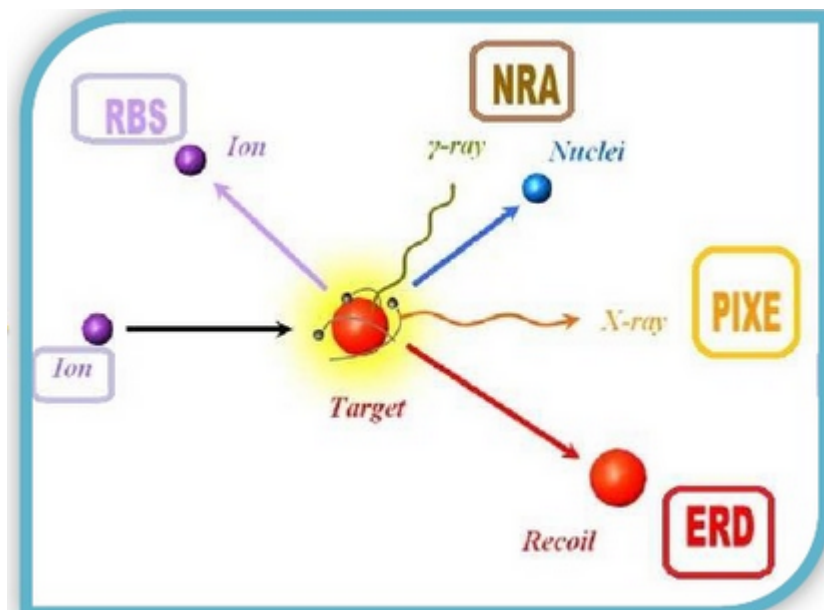
Αυτές οι μέθοδοι χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: την φασματοσκοπία φωτονίων και την φασματοσκοπία φορτισμένων σωματιδίων.

2.1 Ανάλυση με δέσμη φορτισμένων σωματιδίων (Ion Beam Analysis)

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται δέσμη από ιοντισμένα σωματίδια τα οποία αλληλεπιδρούν με τα σωματίδια του πυρήνα-στόχου με αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων ή φωτονίων. Επειδή όμως το σωματίδιο κατά την διαδρομή του μέσα στον στόχο θα χάσει πολύ ενέργεια, η IBA

16ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

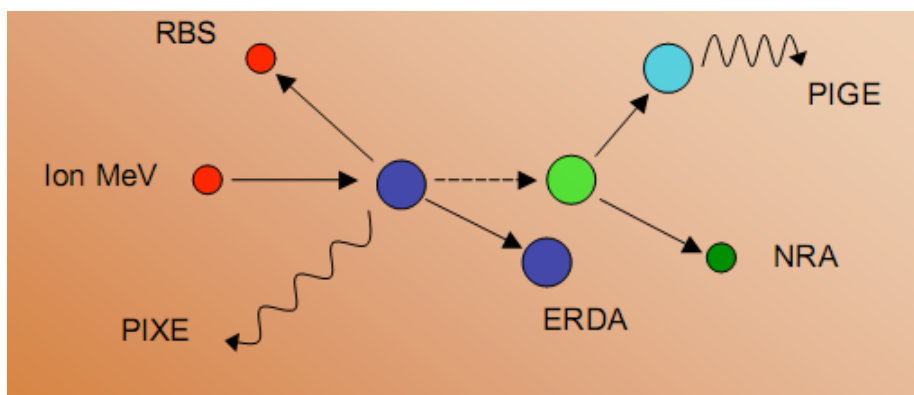
κρίνεται κατάλληλη μόνο για την εξέταση μερικών μm από την επιφάνεια του στόχου.



Η IBA περιλαμβάνει τις παρακάτω τεχνικές:

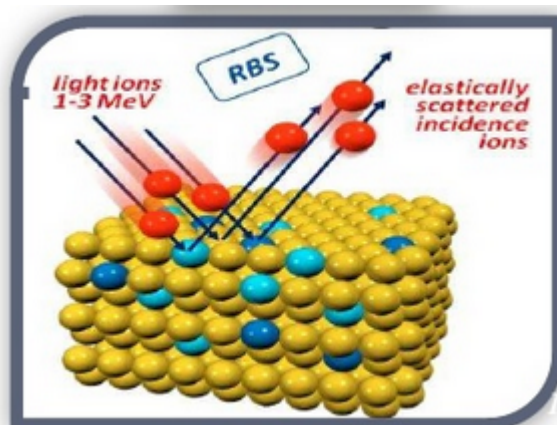
- Φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS)
- Φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης non-Rutherford (Elastic (non-Rutherford) backscattering spectrometry, EBS)
- Φασματοσκοπία ελαστικής ανάκρουσης (Elastic recoil detection analysis, ERDA)
- Ανάλυση μέσω πυρηνικών αντιδράσεων (Nuclear Reaction Analysis, NRA) που περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες:
 - Φασματοσκοπία φορτισμένων σωματιδίων
 - Φασματοσκοπία ακτίνων γ (Particle Induced γ -ray Emission, PIGE)
 - Φασματοσκοπία ακτίνων X (particle induced X-ray emission, PIXE)

2.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (ION BEAM ANALYSIS) 17



Φασματοσκοπία RBS

Στις χαμηλές ενέργειες το βλήμα και οι πυρήνες του στόχου αλληλεπιδρούν μόνο μέσω των δυνάμεων Coulomb και η διαφορική ενεργός διατομή περιγράφεται πλήρως από την εξίσωση του Rutherford. Η τεχνική RBS βασίζεται στο γεγονός ότι η ενέργεια, η γωνία και ο αριθμός των προσπιπτόντων σωματιδίων μπορεί να συσχετισθεί με το είδος, την θέση και την ποσότητα του ατόμου του στόχου. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η δέσμη των σωματιδίων προσπίπτει στον στόχο και τα ιόντα σκεδάζονται ελαστικά. Η σκέδαση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από πυρήνες που βρίσκονται στην επιφάνεια του στόχου, είτε από πυρήνες στο εσωτερικό του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η ελάχιστη καταστροφική ανίχνευση ενός στοιχείου και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης κατά βάθος με μεγάλη ακρίβεια. Αξίζει να σημειωθεί πως μπορούν να ανιχνευθούν βαρείς πυρήνες οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα σε ελαφρούς πυρήνες, ακόμα και αν η συγκέντρωσή τους είναι πολύ μικρή.

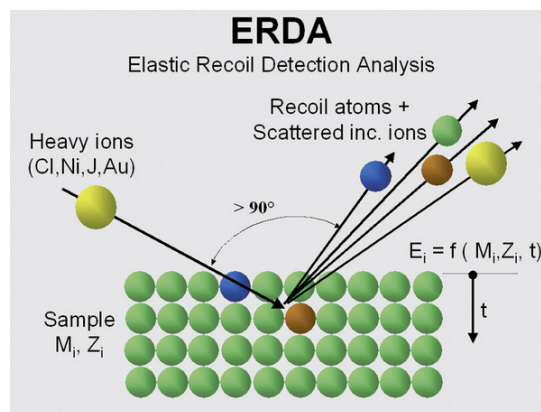


Φασματοσκοπία EBS

Όταν η παράμετρος κρούσης b είναι τόσο μικρή που να ισούται σχεδόν με το άθροισμα των ακτίνων του πυρήνα του βλήματος και του στόχου, οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης οδηγούν σε αποκλίσεις από τη θεωρία της σκέδασης Rutherford. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης, EBS (Elastic (Non-Rutherford) Backscattering Spectroscopy). Η φασματοσκοπία ελαστικής οπισθοσκέδασης μπορεί να ανιχνεύσει ελαφρούς πυρήνες σε βαριά μήτρα.

Φασματοσκοπία ERDA

Η φασματοσκοπία ελαστικής ανάκρουσης είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές φορτισμένων σωματιδίων. Η τεχνική αυτή προσφέρει την δυνατότητα χαρτογράφησης του χωρικού προφίλ του στόχου. Λόγω όμως της απαιτητικής επεξεργασίας και των ανιχνευτικών διατάξεων δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο η τεχνική RBS. Η τεχνική της ERDA βασίζεται στις ίδιες αρχές με αυτές της RBS με την διαφορά πως τώρα τα ανιχνευόμενα σωματίδια είναι τα ανακρουσμένα και όχι τα σκεδαζόμενα. Το ανιχνευτικό σύστημα πρέπει να είναι ικανό να διαχωρίζει τα διαφορετικά άτομα του στόχου. Αυτό δίνει το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου δηλαδή την δυνατότητα εύρεσης του προφίλ των στοιχείων ξεχωριστά όταν αυτά δεν έχουν περίπου ίδια μάζα με το βλήμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται βαριά ιόντα όπως ^{127}I , ^{197}Au κλπ.

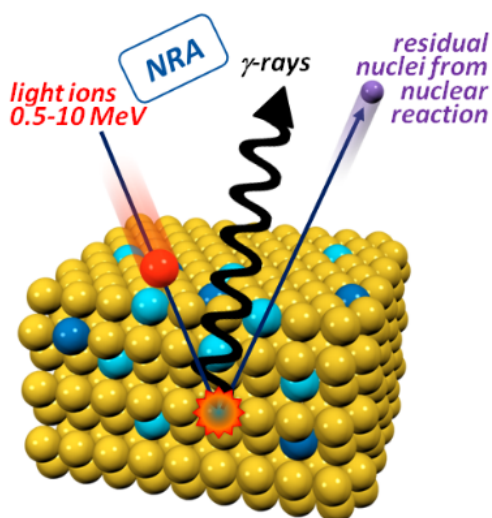


Φασματοσκοπία NRA

Σε αντίθεση με τη φασματοσκοπία RBS, όπου οι δυνάμεις είναι ηλεκτροστατικές, η φασματοσκοπία NRA (Nuclear Reaction Analysis) χρησιμοποιεί χαμηλού βεληνεκούς πυρηνικές δυνάμεις. Οπότε, η ενέργεια της

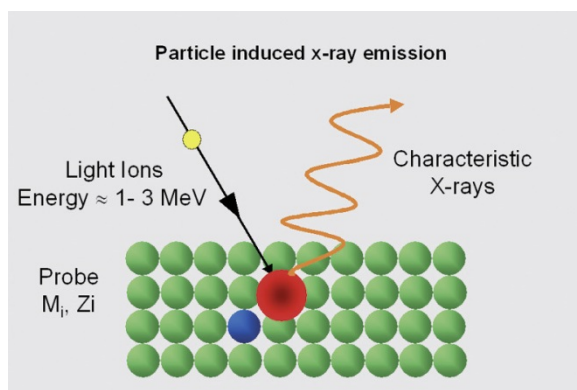
2.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (ION BEAM ANALYSIS) 19

δέσμης πρέπει να είναι συγκρίσιμη με το δυναμικό Coulomb. Όταν μια δέσμη ιόντων προσκρούει με τον στόχο τότε δημιουργείται μια πυρηνική αντίδραση μεταξύ των ιόντων της δέσμης και του πυρήνα και έπειτα ανιχνεύονται τα προϊόντα της αντίδρασης που είναι φορτισμένα σωματίδια, ακτίνες γ ή και τα δύο. Τα φάσματα που προκύπτουν αποτελούνται από καλά διαχωρισμένες κορυφές, και μάλιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή Q_v της αντίδρασης, τόσο πιο απομονωμένες και ευδιάκριτες γίνονται.



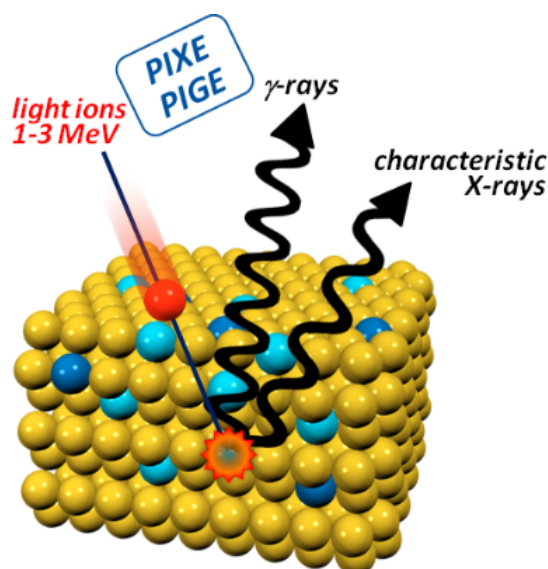
Φασματοσκοπία PIXE

Μια άλλη βασική μέθοδος είναι η PIXE (Particle Induced X-ray Emission) η οποία βασίζεται στην αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων της δέσμης με το ηλεκτρονιακό νέφος του ατόμου και για αυτό τον λόγο στην ουσία δεν αποτελεί μια πυρηνική μέθοδο. Όταν το σωματίδιο της δέσμης συναντήσει τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών φλοιών των ατόμων του στόχου μπορεί να συμβεί είτε ιονισμός του ατόμου είτε διέγερση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες αφήνοντας μια οπή και το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση. Κατά την αποδιέγερση του ατόμου η κενή θέση συμπληρώνεται από ηλεκτρόνια ανώτερων φλοιών με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων με μήκη κύματος στην περιοχή των ακτίνων χ , χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου οι οποίες αντιστοιχούν στην ενεργειακή διαφορά των δυο στοιβάδων. Οι εκπεμπόμενες ακτίνες χ ανιχνεύονται με ανιχνευτές ημιαγωγών όπως Si(Li) ή HPGe και συλλέγεται το φάσμα τους.



2.1.1 Φασματοσκοπία PIGE

Η τεχνική PIGE (Particle Induced γ -ray Emission) βασίζεται στην φασματοσκοπία ακτίνων γ που προέρχονται από τις αποδιεγέρσεις ενός σύνθετου πυρήνα όταν σε αυτόν προσπέσουν φορτισμένα σωματίδια κατά το μοντέλο $A(\alpha, \gamma)B$. Πιο αναλυτικά, όταν ένα σωματίδιο προσπέσει σε ένα πυρήνα και διαπεράσει το δυναμικό Coulomb μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτό δημιουργώντας ένα σύνθετο διεγερμένο πυρήνα ο οποίος στη συνέχεια αποδιεγείρεται εκπέμποντας χαρακτηριστικές ακτίνες γ . Η ακτινοβολία αυτή θα έχει ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας των καταστάσεων μεταξύ των οποίων έγινε η μετάβαση στον σύνθετο πυρήνα και σε πολλές περιπτώσεις (ειδικά όταν η μετάβαση γίνεται από τις πρώτες διεγερμένες καταστάσεις στην θεμελιώδη) η ενέργεια της ακτίνας αποτελεί αποτύπωμα του πυρήνα.



2.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (ION BEAM ANALYSIS) 21

Η μέθοδος PIGE μπορεί να θεωρηθεί ως μια υποκατηγορία της μεθόδου NRA όταν χαρακτηριστικής ενέργειας ακτίνες γ ανιχνεύονται ως προϊόντα της αντίδρασης. Η PIGE χρησιμοποιείται για την μελέτη του προφίλ ελαφριών πυρήνων διότι η επίτευξη μιας τέτοιας τεχνικής απαιτεί η δέσμη ενέργειας ικανή να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού Coulomb και να διεισδύσει στον πυρήνα ώστε να γίνει η αντίδραση.

Γνωρίζουμε από την εξίσωση του φράγματος δυναμικού είναι ανάλογη της σχέσης

$$Eh \simeq \frac{z + Z}{a^{1/3} + A^{1/3}} \quad (2.1)$$

όπου A, a είναι οι μαζικοί αριθμοί του στόχου και της δέσμης αντίστοιχα και Z, z οι ατομικοί αριθμοί του στόχου και της δέσμης.

Παρατηρούμε πως για ελαφρά προσπίπτουσα δέσμη, δηλαδή δέσμη με μικρό z , το δυναμικό εξαρτάται από το ατομικό αριθμό του στόχου. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να συμβεί η αντίδραση στους ελαφρούς πυρήνες.

Αξίζει να σημειωθεί πως η τεχνική PIGE σε σχέση με τις άλλες τεχνικές IBA, χρησιμοποιείται όταν η χημική σύσταση του δείγματος είναι ποιοτικά γνωστή και μια συγκεκριμένης ενέργειας ακτίνα γ είναι ικανή ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου ισότοπου. Επίσης δίνεται η δυνατότητα έλεγχου για τυχόν αλλαγές στην συγκέντρωση του χωρικού προφίλ του ισότοπου. Όμως υπάρχουν πολύ λίγα ισότοπα όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτά η μέθοδος PIGE. Αυτά είναι τα εξής: ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{19}F , ^{22}Ne , ^{23}Na , ^{24}Mg , ^{26}Mg , ^{27}Al , ^{29}Si , ^{30}Si και ^{32}S .

Η τεχνική χρησιμοποιείται από το 1960 σε διάφορα πεδία εφαρμογών, τα οποία ποικίλουν από την ανάλυση των υλικών των αντιδραστήρων σχάσης μέχρι την βιοιατρική, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά, και πρόσφατα χρησιμοποιείται και στην μελέτη των υλικών αντιδραστήρων σύντηξης. Η δυνατότητα για υψηλής ευκρίνειας χωρικού προφίλ σε σχέση με τις άλλες τεχνικές σύντομα αναγνωρίστηκε.

2.1.2 Οι αρχές της μεθόδου

Στην μέθοδο PIGE μετρώνται τα προϊόντα της άμεσης πυρηνικής αντίδρασης. Η απόδοση (yield) δηλαδή ο αριθμός των ανιχνευμένων ακτίνων γ, μας παρέχει πληροφορίες για την χωρητικότητα των στοιχείων, την

22ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

ενέργεια των σωματιδίων που έχουμε ανιχνεύσει καθώς μας δίνει επίσης και μια εικόνα του χωρικού προφίλ των στοιχείων. Είναι προφανές πως και για τις τρεις περιπτώσεις αυτό που πρέπει να είναι γνωστό με μεγάλη ακρίβεια έτσι ώστε να προσδιοριστεί η απόδοση και η ενέργεια των ανιχνευμένων σωματιδίων είναι:

- Η τιμή της ισχύος ανασχέσεως (stopping power) της εισερχόμενης δέσμης ιόντος καθώς και του εξερχόμενου προϊόντος της αντίδρασης.
- Η διαφορική ενεργός διατομή της εφαρμοζόμενης αντίδρασης, που αντιστοιχεί στην πιθανότητα εμφάνισης των ανιχνευόμενων φωτονίων σε μια συγκεκριμένη γωνία όπου είναι ο ανιχνευτής.

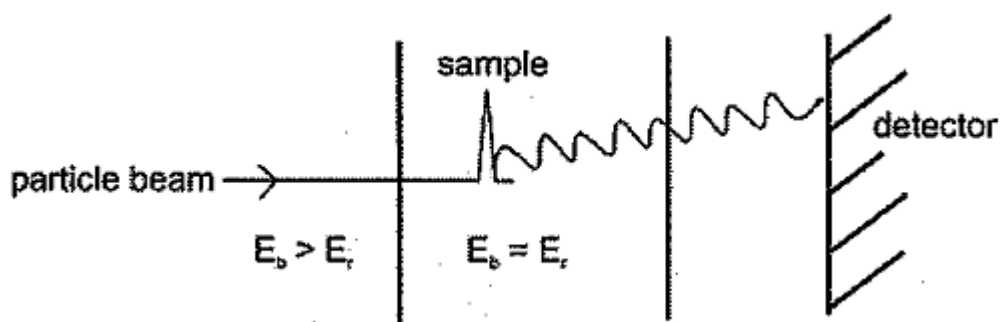
2.1.3 Φασματοσκοπία συντονιστικής PIGE

Σε κάποιες περιπτώσεις και για πολύ συγκεκριμένες ενέργειες δέσμης, η εκπομπή των ακτίνων- γ από τον πυρήνα εμφανίζει ισχυρούς και λεπτούς συντονισμούς με μικρό εύρος, της τάξης των μερικών eV έως keV. Τότε μπορεί να γίνει χρήση της μεθόδου της συντονιστικής-PIGE (resonant-PIGE).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου PIGE είναι το γεγονός ότι η κορυφή της ενέργειας της χαρακτηριστικής ακτίνας γ δεν μεταβάλλεται με το βάθος. Για να προσδιορίσουμε λοιπόν το βάθος πρέπει να χρησιμοποιούμε ισχυρούς και στενούς συντονισμούς. Αυτοί οι συντονισμοί προκαλούν αύξηση στην απόδοση (yield) των ανιχνευόμενων ακτίνων γ και έτσι λειτουργούν σαν ιχνηθέτες ενέργειας σε σχέση με το βάθος (energy markers).

Όταν η ενέργεια της δέσμης συμπίπτει με την ενέργεια του συντονισμού, σχηματίζεται μια κορυφή στο φάσμα των ακτίνων- γ , που οφείλεται στα γεγονότα που συμβαίνουν στην επιφάνεια του στόχου. Καθώς η δέσμη εισέρχεται εντός του δείγματος, η ενέργεια των σωματιδίων της δέσμης ελαττώνεται λόγω απώλειας ενέργειας μέσα στην ύλη, με αποτέλεσμα να μη βρίσκεται πλέον μέσα στο εύρος του συντονισμού. Αυξάνοντας όμως την ενέργεια της δέσμης, τα γεγονότα που συμβάλλουν στο σχηματισμό της κορυφής του φάσματος των ακτίνων- γ , συμβαίνουν βαθύτερα μέσα στο στόχο, όπου τα σωματίδια έχουν χάσει πλέον αρκετή ενέργεια και βρίσκονται εντός του εύρους του συντονισμού. Όσο αυξάνεται η ενέργεια της δέσμης, το προσπίπτον ιόν φτάνει την τιμή της ενέργειας συντονισμού σε μακρύτερο βάθος. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί το υλικό σε μεγαλύτερο βάθος και να προσδιοριστεί το προφίλ της συγκε-

ντρωσής του κατά βάθους.



