

Project 8

Μελέτη της απόδοσης ανιχνευτή HPGe ως προς την ενέργεια και την απόσταση

Θεωρητικά στοιχεία

Η άσκηση διαθέτει μερική επικάλυψη με το θεωρητικό υπόβαθρο της άσκησης K4 και ως εκ τούτου, οι φοιτητές/τριες παραπέμπονται στο φυλλάδιο για περισσότερες λεπτομέρειες.

Η απόλυτη ενεργειακή απόδοση ενός ανιχνευτή (full energy peak efficiency) είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας ενός ανιχνευτή, καθώς επιτρέπει τον ορθό τρόπο μέτρησης άγνωστων πηγών ακτινοβολίας γ με ποσοτικό τρόπο. Η απόλυτη ενεργειακή απόδοση εξαρτάται τόσο από την ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτίνας γ , όσο και από την απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή. Στην παρούσα άσκηση, θα χρησιμοποιηθούν σημειακές πηγές, ώστε να μην υπεισέρχονται θέματα γεωμετρίας όγκου της πηγής (πχ. αυτοαπορρόφηση). Επιπλέον, διαθέτουν χρόνους ημιζωής πολύ μεγαλύτερους από τους χρόνους μέτρησης, ώστε να υποτεθεί ότι η ενεργότητα παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

Σε ένα φάσμα, οι φωτοκορυφές που σχηματίζονται εδραιώνονται πάνω σε ένα υπόβαθρο, το οποίο σχηματίζεται από διάφορους παράγοντες (υπόβαθρο λόγω Compton, κοσμική ακτινοβολία κτλ). Για την ασφαλή εκτίμηση, των γεγονότων που σχηματίζουν τη φωτοκορυφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συνάρτηση που είναι συνδυασμός μερικών άλλων απλούστερων συναρτήσεων με ξεχωριστές παραμέτρους η καθεμία (βλ. και Εικ. 1):

- μιας συνάρτησης Gauss που υπερκαλύπτει το ολοκλήρωμα της φωτοκορυφής
- μιας συνάρτησης βήματος
- μιας εκθετικής συνάρτησης (στο χαμηλό άκρο ενέργειας)
- μιας εκθετικής συνάρτησης (στο υψηλό άκρο ενέργειας)
- μιας πολυωνυμικής συνάρτησης χαμηλής τάξεως (πχ γραμμική) για την αναπαράσταση του υποβάθρου

Η τελική σύνθεση έχει 10 παραμέτρους (P_1, P_2, \dots, P_{10}) και από αυτήν μπορεί να βρεθεί το καθαρό άθροισμα γεγονότων, N , στη φωτοκορυφή μέσω της σχέσης:

