

Άσκηση 4 - Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος

Εισαγωγικά

Το σύνολο του γνωστού σύμπαντος απαρτίζεται από **χημικά στοιχεία**. Οι ιδιότητες των χημικών στοιχείων είναι υπεύθυνες για τις διεργασίες που διαμορφώνουν το **φυσικό περιβάλλον** μέσα στο οποίο ζούμε και κινούμαστε καθημερινά. Οι πρωτοποριακές μελέτες του J.J. Thomson ανέδειξαν για πρώτη φορά το 1912 ότι τα χημικά στοιχεία μπορούν να υπάρξουν σε διαφορετικές μορφές **με τις ίδιες χημικές ιδιότητες, αλλά διαφορετικές πυρηνικές ιδιότητες**, γνωστές ως **ισότοπα**. Ο λόγος είναι ότι τα ισότοπα έχουν στον πυρήνα τους τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (κι επομένως εξακολουθούν να είναι το ίδιο χημικό στοιχείο), αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων (κι επομένως είναι διαφορετικοί πυρήνες).

Στην πλειονότητά τους, τα ισότοπα είναι **ασταθή (ή ραδιενεργά)**. Από τα περίπου 3500 γνωστά ισότοπα που υπάρχουν στη φύση ή έχουν παραχθεί μέσω πυρηνικών αντιδράσεων στο εργαστήριο παραπάνω από 3000 είναι ασταθή. Η θεμελιώδης ιδιότητα της αστάθειας στα ραδιενεργά ισότοπα εκφράζεται ως **αυθόρμητος μετασχηματισμός** προς άλλα ισότοπα. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **μεταστοιχείωση**. Η μεταστοιχείωση στη φύση μπορεί να ανιχνευθεί και να μελετηθεί μέσω της **εκπομπής ακτινοβολίας**, ένα χαρακτηριστικό που είναι καθοριστικής σημασίας για την κατανόηση των ισοτοπικών ιδιοτήτων, τόσο σε θεμελιώδες, όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Η μελέτη των ραδιοϊσοτόπων ως συνιστώσα του ευρύτερου φυσικού περιβάλλοντος (Εικόνα 1) είναι πολύ σημαντική. Ενδεικτικά αναφέρουμε:

➤ Προστασία του περιβάλλοντος:

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι εν δυνάμει απειλητική και επικίνδυνη για τα έμβια όντα, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου, και τα επίπεδά της πρέπει να παρακολουθούνται, ώστε να υπάρχει αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων.

➤ Χρήση ραδιοϊχνηθετών για μελέτες βιωσιμότητας του περιβάλλοντος

Οι διάφορες συνιστώσες του περιβάλλοντος μπορούν να μελετηθούν μέσω της ανίχνευσης φυσικών ραδιοϊσοτόπων που βρίσκονται ήδη σε μικρές ποσότητες, αλλά η ευκολία ανίχνευσής τους πληροφορεί για τις δυναμικές διεργασίες σε διάφορα φυσικά φαινόμενα, π.χ. κινητική σε εδάφη, σεισμολογία, μεταφορά χημικών ουσιών σε υδάτινα και ατμοσφαιρικά οικοσυστήματα και πολλά άλλα.

➤ Χρονολόγηση

Η ευρεία κλίμακα χρόνων ζωής των διάφορων ραδιοϊσοτόπων στο φυσικό περιβάλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρονολόγηση συστημάτων ή αποτελεσμάτων φυσικών διεργασιών με ιδιαίτερα αξιόπιστα αποτελέσματα. Ιδιαίτερα γνωστή είναι η **ραδιοχρονολόγηση** με χρήση του ασταθούς ισότοπου του άνθρακα ^{14}C , το οποίο δημιουργείται λόγω κοσμικής ακτινοβολίας (τα σταθερά ισότοπα του άνθρακα που βρίσκουμε στη φύση, π.χ. στις οργανικές ενώσεις, είναι ο ^{12}C / 98.9% και ο ^{13}C / 1.1%).



Εικόνα 1 - Πηγές ακτινοβολίας στο φυσικό περιβάλλον [1]

Η μελέτη των ραδιοϊσοτόπων έχει πολύ περισσότερες εφαρμογές, οι οποίες εφάπτονται του αντικειμένου της παρούσας άσκησης και χρησιμοποιούν τις ίδιες ή συναφείς μεθόδους ανίχνευσης, καταγραφής και αξιολόγησης. Οι σημαντικότερες είναι:

- Παραγωγή πυρηνικής ενέργειας
- Προστασία από ραδιολογικά ατυχήματα
- Ακτινοδιάγνωση και ακτινοθεραπεία στην ιατρική
- Χαρακτηρισμός υλικών και έλεγχος βιομηχανικής παραγωγής
- Μελέτη αστροφυσικών διεργασιών και εξέλιξης αστέρων