Κάθε ενέργεια που έχουμε συλλέξει αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή του βάθους διείσδυσης του στόχου, και οι ακτίνες γ που έχουμε βρει θα αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο ισότοπο. Έτσι η μέθοδος PIGE απαιτεί να πάρουμε πολλά πειραματικά φάσματα και να τα αναλύσουμε ταυτόχρονα. Αυτή είναι μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία, αλλά δίνει υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα.

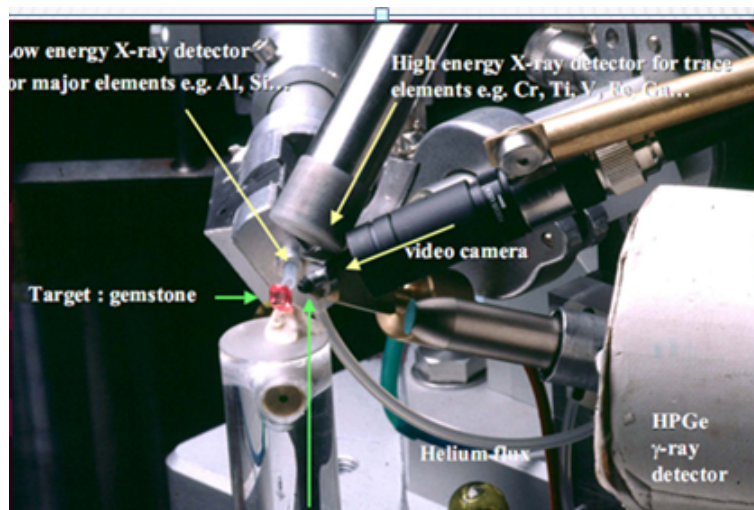
Βασικό μειονέκτημα μεθόδου είναι ότι δεν προσφέρεται η δυνατότητα ανάλυσης περισσότερων του ενός στοιχείων κάθε φορά καθώς και δεν παρέχεται καμία επιπλέον πληροφορία για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που απαρτίζουν το δείγμα.

2.1.4 Εφαρμογές της PIGE

Μια από της βασικότερες και πολλά υποσχόμενες εφαρμογές της μεθόδου PIGE βασίζεται στην μελέτη υλικών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Η μη καταστροφική της ιδιότητα καθώς και το γεγονός ότι μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια το βάθος και το χωρικό προφίλ την καθιστά κατάλληλη για τέτοιου είδους μελέτες.

Έχουν ιδρυθεί πολλά εργαστήρια που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνικές με σκοπό την διαφύλαξη και μελέτη της πολιτιστικής κληρονομιάς όπως το AGLAE (Louvre-Paris) αλλά και για έρευνα όπως Forschungszentrum Rossendorf (Dresden). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιείται στο AGLAE, όπου ένας πολύτιμος λίθος μπορεί να αναλυθεί και να ελεγχθεί η σύσταση του και κατ'επέκταση η γνησιότητα του.

24ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ



Μια εξίσου σημαντική εφαρμογή της μεθόδου είναι ο έλεγχος για παρουσία υδρογόνου σε τεχνολογικά υλικά. Το υδρογόνο είναι το πιο συνηθισμένο στοιχείο που «μολύνει» τα υλικά. Επίσης το υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει με τα περισσότερα στοιχεία και η παρουσία του μπορεί να επιφέρει σοβαρές αλλαγές στις ιδιότητες των υλικών παραδείγματος χάριν στις μηχανικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες.

Είναι κατανοητό πως η τεχνική πυρηνικών αντιδράσεων PIGE μπορεί να εντοπίσει το υδρογόνο και συγκεκριμένα το βάθος που βρίσκεται και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ελεγχτεί αν τα δείγματα πληρούν τις προδιαγραφές παρασκευής τους.

Τέλος η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για βιοιατρικές εφαρμογές όταν ο προς ακτινοβολήση στόχος είναι οστά ή δόντια και ζητείται η στοιχειομετρία του δείγματος.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διάταξη

3.1 Ο επιταχυντής

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον επιταχυντή τύπου Van der Graaff TANDEM μέγιστης διαφοράς δυναμικού $5.5MV$, του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δημόκριτος».



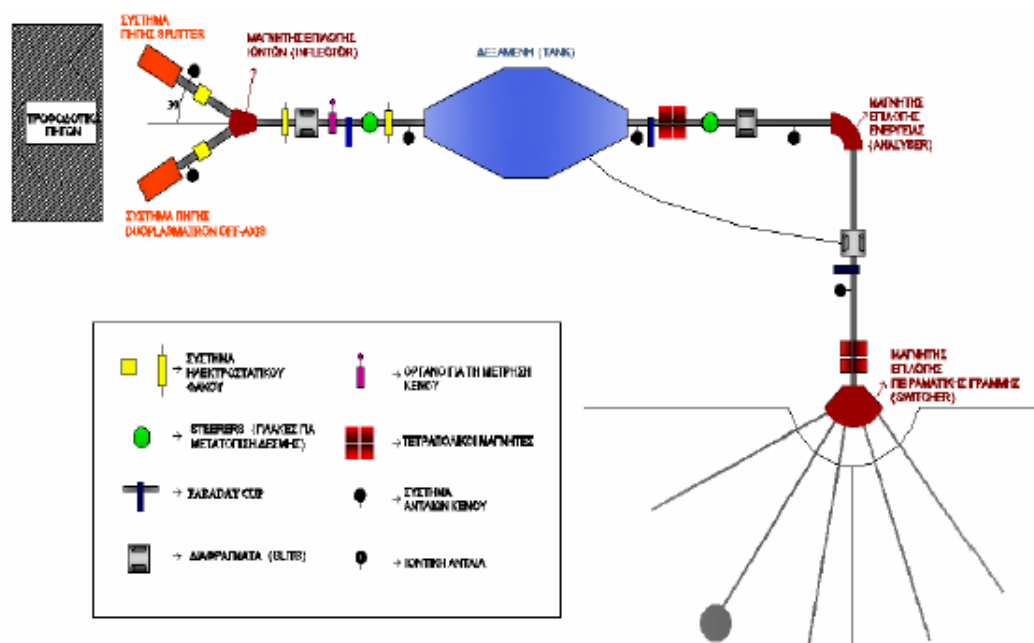
Ο γραμμικός επιταχυντής του ινστιτούτου βασίζεται στη λειτουργία της γεννήτριας Van der Graaff. Χρησιμοποιείται για ερευνητικούς σκοπούς πυρηνικής φυσικής.

Ο επιταχυντής tandem (σε αλληλουχία) συγκροτείται από δύο απλούς ηλεκτροστατικούς επιταχυντές σε σειρά. Τα δύο άκρα του επιταχυντικού συστήματος είναι γειωμένα και στο κέντρο της διάταξης, όπου συναντώνται οι δύο επιταχυντικοί σωλήνες και εφαρμόζεται υψηλή θετική τάση. Η πηγή ιόντων βρίσκεται έξω από τον κυρίως επιταχυντή στο δυναμικό της γης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: τα αρνητικά ιόντα διοχετεύονται στον πρώτο επιταχυντικό σωλήνα και επιταχύνονται σε ενέργεια eV μέχρι το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Στην περιοχή του ηλεκτροδίου εξαναγκάζονται να διασχίσουν κάποιο υλικό, με αποτέλεσμα να αποβάλλουν το περίσσιο ηλεκτρόνιο που τα καθιστούσε αρνητικά ιόντα και να απογυμνώνονται από n επιπλέον ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια,

ως θετικά ιόντα, με φορτίο ne , επιταχύνονται μέχρι το άλλο του άκρο του συστήματος με ολική κινητική ενέργεια $eV + neV$.

Τα βασικά στοιχεία του επιταχυντή όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα είναι:

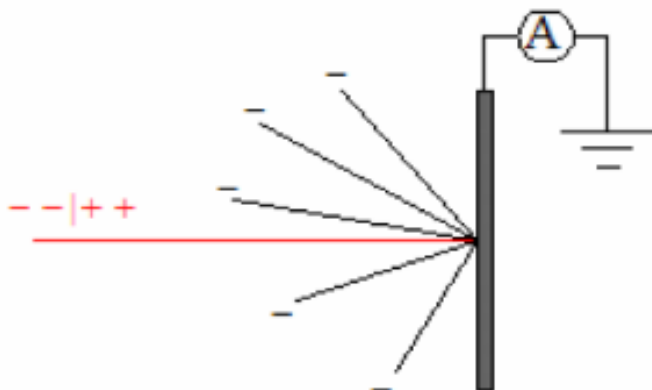
- Οι πηγές των ιόντων στην αρχή της γραμμής
- Η γεννήτρια Van de Graaff στο κέντρο (μέσα στην δεξαμενή του επιταχυντή)
- Πέντε πειραματικές γραμμές



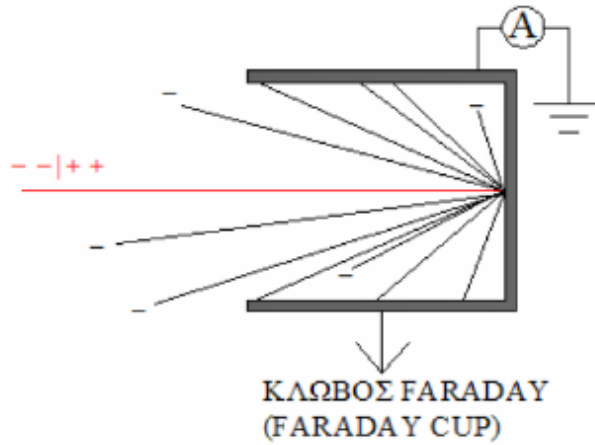
Τα ιόντα παράγονται, ανάλογα με το είδος τους, σε μία από τις δύο πηγές, sputter ή duoplasmatron off axis. Στην sputter παράγονται τα βαρέα ιόντα, όπως οξυγόνο, άνθρακας κλπ, ενώ στην duoplasmatron παράγονται τα ελαφρά ιόντα, όπως υδρογόνο, δευτέριο κλπ. Τα ιόντα που παράγονται οδηγούνται στον επιταχυντή μέσω ενός συστήματος ηλεκτρικών και μαγνητικών οπτικών στοιχείων όπου και επιταχύνονται στην επιθυμητή ενέργεια. Έπειτα με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου επιτυγχάνεται η στροφή της δέσμης κατά 90° . Με παρόμοιο τρόπο, δηλαδή με στροφή της δέσμης μέσω της εφαρμογής ενός μαγνητικού πεδίου και με την παρεμβολή επιπλέον οπτικών στοιχείων η δέσμη κατευθύνεται και στον τόπο του πειράματος.

3.1.1 Κλωβός Faraday (Faraday Cup)

Ο κλωβός Faraday χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το ρεύμα της δέσμης. Τα ιόντα που προσπίπτουν στον στόχο μετρώνται με ένα αμπερόμετρο. Όμως λόγω της αλληλεπίδρασης των ιόντων της δέσμης με τα ηλεκτρόνια του στόχου, πολλά από αυτά διαφεύγουν όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

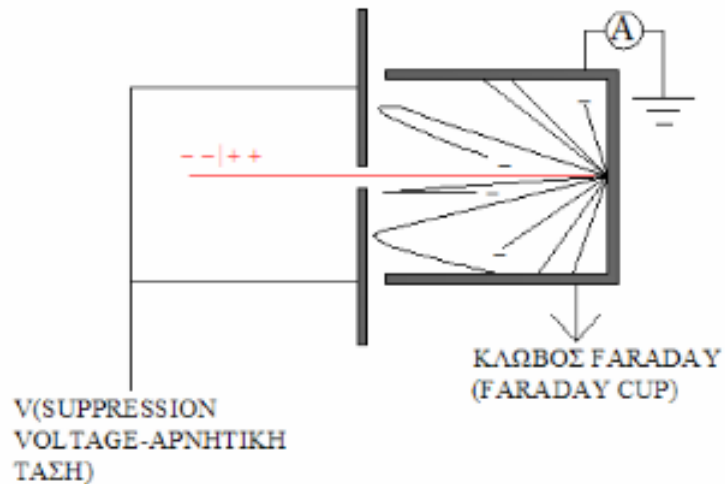


Λόγω αυτού του φαινομένου το ρεύμα που μετράμε, έχει μεγαλύτερη τιμή από την πραγματική. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα απαραίτητα είναι η μεγέθυνση της επιφάνειας στην οποία συλλέγονται τα φορτία ώστε να χάνονται όσο το δυνατόν λιγότερα, δηλαδή η μέτρηση του ρεύματος που συλλέγει ολόκληρος κλωβός και όχι ένα κομμάτι μέταλλο (κλωβός Faraday-Faraday cup).



Επίσης για να συλλεχτούν τα ηλεκτρόνια που έχουν διαφύγει πρέπει να εφαρμοστεί αρνητικής τάσης (secondary electron suppression) έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια να ωθούνται πίσω προς το μέταλλο.

Ιδανικός είναι ο συνδυασμός και των δύο, αρνητική τάση σε ένα πλέγμα μπροστά από το cup για να ωθεί τα ηλεκτρόνια προς τα πίσω, και θετική τάση στον κλωβό Faraday για να τα έλκει και να τα καταμετρά.



Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να προσδιορίσουμε την τιμή του ρεύματος στον στόχο μας με σφάλμα περίπου 3,5%.

3.2 Ανιχνευτικά συστήματα

Στα πειράματα σωματιδιακής και πυρηνικής φυσικής χρησιμοποιούνται ανιχνευτικές συσκευές ικανές να ανιχνεύσουν ή να ταυτοποιήσουν στοιχειώδη σωματίδια που προέρχονται από ραδιενεργές διασπάσεις, από επιταχυντές ή και από την κοσμική ακτινοβολία.

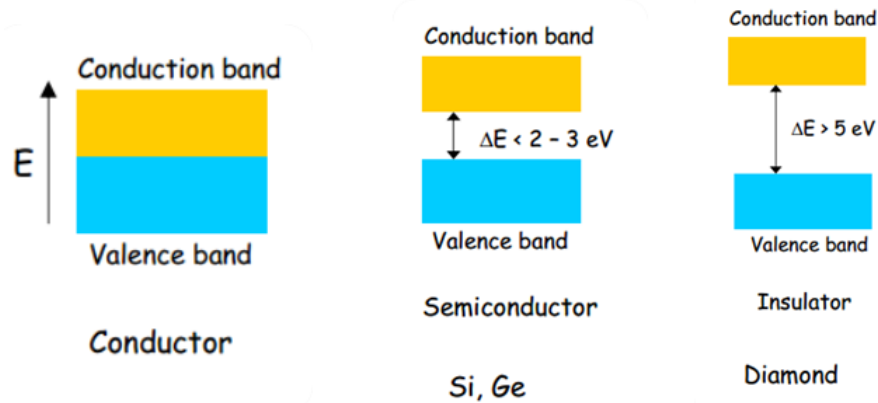
Τα σωματίδια της ραδιενεργού ακτινοβολίας (νετρόνια, πρωτόνια, άλφα, βήτα, γάμα κλπ) ανιχνεύονται από τον ιονισμό που προκαλούν, άμεσα ή έμμεσα, στην ύλη και από τη διέγερση που προκαλούν στα ηλεκτρόνια κρυσταλλικών υλικών (ανιχνευτές στερεάς κατάστασης). Τα φορτισμένα σωματίδια είναι άμεσοι ιοντιστές της ύλης, ενώ τα νετρόνια και τα φωτόνια προκαλούν ιοντισμό έμμεσα. Η διαδικασία ανίχνευσης των φωτονίων μπορεί να παρασταθεί από σχήμα:

$$\gamma \rightarrow \text{αλληλεπίδραση με ύλη} \rightarrow \text{ηλεκτρόνια} \rightarrow \text{ιοντισμός} \rightarrow \text{ανίχνευση} \quad (3.1)$$

Ο ιοντισμός του υλικού του ανιχνευτή συνεπάγεται την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων, η συλλογή των οποίων, με εφαρμογή κατάλληλων ηλεκτρικών πεδίων συνιστά το βασικό σήμα ανίχνευσης του σωματιδίου που προκάλεσε, άμεσα ή έμμεσα, τον ιονισμό.

3.2.1 Ανιχνευτές Στερεάς Κατάστασης - Ανιχνευτές Ημιαγωγών

Αγωγοί - Ημιαγωγοί - Μονωτές Τα κρυσταλλικά στερεά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: αγωγοί, ημιαγωγοί και μονωτές, ανάλογα με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Αυτές, καθορίζονται από τη δυναμική των ηλεκτρονίων σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.



Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η υψηλότερη κατειλημμένη ενεργειακή ζώνη, η ζώνη σθένους (valence band), χωρίζεται από τη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band), με την απαγορευμένη ζώνη ή το ενεργειακό χάσμα (band gap). Έτσι, τα δέσμια ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους για να μεταβούν στην ζώνη αγωγιμότητας και να συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου, πρέπει να αποκτήσουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα ΔE .

Στους αγωγούς η ζώνη σθένους είναι μερικά συμπληρωμένη από ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούν να κινούνται ελεύθερα εφόσον εφαρμόζεται κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Στους μονωτές η ζώνη σθένους είναι πλήρης από ηλεκτρόνια. Τέλος, στους ημιαγωγούς η ζώνη σθένους είναι επίσης τελείως πλήρης από ηλεκτρόνια, με τη διαφορά ότι το εύρος του ενεργειακού χάσματος είναι μικρότερο για τους ημιαγωγούς. Αυτό σημαίνει ότι στους ημιαγωγούς χρειάζεται να προσφερθεί λιγότερη ενέργεια για να μεταβεί ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Το ενεργειακό χάσμα σε έναν ημιαγωγό είναι της τάξης του $2 - 3 \text{ eV}$, ενώ σε ένα μονωτή είναι περίπου $4 - 5 \text{ eV}$.

Οι ημιαγωγοί είναι κρυσταλλικά σώματα, τα οποία στη θερμοκρασία των 0°C , εμφανίζουν μηδενική αγωγιμότητα. Σε περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας ή επίδρασης ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου ή και φωτισμού του κρυστάλλου, συμβαίνει το αντίθετο, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν αγωγός. Με την πρόσληψη ενέργειας, τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας και συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Οι ημιαγωγοί, οι οποίοι στην κρυσταλλική τους δομή δεν εμφανίζουν προσμίξεις ξένων ατόμων, ονομάζονται καθαροί ή ενδογενείς ημιαγωγοί.

Μία άλλη κατηγορία ημιαγωγών είναι οι εξωγενείς ημιαγωγοί, οι οποίοι στη δομή του πλέγματός τους εμφανίζουν προσμίξεις από άλλα άτομα. Ένα από τα πιο γνωστά υλικά για την κατασκευή εξωγενών ημιαγωγών είναι το γερμάνιο (Ge). Το γερμάνιο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα τέσσερα ηλεκτρόνια. Με την προσθήκη ατόμων άλλων στοιχείων, που

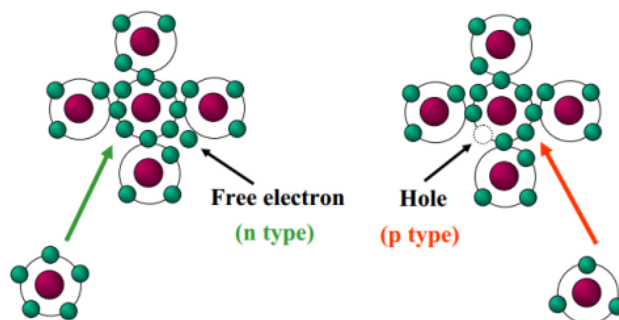
έχουν είτε λιγότερα, είτε περισσότερα από τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου p ή τύπου n.

Ημιαγωγός τύπου p

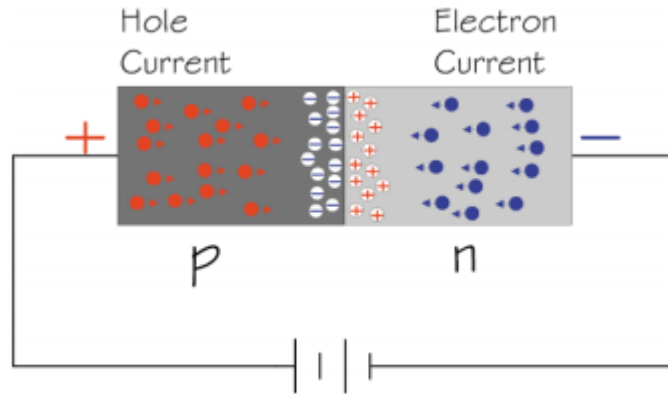
Όταν ο ημιαγωγός (πχ Ge) αναμειχτεί με στοιχείο πρόσμιξης που έχει λιγότερα ηλεκτρόνια σθένους όπως το βόριο (B) που έχει τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, τότε ένα από τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού δεν σχηματίζει ομοιοπολικό δεσμό με αποτέλεσμα την διέγερση από την ζώνη σθένους του ημιαγωγού. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ευκίνητες οπές.

