

ΑΣΚΗΣΗ 8

ΜΕΤΡΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΗΜΙΖΩΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

Σκοπός του πειράματος

Η μέτρηση του χρόνου ημιζωής του θυγατρικού ραδιενεργού πυρήνα ^{137m}Ba .

Εισαγωγή

Στις αρχές του αιώνα οι Soddy και Rutherford ανακάλυψαν ότι τα ραδιενεργά στοιχεία διασπώνται με εκθετικό τρόπο. Γενικά εάν τη χρονική στιγμή $t=0$ ο αριθμός πυρήνων ενός ραδιοϊσοτόπου είναι N_0 , τότε ο αριθμός των πυρήνων του αρχικού ραδιοϊσοτόπου που θα παραμείνουν αδιάσπαστοι μετά την πάροδο χρόνου t δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad 8.1$$

Στη σχέση αυτή η σταθερά λ ονομάζεται σταθερά ή ρυθμός διάσπασης, είναι χαρακτηριστική για κάθε ραδιοϊσότοπο και εκφράζει την πιθανότητα διάσπασης του πυρήνα ανά μονάδα χρόνου. Ο ρυθμός διάσπασης εκφράζεται συναρτήσει του χρόνου ημιζωής του ραδιοϊσοτόπου $T_{1/2}$ ως:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad 8.2$$

όπου ως χρόνος ημιζωής του ραδιοϊσοτόπου ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την μείωση του αριθμού των πυρήνων στο μισό του αρχικού. Ο ρυθμός αποδιέγερσης

$$R(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \quad 8.3$$

ονομάζεται ενεργότητα ή ραδιενέργεια του ασταθούς πυρήνα.

Μέθοδος

Το ^{137}Cs είναι ένα ραδιοϊσότοπο με χρόνο ημιζωής 30.17 έτη το οποίο μεταπίπτει με διάσπαση β^- (με πιθανότητα 94.6%) στη δεύτερη διεγερμένη κατάσταση του ^{137}Ba (βλ. Σχήμα 8.1). Η στάθμη αυτή αποδιεγείρεται προς τη θεμελιώδη κατάσταση με εκπομπή ακτινοβολίας γ ενέργειας 661.6 keV, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.1 και έχει χρόνο ημιζωής 2.55min σχετικά μεγάλο για τους τυπικούς χρόνους αποδιέγερσης των πυρηνικών καταστάσεων μέσω H-M ακτινοβολίας που είναι της τάξης των $10^{-10} - 10^{-15}$ s. Για το λόγο αυτό η στάθμη αυτή ονομάζεται και ισομερής ή μετασταθής (isomeric ή metastable) και συμβολίζεται με m (^{137m}Ba). Το χρόνο ημιζωής των θυγατρικών διεγερμένων πυρήνων ^{137m}Ba (2.55 min) μπορούμε να τον μετρήσουμε εύκολα με το βασικό εξοπλισμό του εργαστηρίου. Ας υποθέσουμε ότι διαθέτουμε μια καθαρή πηγή ^{137m}Ba αρχικού

αριθμού πυρήνων N_0 . Ο προσδιορισμός του χρόνου ημιζωής του ^{137m}Ba μπορεί να γίνει με την καταγραφή της μεταβολής της ενεργότητας του ^{137m}Ba συναρτήσει του χρόνου δηλαδή του αριθμού των ακτίνων γ που καταμετρώνται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Δt συναρτήσει του χρόνου.

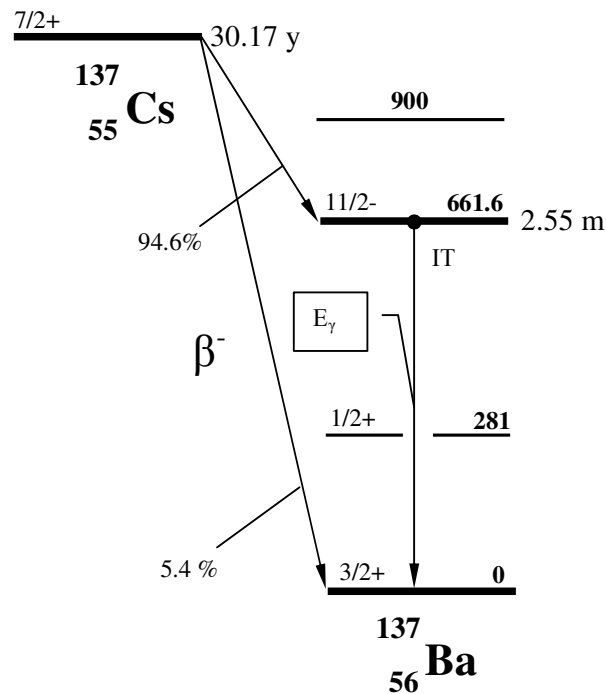
Η ενεργότητα ακολουθεί τον ίδιο εκθετικό νόμο εξέλιξης (8.1):

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad 8.4$$

και

$$\ln R = \ln R_0 - \lambda t \quad 8.5$$

όπου R_0 είναι η ενεργότητα στην αρχή της μέτρησης. Ο χρόνος ημιζωής επομένως μπορεί να προσδιοριστεί με προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στη γραμμική σχέση (8.5) και με τη βοήθεια της σχέσης 8.2.