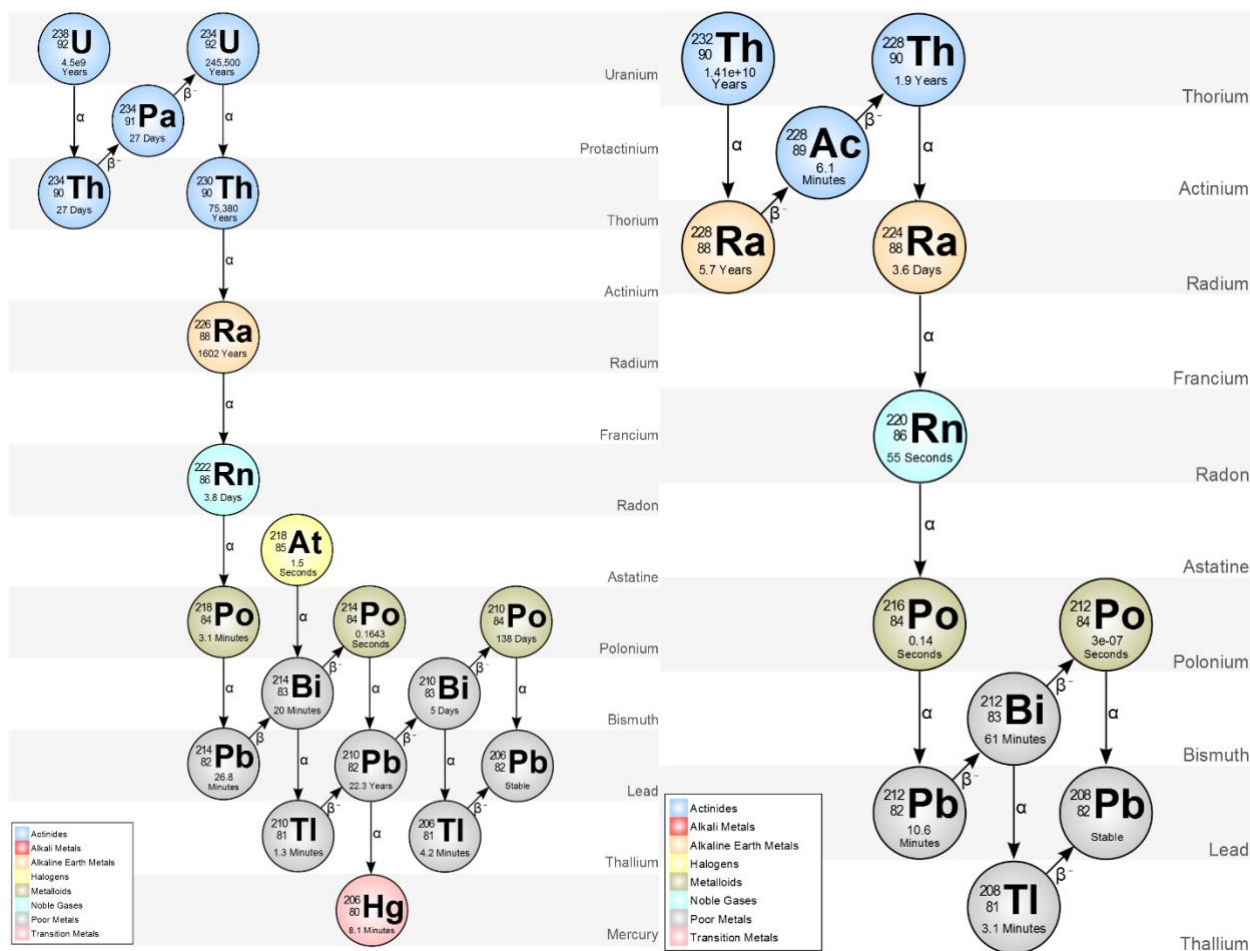
Τρόποι μεταστοιχείωσης

Βασικοί τρόποι μεταστοιχείωσης είναι η **διάσπαση α**, στην οποία ένα ασταθές ισότοπο εκπέμπει έναν σωματίο άλφα (πυρήνας ^4He) και παράγει ένα νέο ισότοπο, καθώς και η **διάσπαση βήτα**, κατά την οποία ο αρχικός πυρήνας εκπέμπει είτε ένα ηλεκτρόνιο (e^- / διάσπαση β^-) είτε ένα ποζιτρόνιο (e^+ / διάσπαση β^+). Υπάρχουν και άλλες διεργασίες, όπως η **ηλεκτρονική σύλληψη** και η **αυθόρμητη σχάση**, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν τα ραδιοϊσότοπα σε μεταστοιχείωση με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Ο αρχικός πυρήνας ονομάζεται **μητρικός**, ενώ ο παραγόμενος πυρήνας **θυγατρικός**.

Στην (πολύ συχνή) περίπτωση που ο θυγατρικός πυρήνας είναι και αυτός ασταθής ακολουθεί ένα ή περισσότερα στάδια διάσπασης, τα οποία σχηματίζουν μια **αλυσίδα διάσπασης**. Μια αλυσίδα διάσπασης δεν είναι απαραίτητο να παρουσιάζει αποκλειστικά ένα μόνο είδος διάσπασης σε κάθε στάδιο μεταστοιχείωσης. Στην πραγματικότητα οι γνωστές αλυσίδες στη

φύση παρουσιάζουν πολλαπλά στάδια με διασπάσεις α και β , με ακόλουθη εκπομπή ακτινοβολίας γ όταν οι θυγατρικοί πυρήνες δημιουργούνται σε διεγερμένες καταστάσεις.

Γνωρίζουμε ότι οι φυσικές αλυσίδες διάσπασης είναι τέσσερις συνολικά, έχοντας ως μητρικούς πυρήνες μακρόβια φυσικά ραδιοϊσότοπα (χρόνοι ημιζωής $\sim 10^7$ - 10^{10} a). Από τις αλυσίδες αυτές οι πιο σημαντικές είναι του ουρανίου-238 (^{238}U) και του θορίου-232 (^{232}Th). Στις ποσότητες φυσικού ουρανίου που βρίσκουμε στο ηλιακό μας σύστημα, υπάρχει σε σχετική περιεκτικότητα 0.7% και το ισότοπο ουράνιο-235 (^{235}U), το οποίο είναι ο μητρικός πυρήνας της τρίτης φυσικής αλυσίδας διάσπασης, ενώ το ποσειδώνιο-237 (^{237}Np) είναι ο μητρικός πυρήνας της τέταρτης αλυσίδας. Η τελευταία αλυσίδα μας είναι γνωστή μόνο από τον τελικό θυγατρικό πυρήνα ^{205}Tl που βρίσκουμε στη φύση, καθώς όλα τα υπόλοιπα ραδιοϊσότοπα που την αποτελούν έχουν εξαφανιστεί (γιατί;). Στην Εικόνα 2 εμφανίζονται οι σειρές ^{238}U και ^{232}Th .



Εικόνα 2 - Σχηματική αναπαράσταση των φυσικών αλυσίδων διάσπασης των μακρόβιων φυσικών ισότοπων ^{238}U (αριστερά) και ^{232}Th (δεξιά) [2]

Πρόελευση ραδιοϊσοτόπων

Τα ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον γύρω μας είναι είτε φυσικής, είτε ανθρωπογενούς προέλευσης. Η αρχική πηγή δημιουργίας εντοπίζεται στην πρωτογενή πυρηνοσύνθεση κατά τη Μεγάλη Έκρηξη για τα πολύ ελαφρά στοιχεία (H, He, Li), ενώ για τα βαρύτερα απαιτούνται έντονες διεργασίες αστρικής πυρηνοσύνθεσης, όπως κατά τη διάρκεια

εκρήξεων υπερκαινοφανών αστέρων ή κοσμικών συνενώσεων αστέρων νετρονίων με μαύρες τρύπες, οι οποίες μπορούν να διασπείρουν βαριά ισότοπα στο σύμπαν. Στην αστρική πυρηνοσύνθεση, απαιτείται ένα τεράστιο δίκτυο πυρηνικών αντιδράσεων για να περιγραφούν (~100'000 αντιδράσεις). Επίσης, πολλά από τα φυσικά ραδιοϊσότοπα είναι αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων της κοσμικής ακτινοβολίας με τα χημικά στοιχεία που βρίσκονται στα εξωτερικά στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας (π.χ. ^{10}B , ^{14}C).

Υπάρχουν ανθρώπινες δραστηριότητες που μπορούν να δημιουργήσουν και να διασπείρουν ραδιοϊσότοπα στο φυσικό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα οι δοκιμές πυρηνικών όπλων κατά τις δεκαετίες 1950-60, η εναπόθεση ραδιενεργών καταλοίπων σε βαθιά σημεία των ωκεανών, ή πυρηνικά και ραδιολογικά ατυχήματα (π.χ. Chernobyl 1986). Τα περισσότερα από αυτά τα ραδιοϊσότοπα είναι βραχύβια και μεταστοιχειώνονται γρήγορα σε σταθερά, χωρίς να δημιουργούν περαιτέρω προβλήματα στη διαχείρισή τους ή την προστασία του οικοσυστήματος. Υπάρχουν όμως άλλα με σημαντικούς χρόνους ημιζωής, για τα οποία πρέπει να υπάρχει συνεχής καταγραφή και παρακολούθηση. Τα πιο σημαντικά είναι τα ανθρωπογενή ραδιοϊσότοπα ^{137}Cs και ^{90}Sr , που παράγονται κατά τη σχάση πυρηνικών καυσίμων και μπορούν να βρεθούν σε σημαντικές ποσότητες σε διάφορες συνιστώσες του οικοσυστήματος και εν δυνάμει να επιδράσουν αρνητικά τον ανθρώπινο πληθυσμό (εξωτερική ακτινοβολήση, τροφική αλυσίδα).

Χρόνος ημιζωής, και ραδιενεργή ισορροπία

Πολύ σημαντική έννοια στη μελέτη των ραδιοϊσοτόπων είναι η έννοια της **ισορροπίας** μεταξύ του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα. Η ισορροπία σχετίζεται με το **χρόνο ημιζωής** των ισοτόπων (ισοδύναμα με το **μέσο χρόνο ζωής**, τ , και τη **σταθερά διάσπασης**, λ). Είναι γνωστό από τις αρχές του 1900 ότι η μεταστοιχείωση υπακούει στον νόμο της εκθετικής διάσπασης:

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad (4.1)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι άμεσο πόρισμα ότι $\lambda=1/\tau$ και ότι $t_{1/2}=\tau \ln(2)$, καθώς ο χρόνος ημιζωής εκφράζει το χρονικό διάστημα στο οποίο ο αρχικός πληθυσμός έχει μειωθεί στο μισό.