Ημιαγωγός τύπου n

Αν ο ημιαγωγός πχ Ge, αναμειχτεί με στοιχείο που έχει περισσότερα ηλεκτρόνια σθένους όπως ο Φώσφορος (P, πέντε ηλεκτρόνια σθένους), τότε περισσεύει ηλεκτρόνιο από το στοιχείο πρόσμιξης. Το πλεονάζον ηλεκτρόνιο δεν συμμετέχει στον δεσμό και μεταβαίνει στην ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι τα άτομα της πρόσμιξης γίνονται δέκτες ηλεκτρονίων.



Όταν ένας ημιαγωγός τύπου n και ένας ημιαγωγός τύπου p έρχονται σε τέλεια επαφή, δημιουργούν τη διόδο p-n (p-n junction), η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Στην επαφή τύπου p-n γίνεται διάχυση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από τον κρύσταλλο p στον κρύσταλλο n, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θετικού φορτίου χώρου στην περιοχή-n δεξιά της επιφάνειας της ζεύξης, και αρνητικού φορτίου χώρου στην πλευρά-p αριστερά της επιφάνειας (περιοχή απεμπλουτισμού (depletion region)).

Όταν ένα ιοντίζον σωματίδιο αλληλεπιδρά με το υλικό της απεμπλουτισμένης περιοχής, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών, τα οποία θα ωθηθούν από έξω από την απεμπλουτισμένη περιοχή, με αποτέλεσμα η κίνησή τους να συνιστά ηλεκτρικό σήμα.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να επιτευχθούν μόνο σε κρυστάλλους γερμανίου, όπου πραγματοποιούνται προσμίξεις της τάξης του 10^{10} άτομα/cm³.

Ανιχνευτές κατασκευασμένοι από τέτοιο υπερκαθαρό γερμάνιο ονομάζονται ενδογενείς (intrinsic) ανιχνευτές γερμανίου ή ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium, HPGe). Οι HPGe είναι οι μοναδικοί που χρησιμοποιούνται για φασματομετρία υψηλής διακριτικής ικανότητας ακτινοβολιών με μεγάλη εμβέλεια, όπως η ακτινοβολία γ .

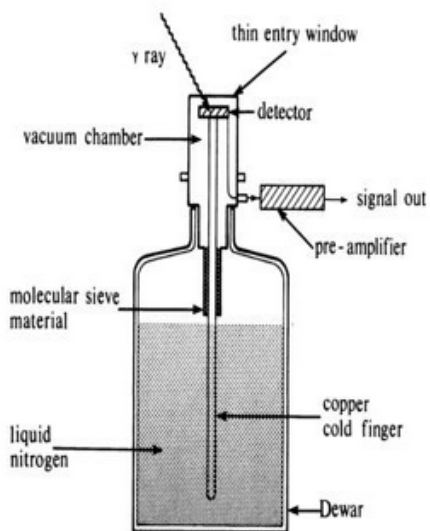
Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των ανιχνευτών υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) που συνέβαλε αποφασιστικά στην επικράτησή τους στην γ -φασματομετρία υψηλής διακριτικής ικανότητας αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να αφεθούν μεταξύ των χρήσεων να θερμανθούν μέχρι θερμοκρασία δωματίου χωρίς να υποστούν βλάβες.

Η λειτουργία ενός ανιχνευτή γερμανίου βασίζεται στην περιοχή απογύμνωσης του κρυστάλλου του ανιχνευτή. Στα άκρα του κρυστάλλου εφαρμόζεται υψηλή τάση προκειμένου να συρρικνωθούν οι περιοχές p και n και να διευρυνθεί η περιοχή απογύμνωσης. Έτσι, ο ενεργός όγκος του κρυστάλλου, δηλαδή ο όγκος στον οποίο αν εισέλθει ένα φωτόνιο, θα ανιχνευθεί, μεγαλώνει.

Με τις τρεις διαδικασίες που περιγράφηκαν παραπάνω, στο εσωτερικό του κρυστάλλου δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών, τα οποία

συλλέγονται από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στις επαφές p-n και συνιστούν το αρχικό σήμα του ανιχνευτή.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, ο κρύσταλλος είναι απαραίτητο να διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία. Διαφορετικά, δημιουργείται ποσότητα ηλεκτρονίων - οπών στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο θόρυβος (λόγω των ελεύθερων φορέων). Έτσι, ο ανιχνευτής Ge διατηρείται μέσα σε δοχείο Dewar το οποίο περιέχει υγρό άζωτο ($77^{\circ}K$).



3.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανιχνευτών

Απόδοση Ανίχνευσης

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των ανιχνευτών είναι η απόδοση της ανίχνευσης. Όταν ένα σωματίδιο εισέρχεται στον ανιχνευτή, τότε υπάρχει πιθανότητα το σωματίδιο να εισέλθει στον ανιχνευτή και να εξέλθει από αυτόν χωρίς να αλληλεπιδράσει με το υλικό του ανιχνευτή.

Ορίζεται ως ενδογενής (intrinsic) ή εσωτερική (internal) απόδοση το μέγεθος:

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{αριθμός παλμών που μετρήθηκαν}}{\text{αριθμός σωματιδίων που προσπίπτουν στον ανιχνευτή}}$$

Η ϵ_{int} εξαρτάται από το υλικό και τις διαστάσεις του ανιχνευτή καθώς και από το είδος και την ενέργεια του σωματιδίου.

Στη διαδικασία όμως της ανίχνευσης δεν προσπίπτουν στον ανιχνευτή όλα τα σωματίδια που εκπέμπονται από την πηγή. Ορίζεται λοιπόν ένα νέο μέγεθος, η απόλυτη απόδοση της μέτρησης ως:

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{αριθμός παλμών που μετρήθηκαν}}{\text{αριθμός σωματιδίων που εκπέμπονται από τον ανιχνευτή}}$$

Η ϵ_{abs} εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή αλλά και από τη γεωμετρία της διάταξης της μέτρησης, διότι στις περισσότερες διατάξεις μέτρησης ένα ποσοστό μόνο των εκπεμπόμενων από την πηγή σωματιδίων προσπίπτει στον ανιχνευτή.

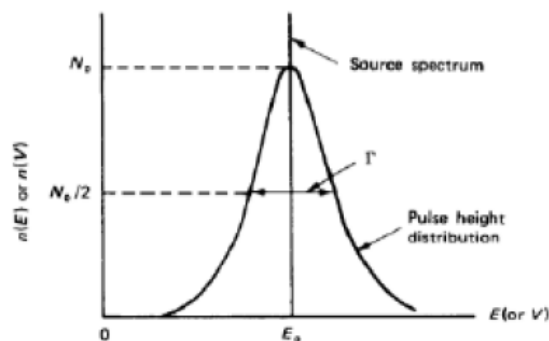
Ανενεργός χρόνος (dead time)

Έστω ότι ένα σωματίδιο εισέρχεται στον ανιχνευτή και αλληλεπιδρά με το υλικό του. Προκειμένου να καταγραφεί το επόμενο σωματίδιο που εισέρχεται στον ανιχνευτή και να αλληλεπιδράσει με το υλικό του, θα πρέπει τα δύο γεγονότα να απέχουν χρονικά τουλάχιστον κατά κάποιον ελάχιστο χρόνο. Διαφορετικά θα υπάρχει επικάλυψη των δύο παλμών με αποτέλεσμα οι παλμοί να μην είναι διακριτοί ως δύο διαφορετικοί και να καταγράφεται ένας αντί δύο παλμών. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως pile-up. Ο ελάχιστος αυτός χρόνος ονομάζεται νεκρός χρόνος και

εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και από την ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος ανίχνευσης. Ο ανενεργός χρόνος μετράται πειραματικά. Σε περιπτώσεις μεγάλου ρυθμού παλμών το σφάλμα από τις απώλειες καταγραφής παλμών μπορεί να είναι σημαντικό και πρέπει να γίνεται σχετική διόρθωση της μέτρησης.

Ενεργειακή διακριτική ικανότητα (resolution)

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution) είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη για ανιχνευτές σχεδιασμένους να μετράνε την ενέργεια της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Στην γενική περίπτωση η διακριτική ικανότητα μπορεί να μετρηθεί στέλνοντας μια μονοενεργειακή δέσμη ακτινοβολίας μέσα στον ανιχνευτή και παρατηρώντας το φάσμα. Ιδανικά κάποιος θα περίμενε να δει μια δέλτα συνάρτηση αλλά στην πραγματικότητα φαίνεται μια κατανομή με πεπερασμένο πλάτος τύπου Gauss. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα δίνεται σε όρους πλάτους καμπύλης στο μισό του μέγιστου ύψους (FWHM - Full Width at Half Maximum). Οι ενέργειες που απέχουν λιγότερο από αυτό το διάστημα θεωρούνται μη διαχωρίσιμες. Το πλάτος μετρούμενο στο μισό του ύψους στο μέγιστο σημείο της κατανομής της ενέργειας συμβολίζεται με Γ . Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα δίνεται σε σχέση με το Γ ή σε σχέση με το λόγο $R(E_0)$ σε ποσοστό. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα δίνεται από την σχέση $R(E_0) = \Gamma/E_0$.

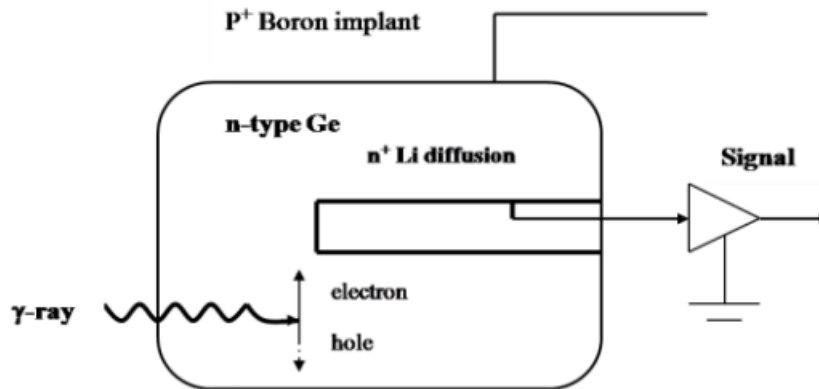


Συνάρτηση απόκρισης

Η συνάρτηση απόκρισης είναι το φάσμα των παλμών που παρατηρούνται από τον ανιχνευτή καθώς βομβαρδίζεται από μια μονοενεργειακή δέσμη καθορισμένης ενέργειας. Στην ιδανική περίπτωση το φάσμα των παλμών που μετρά ο ανιχνευτής συνδέεται άμεσα με το ενεργειακό φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η συνάρτηση απόκρισης ενός ανιχνευτή σε μια συγκεκριμένη ενέργεια προσδιορίζεται από τις διαφορετικές αλληλεπιδράσεις τις οποίες η ακτινοβολία μπορεί να υποστεί στον ανιχνευτή. Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν είναι ο σχεδιασμός και η γεωμετρία του ανιχνευτή.

3.2.3 Ηλεκτρονικά - Παραγωγή Σήματος

Όταν μια ακτίνα γ αλληλεπιδρά με την ενεργή περιοχή με τους τρεις τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton, δίδυμη γένεση) δημιουργείται ένα ηλεκτρόνιο το οποίο συλλέγεται στην n^+ επαφή και μια οπή που συλλέγεται στην p^- περιοχή και το ρεύμα που δημιουργείται καθώς τα ηλεκτρόνια και οι οπές μετακινούνται στους ηλεκτροδότες, δίνοντάς μας το ενεργειακό σήμα των ακτινών γ .



Για να επιτευχθεί η παραπάνω διεργασία και ο ανιχνευτής να παράγει σήμα ύψους ανάλογο της ενέργειας που αφήνει το σωματίδιο απαιτείται ένα σύστημα ηλεκτρονικών.

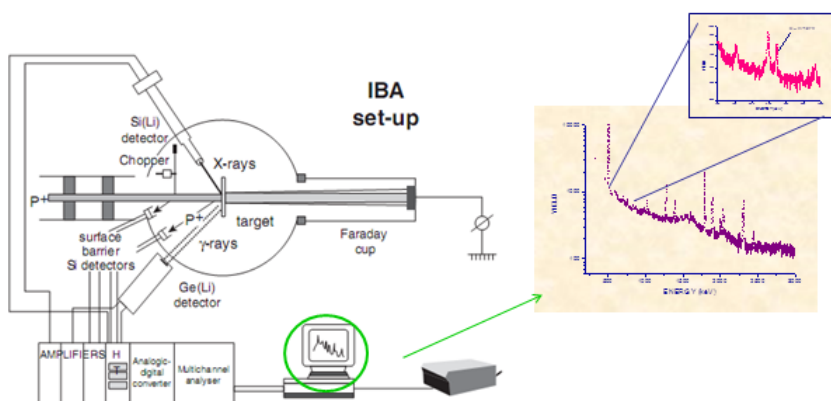
Κάθε ανιχνευτής συνδέεται με:

- ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης
- έναν ενισχυτή και
- ένα σύστημα ADC/MCA

Το σήμα αρχικά περνάει από έναν προενισχυτή, ο οποίος του δίνει μια μικρή ενίσχυση, με σκοπό την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Μέσω του προενισχυτή παρέχεται στον ανιχνευτή και η τάση λειτουργίας του από ένα τροφοδοτικό τάσης.

Στη συνέχεια το σήμα διαμορφώνεται μέσω ενός ενισχυτή, όπου και ενισχύεται κατά το επιθυμητό. Η διαμόρφωση περιλαμβάνει τη ρύθμιση (από τον χρήστη) παραμέτρων, όπως το shaping time και το pole zero. Το σήμα μετά τον ενισχυτή μετατρέπεται σε ψηφιακό, μέσω ενός μετατροπέα (Analog to Digital Converter – ADC) και καταχωρείται ανάλογα με το ύψος του σε ένα κανάλι, μέσω ενός πολυκαναλικού αναλυτή (Multi Channel Analyzer – MCA).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται όλα τα σημεία της πειραματικής διάταξης που περιγράφηκαν παραπάνω για τις τεχνικές IBA γενικότερα. Βλέπουμε όλα τα στάδια που χρειαζόμαστε για να συλλέξουμε το φάσμα μας και να μπορέσουμε να το επεξεργαστούμε για να μελετήσουμε την εκάστοτε αντίδραση.



3.2.4 Ο στόχος του πειράματος

Ο στόχος που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των διαφορικών ενεργών διατομών ήταν αλουμίνιο (Al) σε υπόστρωμα από βολφράμιο (W). Ο στόχος αυτός κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της εξαχνωσης στον εξαχνωτήρα του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος». Ο εξαχνωτήρας αποτελείται από έναν θάλαμο σε υψηλό κενό,

όπου ανάλογα το υλικό επιλέγεται είτε η τεχνική electron-gun είτε η απλή θέρμανση του υλικού για την εξαχνωσή του.

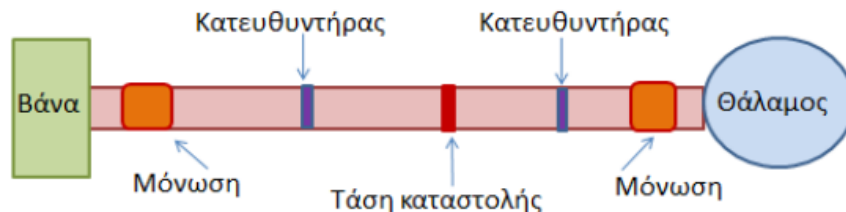
3.2.5 Διάταξη HPGe του πειράματος για τη μελέτη της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p, p\gamma)^{27}\text{Al}$

Όταν η δέσμη περάσει από τον μαγνήτη επιλογής καταλήγει την πειραματική γραμμή όπου και πραγματοποιείται το πείραμα.

Η δέσμη του επιταχυντή συγκρούεται με τον στόχο σε ένα θάλαμο από ανοξείδωτο ατσάλι. Ο θάλαμος αυτός βρίσκεται κατά την διάρκεια του πειράματος σε συνθήκες υψηλού κενού της τάξεως των 10^{-6} Torr με την βοήθεια κατάλληλων αντλιών κενού, μιας περιστροφικής λαδιού (rotary) και μιας στροβιλομοριακής turbo για το υψηλό κενό. Μέσα σε αυτόν τον θάλαμο τοποθετήθηκε ο στόχος αλουμινίου. Στο καπάκι του θαλάμου έχει ενσωματωθεί ένα σωληνάκι, όπου εφαρμόζοντας αέρα υπό πίεση, ψήχεται η βάση του στόχου, άρα και ο στόχος, γιατί υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί λόγω της θερμότητας της δέσμης.

Η διάταξη αυτή είναι κατάλληλα μονωμένη ώστε να λειτουργεί ως κλωβός Faraday. Συγκεκριμένα πριν τον θάλαμο και μετά την βάνα η διάταξη είναι μονωμένη έτσι ώστε να μπορεί να απομονώσει το τελευταίο τμήμα του επιταχυντικού σωλήνα από τον υπόλοιπο επιταχυντή και εκεί εφαρμόζεται τάση καταστολής (suppression) περίπου -300V. Με αυτό τον τρόπο όπως προαναφέρθηκε μπορούμε να μετρήσουμε το φορτίο που προσπίπτει στον στόχο με ακρίβεια.

Καθώς η δέσμη περνά στον επιταχυντικό σωλήνα ευθυγραμμίζεται από τους κατευθυντήρες (collimators) που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και είναι φτιαγμένοι από ταντάλιο.



Στο γωνιομετρικό τραπέζι τοποθετήθηκαν τέσσερις ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) οι τρεις με απόδοση 100% και ο τέταρτος με 75%, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα, στο οποίο φαίνεται η διάταξη.



Κατά την διαδικασία του πειράματος προέκυψε ένα πρόβλημα καθώς ανιχνευόταν αλουμίνιο το οποίο δεν προερχόταν από τον στόχο που ακτινοβολούσαμε. Η κορυφή του αλουμινίου εμφανιζόταν ακόμα και χωρίς

την παρουσία του στόχου. Έτσι λοιπόν θεωρήθηκε πως μέσα στον επιταχυντικό σωλήνα υπήρχε πρόσμιξη αλουμινίου και καθώς κάποια από τα πρωτόνια της δέσμης συγκρούσαν με κάποιο υλικό του σωλήνα εμφανιζόταν κορυφή αλουμινίου στο φάσμα υποβάθρου (background). Το γεγονός αυτό επηρέαζε σε μεγάλο βαθμό τις μετρήσεις μας καθώς τα γεγονότα που προσθέτονταν κάθε φορά στην κορυφή δεν προερχόταν από τον στόχο μας σε συγκεκριμένη γωνία ανίχνευσης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος τοποθετήθηκε καλάμι ψαρέματος μέσα στην διάταξη το οποίο είναι από άνθρακα. Παρόλα αυτά η κορυφή του αλουμινίου συνέχιζε να υπάρχει και έτσι αποφασίστηκε η πειραματική διαδικασία να περιλαμβάνει δύο μέρη.

Αρχικά ακτινοβολούσαμε με δέσμη πρωτονίων το πίσω μέρος του στόχου μας δηλαδή το βολφράμιο έτσι ώστε οι εκπεμπόμενες ακτίνες γ που αντιστοιχούν στη αντίδραση του αλουμινίου να μην οφείλονται στο αλουμίνιο του στόχου και έτσι παίρναμε ένα φάσμα υποβάθρου. Έπειτα ακτινοβολούσαμε με πρωτόνια τον στόχο αλουμινίου και καταγράφαμε τα φάσματα των ακτίνων γ που προέρχονται τόσο από τον στόχο μας αλλά και από το αλουμίνιο που υπάρχει στον χώρο του πειράματος.

Στην ανάλυση που ακολούθησε αναλύθηκαν ξεχωριστά τα φάσματα για το «μπροστά» και τον «πίσω» στόχο και έπειτα αφαιρέθηκαν οι συναρτήσεις διέγερσης έτσι ώστε να είμαστε σίγουροι πως το αλουμίνιο της αντίδρασης προέρχεται αποκλειστικά από τον ζητούμενο στόχο. Το γεγονός ότι αφαιρέθηκαν οι συναρτήσεις διέγερσης των δυο φασμάτων επιφέρει μεγαλύτερα φάσματα στο προσδιορισμό της ενεργού διατομής. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα όπου στις μεγάλες ενέργειες πρέπει να αφαιρεθούν γεγονότα που έχουν τιμές πολύ κοντινές, με αποτέλεσμα το σφάλμα να μεγαλώνει.

