

## Άσκηση 3

# ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ-β

Σκοπός της εργαστηριακής αυτής άσκησης είναι η μελέτη της εμβέλειας των σωματίων β.

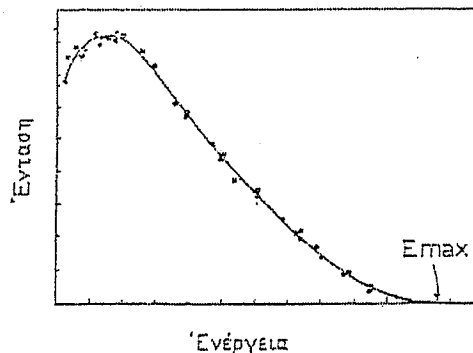
### 3.1 Γενικά

Είναι πειραματικά δεδομένο ότι στις διασπάσεις ορισμένων ραδιενεργών πυρήνων εκπέμπονται ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια τα οποία ονομάζονται **σωματίδια-β**. Η πιο απλή διαδικασία αυτού του είδους είναι η διάσπαση β του νετρονίου σε πρωτόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και ενός αντι-νετρίνου, σύμφωνα με την αντίδραση



Η διάσπαση βήτα ανήκει στις **ασθενείς αλληλεπιδράσεις**. Μπορεί να γίνει και προς τις δύο κατευθύνσεις και ονομάζεται β<sup>-</sup> ή β<sup>+</sup> για εκπομπή ηλεκτρονίου ( $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$ ) ή ποζιτρονίου ( $p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e$ ) αντίστοιχα. Το πρωτόνιο είναι σταθερό σωματίο επομένως η β<sup>+</sup> διάσπαση είναι δυνατή μόνο στο πεδίο άλλων νουκλεονίων, ώστε να επιτρέπεται ενεργειακά.

Η β-διάσπαση (π.χ. β<sup>-</sup>) είναι δυνατή μόνον εάν  $m_{\text{πυρ}}(A,Z) > m_{\text{πυρ}}(A,Z+1) + m_e$  (αφού η μάζα του αντινετρίνου είναι εξαιρετικά μικρή). Το γινόμενο της περίσσειας αυτής μάζας  $\Delta m$  επί την ταχύτητα του φωτός στο τετράγωνο είναι η σταθερή διαθέσιμη από την αντίδραση ενέργεια  $E_m$ , η οποία μοιράζεται ανάμεσα στο ηλεκτρόνιο και το αντινεutrino (υπό μορφή κινητικής ενέργειας – Q-value). Για το λόγο αυτό τα ηλεκτρόνια της β-διάσπασης δεν εκπέμπονται με σταθερή ενέργεια αλλά εμφανίζουν ένα συνεχές ενεργειακό φάσμα που εκτείνεται από την ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου μέχρι τη διαθέσιμη από την αντίδραση ενέργεια  $E_m$  όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.1*.



*Σχήμα 3.1 : Τυπικό ενεργειακό φάσμα ακτίνων β.*

Τα σωματίδια β περνώντας μέσα από την ύλη χάνουν ενέργεια. Η απώλεια ενέργειας των β οφείλεται:

α) - ιδιαίτερα για τα β χαμηλής ενέργειας - στις ανελαστικές τους κρούσεις με τα ατομικά ηλεκτρόνια, αποτέλεσμα των οποίων είναι ο ιονισμός και, κυρίως η διέγερση των ατόμων του υλικού που διασχίζουν. Άλλα σχετιζόμενα φαινόμενα είναι ο φθορισμός των ατόμων μετά τη διέγερσή τους. Το χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι ότι η ενέργεια που μεταβιβάζεται στα άτομα σε κάθε κρούση είναι πολύ μικρή (μερικά eV) και επομένως η ολική απώλεια ενέργειας ενός ηλεκτρονίου, που διασχίζει ένα φύλλο υλικού, είναι το αποτέλεσμα ενός πολύ μεγάλου αριθμού μικρών απωλειών. Όταν τα ηλεκτρόνια (γενικώς φορτισμένα σωματίδια) κινούνται μέσα σε ένα υλικό με ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του φωτός στο υλικό αυτό, τότε εκπέμπουν ακτινοβολία **Cherenkov**.