Δεδομένου ότι η **ενεργότητα** μιας πηγής ορίζεται ως $A=\lambda N$ (και μετριέται σε $\text{Bq}=1$ διάσπαση/s), μπορεί εύκολα ναδειχθεί ότι αν $\lambda_{\text{μητ}} \ll \lambda_{\text{θυγ}}$ τότε σε πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (πρακτικά μετά από $\Delta t=5\tau_{\text{θυγ}}$), επέρχεται εξίσωση των ενεργοτήτων $A_{\text{μητ}}=A_{\text{θυγ}}$. Την κατάσταση αυτή την ονομάζουμε **ραδιενεργή ισορροπία**. Παρόμοια ισχύουν και όταν $\lambda_{\text{μητ}} \leq \lambda_{\text{θυγ}}$, ενώ δεν υπάρχει ισορροπία όταν $\lambda_{\text{μητ}} \gg \lambda_{\text{θυγ}}$.

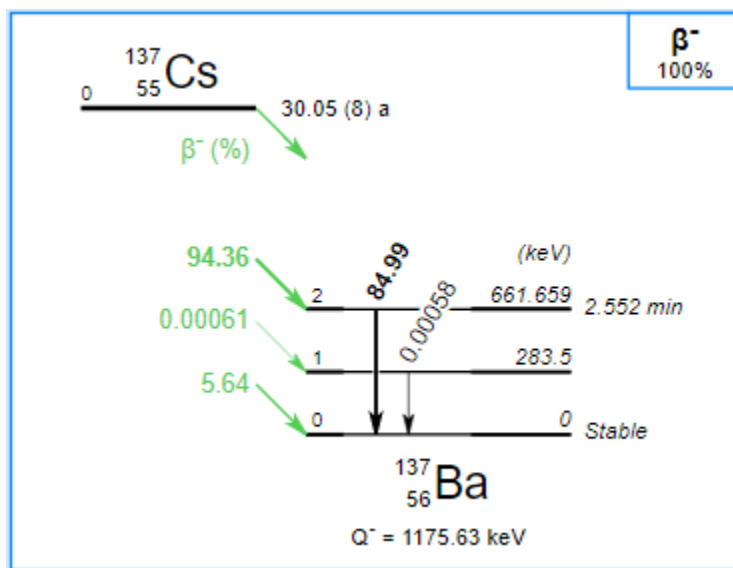
Στο φυσικό περιβάλλον, η ισορροπία εξετάζεται στις διάφορες συνιστώσες του και μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για το μητρικό πυρήνα, μελετώντας τους θυγατρικούς του. Αντίστοιχα, η ύπαρξη ανοικτών συστημάτων που δυναμικές διεργασίες μπορούν να διαταράξουν την επίτευξη ισορροπίας, μπορούν να μελετηθούν πραγματοποιώντας τις αντίστοιχες μετρήσεις.

Ακτινοβολίες α, β, γ

Καθώς τα σωματίδια α και β , τα οποία αποτελούν τους δύο βασικούς τύπους σωματιδιακής ακτινοβολίας έχουν πολύ μικρή εμβέλεια στον αέρα, η φωτεινή ακτινοβολία γ καταδεικνύεται ως σημαντική για την εκτίμηση της πιθανής επίπτωσης που έχει στους ανθρώπινους ιστούς. Οι ακτινοβολίες α και β είναι σημαντικές όταν η απόσταση ακτινοβολήσης είναι μικρή ($<1-10$ cm), όπως στην περίπτωση της εσωτερικής ακτινοβολήσης.

Ένα παράδειγμα σημαντικής εσωτερικής ακτινοβόλησης είναι λόγω της εισπολής του φυσικού ραδιενεργού ραδονίου (^{222}Rn), το οποίο είναι θυγατρικό ισότοπο στην αλυσίδα του ^{238}U και ως ευγενές αέριο εισέρχεται στους πνεύμονες, τους οποίους ακτινοβολεί με σωμάτια α μεγάλης ενέργειας. Η δόση από το ραδόνιο στον ευρύτερο πληθυσμό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (σύσταση γεωλογικού ορίζοντα, υγρασία κτλ.), αλλά είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες επικινδυνότητας για τον οποίο η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει καταδείξει ως βασική αναγκαιότητα την καταγραφή των επιπέδων του γενικότερα.

Η ακτινοβολία γ είναι φωτόνια υψηλής ενέργειας (0.1-10 MeV) και προκύπτει από τα ραδιοϊσότοπα ως αποτέλεσμα μετασχηματισμών στον πυρήνα που οδηγούν στην μετάβαση από μια διεγερμένη στάθμη σε κάποια χαμηλότερη. Η διαφορά της ενέργειας μεταφέρεται στο φωτόνιο γ (με κάποιο πολύ μικρό ποσοστό να δίδεται ως ενέργεια ανάκρουσης του αποδιεγειρόμενου πυρήνα). Καθώς ο πυρήνας πρέπει να είναι σε διεγερση, ώστε να εκπέμψει ακτινοβολία γ , οι αποδιεγέρσεις του είναι συνήθως απόρροια προγενέστερων διεργασιών που θα προκαλέσουν την αρχική διεγερση. Στο φυσικό περιβάλλον, συνήθως πρόκειται για διασπάσεις α και β που αφήνουν τους θυγατρικούς πυρήνες με πλεόνασμα ενέργειας, ώστε τελικά να αποδιεγερθούν μέσω εκπομπής φωτονίων γ . Ένα τέτοιο παράδειγμα απεικονίζεται στο διάγραμμα διάσπασης μια ραδιενεργού πηγής ^{137}Cs (Εικόνα 3), παρόμοιας με αυτήν που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο.



Εικόνα 3 - Διάγραμμα διάσπασης ^{137}Cs . Η εκπομπή ακτινοβολίας γ έπεται της διάσπασης β του μητρικού πυρήνα προς διεγερμένη στάθμη στο θυγατρικό ισότοπο $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (με σχετική πιθανότητα 94.36%). Η εκπομπή του φωτονίου γίνεται με σχετική πιθανότητα 84.99% [3].