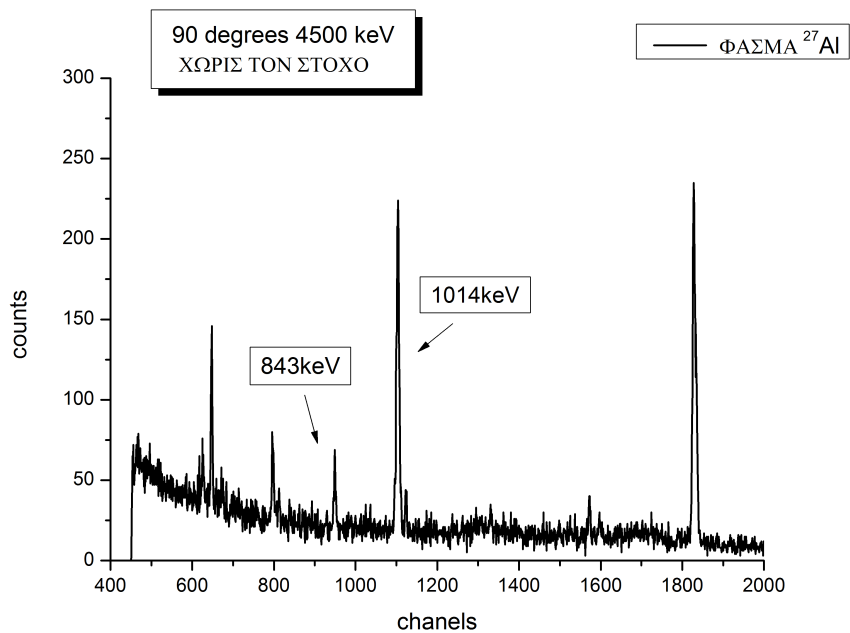
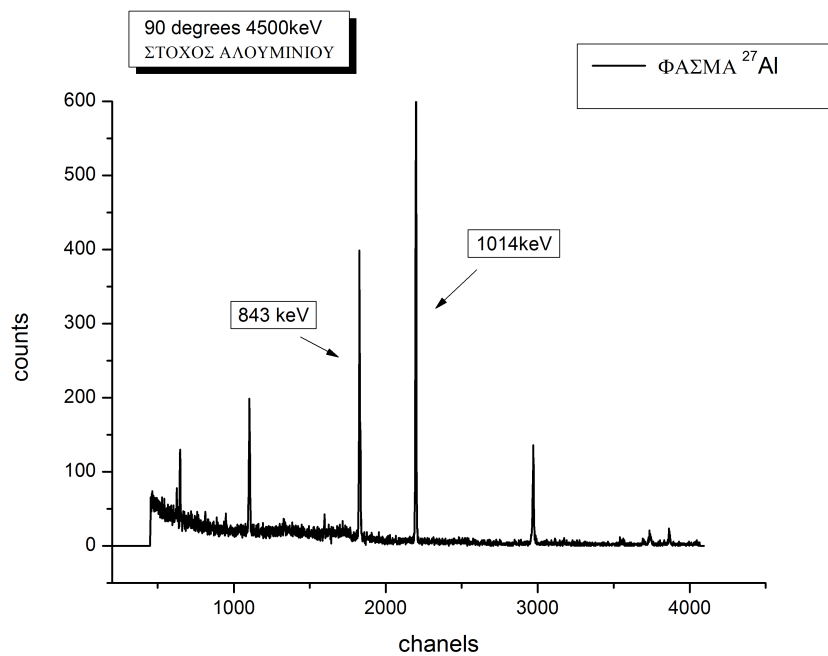
Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται μετά την εκτέλεση των πειραμάτων και τη συλλογή των δεδομένων. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των διαφορικών ενεργών διατομών που μας ενδιαφέρουν και αποτελείται από τέσσερα στάδια. Αρχικά πρέπει να αναλυθούν τα φάσματα που καταγράφονται με τη βοήθεια των ανιχνευτών και να προσδιοριστεί η απόλυτη απόδοση του κάθε ανιχνευτή. Έπειτα πρέπει να προσδιορίσουμε το πάχος του στόχου και τέλος χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ζητούμενες διαφορικές ενεργές διατομές.

4.1 Ανάλυση των φασμάτων

Η πληροφορία που καταγράφεται στον ανιχνευτή και είναι απαραίτητη για την επεξεργασία των δεδομένων έχει την μορφή φάσματος. Το πειραματικό φάσμα δείχνει τον αριθμό των φωτονίων (counts) που αντέδρασαν με το υλικό του ανιχνευτή σε σχέση με την ενεργεία τους η οποία αντιστοιχεί σε κανάλια (channels) μέσω της βαθμονόμησης. Στα παρακάτω γράφηματα φαίνονται τα φάσματα του αλουμινίου και οι κορυφές που αναγνωρίσαμε. Τα φάσματα σχεδιάστηκαν με την βοήθεια του προγράμματος Origin8 και αναφέρονται για ενέργεια δέσμης 4500 keV για γωνία ανίχνευσης 90° για τις δυο φάσεις του πειράματος δηλαδή με τον στόχο του αλουμινίου και χωρίς αυτόν.



4.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση

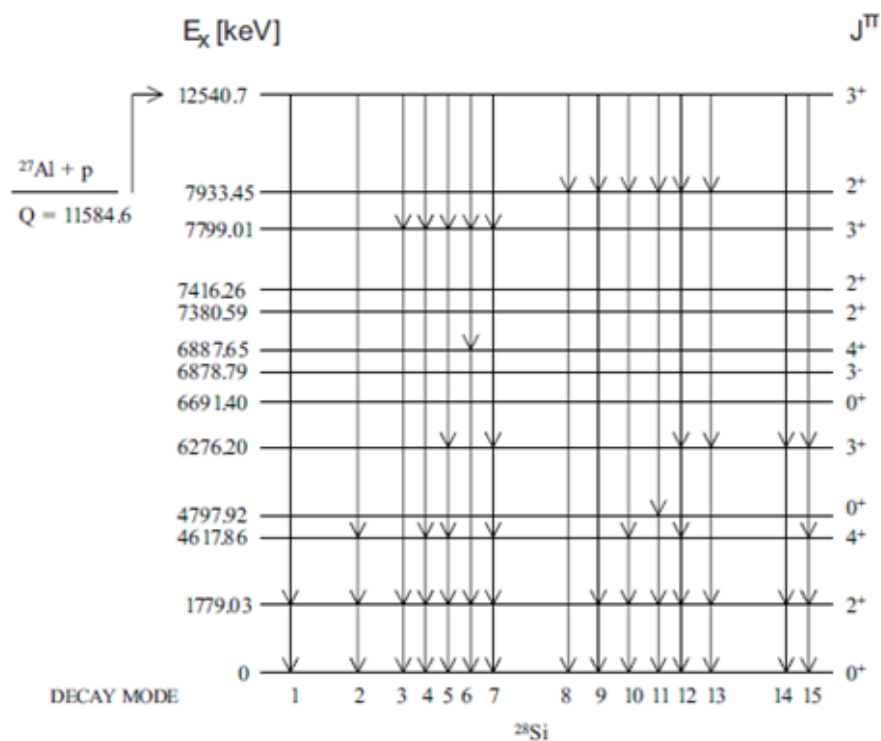
Για την ανάλυση ενός φάσματος απαραίτητη είναι η ενεργειακή βαθμονόμηση, δηλαδή η αντιστοιχία των καναλιών σε ενέργεια. Η θέση (κάνάλι) της κάθε κορυφής εξαρτάται από το αντίστοιχο σήμα. Επομένως ο κάθε ανιχνευτής σε κάθε γωνία θα πρέπει να βαθμονομείται ξεχωριστά αφού ο καθένας συνδέεται με διαφορετικά καλώδια και έχει διαφορετική ενίσχυση σήματος. Η βαθμονόμηση του κάθε ανιχνευτή για όλες τις γωνίες παραμένει η ίδια διότι κατά την διάρκεια του πειράματος δεν έγινε κάποια αλλαγή σε αυτά τα χαρακτηριστικά. Η σχέση που συνδέει τα κανάλια με την ενέργεια των σωματιδίων είναι γραμμική και όσο πιο απομακρυσμένα είναι τα σημεία που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση αυτή, τόσο πιο ακριβής θα είναι.

Για την βαθμονόμηση των φασμάτων χρησιμοποιήσαμε μια πηγή Ευρωπίου ^{152}Eu όπου αναγνωρίσαμε τις κορυφές γνωστής έντασης σε συγκεκριμένη ενέργεια.

4.3 Βαθμονόμηση του επιταχυντή

Τα πρωτόνια φτάνουν στον στόχο με ενέργεια που έχουν αποκτήσει από τον επιταχυντή ανάλογη της τάσης που τα έχει επιταχύνει. Η ενέργεια της δέσμης του επιταχυντή ρυθμίζεται από τον μαγνήτη επιλογής ενέργειας (analyser). Όμως λόγω του βρόχου υστέρησης, υπάρχει μια παραμένουσα μαγνήτιση. Για να προσδιορίσουμε την ακριβή τιμή της ενέργειας των πρωτονίων που πέφτουν στον στόχο εκμεταλλευόμαστε τον λεπτό συντονισμό που παρουσιάζει η αντίδραση $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ για $E_{p,lab} = 991.89 \text{ keV}$.

Για αυτόν τον συντονισμό ο διεγερμένος πυρήνας ^{28}Si μπορεί να αποδιεγερθεί με δεκαπέντε διαφορετικούς τρόπους στην θεμελιώδη κατάσταση. Ο καθένας από αυτούς έχει διαφορετική πιθανότητα εκπομπής φωτονίων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα και στον πίνακα που ακολουθεί.

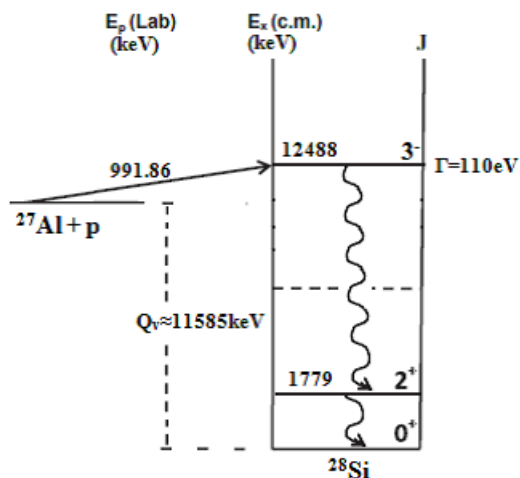


Τρόπος Μετάπτωσης	Ποσοστό εκπομπής %
1	76.4
2	4.09
3	5.601
4	0.1122
5	2.439
6	0.0119
7	0.3272
8	3.295
9	0.2178
10	0.1861
11	0.1584
12	0.0111
13	0.084
14	1.8963
15	0.2537

Παρατηρούμε πως ο πρώτος τρόπος αποδιέγερσης έχει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής (76,4 %) σε σχέση με τους άλλους τρόπους. Επομένως η διαδρομή που είναι πιθανότερη για την αποδιέγερση στην θεμελιώδη στάθμη είναι αυτή που ξεκινά από την στάθμη ενέργειας 1254,7

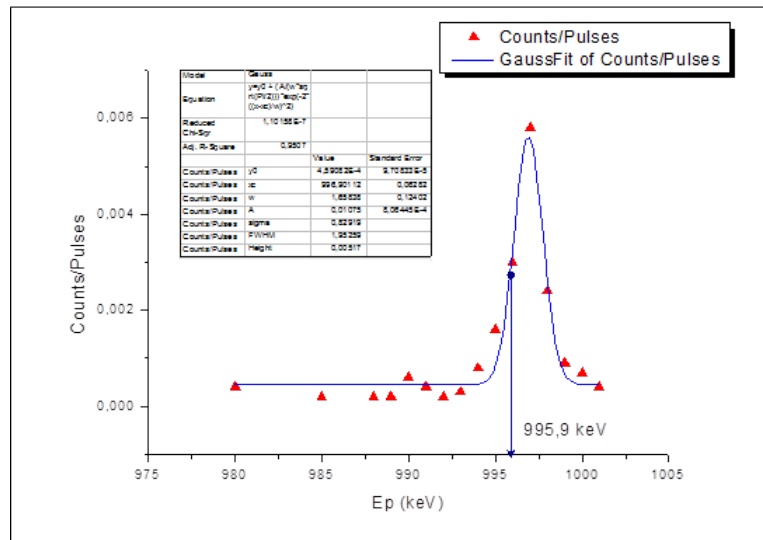
keV καταλήγει στην πρώτη διεγερμένη στάθμη και έπειτα αποδιεγείρεται στην θεμελιώδη εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενεργειας 1779 keV.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον στόχο αλουμινίου του πειράματος (λεπτός στόχος) και με δέσμες πρωτονίων εύρους 980 έως 1001 μελετήσαμε την παραπάνω αντίδραση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ενεργειακό διάγραμμα $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ για τον τρόπο αποδιέγερσης που περιγράφηκε παραπάνω. Η ακτίνα γ που εκπέμπεται και ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή μας (HPGe) έχει ενέργεια 1779 keV και προκύπτει από την αποδιέγερση του πυρήνα ^{28}Si από την πρώτη διεγερμένη στάθμη στην θεμελιώδη κατάσταση.



Η διαδικασία προσδιορισμού της πραγματικής ενέργειας της δέσμης αναφέρεται για προφανείς λόγους και ως βαθμονόμηση της μηχανής (machine calibration).

Ο αριθμός των ακτίνων- γ (counts) που κατέγραψε ο ανιχνευτής φαίνεται για κάθε μέτρηση, κάθε ενέργεια E_p (ονομαστική). Το μέσο της ανόδου της καμπύλης αντιστοιχεί στην ενέργεια συντονισμού και παρατηρείται για ονομαστική ενέργεια των πρωτονίων στα 995,9 keV δηλαδή υπάρχει μια μετατόπιση της ενέργειας του ανιχνευτή κατά 4,1 keV.



4.4 Απόδοση ανιχνευτών HPGe

Όπως είδαμε και παραπάνω για να προσδιορίσουμε την ενεργό διατομή για κάθε γωνία θ και ενέργεια απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της απόλυτης απόδοσης των ανιχνευτών. Η απόλυτη απόδοση δίνεται από την σχέση:

$$\epsilon_{abs} = \frac{N_{\gamma\epsilon\gamma}/\Delta t}{RI_{\gamma}} \quad (4.1)$$

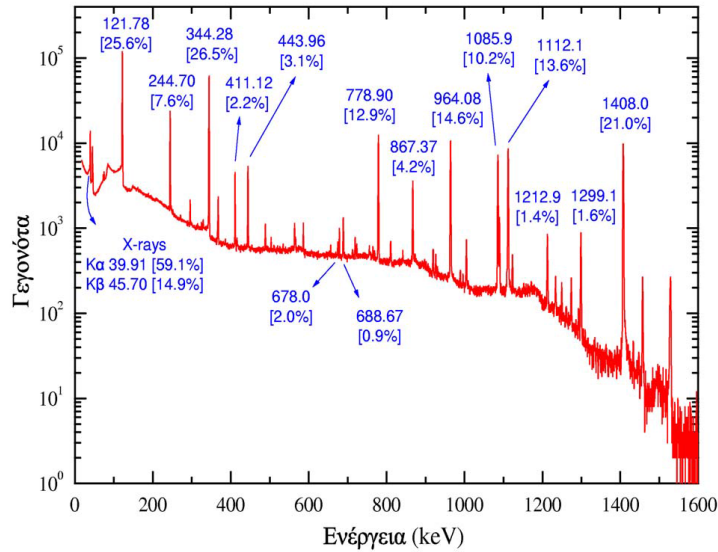
όπου $N_{\gamma\epsilon\gamma}$ είναι ο αριθμός των γεγονότων που έχουν καταγραφεί από τον ανιχνευτή, Δt ο χρόνος που διήρκεσε η μέτρηση, R είναι η ενεργότητα της πηγής και I_{γ} οι εντάσεις των ακτίνων γ που καταγράφονται.

Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας του Ευρωπίου, πρώτον χρειαζόμαστε την αρχική ενεργότητα και δεύτερον τον χρόνο ημιζωής του Ευρωπίου. Η πηγή Ευρωπίου που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε 01/01/2011 και είχε αρχική ενεργότητα $R_{0\text{ }^{152}\text{Eu}} = (217 \pm 3) \text{ kBq}$

Επίσης γνωρίζουμε πως ο χρόνος ημιζωής του είναι $\tau_{1/2} = 13,537$ χρόνια. Από τη γνωστή σχέση για την ενεργότητα $R = R_0 e^{-\lambda t}$ και με $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$ υπολογίζουμε πως η ενεργότητα την ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος είναι ίση με $R = (193,4 \pm 2,7) \text{ kBq}$.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το φάσμα Ευρωπίου καθώς επίσης και χαρακτηριστικές ενέργειες των ακτίνων γ με τις αντίστοιχες εντάσεις

τους.

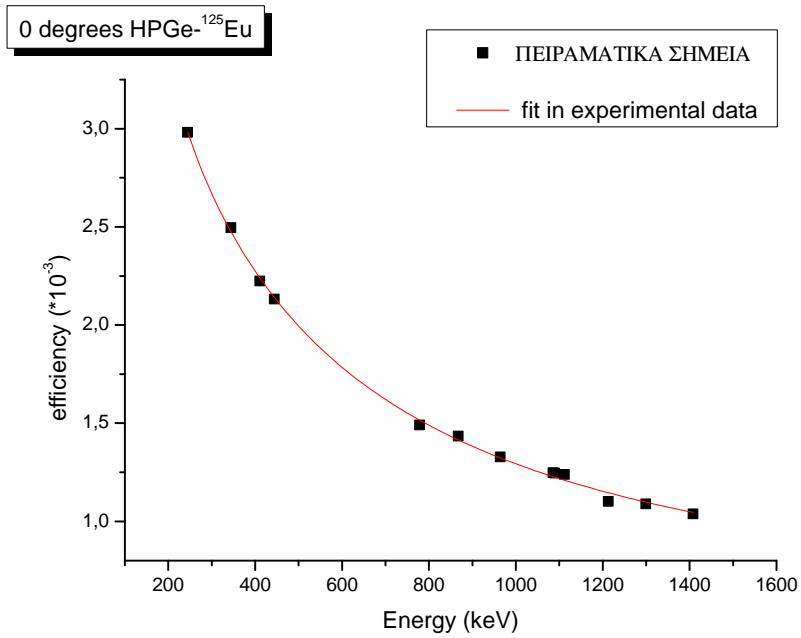


Γνωρίζοντας λοιπόν τον χρόνο που διήρκεσε η μέτρηση, τον αριθμό των γεγονότων, την ενεργότητα και τις εντάσεις των ακτίνων γ μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόδοση για την κάθε χαρακτηριστική ακτινοβολία γ .

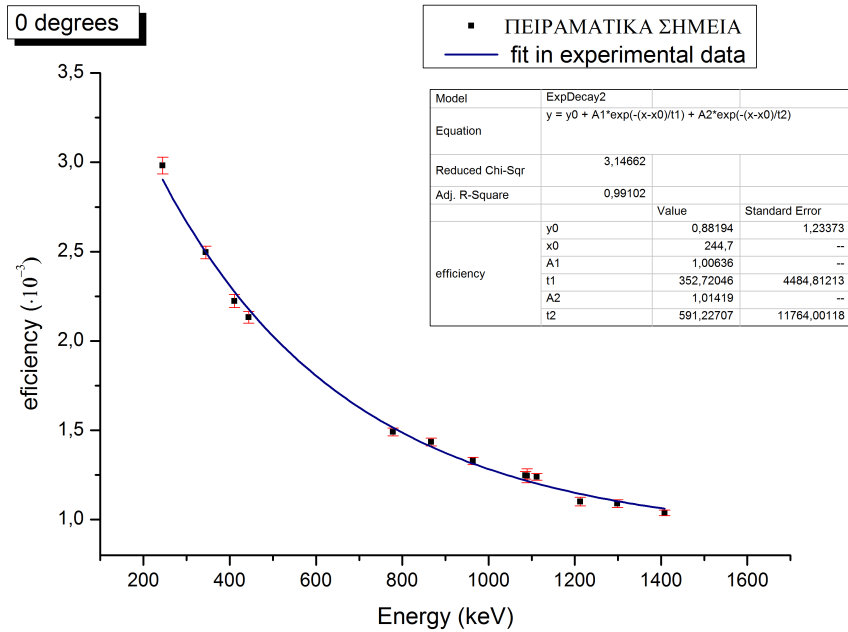
Από τη σχέση διάδοσης σφαλμάτων, το σφάλμα της απόλυτης απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_{abs} = \epsilon_{abs} \sqrt{\left[\frac{\delta N_{\gamma\epsilon\gamma}}{N_{\gamma\epsilon\gamma}} \right]^2 + \left[\frac{\delta I_{\gamma}}{I_{\gamma}} \right]^2 + \left[\frac{\delta R_0}{R_0} \right]^2} \quad (4.2)$$

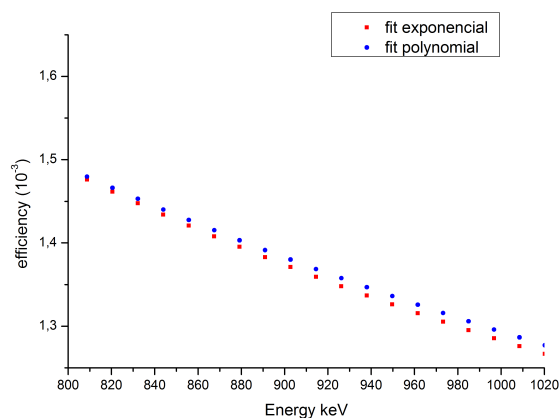
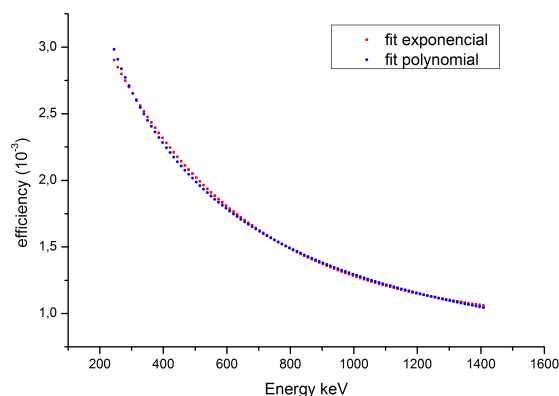
Με βάση τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει το γράφημα της απόλυτης απόδοσης (ϵ_{abs}) συναρτήσεως της ενέργειας όπου έχει γίνει προσαρμογή των πειραματικών σημείων με την συνάρτηση $y = A + B/x + C/x^2 + D/x^3$.