β) Τα ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια υψηλής ενέργειας (μερικών MeV και πάνω) μπορούν να χάσουν ενέργεια και με το μηχανισμό της ακτινοβολίας πέδησης (Bremsstrahlung). Σύμφωνα με την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού ένα επιταχυνόμενο φορτισμένο σωματίδιο εκπέμπει ακτινοβολία. Τα ηλεκτρόνια στο πεδίο Coulomb του πυρήνα μπορούν να έχουν μεγάλη επιτάχυνση εξαιτίας της μικρής τους μάζας. Η επιτάχυνση αυτή είναι ανάλογη του ατομικού αριθμού Z και αντιστρόφως ανάλογη της μάζας του σωματίου. Ο λόγος της απώλειας ενέργειας από ακτινοβολία,  $(\frac{dE}{dx})_r$ , και από

ιονισμό,  $(\frac{dE}{dx})_c$ , ακολουθεί τη σχέση [3] :

$$\frac{(dE/dx)_r}{(dE/dx)_c} = \frac{EZ}{800} \quad (3.2)$$

όπου E η ενέργεια σε μονάδες MeV. Έτσι σε μόλυβδο (Z=82) στα 10 MeV οι δύο μηχανισμοί συνεισφέρουν εξίσου στην απώλεια ενέργειας, ενώ πάνω από 10 MeV η απώλεια λόγω ακτινοβολίας επικρατεί. Το μήκος της διαδρομής των σωματιδίων β (μέσα σε ένα υλικό) ονομάζεται εμβέλεια των σωματιδίων β (στο συγκεκριμένο υλικό).

Ο πειραματικός προσδιορισμός της εμβέλειας των σωματιδίων β περιπλέκεται από το γεγονός ότι η εκπομπή τους συνοδεύεται συνήθως από εκπομπή ακτίνων γ (σκληρή συνιστώσα). Ο αριθμός των σωματιδίων N που καταγράφονται από έναν απαριθμητή (π.χ. G-M) αρχικά μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του πάχους του απορροφητή, σύμφωνα με τη σχέση :

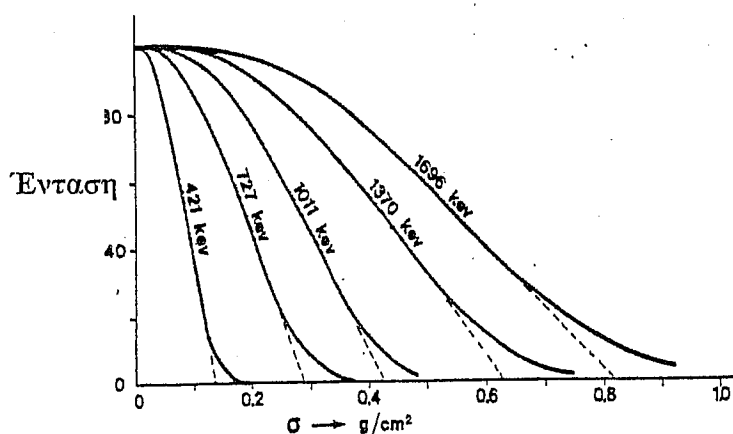
$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (3.3)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής απορρόφησης των βήτα και x η επιφανειακή πυκνότητα του απορροφητή σε mg/cm<sup>2</sup>. Για μεγάλα πάχη απορροφητή, ο απαριθμητής μετρά μόνο το υπόστρωμα και την ακτινοβολία γάμμα της πηγής.

Εξάλλου με το μηχανισμό της ακτινοβολίας πέδησης εκπέμπονται ακτίνες-X, στις οποίες οφείλεται ο παραμένον αριθμός κρούσεων στην ουσία της καμπύλης απορροφήσεως. Τέλος, το φαινόμενο της πολλαπλής σκέδασης αλλοιώνει και αυτό τη μορφή της καμπύλης.

Τυπικές καμπύλες απορροφήσεως ηλεκτρονίων ως συνάρτηση του πάχους του απορροφητή δίνονται στο *Σχήμα 3.2*. Η ακριβής ανάλυση μιας τέτοιας καμπύλης παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες.