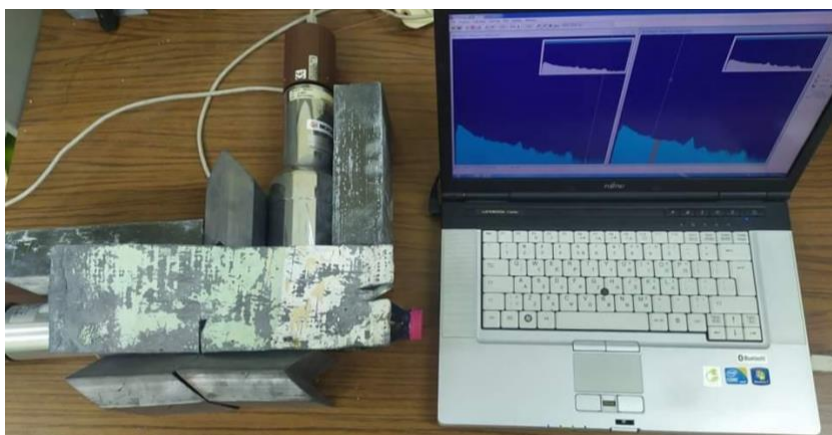
Η ανίχνευση της ακτινοβολίας γ πραγματοποιείται με κατάλληλα ανιχνευτικά συστήματα, των οποίων η αρχή λειτουργίας εκμεταλλεύεται την αλληλεπίδραση φωτεινής ακτινοβολίας με την ύλη. Υπάρχει ποικιλία οργάνων (αέριοι ανιχνευτές, σπινθηριστές κοκ) και οι βασικότεροι τύποι έχουν μελετηθεί ως προς τα χαρακτηριστικά τους στο Εργαστήριο Κορμού (Πυρηνική Φυσική). Οι ασκούμενοι/ες μπορούν να επισκεφθούν τις Ασκήσεις Π1 & Π2 στο αντίστοιχο φυλλάδιο [4]. Στην παρούσα άσκηση θα γίνει χρήση φορητού φασματόμετρου με κρύσταλλο σπινθηριστή NaI(Tl) , αλλά και ενός ανιχνευτικού συστήματος με βάση ημιαγώγιμο κρύσταλλο υψηλής καθαρότητας γερμανίου (HPGe), ο οποίος αποκτά εξαιρετικές ανιχνευτικές ιδιότητες όταν

ψυχθεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες με χρήση υγρού αζώτου (~80 K). Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των ανιχνευτών και των ηλεκτρονικών μονάδων που τις συνοδεύουν.

Φορητό σύστημα φασματομετρίας NaI(Tl)

Το σύστημα φασματομετρίας ακτίνων γ περιλαμβάνει κυλινδρικό κρύσταλλο σπινθηρισμού NaI(Tl) διαμέτρου 76.2 mm και μήκους 76.2 mm, εγκλεισμένο σε προστατευτικό περίβλημα αλουμινίου [5]. Ο σπινθηριστής έχει ενσωματωμένο φωτοπολλαπλασιαστή και ειδική ψηφιακή μονάδα digiSpec® [6]. Η τελευταία είναι κατασκευασμένη ώστε να:

- Παρέχει τροφοδοσία υψηλής τάσης στον ανιχνευτή
- Προενισχύει, ενισχύει και σταθεροποιεί το σήμα
- Ψηφιοποιεί τους παλμούς
- Καταγράφει τα φάσματα μέσω σύνδεσης USB με φορητό Η/Υ



Εικόνα 4 - Το φορητό φασματόμετρο NaI(Tl) που θα χρησιμοποιηθεί στην άσκηση, εδώ κατά τη διάρκεια μέτρησης στο εργαστήριο [8]. Η διάταξη περιλαμβάνει τον ανιχνευτή και θωράκιση μολύβδου για μείωση του υποβάθρου λόγω κοσμικής ακτινοβολίας. Η μονάδα digiSPEC® (καφέ χρώμα) απεικονίζεται περίπου στο κέντρο της φωτογραφίας, ενώ το φάσμα εμφανίζεται στην οθόνη του Η/Υ δεξιά

Ο έλεγχος του φασματόμετρου και όλων των παραπάνω βημάτων ελέγχου και λειτουργίας γίνεται μέσα από το ειδικό λογισμικό MAESTRO® [7] και χωρίς την παρεμβολή άλλων ηλεκτρονικών μονάδων. Ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τις παραμέτρους των φασμάτων (πχ. ενεργειακή βαθμονόμηση, αριθμός καναλιών κτλ) και να επεξεργαστεί τα φάσματα και τις φωτοκορυφές ενδιαφέροντος κατά τη μέτρηση ή αργότερα. Η επίδειξη της χρήσης του λογισμικού θα πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της άσκησης.

Σταθερό σύστημα φασματομετρίας HPGe

Το σταθερό σύστημα φασματομετρίας περιλαμβάνει κρύσταλλο γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High-Purity Ge ή HPGe) με ενσωματωμένο προενισχυτή και κρυοστάτη σε οριζόντια διάταξη. Ο κρύσταλλος τροφοδοτείται από δοχείο Dewar με υγρό άζωτο (77 K), ώστε να ψύχεται σε χαμηλή θερμοκρασία και να αποκτά ημιαγώγιμες ιδιότητες. Η απαίτηση της χαμηλής θερμοκρασίας είναι κρίσιμη ώστε να υπάρξουν οι συνθήκες που θα επιτρέψουν τον κρύσταλλο να λειτουργήσει ως ημιαγώγιμος ανιχνευτής ακτίνων γ .

Εν συντομία, η αρχή λειτουργίας του HPGe στηρίζεται στο ότι η αλληλεπίδραση μιας ακτίνας γ με το ημιαγώγιμο υλικό θα παράξει αρχικά ηλεκτρόνια με ενέργειες πολύ μεγαλύτερες από τις θερμικές ενέργειες. Η αλληλεπίδραση αυτών μπορεί να διεγείρει ηλεκτρόνια από βαθιά κατειλημμένες ζώνες πολύ κάτω από τη ζώνη σθένους σε ενεργειακά επίπεδα πολύ πάνω από τη βάση της ζώνης αγωγιμότητας. Αυτές οι βαθιά εντοπισμένες οπές και τα διεγερμένα ηλεκτρόνια τείνουν να ανακατανέμονται εντός των διαθέσιμων ενεργειακών ζωνών ώσπου οι οπές να βρεθούν στην κορυφή της ζώνης σθένους και τα ηλεκτρόνια στη βάση της ζώνης αγωγιμότητας (Εικόνα 5α). Σε αυτή τη διαδικασία, μπορεί να συμβεί περαιτέρω διέγερση, δίνοντας έναν κατακλυσμό ζευγών ηλεκτρονίων-οπών για κάθε αλληλεπίδραση αρχικού ηλεκτρονίου. Υπό κανονικές συνθήκες, τα επιπλέον διεγερμένα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας αναμένεται να αποδιεγερθούν τελικά και να επιστρέψουν στη ζώνη σθένους, αποκαθιστώντας τον πληθυσμό της ζώνης αγωγιμότητας σε αυτόν που αναμένεται μόνο από τη θερμική διέγερση. Παρουσία ηλεκτρικού πεδίου, αντ' αυτού θα μεταναστεύσουν προς τα πάνω (ηλεκτρόνια) ή προς τα κάτω (τρύπες) (Εικόνα 5β). Ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που παράγονται σχετίζεται άμεσα με την ενέργεια των ακτίνων γάμμα που απορροφάται, E_{abs} .

Βασιζόμενοι στα παραπάνω, στον ανιχνευτή HPGe μπορούμε να μετρήσουμε παλμούς διαφορετικού ύψους για διαφορετικές ενέργειες κι επομένως, όπως και στην περίπτωση του σπινθηριστή NaI(Tl), να έχουμε τις συνθήκες για φασματοσκοπία και όχι απλή ανίχνευση.