Επιπλέον έγινε προσαρμογή των πειραματικών σημείων και με μια εκθετική συνάρτηση της μορφής $y = y_0 + A_1 e^{(x-x_0)t_1} + A_2 e^{(x-x_2)t_2}$ η οποία φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.

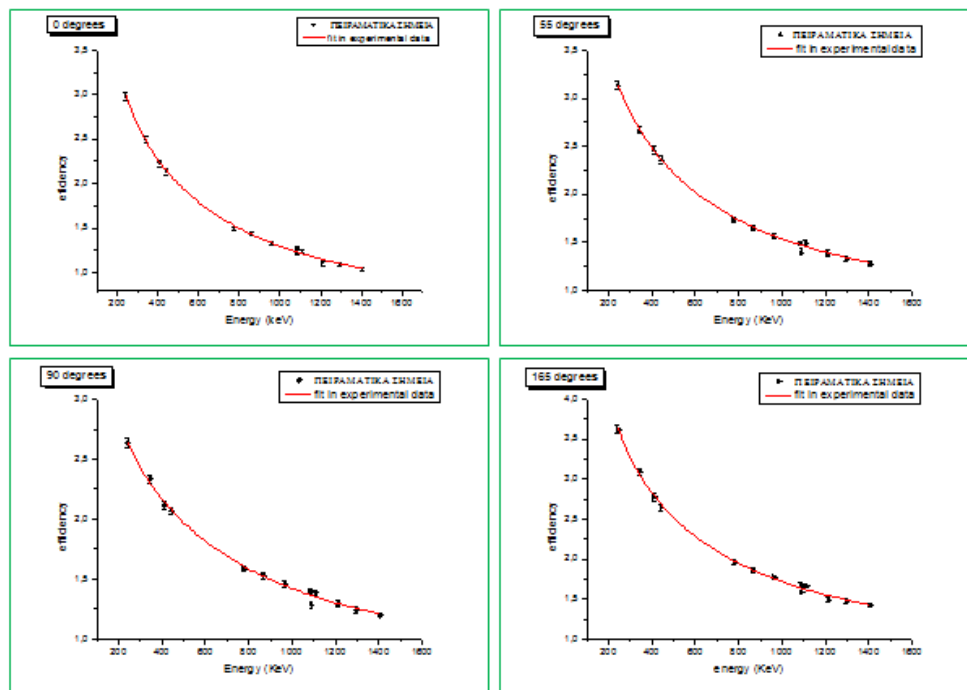


Έπειτα έγινε σύγκριση των δύο καμπυλών έτσι ώστε να δούμε που κυμαίνονται οι τιμές της απόδοσης και να εκτιμήσουμε το σφάλμα. Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται οι δυο καμπύλες για όλο το εύρος ενεργειών και για εύρος ενεργειών από 800 – 1020 keV όπου βρίσκονται οι δυο ενέργειες των ακτίνων γ που μας ενδιαφέρουν.



Οι δύο καμπύλες απέχουν μεταξύ τους περίπου 0.02 μονάδες για ενέργειες 843 keV και 1014 keV, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Παρακάτω βλέπουμε τα γραφήματα της απόλυτης απόδοσης και για τις τέσσερις γωνίες ανίχνευσης (0° , 55° , 90° , 165°) για την πολυωνυμική προσαρμογή.



Από τις καμπύλες της πολυωνυμικής προσαρμογής που φαίνονται στα παρακάτω γραφήματα μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόλυτη απόδοση των ανιχνευτών μας για τις ζητούμενες ενέργειες 843 keV και 1014 keV. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα αποτελέσματα μας.

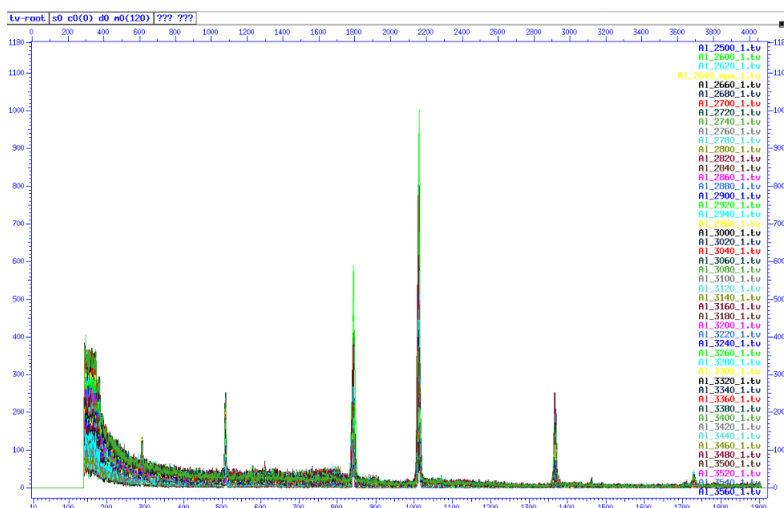
	$\epsilon_{abs} \cdot 10^{-3}$			
	0 degrees	55 degrees	90 degrees	165 degrees
843keV	1,45±0,02	1,68 ± 0,02	1,54 ± 0,02	1,89±0,02
1014keV	1,28 ± 0,02	1,52 ±0,02	1,41 ± 0,02	1,70±0,02

4.5 Εμβαδομέτρηση των κορυφών

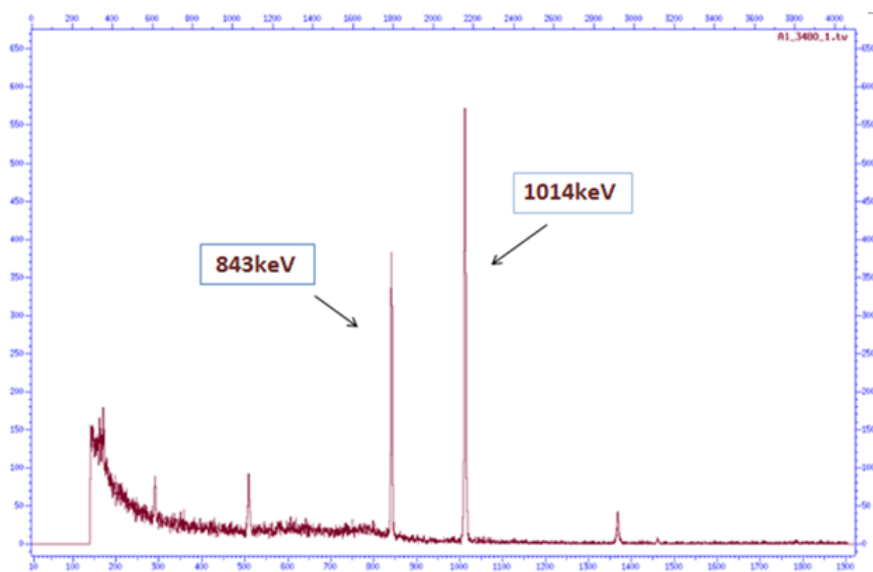
Τα φάσματα τα οποία συλλέχτηκαν είχαν εύκολα αναγνωρίσιμες κορυφές χωρίς αλληλοεπικαλύψεις ή μεγάλο υπόβαθρο (background) δηλαδή οι κορυφές που αντιστοιχούν στις δυο χαρακτηριστικές ακτίνες γ μπορούσαν να αναγνωριστούν και στις δύο φάσεις του πειράματος. Για να υπολογιστεί ο αριθμός των γεγονότων (Y) που προσέπεσαν στον ανιχνευτή απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός του εμβαδού κάτω από την μελέτη κορυφή. Αυτός έγινε με την βοήθεια του προγράμματος TV. Το

πρόγραμμα [TV] δίνει δύο επιλογές στον χρήστη. Πρώτη είναι η ολοκλήρωση των κορυφών (integrate) και η δεύτερη είναι η προσαρμογή (fitting) της κορυφής με μια καμπύλη Gauss. Συγκεκριμένα σε αυτή την ανάλυση έγινε ολοκλήρωση των κορυφών και αποθηκεύτηκαν οι τιμές του αριθμού των γεγονότων καθώς και το στατιστικό σφάλμα που υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται τα φάσματα για πολλές ενέργειες για τον ανιχνευτή HPGe που βρίσκεται στις 0°.

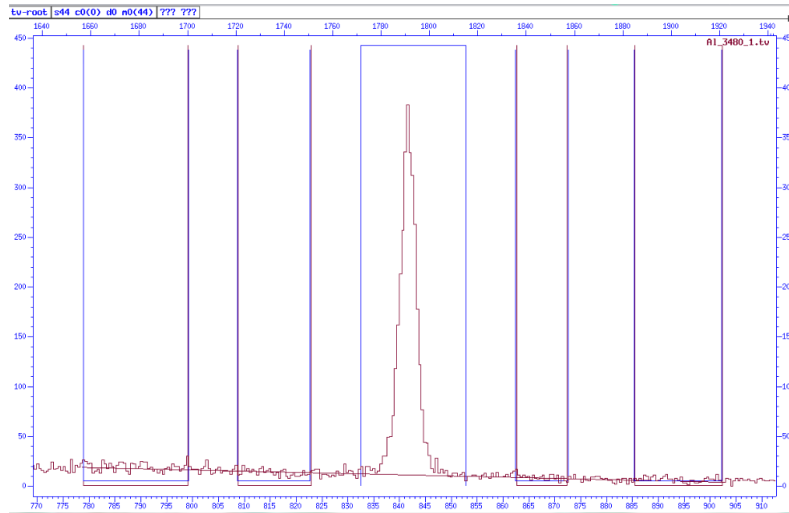


Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται το φάσμα των ακτίνων γ που προήλθαν όταν ο στόχος αλουμινίου ακτινοβολήθηκε με πρωτόνια ενέργειας 3480 keV για τον ανιχνευτή στις 0°.



Φαίνονται με αρκετά καλή ακρίβεια (resolution) οι δυο προς ανάλυση κορυφές η 843 keV και η 1014 keV .

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται με λεπτομέρεια η ανάλυση της κορυφής 843 keV .



Αφού πρώτα επιλέξαμε αρκετά σημεία μακριά από την κορυφή έτσι ώστε να αφαιρέσουμε από την κορυφή το υπόβαθρο(background), κάναμε ολοκλήρωση της κορυφής για να προσδιορίσουμε τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφηκαν στον ανιχνευτή μας.

4.6 Προσδιορισμός του φορτίου

Όπως είδαμε παραπάνω για να προσδιορίσουμε την ενεργό διατομή μιας αντίδρασης απαραίτητος είναι ο αριθμός των πρωτονίων που προσπίπτουν στον στόχο. Αυτός μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα γνωρίζοντας το φορτίο Q που μετράται στον κλωβό Faraday και με γνωστό το φορτίο του ηλεκτρονίου ($q_p = q_e \simeq 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$) έχουμε για τον αριθμό των πρωτονίων:

$$N_p = \frac{Q}{q_p} \quad (4.3)$$

Το φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση:

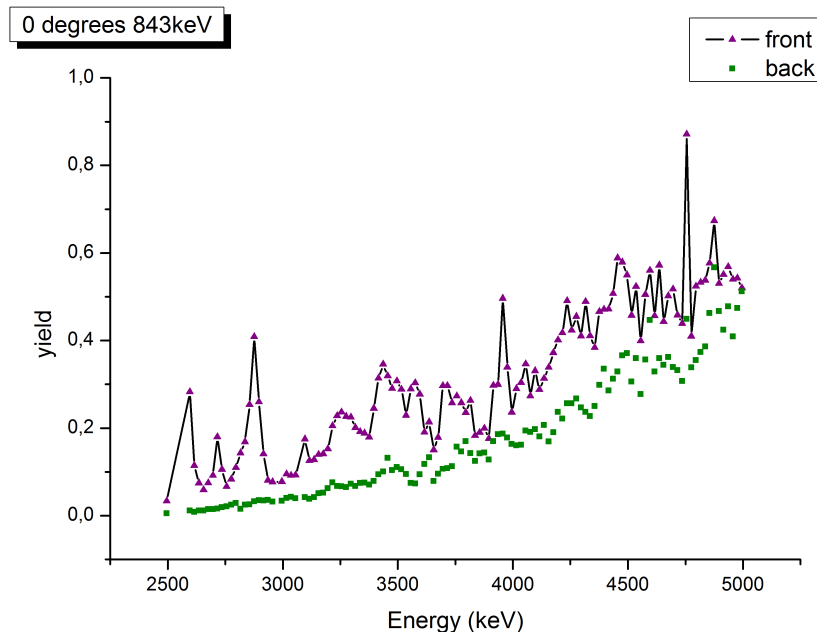
$$Q = \frac{F.S.A \text{ (Pulses)}}{100} \quad (4.4)$$

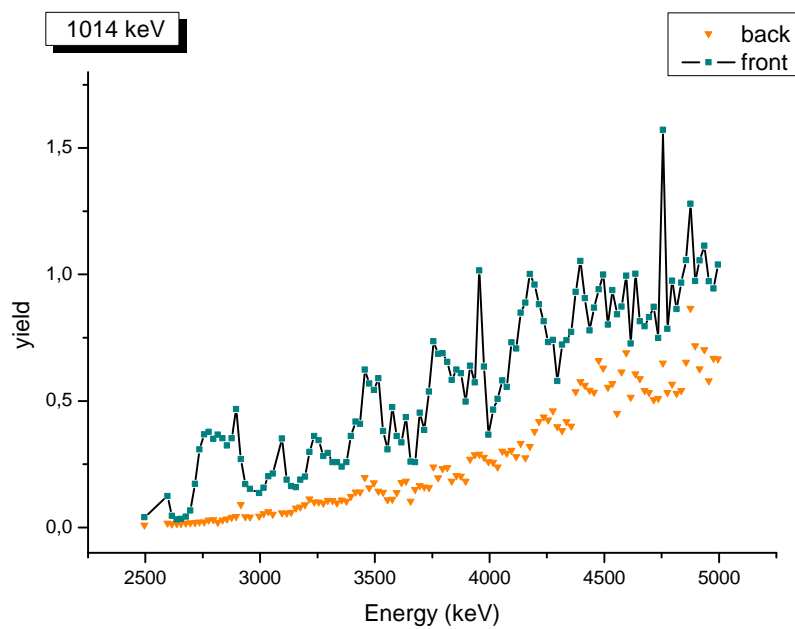
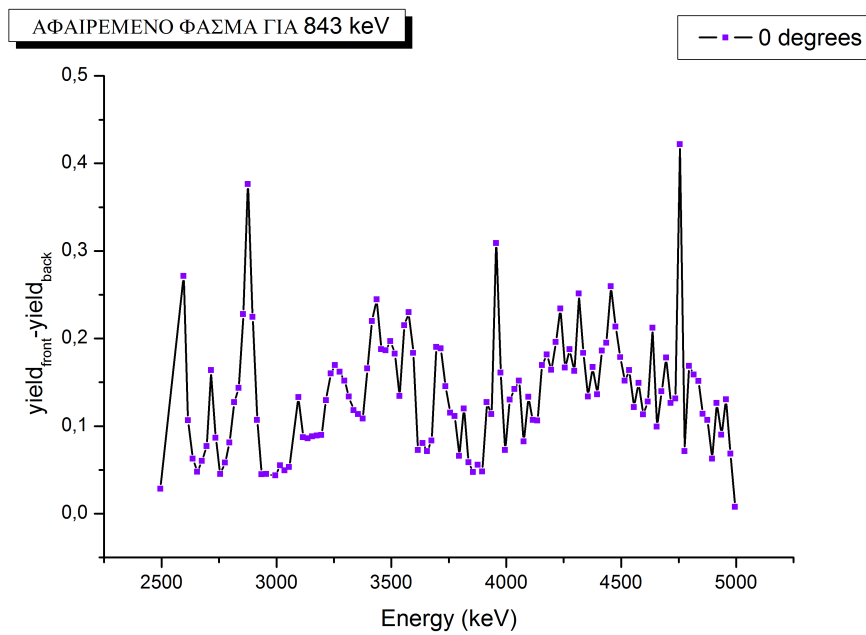
Όπου F.S.A (Full Scale Amps) είναι το φορτίο που αντιστοιχεί σε 100 παλμούς και σε όλη την διάρκεια του πειράματος ήταν 200 nC και Pulses είναι οι παλμοί που καταγράφονται σε κάθε μέτρηση.

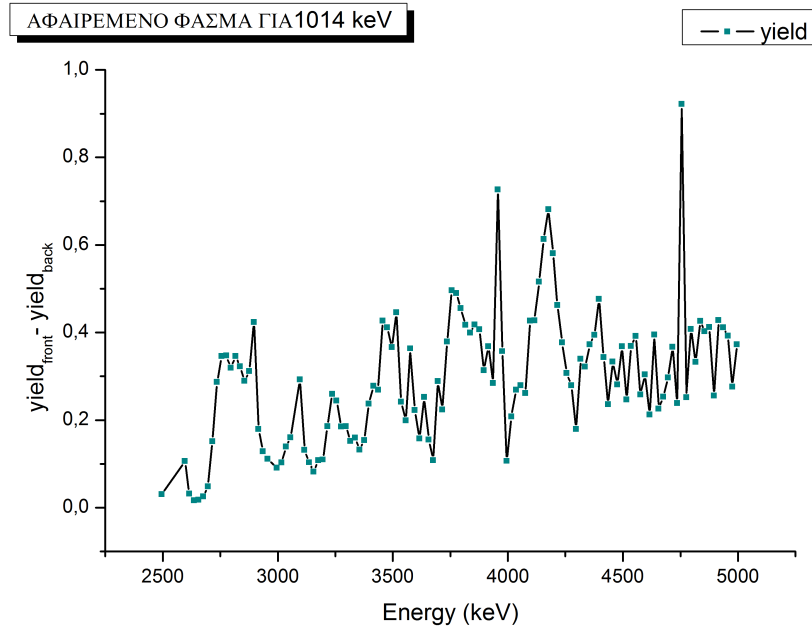
Έτσι, για κάθε ενέργεια ανάλογα τα Pulses μπορούμε να προσδιορίσουμε το φορτίο και κατ'έπекταση των ζητούμενο αριθμό πρωτονίων. Το σφάλμα στο κλωβό Faraday έχει υπολογιστεί περίπου στο 3,5% από προηγούμενες μετρήσεις.

4.6.1 Αφαίρεση της απόδοσης των δύο φασμάτων

Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται τα γεγονότα (Counts) κανονικοποιημένα με τους παλμούς (Pulses) για το στόχο αλουμινίου και χωρίς αυτόν για τις δύο ενέργειες 843 keV και 1014 keV για γωνία ανίχνευσης 0°. Αυτά τα δύο γραφήματα στην συνέχεια αφαιρέθηκαν για να προσδιορίσουμε την ενεργό διατομή που προέρχεται αποκλειστικά από τον στόχο.







Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν οι τιμές που πρέπει να αφαιρεθούν είναι πολύ κοντά τότε η αφαίρεση τους επιφέρει μεγάλα σφάλματα. Επίσης οι γραμμές που φαίνονται στα διαγράμματα προκύπτουν από την ένωση των πειραματικών σημείων για καλύτερη ευκρίνεια.

4.7 Συνάρτηση διέγερσης

Η συνάρτηση διέγερσης χρησιμοποιείται στην πυρηνική φυσική για να περιγράψει την απόδοση (Yield) μιας πυρηνικής αντίδρασης συναρτήσει της ενέργειας του προσπίπτοντος σωματιδίου. Ως συνάρτηση διέγερσης μπορεί αν θεωρηθεί η καμπύλη που προκύπτει όταν γίνει κανονικοποίηση του αριθμού των γεγονότων με το φορτίο και την απόδοση του ανιχνευτή. Επομένως:

$$\text{Excitation function} = \frac{Y}{N_p 4\pi \epsilon_{abs}} \quad (4.5)$$

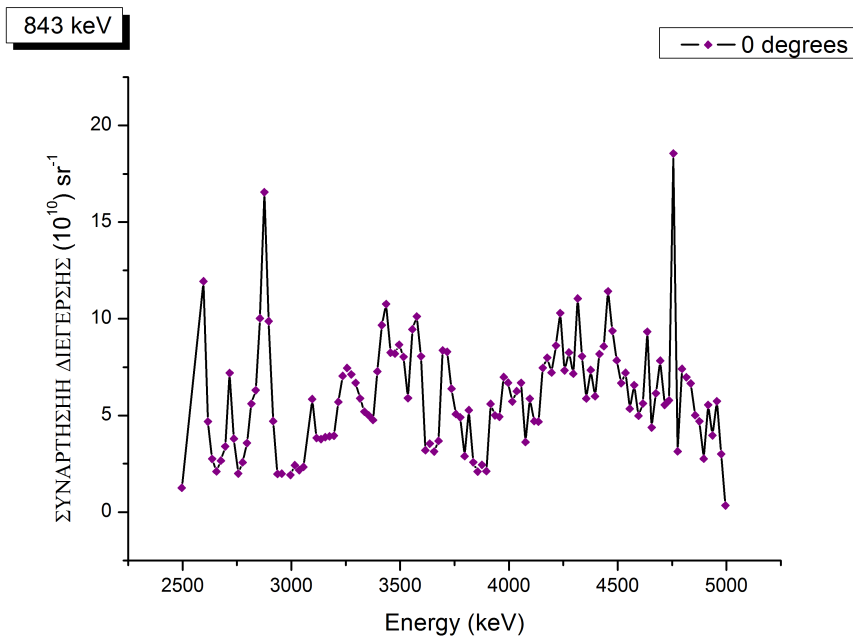
Όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα εργασία ήταν απαραίτητη η αφαίρεση των δύο συναρτήσεων διέγερσης (μια με τον στόχο και μια χωρίς αυτόν) για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η συνάρτηση διέγερσης του αλουμινίου που προέρχεται μόνο από τον στόχο.