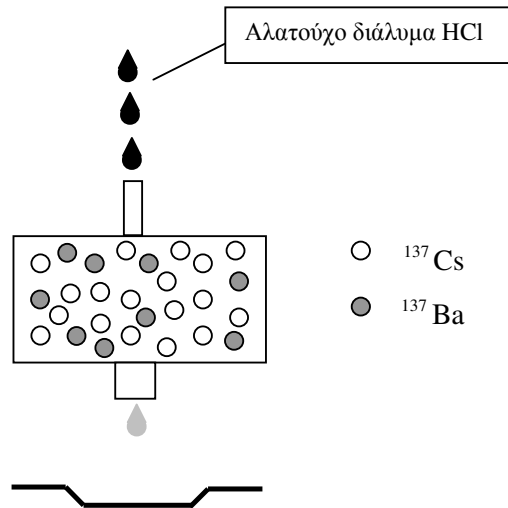


Σχήμα 8.1 Διάγραμμα διάσπασης του ραδιενεργού πυρήνα ^{137}Cs .

Η συλλογή των πειραματικών δεδομένων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ανιχνευτή NaI(Tl) και πολυκαναλικού αναλυτή (MCA) 1024 καναλιών σε λειτουργία πολυκαναλικής κλίμακας (MCS). Στη λειτουργία αυτή κάθε κανάλι (θέση μνήμης) αποθηκεύει τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται στο χρονικό διάστημα Δt το οποίο μπορεί να προκαθοριστεί μέσω κατάλληλου λογισμικού. Στο τέλος της μέτρησης επομένως το φάσμα περιέχει τη μεταβολή του ρυθμού των εκπεμπομένων φωτονίων στο διάστημα Δt συναρτήσει του χρόνου.

Η ραδιενεργός πηγή ^{137m}Ba που θα χρησιμοποιήσετε στο εργαστήριο προκύπτει από ένα φιαλίδιο που περιέχει ^{137}Cs και ^{137m}Ba σε κατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας κατά την οποία οι ενεργότητες του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα είναι ίσες. Στην περίπτωση αυτή ο ρυθμός διάσπασης καθορίζεται από το χρόνο

ημιζωής του μητρικού πυρήνα, στη συγκεκριμένη περίπτωση του ^{137}Cs (30 y) που είναι ανέφικτο να μετρηθεί στον τυπικό χρόνο των 2 h μιας εργαστηριακής μέτρησης, κατά τη διάρκεια της οποίας η ενεργότητα του ^{137}Cs παραμένει ουσιαστικά σταθερή. Η απομόνωση του $^{137\text{m}}\text{Ba}$ από το ^{137}Cs επιτυγχάνεται με χημικό διαχωρισμό, ρίχνοντας στο φιαλίδιο αλατούχο διάλυμα HCl οξέος που δεσμεύει επιλεκτικά το Ba το οποίο και συλλέγεται σε κατάλληλο δισκίο (σχήμα 8.2)



Σχήμα 8.2 Σχηματική αναπαράσταση του χημικού διαχωρισμού του Ba από το Cs.

Εξοπλισμός

1. Ανιχνευτής NaI(Tl) με MCA
2. Φιαλίδιο ^{137}Cs , πηγές ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn

Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, Π.Ασημακόπουλος, Ιωάννινα, 2002, σελ. 88.

Πειραματική Διαδικασία

1. Χρησιμοποιήστε τις πηγές ^{22}Na και ^{54}Mn για την ενεργειακή βαθμονόμηση του φάσματος. Επιβεβαιώστε την ενεργειακή βαθμονόμηση καταγράφοντας το φάσμα εκπομπής της πηγής ^{137}Cs .
2. Προκειμένου να επιλέξετε στο φάσμα τη φωτοκορυφή 661.6 keV μετακινήστε με το ποντίκι τα κίτρινα τριγωνάκια στον οριζόντιο άξονα του φάσματος. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλονται οι τιμές των LLD (Lower Level Discriminator) και ULD (Upper Level Discriminator) ώστε στο φάσμα να καταγράφονται γεγονότα μέσα στο επιθυμητό «παράθυρο» και να εμφανίζεται τελικά μόνο η φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στα 661.6 keV. Για να αυξηθεί η στατιστική των μετρήσεών σας μπορείται να διευρύνετε το «παράθυρο» προς τα αριστερά του φάσματος ώστε να

συμπεριλάβετε και τα γεγονότα από τη σκέδαση Compton της φωτοκορυφής 661.6 keV.