Βασικό πλεονέκτημα του HPGe είναι η πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα σε σχέση με τον σπινθηριστή NaI(Tl). Τυπική τιμή είναι 1% για την ακτίνα γ με 662 keV (^{137}Cs) στον HPGe, ενώ αντίστοιχα στο σπινθηριστή είναι 7%. Ένα χρήσιμο μέτρο εκτίμησης της διακριτικής ικανότητας είναι το Full-Width at Half Maximum (FWHM) μιας φωτοκορυφής. Παρά το ότι η αβεβαιότητα γύρω από την κεντρική τιμή της ενέργειας μιας φωτοκορυφής εξαρτάται από την κατανομή Poisson, σε πρακτικό επίπεδο χρησιμοποιείται επιπλέον ένας παράγοντας (παράγοντας Fano), που εκφράζει την παρατηρούμενη διακύμανση στον αριθμό των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται, διαιρούμενη με τη διακύμανση που προβλέπεται από την κατανομή Poisson. Τότε η διακύμανση ($\sigma=2.35 \cdot \text{FWHM}$) εκφράζεται ως [10]:

$$\sigma = \sqrt{F \times E \times \varepsilon} \quad (4.2)$$

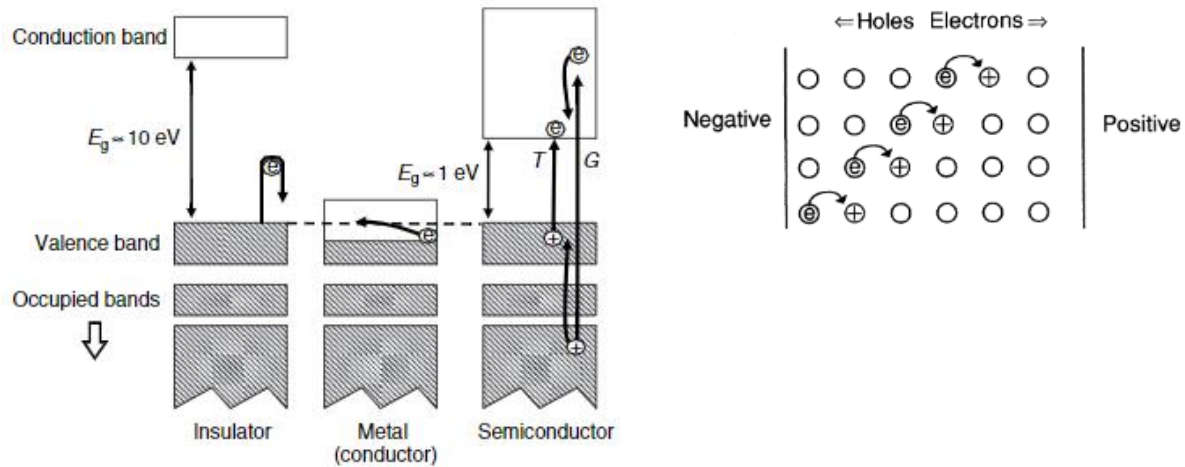
όπου F είναι ο παράγοντας Fano, E (eV) η ενέργεια ενός φωτονίου και ε (eV) η μέση ενέργεια ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Τυπικές τιμές για το γερμάνιο, δίνουν $F = 0.058$.

Παρότι έχει σημαντικά καλύτερη διακριτική ικανότητα, η απόλυτη απόδοση ανίχνευσης ακτινοβολίας γ του HPGe είναι εν γένει χαμηλότερη από αυτήν του NaI(Tl). Συχνά, χρησιμοποιείται η έννοια της **σχετικής απόδοσης** για τους κρυστάλλους HPGe, δηλ. η απόδοση σε σχέση με ένα σπινθηριστή NaI(Tl) διαστάσεων 3"×3". Ο ανιχνευτής του εργαστηρίου είναι σχετικής απόδοσης 22% (ονομαστική τιμή κατασκευαστή).

Ο χαρακτηρισμός ενός ανιχνευτή HPGe περιλαμβάνει το σύνολο των ηλεκτρονικών μονάδων/ ή στοιχείων που περιλαμβάνονται στη συνολική συνδεσμολογία (βλ. διάγραμμα τυπικής συνδεσμολογίας στην Εικόνα 7). Για τη σωστή χρήση του στη μέτρηση ακτίνων γ από περιβαλλοντικά ή άλλα δείγματα, υπάρχουν τρία βήματα χαρακτηρισμού τού ανιχνευτή:

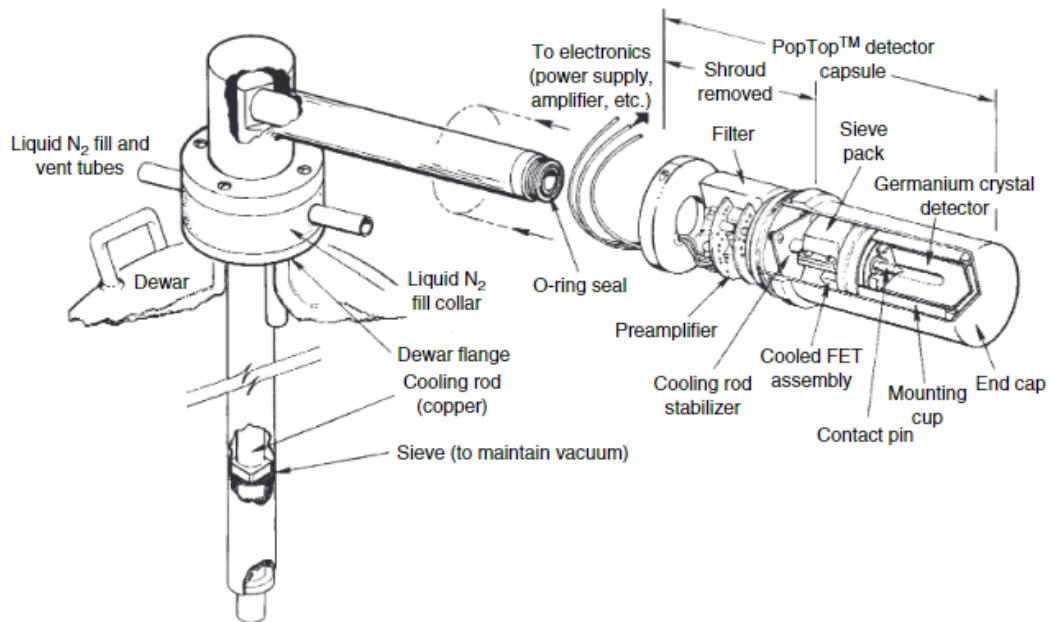
1. Ενεργειακή βαθμονόμηση, δηλ. η σχέση ανάμεσα σε κανάλι και ενέργεια φωτονίου
2. Εύρεση διακριτικής ικανότητας, δηλ. η εξάρτησή της από την ενέργεια

3. Ενεργειακή απόδοση, δηλ. η εύρεση της σχέσης ανάμεσα στα καταγεγραμμένα γεγονότα στον ανιχνευτή και το ρυθμό διάσπασης κάποιου ραδιοϊσοτόπου στο δείγμα

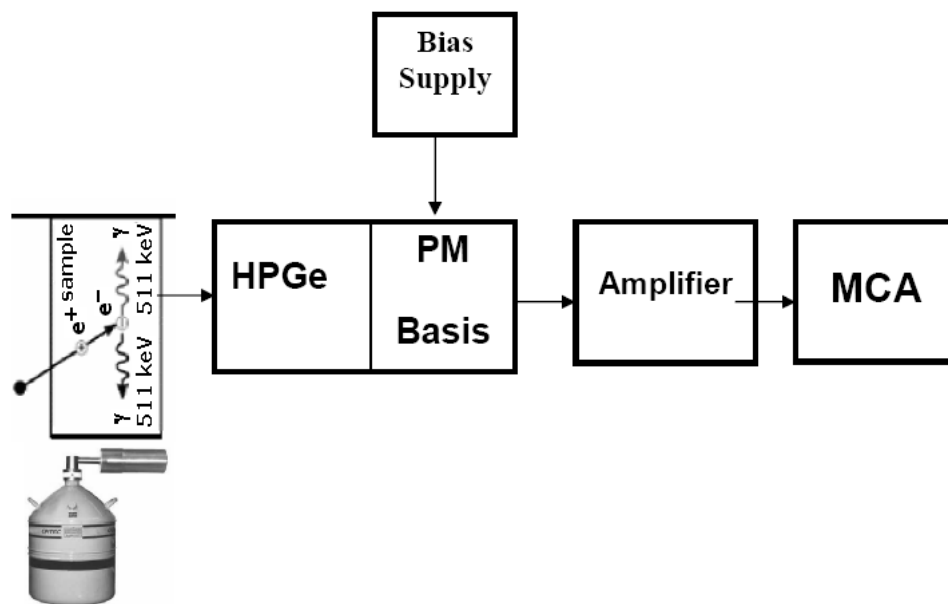


Εικόνα 5α – Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης ηλεκτρονίων-οπών μεταξύ ζώνης σθένους (valence band) και ζώνης αγωγιμότητας (conduction band) σε μονωτή (insulator), αγωγό (conductor) και ημιαγωγό (semiconductor)