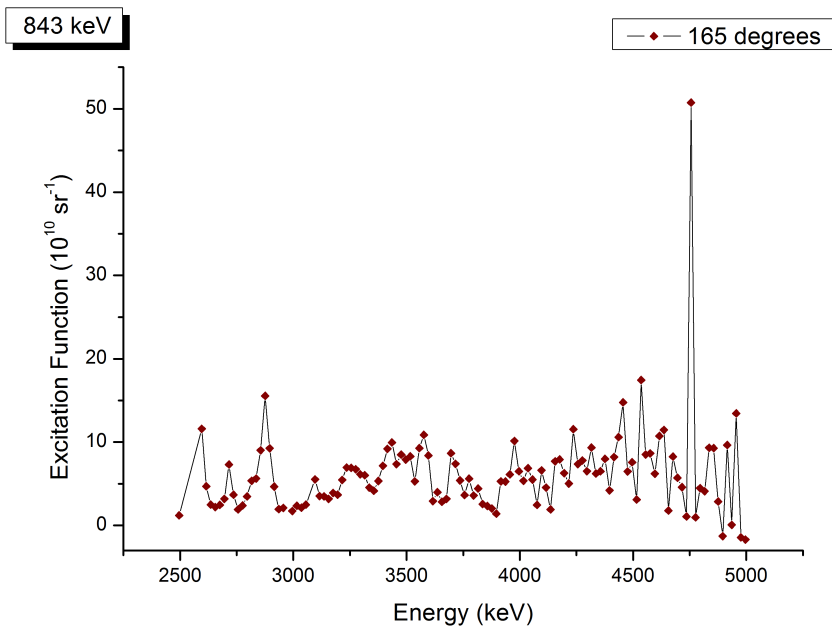
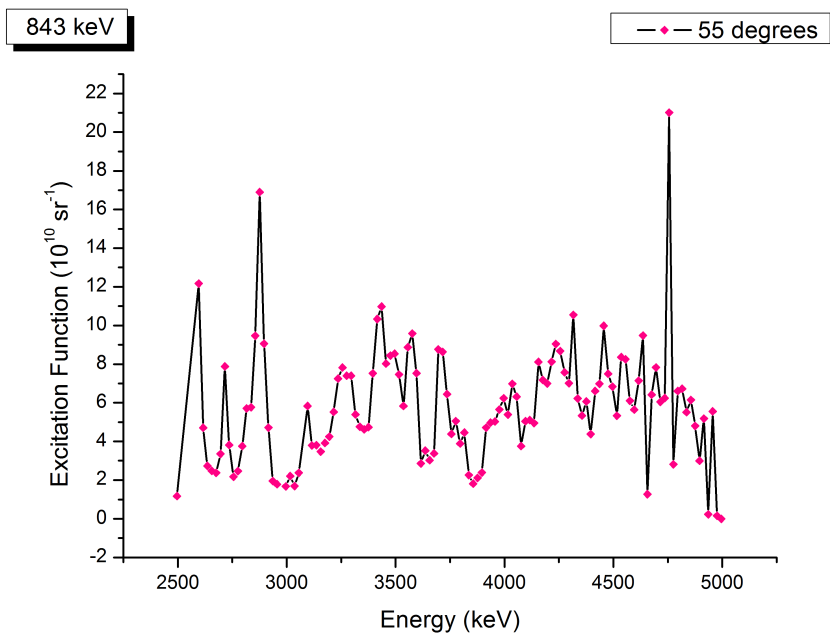
Επομένως η σχέση για τη συνάρτηση διέγερσης μετασχηματίζεται στην

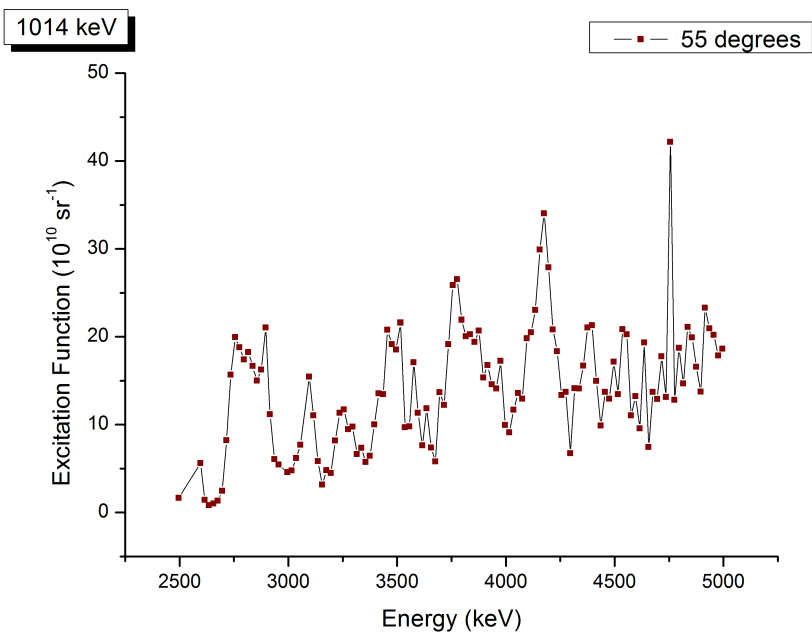
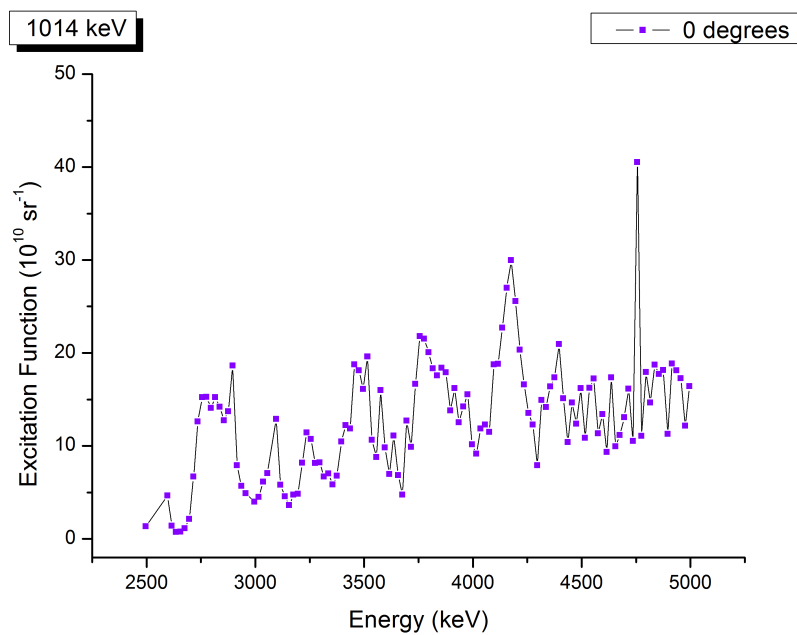
εξής:

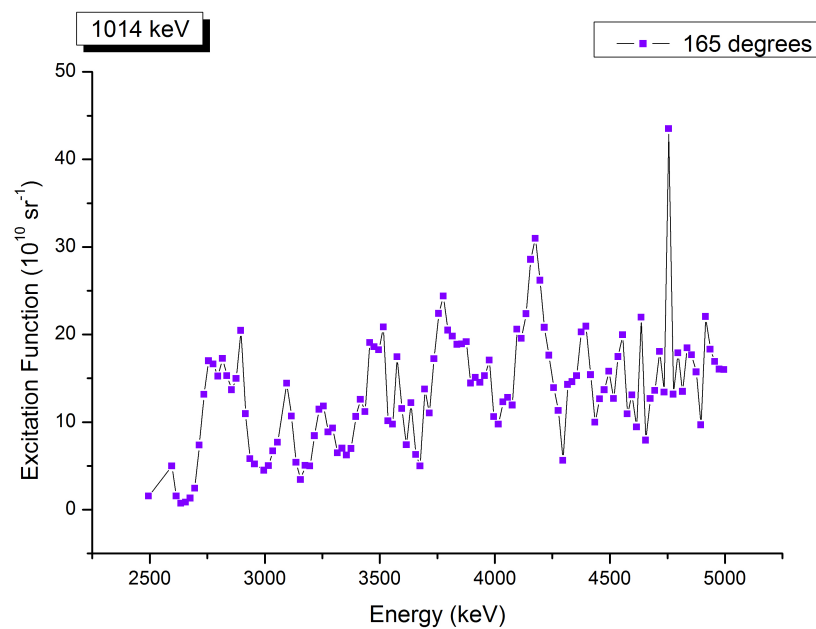
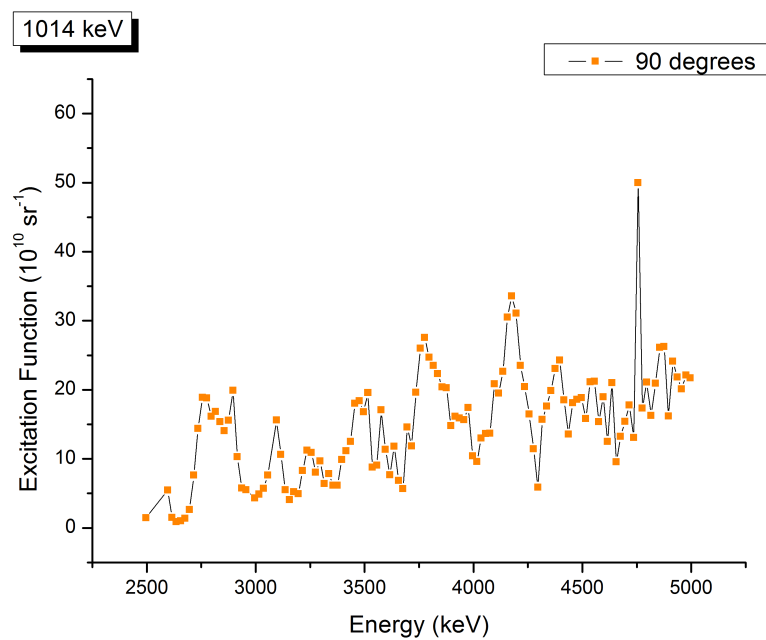
$$\text{Exitation function (στόχου)} = \frac{\frac{Y_{front}}{N_{p,front}} - \frac{Y_{back}}{N_{p,back}}}{4\pi\epsilon_{abs}} \quad (4.6)$$

Για τις δύο ζητούμενες ακτίνες γ με ενέργειες 843 keV και 1014 keV υπολογίστηκε η συνάρτηση διέγερσης για κάθε γωνία όπως φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα. Και εδώ, η γραμμή που φαίνεται σε κάθε γράφημα προκύπτει από την ένωση των πειραματικών σημείων για καλύτερη ευκρίνεια.



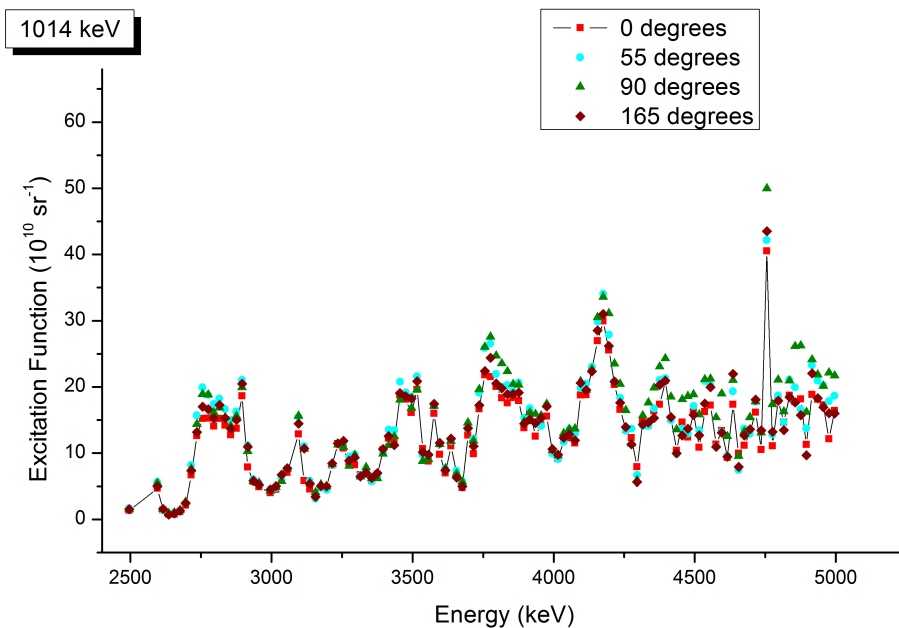
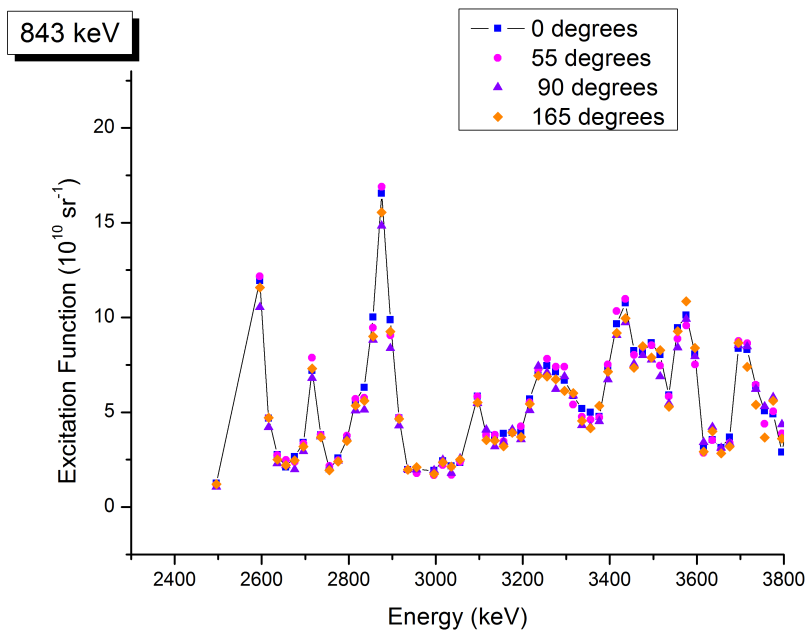






Παρατηρούμε πως για κάθε ενέργεια η μορφή της συνάρτησης διέγερσης παραμένει ίδια. Αυτό μπορεί να φανεί και στα παρακάτω διαγράμματα, όπου φαίνονται οι συναρτήσεις διέγερσης για όλες της γωνίες σε κάθε ενέργεια.

Στο πρώτο διάγραμμα για τη ακτίνα γ 843 keV φαίνονται σε κοινό διάγραμμα οι συναρτήσεις διέγερσης στο ενεργειακό εύρος 2400 – 3800 keV και στο δεύτερο διάγραμμα φαίνονται οι συναρτήσεις διέγερσης της ακτίνας γ ενέργειας 1014 keV στο ενεργειακό εύρος 2500 με 5000 keV.



4.8 Προσδιορισμός του πάχους του στόχου

Για να προσδιοριστεί η διαφορική ενεργός διατομή μιας αντίδρασης πρέπει να κανονικοποιηθεί η συνάρτηση διέγερσης με το πάχος του στόχου, όπως εύκολα μπορούμε να δούμε από τον τύπο της διαφορικής ενεργού διατομής:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Y(E, \theta)}{N_p N_t 4\pi \epsilon_{abs}} \quad (4.7)$$

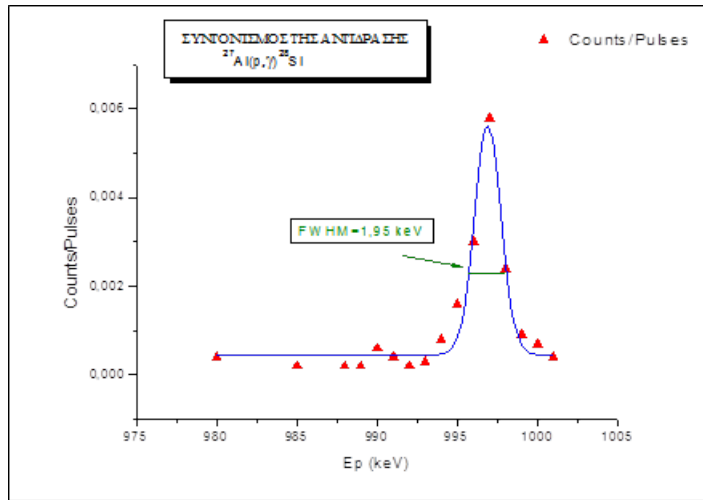
Είναι λοιπόν αναγκαίο να γνωρίζουμε με ακρίβεια το πάχος του στόχου N_t σε μονάδες αριθμού ατόμων ανά επιφάνεια ($atoms/cm^2$). Ο υπολογισμός του πάχους του στόχου προσδιορίστηκε με την βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης SRIM το οποίο μπορεί να υπολογίσει την απώλεια ενέργειας dE/dx .

Είναι γνωστό πως η απώλεια ενέργειας (stopping power) dE/dx είναι η επιβραδυντική δύναμη που δρα στο προσπίπτον σωματίδιο καθώς αυτό αλληλεπιδρά με το υλικό. Καθώς η δέσμη των πρωτονίων περνά από το αλουμίνιο χάνει ενέργεια μέσω ανελαστικών σκεδάσεων Coulomb με τα ηλεκτρόνια του στόχου.

Για να προσδιορίσουμε το πάχος του στόχου εκμεταλλευόμαστε τον στενό συντονισμό της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ ο οποίος έχει μικρό εύρος για τον υπολογισμό του πάχους. Το εύρος της γκαουσιανής καμπύλης, το οποίο δίνεται από το F.W.H.M., προέρχεται από την συνέλιξη του εύρους του συντονισμού, του πάχους του στόχου και του φαινομένου straggling. Όμως το εύρος του συντονισμού της αντίδρασης είναι πάρα πολύ μικρό (110 eV) σε σχέση με το πάχος του στόχου και μπορούμε να μην το λάβουμε υπόψη μας. Το ίδιο ισχύει και για το φαινόμενο straggling. Έτσι το εύρος της καμπύλης αντιστοιχεί στο πάχος του στόχου.

Επομένως το πάχος του στόχου με αυτό τον τρόπο εκφράζεται με μονάδες [keV] και είναι ίσο με $1,95 \text{ keV}$, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

4.9. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ⁶³



Δίνοντας λοιπόν την πυκνότητα του αλουμινίου η οποία είναι $\rho_{Al} = 2,699 \text{ gr/cm}^3$ υπολογίζουμε την απώλεια ενέργειας για την ενέργεια συντονισμού $E_{p,lab} = 991.89 \text{ keV}$. Βρίσκουμε πως χάνεται $dE/dx = 7,8 \text{ eV cm}^2/\text{άτομα}10^{15}$. Επομένως το πάχος του στόχου υπολογίζεται ότι είναι ίσο με $N_t = (2,146 \pm 0,160)10^{17} \text{ άτομα/cm}^2$.