Παρόλο που οι διαδικασίες που περιγράψαμε είναι τόσο πολύπλοκες, ένα μεγάλο πλήθος από μετρήσεις της εμβέλειας των ηλεκτρονίων ως συνάρτηση της μέγιστης ενέργειάς τους  $E_m$  έδειξε ότι τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με μια γραμμική σχέση. Ας δούμε ένα τυπικό παράδειγμα απορρόφησης σωματιδίων  $\beta$  από καθαρό αργίλιο (Al). Τα Σχήματα 3.3 και 3.4 εικονίζουν την καμπύλη απορρόφησης σωματιδίων  $\beta$  σε γραμμική κλίμακα και σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2 : Τυπικές καμπύλες απορρόφησης εκπνευμένων ηλεκτρονίων από  $\beta$ -διάσπαση ραδιενεργού πηγής ως συνάρτηση της επιφανειακής πυκνότητας φύλλων αργιλίου (Al).

Στην περίπτωση ύπαρξης σκληρής συνιστώσας (ακτίνες γάμμα), επιβάλλεται να χαραχθεί αρχικά το διάγραμμα του ρυθμού των κρούσεων ως συνάρτηση του πάχους του απορροφητή (Σχ. 3.3), όπου η κλίμακα του ρυθμού να είναι λογαριθμική ώστε να αναδειχθεί η περιοχή του χαμηλού ρυθμού κρούσεων. Με το διάγραμμα αυτό βρίσκεται η σκληρή συνιστώσα και αφαιρείται από τις ακτίνες βήτα. Στη συνέχεια, από το διάγραμμα που προκύπτει βρίσκεται με καλή προσέγγιση η εμβέλεια  $R$  (σημείο τομής με τα γεγονότα υποβάθρου).

Από την εμβέλεια  $R$  των ηλεκτρονίων μέσα στο αλουμίνιο μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη ενέργειά τους,  $E_m$ , χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση του Flammersfeld [3] :

$$R = 0.11 \cdot \left( \sqrt{1 + 22.4 \cdot E_{\max}^2} - 1 \right) \quad \text{για } 0 < E_{\max} < 3 \text{ MeV}$$

όπου το  $R$  εκφράζεται σε  $\text{g/cm}^2$  και το  $E_m$  σε MeV.

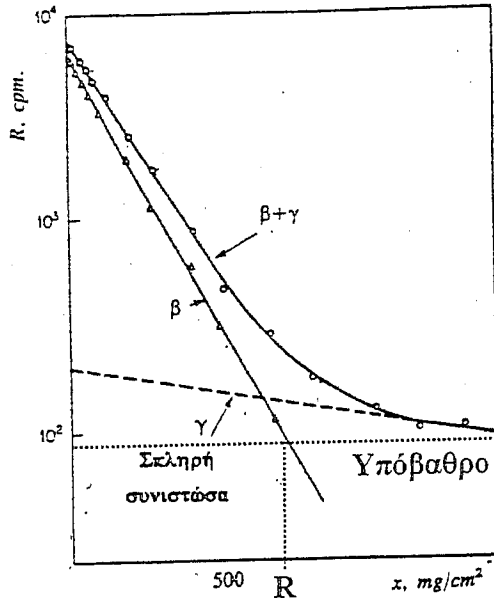
## 3.2 Μέθοδος

### 3.2.1. Πειραματική διάταξη

Για να πραγματοποιήσουμε το πείραμα χρειαζόμαστε:

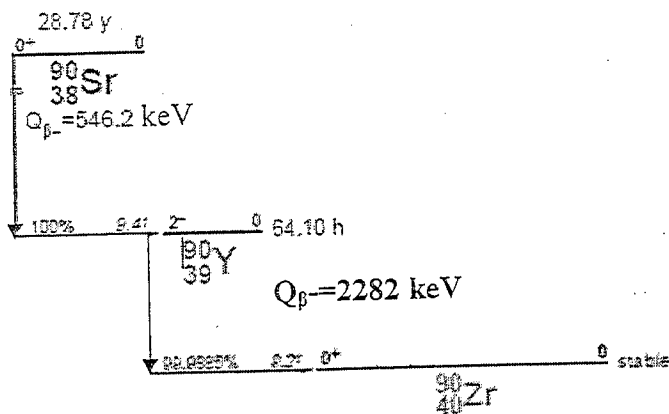
1. Έναν απαριθμητή G.M.
2. Μια μονάδα επικοινωνίας H/Y με G.M.