Εικόνα 5β – Πρότυπο κίνησης οπών σε στερεά



Εικόνα 6 - Μια σύγχρονη διάταξη ανιχνευτή και προενισχυτή εντός του περιβλήματος του κρυοστάτη – με έναν οριζόντιο κρυοστάτη και ένα δοχείο Dewar για το υγρό άζωτο. Ο ανιχνευτής που απεικονίζεται είναι πανομοιότυπος στα βασικά μέρη κοντά στον κρύσταλλο, διαφέρει μόνο στην τοποθέτηση του δοχείου σε σχέση με τον ανιχνευτή [9]



Εικόνα 7 – Τυπικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ενός ανιχνευτή HPGe που περιλαμβάνει τροφοδοσία, ενίσχυση, ψηφιοποίηση και καταγραφή της ακτινοβολίας



Εικόνα 8 - Ο ανιχνευτής HPGe. Ο κρύσταλλος περιβάλλεται από μολυβδότουβλα συνολικού πάχους 10cm για μείωση του υποβάθρου λόγω κοσμικής ακτινοβολίας. Είναι εμφανές το δοχείο υγρού αζώτου (LN2) το οποίο διατηρεί τον κρύσταλλο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αριστερά διακρίνεται η κονσόλα NIM με τις μονάδες υποστήριξης (τροφοδοτικό υψηλής τάσης και ενισχυτής σήματος).

Και τα τρία βήματα πραγματοποιούνται με σχετικά απλό τρόπο χρησιμοποιώντας βαθμονομημένες ραδιενεργές πηγές, γνωστής ενεργότητας, με τρόπο πολύ παρόμοιο με αυτές των ασκήσεων στο εργαστήριο Κορμού (π.χ. ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co).

Για τον ανιχνευτή HPGe του εργαστηρίου (Εικόνα 8), τα βήματα 1 και 2 πραγματοποιούνται εύκολα μέσα από το λογισμικό ανάλυσης των φασμάτων. Για το βήμα 3 θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ενδιαφέρει η **ολική απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή**, ϵ_{abs} (Full energy photopeak efficiency, FEPE). Αυτή ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού καταγραφής γεγονότων από τον ανιχνευτή σε κάποια ενέργεια E , R , ως προς τον αριθμό των ακτίνων γάμμα που εκπέμπονται από την πηγή. Δηλαδή:

$$\epsilon = \frac{R}{S \cdot P_{\gamma}} \quad (4.3)$$

Energy (keV)	Intensity (%)	Type
40.1186 (-)	37.7 (5)	$X_{\text{K}\alpha 1}$
121.7817 (3)	28.41 (13)	γ
344.2785 (12)	26.59 (12)	γ
1 408.013 (3)	20.85 (8)	γ
39.5229 (-)	20.8 (3)	$X_{\text{K}\alpha 2}$
964.079 (18)	14.50 (6)	γ
1 112.076 (3)	13.41 (6)	γ
6.395 (-)	13.0 (4)	X_{L}
778.9045 (24)	12.97 (6)	γ
45.4777 (-)	11.78 (19)	$X_{\text{K}\beta 1}$
1 085.837 (10)	10.13 (6)	γ
244.6974 (8)	7.55 (4)	γ
867.380 (3)	4.243 (23)	γ
443.965 (3)	3.120 (28)	γ
46.6977 (-)	3.04 (8)	$X_{\text{K}\beta 2}$
411.1165 (12)	2.238 (10)	γ
1 089.737 (5)	1.73 (1)	γ
1 299.142 (8)	1.633 (9)	γ
1 212.948 (11)	1.416 (9)	γ
367.7891 (20)	0.862 (5)	γ
688.670 (5)	0.841 (6)	γ
1 005.272 (17)	0.665 (23)	γ
1 457.643 (11)	0.498 (4)	γ
678.623 (5)	0.470 (4)	γ
586.265 (3)	0.462 (4)	γ

όπου S ο ρυθμός διάσπασης της πηγής (Bq) και P_{γ} η σχετική πιθανότητα εκπομπής της συγκεκριμένης ακτίνας γ (βλ. τη δεύτερη στήλη στην Εικόνα 9).

Για το βήμα 3 μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν διάφορες πηγές ταυτόχρονα, είτε μονοϊσοτοπικές πηγές βαθμονόμησης που εκπέμπουν πολλές ακτίνες γ ταυτόχρονα. Μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πηγές για το σκοπό αυτό είναι η πηγή ευρωπαϊού-152 (^{152}Eu , $t_{1/2} = 13.52(2)$ a). Στην Εικόνα 9 εμφανίζονται οι 30 πιο πιθανές ακτίνες X και γ από τη διάσπαση του ^{152}Eu σε φθίνουσα σειρά σχετικής πιθανότητας εκπομπής (μεσαία στήλη).

Εικόνα 9 – Οι 30 πιο πιθανές ακτίνες X και γ που εκπέμπονται από μια πηγή ^{152}Eu [3].

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Η άσκηση εστιάζει στη μελέτη της ραδιενέργειας στο φυσικό περιβάλλον μέσω φασματομετρίας περιβαλλοντικών δειγμάτων στο εργαστήριο. Προτού χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις, τα φασματόμετρα θα πρέπει να βαθμονομηθούν πλήρως. Τελικός στόχος είναι η εξοικείωση των ασκούμενων με όργανα υψηλής διακριτικής ικανότητας ή/και φορητότητας για τη διερεύνηση φαινομένων που σχετίζονται με την ύπαρξη φυσικής ραδιενέργειας μέσω στοχευμένων μετρήσεων που θα παράξουν ποσοτικά αποτελέσματα ενεργοτήτων ραδιοϊσοτόπων φυσικής και ανθρωπογενούς προέλευσης.