4.9 Προσδιορισμός της διαφορικής ενεργού διατομής

Ο βασικός στόχος της μελέτης μια πυρηνικής αντίδρασης είναι ο προσδιορισμός της διαφορικής ενεργού διατομής η οποία αντιστοιχεί στην πιθανότητα να λάβει χώρα η αντίδραση. Στην περίπτωση λεπτών συντονισμών όπου το βήμα της ενέργειας ΔE είναι συγκρίσιμο του πάχους του στόχου, όπως στο αλουμίνιο, η σχέση για τον προσδιορισμό της διαφορικής ενεργού διατομής απλοποιείται στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Y(E, \theta)}{N_p N_t 4\pi \epsilon_{abs}} \quad (4.8)$$

Όμως, λόγω της παρουσίας αλουμινίου που δεν προέρχεται από τον στόχο μας, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση όπου δεν φαίνεται η αφαίρεση που προαναφέρθηκε.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\frac{Y_{front}}{N_{p,front}} - \frac{Y_{back}}{N_{p,back}}}{4\pi \epsilon_{abs} N_t} \quad (4.9)$$

Τα σφάλματα για τις διαφορικές ενεργές διατομές προκύπτουν από τη

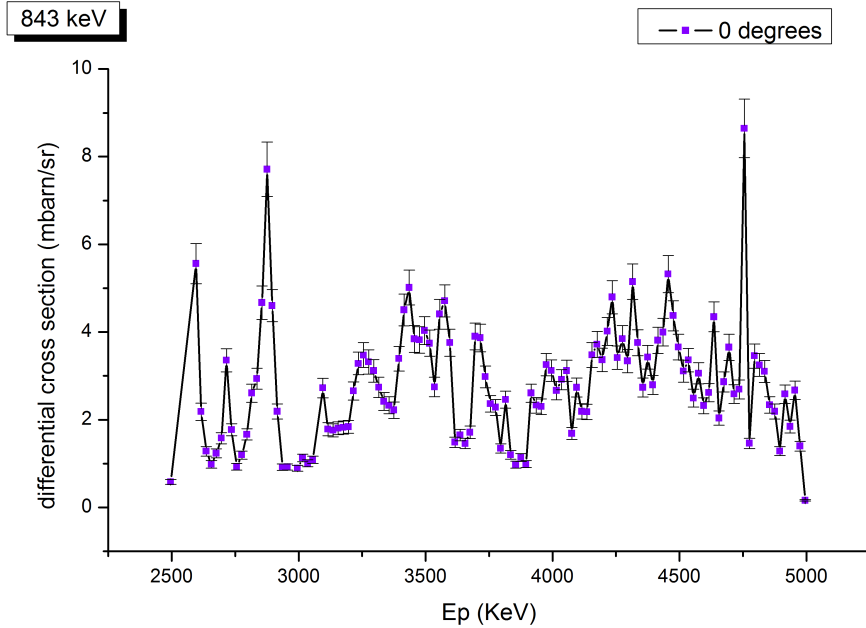
διάδοση σφαλμάτων από την σχέση:

$$\delta \left(\frac{d\sigma(E, \theta)}{d\Omega} \right) = \frac{d\sigma(E, \theta)}{d\Omega} \sqrt{\left(\frac{\delta Y(E, \theta)}{Y(E, \theta)} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_p}{N_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_t}{N_t} \right)^2 + \left(\frac{\delta \epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}} \right)^2}$$

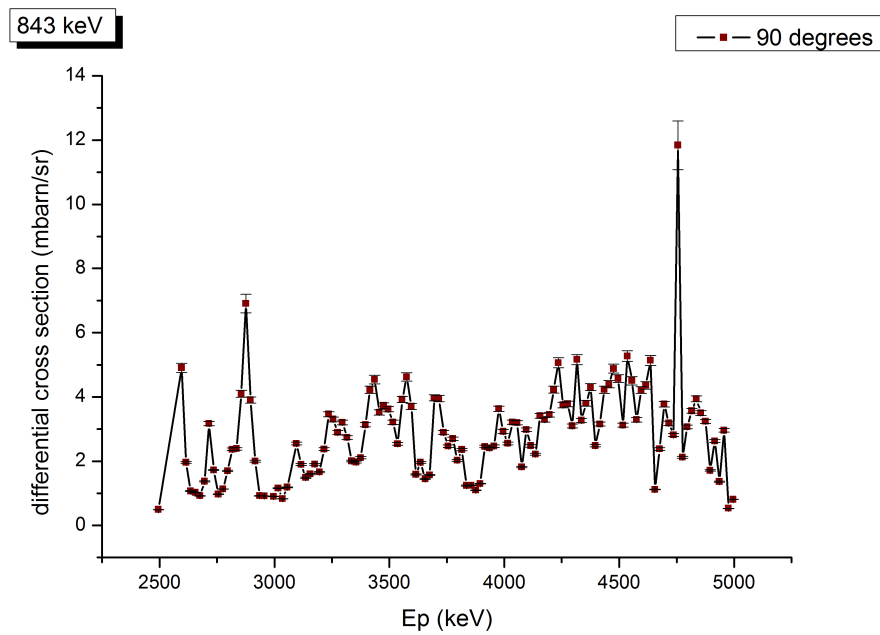
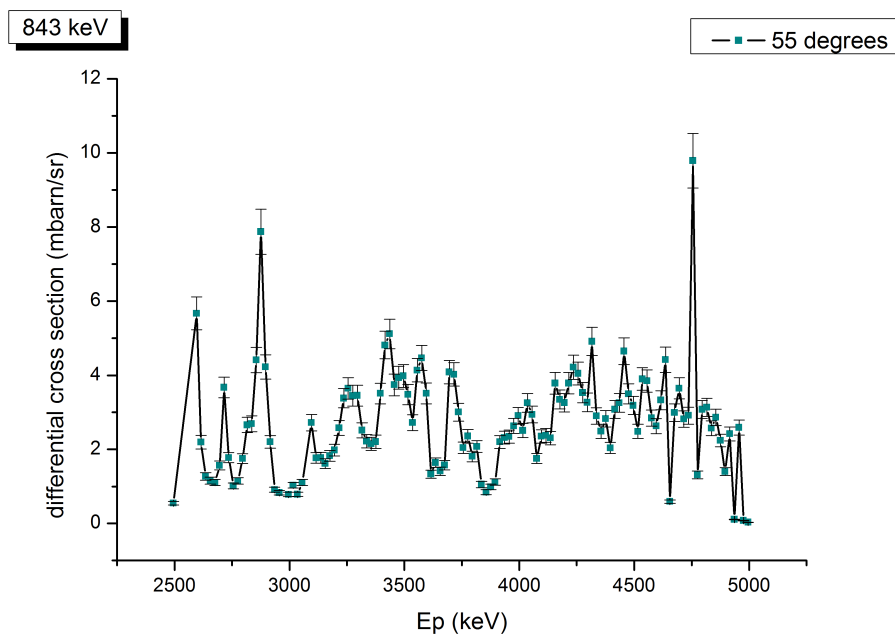
Αντίστοιχα, η σχέση για τα σφάλματα είναι πλέον η εξής:

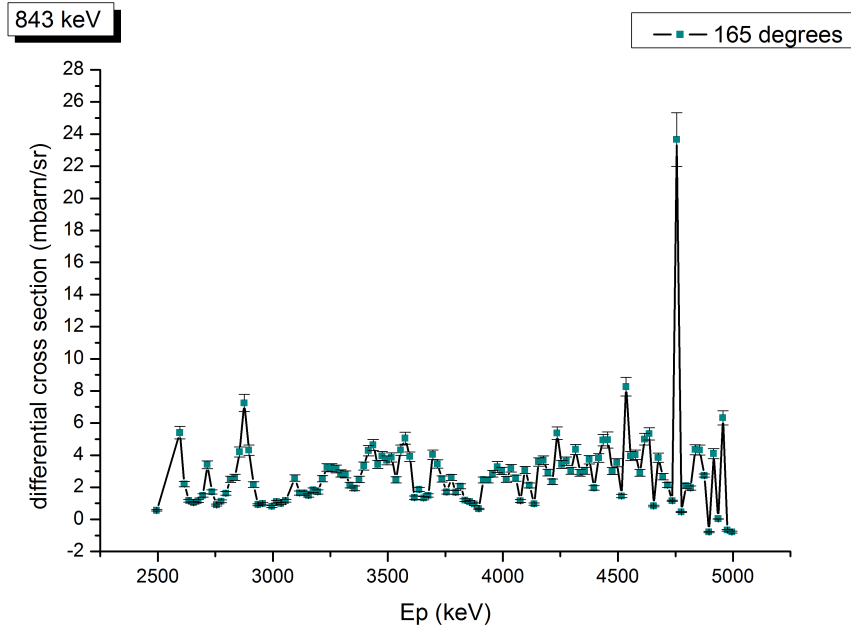
$$\begin{aligned} \delta \left(\frac{d\sigma(E, \theta)}{d\Omega} \right) &= \frac{d\sigma(E, \theta)}{d\Omega} \times \\ &\times \left[\left(\frac{\delta Y_{front}(E, \theta)}{Y_{front}(E, \theta)} \right)^2 + \left(\frac{\delta Y_{back}(E, \theta)}{Y_{back}(E, \theta)} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_{pfront}}{N_{pfront}} \right)^2 + \right. \\ &\left. + \left(\frac{\delta N_{pback}}{N_{pback}} \right)^2 + \left(\frac{\delta N_t}{N_t} \right)^2 + \left(\frac{\delta \epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned}$$

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$ για την χαρακτηριστική ακτίνα γ ενέργειας 843 keV για όλες τις γωνίες ανίχνευσης. Η ακτίνα αυτή προέρχεται από μετάπτωση του διεγερμένου πυρήνα από την πρώτη διεγερμένη στάθμη στην θεμελιώδη. Όλα τα διαγράμματα έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος Origin.

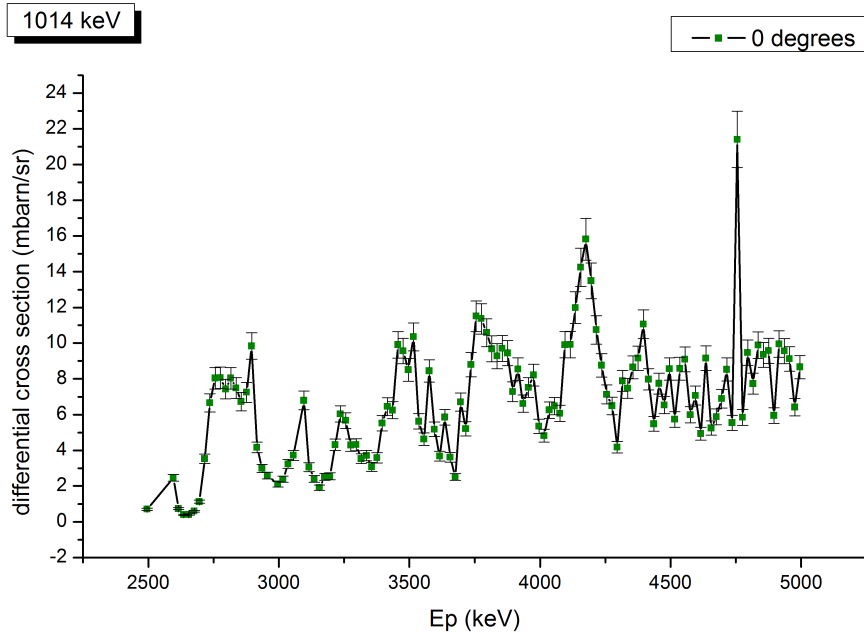


4.9. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ⁶⁵

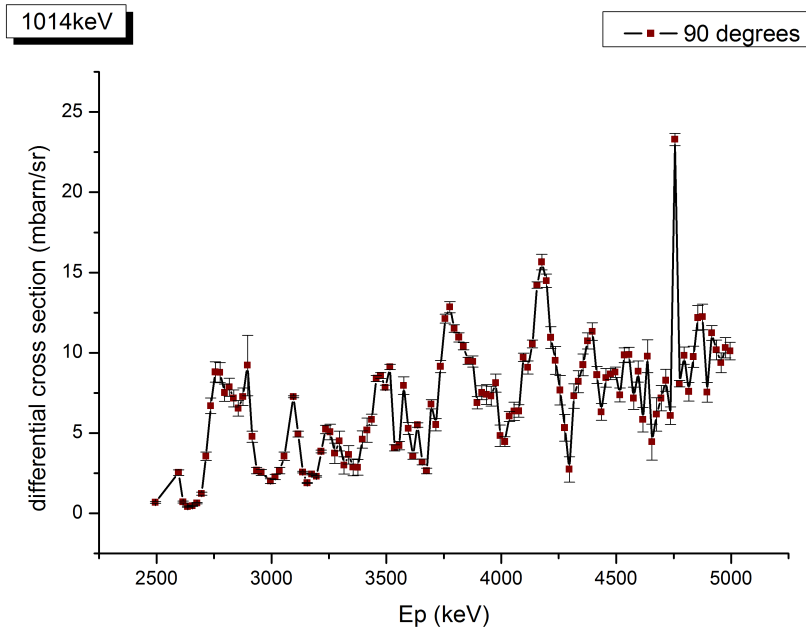
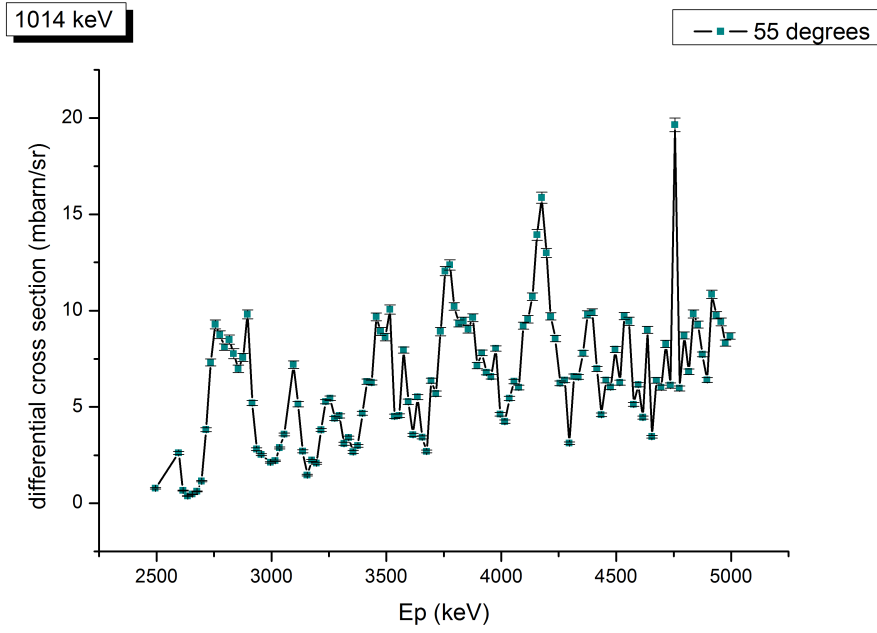


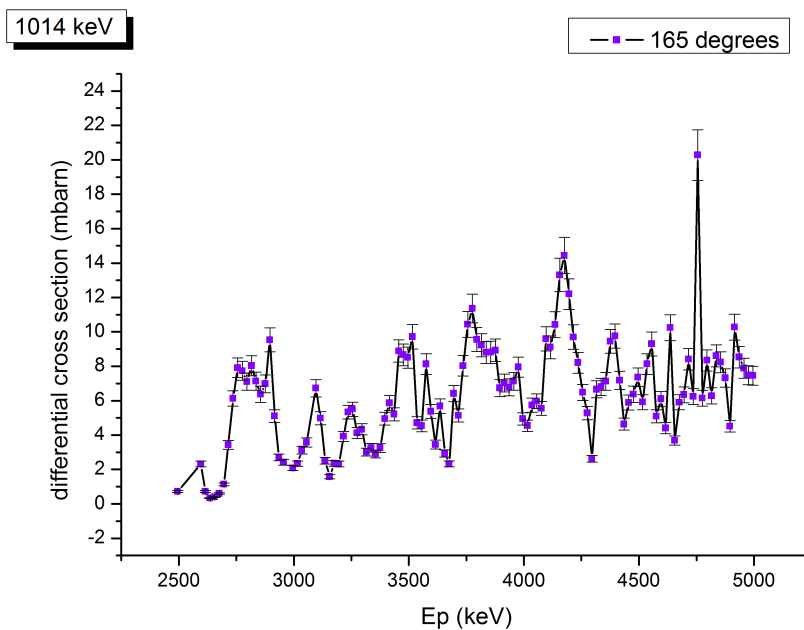


Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η ενεργός διατομή για την ακτίνα γ χαρακτηριστικής ενέργειας 1014 keV για όλες τις γωνίες αντίχτυσης. Αυτή η ακτίνα γ προκύπτει από την μετάπτωση του διεγερμένου πυρήνα από την δεύτερη διεγερμένη στάθμη στην θεμελιώδη.



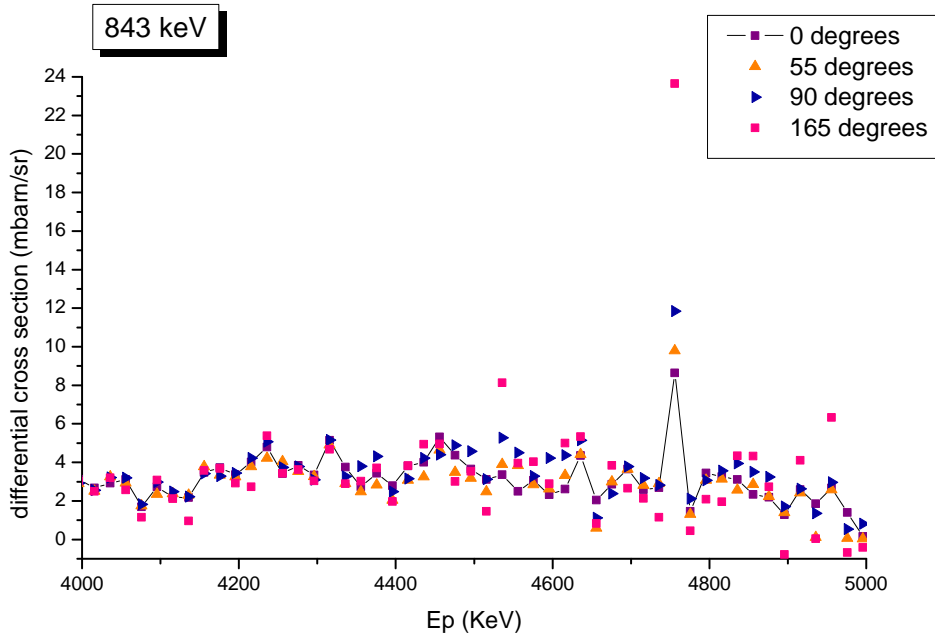
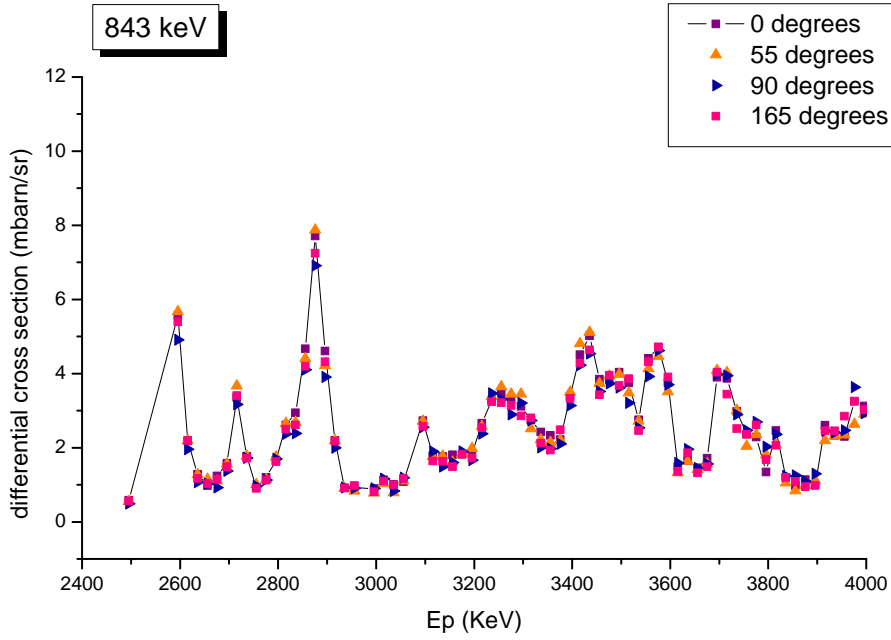
4.9. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ67

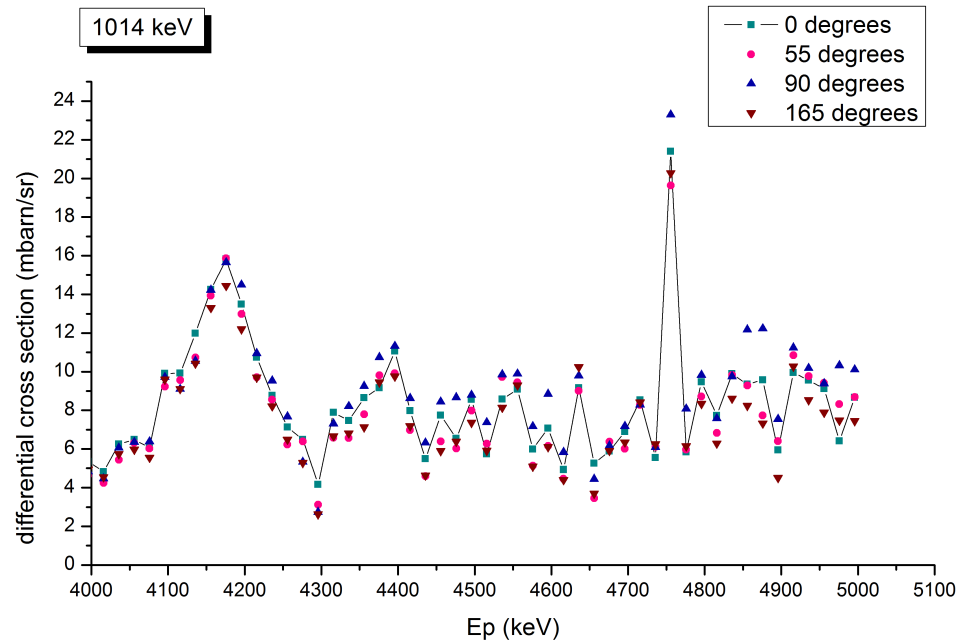
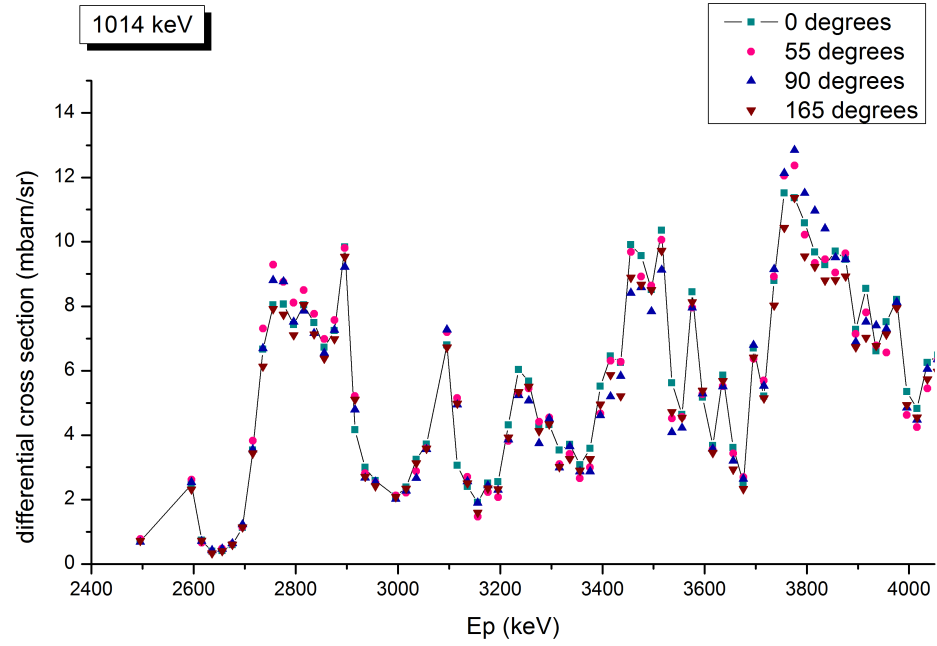




Στην επόμενη σελίδα φαίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης των γωνιών για τις ακτίνες γ με ενέργεια 843 keV και 1014 keV αντίστοιχα. Για ευκολία στην σύγκριση των αποτελεσμάτων τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν τις ενεργές διατομές σε μικρότερο εύρος ενεργειών από 2500 μέχρι 4000 keV και από 4000 keV μέχρι 5000 keV .