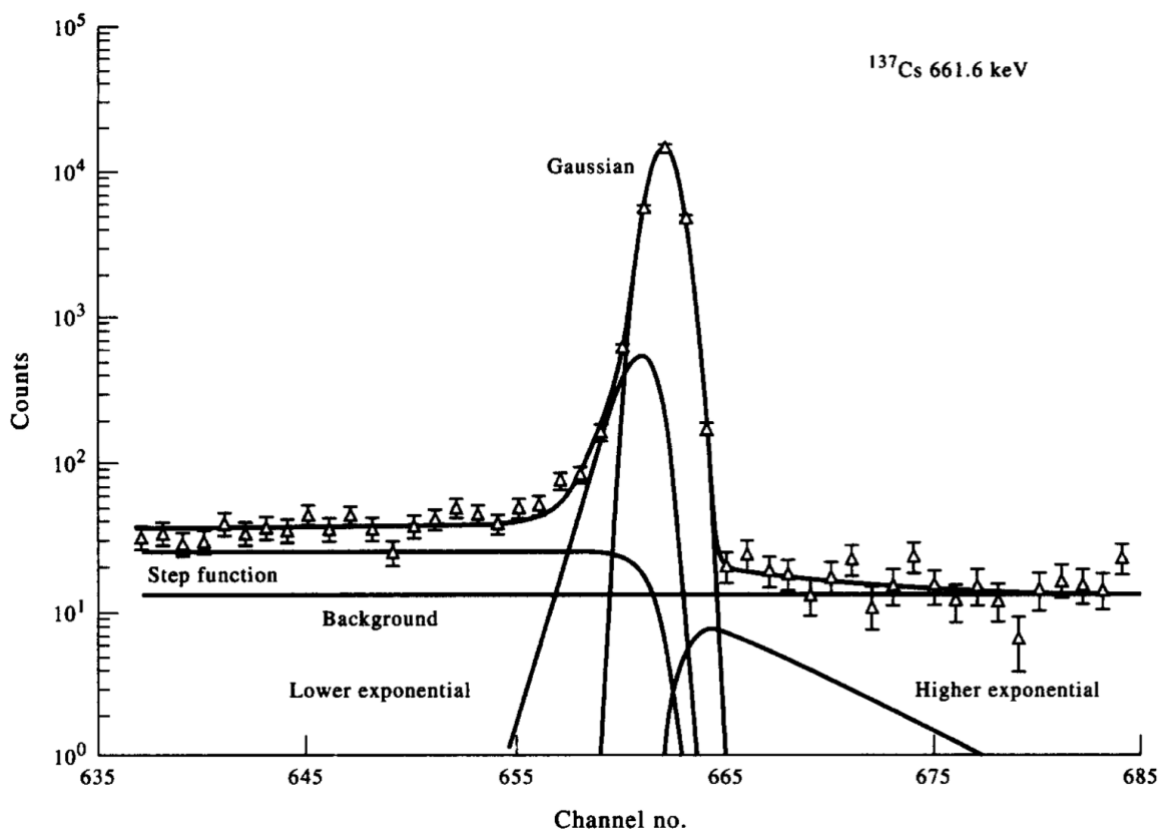
$$N = P_1 P_3 (2\pi)^{\frac{1}{2}} + \frac{P_3 P_4 (\Gamma(P_5) \Gamma(4 - P_5))}{6} + \frac{P_3 P_9 (\Gamma(P_{10}) \Gamma(4 - P_{10}))}{6} \quad (1)$$

Όπου $\Gamma(x)$ είναι η συνάρτηση γάμμα και οι αριθμοί 4 και 6 είναι αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης της συνάρτησης Gauss και των δύο εκθετικών στο $[-\infty, +\infty]$.

Από έναν τέτοιο υπολογισμό, η απόλυτη ενεργειακή απόδοση μπορεί να βρεθεί μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon = \frac{N_c}{A_o \times P_\gamma \times e^{-\lambda t}} \quad (2)$$

Όπου N_c είναι το εμβαδόν της φωτοκορυφής μετά από όλες τις διορθώσεις (σε counts/s), A_0 είναι η αρχική ενεργότητα της φωτοκορυφής τη στιγμή της κατασκευής της, P_γ η σχετική πιθανότητα εκπομπής του φωτονίου με ενέργεια E_γ , λ είναι η σταθερά διάσπασης και t ο χρόνος που έχει περάσει ως τη στιγμή της μέτρησης.



Εικόνα 1 Φωτοκορυφή φάσματος πηγής ^{137}Cs με τις πέντε συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του σχήματος και εκτίμηση του καθαρού ρυθμού καταγραφής

Απόδοση ως συνάρτηση της ενέργειας φωτονίου

Με την ευρεία χρήση των ανιχνευτών HPGe σε ερευνητικές μελέτες πειραματικής και εφαρμοσμένης φυσικής, πολλές αναλυτικές εκφράσεις διατυπώθηκαν για την ακριβή περιγραφή της ενεργειακής τους απόδοσης. Μία από τις πιο διαδεδομένες είναι η σχέση των Gray & Ahmad [1], η οποία διαθέτει το πλεονέκτημα ότι είναι γραμμική ως προς τις εμπλεκόμενες παραμέτρους. Η γενική της έκφραση περιέχει 6 παραμέτρους:

$$\varepsilon(E, P) = \frac{1}{E} (P_0 + P_1 \ln E + P_2 (\ln E)^2 + P_3 (\ln E)^3 + P_5 (\ln E)^5 + P_6 (\ln E)^6) \quad (3)$$

(Προσοχή, απουσιάζει η 4η δύναμη του $\ln E$ και η παράμετρος P_4). Η ενέργεια είναι σε MeV.