3. Ένα προσωπικό H/Y



Σχήμα 3.3: Προσδιορισμός της μέγιστης εμβέλειας σωματιδίων β. Η κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα είναι λογαριθμική.

4. Πηγή σωματιδίων β: <sup>90</sup>Sr. Το διάγραμμα αποδιέγερσης της πηγής <sup>90</sup>Sr αποδίδεται γραφικά ως εξής:



5. Απορροφητές αργιλίου πάνω στους οποίους αναφέρεται το ισοδύναμο πάχος σε  $\text{mgr/cm}^2$  ή  $\text{gr/cm}^2$ .
6. Μια πλαστική βάση για τη στήριξη του G.M. των απορροφητών και της πηγής.
7. Μια λαβίδα για ραδιενεργές πηγές.
8. Ένα χάρακα.

Η λειτουργία του απαριθμητή G.M. και η μέθοδος καταγραφής των μετρήσεων στον Η.Υ. περιγράφεται στην Άσκηση 28.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ. Χαραλάμπους, Εργαστηριακές Ασκήσεις Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής, Θεσσαλονίκη 1983, β' έκδοση.
2. A. Melissinos, EXPERIMENTS IN MODERN PHYSICS, Pergamon Press, 1968, σελ. 14-20.
3. W. Price, NUCLEAR RADIATION DETECTION, McGraw-Hill, 1964, σελ. 14-20.
4. Κ. Αλεξόπουλος, Τόμος 3, ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ, 1963, σελ. 160-163.
5. M. Alonso-Finn, Vol. 3, FUNDAMENTAL UNIVERSITY PHYSICS, σελ. 340-348.
6. W.N. Cottingham, D.A. Greenwood, Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, σελ. 180-105 μετάφραση Κ.Σαρηγιάννης.

### 3.2.2. Εκτέλεση του πειράματος

**ΠΡΟΣΟΧΗ :** Μην αγγίζετε ποτέ τις ραδιενεργές πηγές με τα χέρια. Χρησιμοποιείτε πάντα τη λαβίδα.

1. Μετρήστε την ακτινοβολία του υποστρώματος για 6 min. Υπενθυμίζεται ότι ως υπόστρωμα ορίζεται το σύνολο των γεγονότων που προέρχονται από όλα τα άλλα αίτια, εκτός από τις υπό μέτρηση πηγές και οφείλεται κυρίως στην κοσμική ακτινοβολία και τη ραδιενέργεια του περιβάλλοντος.

2. Τοποθετήστε, με τη λαβίδα, την πηγή β ( $^{90}\text{Sr}$ ) στην κατάλληλη υποδοχή, στον πυθμένα της πλαστικής βάσης και μετρήστε τον αριθμό κρούσεων  $K_{\beta}$  επί 3 min. Η πηγή θα πρέπει να τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καταμετράται ο μέγιστος δυνατός αριθμός κρούσεων.

3. Παρεμβάλλετε μεταξύ πηγής και απαριθμητή το λεπτότερο φύλλο αργιλίου και μετρήστε και πάλι τον αριθμό κρούσεων επί 3 min.

Συνεχίστε με τον ίδιο τρόπο προσθέτοντας διαδοχικά φύλλα Al (προτεινόμενο βήμα  $\sim 100 \text{ mg/cm}^2$ ) και πάρτε μετρήσεις για διάφορα πάχη x μέχρις ότου οι μετρήσεις σταθεροποιηθούν στον αριθμό κρούσεων του υποστρώματος  $N_{\beta}$ . Μη σταματήσετε τις μετρήσεις αν δεν έχετε φθάσει τουλάχιστον  $1400 \text{ mgr/cm}^2$ . Συμπληρώστε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα Ι.