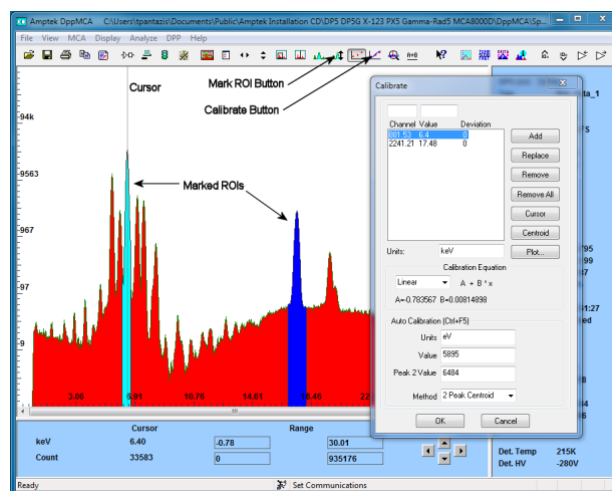
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σημαντικές υπενθυμίσεις πριν την έναρξη της άσκησης

- Το εργαστήριο περιλαμβάνει τη χρήση ραδιενεργών πηγών, οι οποίες είναι σφραγισμένες και απόλυτα ασφαλείς για τους ασκούμενους. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αφαιρείται, να καταστρέφεται, να εξέρχεται έξω από τους ελεγχόμενους χώρους εργαστηριακή πηγή. Οι ασκούμενοι/ες θα πρέπει να ακολουθούν απαράβατα τις οδηγίες των διδασκόντων.
- Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου είναι υψηλού κόστους και ιδιαίτερα ευπαθής, καθώς οι ανιχνευτές είναι εύθραυστοι κρύσταλλοι. Παρακαλείσθε να είστε ιδιαίτερα προσεκτικοί κατά το χειρισμό των οργάνων και τη διεξαγωγή των μετρήσεων.
- Το εργαστήριο περιλαμβάνει τη χρήση υγρού αζώτου, το οποίο βρίσκεται σε ειδικό δοχείο Dewar. Μπορεί να καταστεί πολύ επικίνδυνο όταν γίνεται απρόσεκτη χρήση. Οι ασκούμενοι/ες θα πρέπει να ακολουθούν απαράβατα τις οδηγίες των διδασκόντων.
- Ο κανονισμός του εργαστηρίου απαγορεύει κατανάλωση φαγητών ή ποτών κατά τη διάρκεια της άσκησης και εντός των χώρων του εργαστηρίου.

Πρόγραμμα επεξεργασίας φασμάτων

Η άσκηση απαιτεί τη συλλογή και την επεξεργασία φασμάτων ακτινοβολίας γ. Η συλλογή στο εργαστήριο γίνεται με εξειδικευμένα λογισμικά σε περιβάλλον Windows, ενώ η ανάλυσή τους μετά το πέρας της άσκησης, θα πραγματοποιηθεί από τους/τις ασκούμενους/ες με το λογισμικό DppMCA της AMETEK [12]. Οδηγίες εγκατάστασης της δωρεάν έκδοσης σε περιβάλλον Windows δίνονται στο eclass, μαζί με τις βασικές οδηγίες χρήσης. Η διπλανή Εικ. 10 εμφανίζει ένα τυπικό παράθυρο χρήσης του λογισμικού με κάποιες βασικές πληροφορίες.



ΜΕΡΟΣ Α - ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΦΟΡΗΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ NaI(Tl)

A1. Προετοιμασία ανιχνευτή

Συνδέστε τον ανιχνευτή με το φορητό Η/Υ, ανοίξτε το πρόγραμμα συλλογής φασμάτων και δώστε τάση 700 Volt από το αντίστοιχο μενού του λογισμικού. Ρυθμίστε επίσης το χρόνο συλλογής φάσματος (Preset Live time: 300 s).

A2. Βαθμονόμηση ανιχνευτή

- Τοποθετήστε την πρώτη πηγή βαθμονόμησης (^{22}Na) στην ειδική βάση μπροστά από τον ανιχνευτή. Μετρήστε για 300 s και αποθηκεύστε το τελικό φάσμα (*Nal_22Na.Spe*). Με χρήση του λογισμικού βαθμονομήστε τον ανιχνευτή. Δώστε την πρόχειρη εξίσωση βαθμονόμησης με την πηγή ^{22}Na .
- Αντικαταστήστε την πηγή ^{22}Na με μια άλλη πηγή ^{152}Eu . Λάβετε νέα μέτρηση (αρχείο *Nal_152Eu.Spe*). Σημειώστε τις αρχικές ενεργότητες των πηγών και τις αντίστοιχες ημερομηνίες παρασκευής. Μετά το τέλος της κάθε μέτρησης επιστρέψτε τις πηγές στον υπεύθυνο του εργαστηρίου.

A3. Μέτρηση άγνωστου δείγματος #1

Αλλάξτε τη ρύθμιση χρόνου μέτρησης σε 3600 s (live). Τοποθετήστε το δείγμα στην ειδική βάση μπροστά στον ανιχνευτή και λάβετε μια πλήρη μέτρηση. Αποθηκεύστε το φάσμα (*Nal_sample1.Spe*).

A4. Μέτρηση άγνωστου δείγματος #2

Αντικαταστήστε το δείγμα με ένα δεύτερο που θα σας δοθεί και λάβετε μια πλήρη μέτρηση όπως στο A3. Αποθηκεύστε το φάσμα (*Nal_sample2.Spe*).

A5. Ολοκλήρωση άσκησης με φορητό σπινθηριστή

Μηδενίστε την τάση, αποσυνδέστε τον ανιχνευτή και επιστρέψτε τα δείγματα στον υπεύθυνο του εργαστηρίου. Σημειώστε τις μάζες των δειγμάτων 1 και 2, καθώς και όποιες άλλες παρατηρήσεις έχετε σχετικά με αυτά (σχήμα δοχείου, κατάσταση ύλης κτλ). Επιστρέψτε δείγματα, πηγές ή άλλα υλικά του εργαστηρίου στον υπεύθυνο.

ΜΕΡΟΣ Β - ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ HPGe (High-Purity Germanium)

B1. Προετοιμασία μέτρησης με HPGe

- Εξοικειωθείτε με το χώρο, τον ανιχνευτή HPGe και τις ηλεκτρονικές μονάδες που τον συνοδεύουν. Ο υπεύθυνος του εργαστηρίου θα έχει φροντίσει ο ανιχνευτής να έχει δώσει τάση υψηλή τάση λειτουργίας πριν ξεκινήσει το εργαστήριο. Προσέξτε ιδιαίτερα τους διακόπτες ON/OFF στο τροφοδοτικό της κονσόλας NIM και στο HV Bias Supply Module.
- Μην αλλάζετε καμία από τις υπάρχουσες ρυθμίσεις
- Καταγράψτε τις βασικές ρυθμίσεις (τάση τροφοδοσίας, ενίσχυση Coarse & Fine, polarity, pulse output κτλ).

B2. Βαθμονόμηση ανιχνευτή HPGe

- Ζητήστε μία πηγή ^{22}Na , καταγράψτε τα χαρακτηριστικά της (ενεργότητα και ημερομηνία παρασκευής) και τοποθετήστε την στην ειδική βάση σε απόσταση ≈ 10 cm από την εμπρόσθια όψη του κρυστάλλου ευθεία εμπρός από το πρόσωπο του ανιχνευτή.

- Ανοίξτε το λογισμικό συλλογής φάσματος στον H/Y. Θέστε χρόνο μέτρησης (preset Live time) ίσο με 300 s. Εκκινήστε τη μέτρηση (Start). Μόλις ολοκληρωθεί η μέτρηση, βαθμονομήστε πρόχειρα τον ανιχνευτή, αφού αποθηκεύσετε το φάσμα με συγκεκριμένο όνομα (Ge_22Na.TKA). Δώστε την πρόχειρη εξίσωση βαθμονόμησης.
- Αντικαταστήστε με πηγή ^{152}Eu και επαναλάβετε το προηγούμενο βήμα. Μην ξεχάσετε να επιστρέψετε την πηγή ^{22}Na στον υπεύθυνο. Το φάσμα σας είναι τώρα είναι πολύ πιο σύνθετο με εμφανώς περισσότερες φωτοκορυφές. Σημειώστε τις παρατηρήσεις σας από τη σύγκριση με το προηγούμενο του ^{22}Na . Αποθηκεύστε το φάσμα μόλις ολοκληρωθεί η μέτρηση (Ge_152Eu.TKA). Επιστρέψτε την πηγή ^{152}Eu .