3. Προκειμένου κάθε κανάλι (θέση μνήμης) να αποθηκεύει τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται στο χρονικό διάστημα Δt , θα πρέπει να μεταβάλλετε την οριζόντια κλίμακα ενέργειας σε κλίμακα χρόνου επιλέγοντας **multi channel scaling** στο menu **mode**.
4. Στο menu **settings** επιλέξτε **MCS**. Εισάγετε χρόνο καταγραφής **dwel time** 1sec.
5. Απομακρύνετε όλες τις πηγές και καταγράψτε το φάσμα υποβάθρου. Μεταφέρετε το φάσμα στη θέση μνήμης **Bg.Buffer** μέσω της εντολής **transfer**.
6. Παρακολουθήστε τον υπεύθυνο του εργαστηρίου στη διαδικασία διαχωρισμού του Ba από το φιαλίδιο. Η διαδικασία είναι απολύτως ασφαλής, όμως απαιτείται εμπειρία για την επιτυχή υλοποίησή της.
7. Εισάγετε με προσοχή το δισκίο με το διάλυμα του Ba στην πρώτη θέση κάτω από τον ανιχνευτή και καταγράψτε το φάσμα. **ΠΡΟΣΟΧΗ** μην σας χυθεί το υγρό, το διάλυμα είναι ραδιενεργό. Θυμηθείτε πάντως ότι σε ~30min θα έχει αποδιεγερθεί πλήρως.
8. Αφαιρέστε το φάσμα υποβάθρου μέσω της εντολής Bg subtract και σώστε το καθαρό φάσμα (απαλαγμένο από το υπόβαθρο) με τη μορφή binary file (*.ssf) και tab separated text (*.tsv).
9. Εκτυπώστε το καθαρό φάσμα σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα και κάντε μια πρώτη εκτίμηση του χρόνου ημιζωής για να ελέγξετε αν είναι στη σωστή τάξη μεγέθους.
10. Καταγράψτε το φάσμα σε δισκέττα για πιο αναλυτική και συστηματική μελέτη στο σπίτι σας.
11. Στο menu **mode** θέστε πάλι **pulse height** ώστε το φάσμα να επανέλθει στην ενεργειακή κλίμακα.

Επεξεργασία των Μετρήσεων

1. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι να προσδιορίσετε το χρόνο ημιζωής από το γράφημά σας. Δοκιμάστε και τους τρεις τρόπους.

α) Από το γράφημα σε γραμμική κλίμακα των πειραματικών σας μετρήσεων, εκτιμήστε το χρόνο T για τον οποίο η ενεργότητα ελαττώνεται στο μισό, καθώς και το αντίστοιχο σφάλμα του. Αυτός είναι ένας γρήγορος τρόπος για την εκτίμηση του χρόνου ημιζωής αλλά σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να είναι ο μοναδικός.

β) Στο γράφημα των δεδομένων σε ημιλογαριθμική κλίμακα, σχεδιάστε μια ευθεία που διέρχεται από τα περισσότερα πειραματικά σας σημεία, κυρίως από αυτά που έχουν τις μεγαλύτερες τιμές και υπολογίστε την κλίση της ευθείας. Η κλίση είναι η σταθερά διάσπασης λ , και έχει μονάδες 1/sec. Υπολογίστε ακολούθως το χρόνο ημιζωής μέσω της σχέσης 8.2 και εκτιμήστε το σφάλμα του.

γ) Χρησιμοποιήστε μια ρουτίνα προσαρμογής για γραμμικές σχέσεις, πχ το πρόγραμμα ORIGIN, για να υπολογίσετε την κλίση, τη σταθερά διάσπασης λ , το χρόνο ημιζωής και το σφάλμα του. Για το σκοπό αυτό θα χρειαστεί να ανοίξετε το αρχείο που περιέχει τα δεδομένα της διάσπασης του ^{137m}Ba με έναν κειμενογράφο

(editor) πχ το notepad. Αφαιρέστε στην αρχή του αρχείου όσες πληροφορίες δεν αντιστοιχούν στη στήλη χρόνος- γεγονόςτα και σώστε εκ νέου το αρχείο ως *.asc.

2. Συγκρίνετε τα πειραματικά αποτελέσματα με τον αναμενόμενο χρόνο ημιζωής. Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.

3. Υπολογίστε τον αριθμό των διεγερμένων πυρήνων του ^{137m}Ba στην κατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας, γνωρίζοντας ότι η ενεργότητα της πηγής του ^{137}Cs είναι $5\mu\text{Ci}$. Υπολογίστε την αντίστοιχη μάζα του ραδιενεργού Ba.

4. Αν διαταράξουμε πλήρως την κατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας ($^{137}\text{Cs} - ^{137m}\text{Ba}$), απομακρύνοντας όλο το ^{137m}Ba , εκτιμήστε αναλυτικά το χρόνο που απαιτείται για να βρεθεί και πάλι το σύστημα σε ραδιενεργό ισορροπία ώστε να είμαστε σε θέση να επαναλάβουμε το πείραμα.