4.9. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ⁶⁹





4.10 Διεργαστηριακή Άσκηση (interlaboratory exercise)

Η παρούσα διπλωματική έγινε στα πλαίσια της διεργαστηριακής άσκησης διαφόρων εργαστηρίων που διοργανώθηκε από την επιτροπή ατομικής ενέργειας IAEA (International Atomic Energy Agency) σε μια προσπάθεια να υπάρξει έγκυρη βάση δεδομένων για την φασματοσκοπία PIGE.

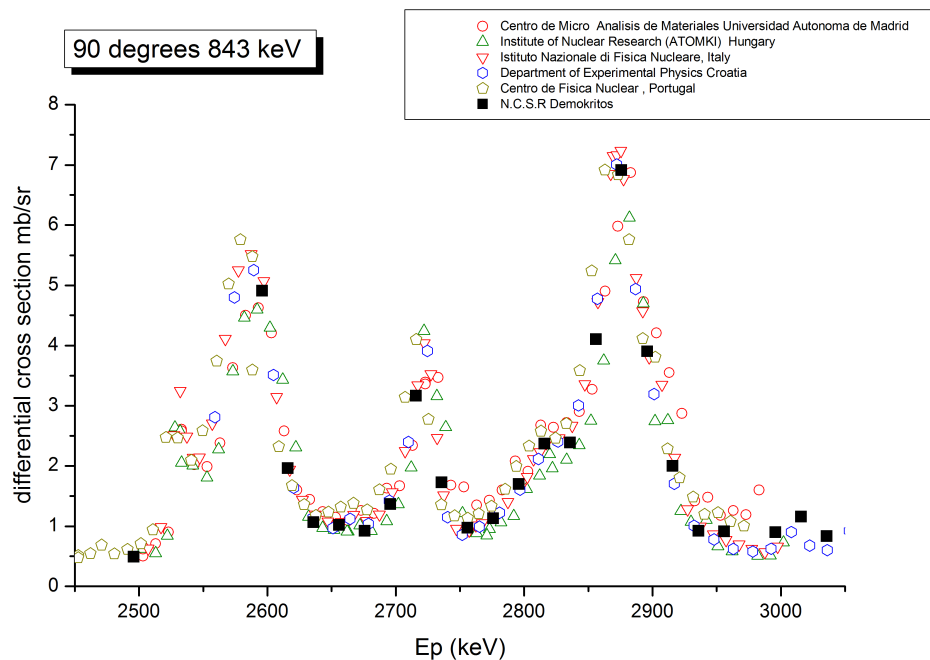
Στη άσκηση έλαβαν μέρος διάφορα εργαστήρια τα οποία κλήθηκαν να μετρήσουν την χαρακτηριστική ακτίνα γ ενέργειας 843 keV σε ενεργειακό εύρος $2,5$ με 3 MeV . Ενδεικτικά κάποια από τα εργαστήρια που συμμετείχαν είναι:

- Centro de Física Nuclear (Lisboa, Portugal)
- Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal
- Ruhr Universität Bochum, Germany
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Firenze, Italy
- Dept. of Physics University of Genova and INFN Sezione di Genova, Italy
- Institute of Nuclear Research (ATOMKI), Debrecen, Hungary
- Kharkov Institute of Physics and Technology, National Science Center, Akademicheskaya, Ukraine
- Centro de Micro Análisis de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid, Spain
- Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
- National Center of Scientific Research "Demokritos" Athens, Greece
- Division of Materials Physics, Department of Physics, University of Helsinki, University of Helsinki, Finland
- Department of Experimental Physics, Institute Rudjer Boskovic, Zagreb, Croatia
- Institut de Physique Nucleaire, Atomique et de Spectroscopie, Universite de Liège, Liège, Belgium
- Institute of Physics and Power Engineering, 1, 249033 Obninsk, Russia

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η διαφορική ενεργός διατομή (differential cross section) όπως προσδιορίστηκε από την ανάλυση που περιγράφηκε παραπάνω και από τα δεδομένα που δόθηκαν από τα εξής εργαστήρια:

- Centro de Micro Análisis de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid
- Institute of Nuclear Research (ATOMKI), Debrecen, Hungary
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Firenze, Italy
- Department of Experimental Physics, Institute Rudjer Boskovic, Zagreb, Croatia
- Centro de Física Nuclear (Lisboa, Portugal)

Οι ενεργές διατομές αντιστοιχούν σε ενέργεια ακτίνας γ 843 keV και γωνία ανίχνευσης 90° .



Στόχος της διεργαστηριακής άσκησης ήταν να ελεγχθεί κατά πόσο τα διάφορα εργαστήρια που εφαρμόζουν την τεχνική PIGE συμφωνούν στις μετρήσεις των ενεργών διατομών. Έτσι επιλέχτηκε η αντίδραση $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$ να μελετηθεί σε συγκεκριμένο ενεργειακό εύρος. Παρατηρούμε λοιπόν πως υπάρχουν διακυμάνσεις στις τιμές των διαφορικών ενεργών διατομών ανάμεσα στα εργαστήρια της τάξης των μερικών eV.

4.11. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ IBANDL

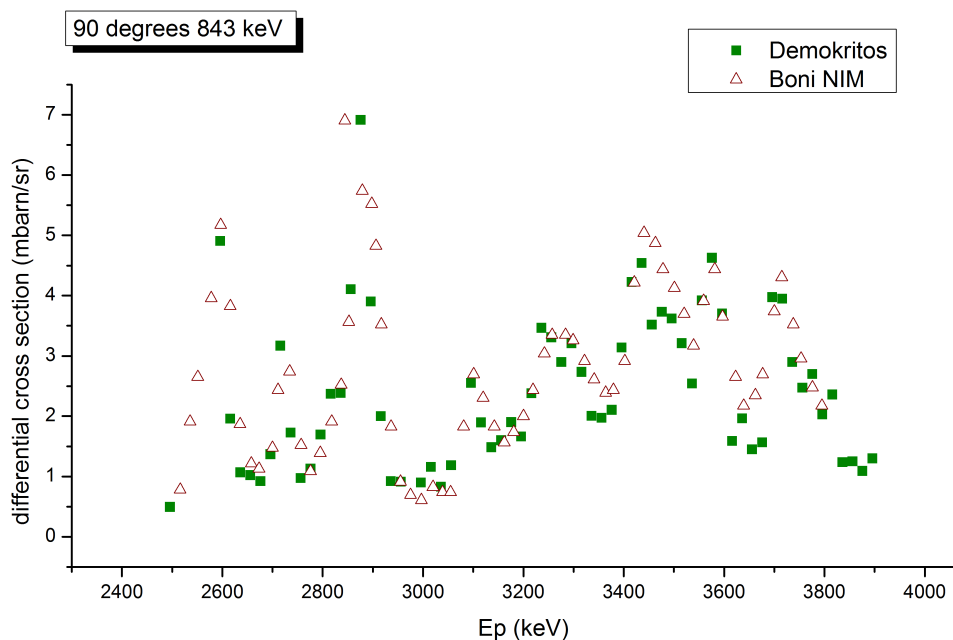
Μια πιθανή αιτία αυτών των διακυμάνσεων είναι η λαθεμένη βαθμονόμηση του επιταχυντή (machine calibration) η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μετατόπιση του γραφήματος.

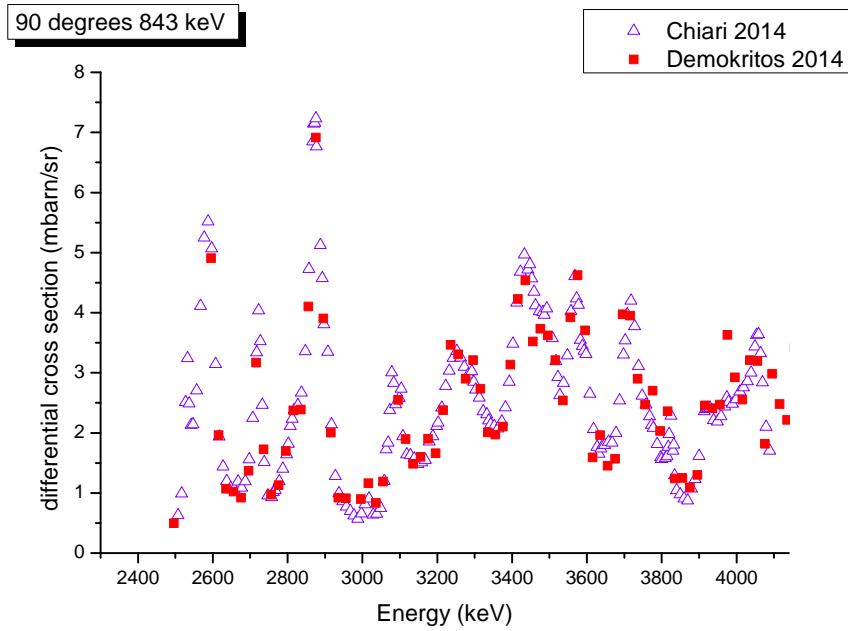
4.11 Σύγκριση της διαφορικής ενεργού διατομής με την βάση δεδομένων IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library)

Η διαδικτυακή βιβλιοθήκη IBANDL (Ion Beam Analysis Nuclear Data Library) δημιουργήθηκε από τον A.Gurbich υπό την αιγίδα της ΙΑΕΑ και περιέχει δεδομένα διαφορικών ενεργών διατομών που σχετίζονται με τις τεχνικές IBA (Ion Beam Analysis) όπως και η PIGE. Παρόλα αυτά είναι αναγκαίος ο εμπλουτισμός της από ανανεωμένα δεδομένα διαφορικών διατομών. Στην ενότητα που ακολουθεί συγκρίνονται τα αποτελέσματα μας με τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα άλλων εργαστηρίων.

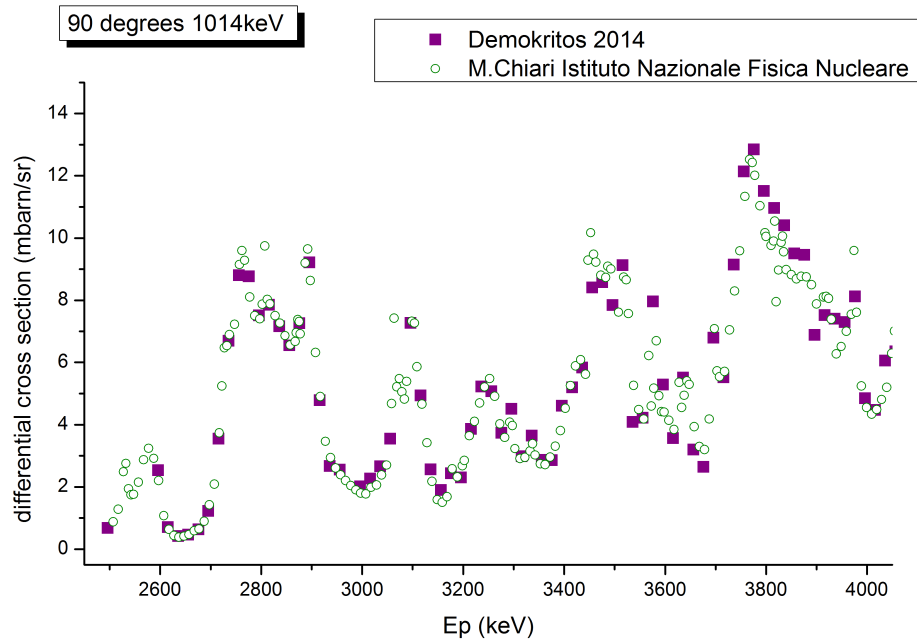
Στην βάση δεδομένων για την αντίδραση του πειράματός μας $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$ βρέθηκαν τέσσερα αρχεία διαφορικών ενεργών διατομών για τις ενέργειες ακτίνας γ 843 και 1014 keV αντίστοιχα.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η διαφορική ενεργός διατομή για χαρακτηριστική ενέργεια 843 KeV σε γωνία ανίχνευσης 90°.

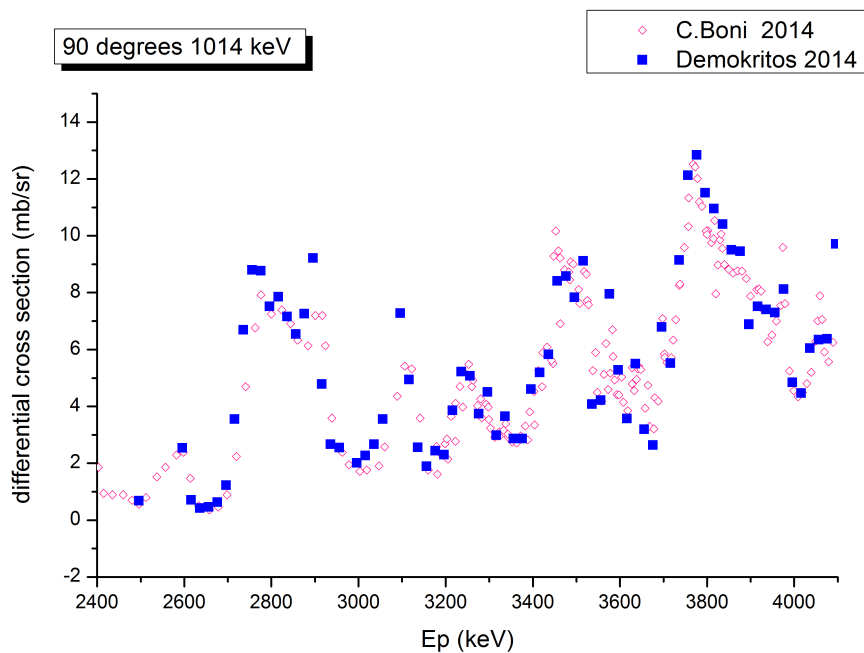




Τα δεδομένα έχουν δημοσιευτεί στην ιστοσελίδα από τον C.Boni (Nucl. Instr. & Meth). Αντίστοιχα έχουμε για την ενέργεια 1014 keV σε γωνία ανίχνευσης 90° από δεδομένα μου δημοσίευσε στην ιστοσελίδα ο M. Chiari (NIMB) και από τον C.Boni (Nucl. Instr. & Meth (NIM)).



4.11. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ IBANDL



Παρατηρούμε πως η μορφή της διαφορικής ενεργού διατομής είναι ίδια και για τις δυο ενέργειες. Παρόλα αυτά υπάρχει μετατόπιση της τάξης των μερικών eV. Το γεγονός αυτό δείχνει την αναγκαιότητα της πραγματοποίησης της διεργαστηριακής άσκησης για να αξιολογηθούν τα δεδομένα που θα χρειαστούν στην βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις για το μέλλον

Η τεχνική PIGE είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για τον χαρακτηρισμό στόχων και για την κατά βάθος ανάλυση τους. Αυτή η δουλειά αποτέλεσε ένα πρώτο βήμα για την αξιολόγηση των ήδη υπαρχόντων δεδομένων της βιβλιογραφίας σε μεγάλο ενεργειακό εύρος.

Τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για περισσότερη μελέτη στο μέλλον, αφού αποτελούν το βασικό στοιχείο για να γίνουν οι μετρήσεις με περισσότερη ακρίβεια σε επόμενες μετρήσεις. Μία πρόταση που θα έλυne το πρόβλημα της μετατόπισης των μερικών keV είναι η βελτίωση της μεθόδου της βαθμονόμησης του επιταχυντή (machine calibration), όπου θα υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην ενέργεια της δέσμης.

Βιβλιογραφία

- [1] Claus E. Rolfs and William S. Rodney, “Cauldrons in the Cosmos”, 1988
- [2] Radiation Detection and Measurement Glenn E Knoll John Wiley Sons, 2000.
- [3] Introductory Nuclear Physics Kenneth S.Krane John Wiley Sons, 1988.
- [4] Introduction to Solid State Physics, Kittel , Wiley 2000
- [5] Handbook of Modern Ion Beam Material Analysis, Yongqiang Wang and Michael Nastasi
- [6] Nuclear reaction Analysis (NRA) and Particle Induced γ -ray emission(PIGE), M.Kokkoris Department of Physics, National Technical University of Athens
- [7] Resonance strength measurements of the $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ reaction in the energy range 0.8 – 2.0 MeV, C. Chronidou, K. Spyrou, S. Harissopulos, S. Kossionides, T. Paradellis, N.C.S.R. «Demokritos», Institute of Nuclear Physics, Laboratory for Material Analysis
- [8] The $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ reaction: direct capture cross-section and resonance strengths at 0.2–1.12 MeV, S. Harissopulos, C. Chronidou, K. Spyrou, T.Paradellis, C.Rolfs, W.H. Schulte, and H.W. Becker, Institute of Nuclear Physics, NCSR “Demokritos”
- [9] Development in Nuclear reaction Analysis and interdisciplinary investigation with ion beam methods, Sziki Gustav Avon
- [10] Gamma-Ray Detectors, Hastings A Smith, Jr., and Marcia Lucas
- [11] High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry, Mayeen Uddin Khandaker
- [12] Assessment of Nuclear Data Needs for Particle Induced Gamma Ray Emission (PIGE). IAEA Nuclear Data Section (2010)

- [13] Development of a reference Data base for particle gamma-ray emission (PIGE) spectroscopy IAEA Nuclear Data Section (2013)
- [14] Μαρία Διακάκη και Νίκος Ντίβης, “Ο επιταχυντής Van de Graaff TANDEM του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. “Δημόκριτος” – Εγχειρίδιο εισαγωγή στις βασικές έννοιες λειτουργίας του επιταχυντή”.
- [15] Βασίλειος Ρακόπουλος, Διπλωματική εργασία: «Μετρήσεις της διαφορική ενεργού διατομής των αντιδράσεων $^{32}\text{S}(d,p)^{33}\text{S}$ και $^{32}\text{S}(d,\alpha)^{30}\text{P}$ », 2009
- [16] Πρεκετές Σιγάλας Κωνσταντίνος Διπλωματική εργασία «Μελέτη της αντίδρασης $^{32}\text{S}(p,p'\gamma)^{32}\text{S}$ στο ενεργειακό εύρος $3 - 4 \text{ MeV}$ »
- [17] Καλαμαρά Αντιγόνη Διπλωματική εργασία «Μέτρηση της ενεργού διατομής της αντίδρασης $^{241}\text{Am}(n,2n)^{240}\text{Am}$ »
- [18] Πανέτα Βαλεντίνα Μεταπτυχιακή εργασία «Μελέτη του συστήματος $p + ^{12}\text{C}$ για ενέργειες πρωτονίων έως 7 MeV »
- [19] C.Boni et al. Nucl. Instr. Meth. B35 (1988) 80
- [20] M. Chiari et al., accepted for publication in NIMB
- [21] Ion Beam Analysis Nuclear Data Library, <http://www-nds.iaea.org/ibandl/>
- [22] J. Theuerkauf, S. Esser, S. Krink, M. Luig, N. Nicolay, O. Stuch, H. Wolters, Program TV, University of Cologne (unpublished), 1993