B3. Μέτρηση άγνωστων δειγμάτων

- Για τον ίδιο χρόνο μέτρησης (3600 s) μετρήστε διαδοχικά τα ίδια δείγματα των βημάτων A4 και A3 (σημ. οι μετρήσεις γίνονται παράλληλα και εναλλάξ για τους δύο ανιχνευτές για οικονομία χρόνου). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, παρατηρήστε τα φάσματα, σημειώστε σημεία ενδιαφέροντος, καταγράψτε διαφορές και ομοιότητες τόσο για τα δύο δείγματα στον ίδιο ανιχνευτή, όσο και για το κάθε δείγμα σε διαφορετικούς ανιχνευτές. Ποιοτικά διερευνήστε την ύπαρξη φυσικών και τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στα φάσματα. Μετά το πέρας κάθε μέτρησης, αποθηκεύστε τα φάσματα (Ge_sample1.TKA & Ge_sample2.TKA).

B4. Ολοκλήρωση μετρήσεων

Μετά το πέρας των μετρήσεων, επιστρέψτε τα δείγματα στον υπεύθυνο, κατεβάστε τάσεις στους ανιχνευτές όπου απαιτείτε και βεβαιωθείτε ότι έχετε σημειώσει όλες τις σχετικές πληροφορίες για το πείραμά σας. Σε συνεννόηση με τον υπεύθυνο, θα λάβετε όλα τα φάσματα σε κατάλληλο τύπου αρχείου (*.mca), ώστε να μπορείτε να τα επεξεργαστείτε μετά την αποχώρησή σας από το εργαστήριο.

Μέρος Γ - Επεξεργασία μετρήσεων

Γ1. Ανάλυση φασμάτων

Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με το λογισμικό DppMCA (δείτε οδηγίες νωρίτερα σχετικά με την εγκατάσταση και τις βασικές λειτουργίες).

Γ2. Βαθμονόμηση φασμάτων

- Για κάθε ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε, επαναλάβετε τη βαθμονόμηση των φασμάτων με χρήση των φασμάτων πηγών. Δώστε την εξίσωση της γραμμικής βαθμονόμησης με την πηγή ^{22}Na .
- Προχωρήστε σε πλήρη βαθμονόμηση με την πηγή ^{152}Eu , μετρώντας τουλάχιστον 10-12 φωτοκορυφές που εμφανίζονται έντονα στο φάσμα.
- Κατασκευάστε την πλήρη καμπύλη βαθμονόμησης και συγκρίνετε με το βήμα A2.

Γ3. Διακριτική ικανότητα

Ως μέτρο της διακριτικής ικανότητας των φασματομέτρων, χρησιμοποιείται συνήθως το Full Width at Half Maximum (FWHM) της κάθε φωτοκορυφής με συγκεκριμένη ενέργεια, E. Μετρώντας τις φωτοκορυφές της πηγής ^{152}Eu και στους δύο ανιχνευτές, κατασκευάστε τα αντίστοιχα γραφήματα FWHM (σε keV) = f(E σε keV), σε ξεχωριστά διαγράμματα, αλλά και σε επιπλέον σε ένα κοινό. Συμβουλευτείτε την εξίσωση (4.2) για να προσαρμόσετε τα δεδομένα σας με κατάλληλες καμπύλες. Δώστε τα αριθμητικά αποτελέσματά σας και σχολιάστε.

Γ4. Απόλυτη απόδοση ανιχνευτή HPGe

- Μέσω της μέτρησης της πηγής ^{152}Eu στον ανιχνευτή HPGe, να κατασκευάσετε την καμπύλη της απόλυτης ενεργειακής απόδοσης σχεδιάζοντας τα διαγράμματα $\epsilon_{\text{abs}}=f(E)$ σε γραμμική κλίμακα και σε log-log χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.3). Τι παρατηρείτε;
- Για το διάγραμμα στο Γ4 (γραμμικό), μπορείτε να βρείτε μια καμπύλη προσαρμογής στα δεδομένα που να περιγράφει την απόλυτη απόδοση ικανοποιητικά; Χρησιμοποιήστε κάποιο λογισμικό ή γράψτε το δικό σας κώδικα. Συμβουλευτείτε αναφορές που βρίσκονται στο eclass και τη βιβλιογραφία που παρατίθεται στο τέλος του φυλλαδίου.
- Καταγράψτε τους συντελεστές της εξίσωσης προσαρμογής και τα σφάλματά τους. Σχολιάστε τις παρατηρήσεις σας.

Γ5. Μέτρησις άγνωστων δειγμάτων

- Έχοντας βρει την καμπύλη της απόδοσης στο Γ4, χρησιμοποιήστε τα φάσματα των άγνωστων δειγμάτων που μετρήσατε με τον ανιχνευτή HPGe και ταυτοποιήστε τουλάχιστον 6-7 φωτοκορυφές και τα ραδιοϊσότοπα, στα οποία αντιστοιχούν. Μετρώντας το ολοκλήρωμα των φωτοκορυφών, βρείτε την πραγματική ενεργότητα (Bq) του δείγματος με την αβεβαιότητα της μέτρησης
- Αν επιχειρήσετε διάδοση σφαλμάτων, αγνοήστε τα σφάλματα των συντελεστών της καμπύλης απόδοσης που βρήκατε στο Γ4.
- Θεωρήστε ότι οι αβεβαιότητες στις ενεργότητες των εργαστηριακών πηγών είναι 3%.
- Για ισότοπα που εμφανίζουν περισσότερες από μία φωτοκορυφή, πώς συγκρίνονται οι εκτιμηθείσες ενεργότητες που βρήκατε;
- Μπορείτε να ταυτοποιήσετε αλυσίδες φυσικές αλυσίδες διάσπασης ή άλλα ανθρωπογενή ισότοπα;
- Μπορείτε να εκτιμήσετε αν υπάρχει ραδιενεργή ισορροπία στα δείγματα που μετρήσατε;
- Αν έχετε βρει αλυσίδες ουρανίου και θορίου, να υπολογίσετε την αναλογία των ενεργοτήτων τους, $A[\text{U}]/A[\text{Th}]$.
- Σχολιάστε όλα σας τα αποτελέσματα δίνοντας έμφαση σε πιθανούς παράγοντες που έχουν επηρεάσει τη μέτρηση, τη φύση του δείγματος, πιθανές διαταραχές της ισορροπίας κτλ.

Βιβλιογραφία

- [01] Canadian Nuclear Safety Commission, url: <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/index.cfm>
- [02] Nuclear Forensic Search Project, Berkeley url: <https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>
- [03] Nucleide - Lara, url: <http://www.nucleide.org/Laraweb/>
- [04] Φυλλάδιο Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής Κορμού (2021)
- [05] T.J. Mertzimekis et al., NUCET 7, 157 (2021), doi: 10.3897/nucet.7.60122
- [06] ORTEC® digiBASE-E® Technical Description and Manual, url: <https://www.ortec-online.com/products/electronics/photomultiplier-tube-bases/digibase-e>
- [07] ORTEC® MAESTRO® Technical Description and Manual, url: <https://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca>
- [08] M. Efstathiou et al., HNPS Adv. Nucl. Phys. (2021) - in print
- [09] ORTEC® Online Catalog, url: <https://www.ortec-online.com/>
- [10] G. Gilmore, "Practical Gamma-Ray Spectrometry", ISBN 978-0-470-86196-7, Wiley (2008)
- [11] National Nuclear Data Center, url: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>
- [12] DppMCA Spectrum Analysis Software, url: <https://www.amptek.com/software/dp5-digital-pulse-processor-software/dppmca-display-acquisition-software>