Πίνακας Ι

Φύλλα Al	$x_{\text{Al}}$	$K_{\beta}$	$N_{\beta}$	$N_{\beta}-N_{\beta}$	$\Delta(N_{\beta}-N_{\beta})$

4. Να σημειώσετε την ενεργότητα της πηγής  $^{90}\text{Sr}$  που χρησιμοποιήσατε (σε  $\mu\text{Ci}=0,37 \times 10^5$  διασπάσεις/s) καθώς και το χρόνο κατασκευής της. Έχοντας υπόψη ότι αυτά τα σωματίδια-β εκπέμπονται ισότροπα σε όλο το χώρο, να μετρήσετε (εκτιμήσετε) τη διάμετρο του παραθύρου του G.M. (χωρίς να τον μετακινήσετε από τη θέση του) καθώς και την απόσταση πηγής-απαριθμητή.

### 3.3 Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων

#### 3.3.1 Προσδιορισμός μέγιστης εμβέλειας και μέγιστης ενέργειας των σωματιδίων-β.

1. Από τους αριθμούς κρούσεων για 3 min,  $K_\beta$ , υπολογίστε τους ρυθμούς κρούσεων ανά min  $N_\beta$ , και συμπληρώστε τις υπόλοιπες στήλες του ΠΙΝΑΚΑ I.
2. Να αποδώσετε γραφικά τη συνάρτηση  $\ln(N_\beta - N_b) = f(x_{AI})$ . Θα πρέπει να λάβετε υπόψη και τα αντίστοιχα σφάλματα και να χαράξετε την καλύτερη δυνατή ευθεία προσαρμογής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.
3. Από την ευθεία που χαράζατε, βρείτε το σημείο τομής με την αντίστοιχη σταθερά του υποβάθρου ( $y = \ln N_b$ ), προσδιορίστε τη μέγιστη εμβέλεια  $R$  και εκτιμήστε το σφάλμα  $\delta R$ .
4. Υπολογίστε τη μέγιστη κινητική ενέργεια  $E_m$  των σωματιδίων  $\beta$  και το σφάλμα  $\delta E_m$  με βάση τη σχέση (3.4).
5. Να υπολογίσετε τα ποσοστά απώλειας ενέργειας των σωματιδίων βήτα από ακτινοβολία και από συγκρούσεις από την πηγή  $^{90}\text{Sr}$  που χρησιμοποιήσατε, με βάση τη σχέση (3.2) και το ενεργειακό διάγραμμα αποδιέγερσης του  $^{90}\text{Sr}$ . Μπορεί πραγματικά η σκληρή συνιστώσα να θεωρηθεί αμελητέα στην περίπτωση του  $^{90}\text{Sr}$ ; Επιβεβαιώνεται κάτι τέτοιο από τα πειραματικά σας δεδομένα;
6. Με δεδομένο το ενεργειακό διάγραμμα αποδιέγερσης του  $^{90}\text{Sr}$  και με τη χρήση του λογισμικού Monte-Carlo ESTAR που διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο, το οποίο δίδει αξιόπιστες θεωρητικές προβλέψεις, συγκρίνετε την αναμενόμενη εμβέλεια των σωματιδίων βήτα του  $^{90}\text{Sr}$  στο αλουμίνιο με την πειραματική τιμή που προσδιορίσατε στο ερώτημα 3. Είναι η πειραματική τιμή μικρότερη και κατά πόσο; Πού αποδίδετε τη διαφορά αυτή;
7. Με βάση το βήμα (4) εκτέλεσης των μετρήσεων (γεωμετρία πειραματικής διάταξης και στοιχεία πηγής), να υπολογίσετε τον αριθμό  $M_\beta$  των σωματιδίων-β που αναμένονται θεωρητικά να εισέλθουν στον ανιχνευτή ανά min κατά την ημερομηνία που πραγματοποιήσατε τις μετρήσεις. Με βάση την τιμή αυτή και την τιμή  $N_\beta$  χωρίς απορροφητή (στην ίδια απόσταση) και υποθέτοντας ότι δεν απορροφώνται καθόλου σωματίδια-β από τον αέρα και το παράθυρο, να υπολογίσετε το συντελεστή απόδοσης  $\eta$  του απαριθμητή G.M. ( $\eta = \text{λόγος πειραματικά ανιχνευόμενων προς θεωρητικά αναμενόμενων}$ ).