Μετρώντας ένα ικανό αριθμό φωτοκορυφών σε διαφορετικές ενέργειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Εξ. (3) για να πραγματοποιηθεί προσαρμογή καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα και να εξαχθεί η συνάρτηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω προσαρμογής της.

Απόδοση ως συνάρτησης της απόστασης πηγής-ανιχνευτή

Η εκτίμηση της απόδοσης ως προς την απόδοση είναι παρόμοια με τη διαδικασία που περιγράφηκε για την εξάρτηση από την ενέργεια, με τη διαφορά ότι πρέπει να εκτιμηθούν πολλαπλές καμπύλες απόδοσης σε διαφορετικές αποστάσεις η καθεμία. Επιπλέον, ενδιαφέρον φέρει η εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ως συνάρτηση δύο μεταβλητών, ενέργεια E και απόσταση x .

Μια τέτοια εμπειρική συνάρτηση είναι η παρακάτω:

$$\varepsilon(x, E) = \frac{P_0 + P_1 \ln E + P_2 (\ln E)^2 + P_3 (\ln E)^3 + P_5 (\ln E)^5 + P_6 (\ln E)^6}{E \times (x + P_7 - P_8 e^{P_9 E})^2} \times (1 - [P_{10}(10E)^{3P_{11}} e^{-P_{12} x}]) \quad (4)$$

η οποία εν γένει δίνει καλές προσαρμογές στις δύο μεταβλητές που ενδιαφέρουν. Το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων (12) και η τελική προσαρμογή απαιτεί κώδικες ελαχιστοποίησης για την εύρεση των τιμών τους και των αντίστοιχων σφαλμάτων τους.

Πειραματική Διαδικασία

1. Βεβαιωθείτε ότι ο ανιχνευτής HPGe είναι συνδεδεμένος στον υπολογιστή μέτρησης και έχει δοθεί τάση λειτουργίας
2. Τοποθετήστε μια πηγή ^{152}Eu σε απόσταση 10 cm μπροστά από τον ανιχνευτή. Καταγράψτε το αντίστοιχο φάσματα για κατάλληλο χρόνο μέτρησης, ώστε να υπάρχουν τουλάχιστον 10'000 γεγονότα στη φωτοκορυφή 1408 keV.
3. Κάνοντας όλες τις απαραίτητες διορθώσεις και προσεγγίσεις για να κατασκευάσετε την καμπύλη ενεργειακής απόδοσης για τον ανιχνευτή HPGe.
4. Στη συνέχεια επαναλάβετε το βήμα 2 για αποστάσεις 3, 5, 12, 15, 20, 25 cm. Κατασκευάστε τις αντίστοιχες καμπύλες απόδοσης για κάθε απόσταση.
5. Κατασκευάστε κοινό διάγραμμα για όλες τις καμπύλες των βημάτων 2 και 4. Τι παρατηρείτε;
6. Να κατασκευαστεί το διάγραμμα που δίνει την απόδοση σε σχέση με την απόσταση για δυο φωτοκορυφές της πηγής, 244 keV και 1408 keV. Τι παρατηρείτε;
7. Τοποθετήστε πηγή άγνωστης ενεργότητας σε 15 cm μακριά από τον ανιχνευτή. Μετρήστε ώστε η κορυφή να έχει τουλάχιστον 3000 κρούσεις στην κορυφή ενδιαφέροντος. Να βρεθεί η ενεργότητα της πηγής. Να γίνει εκτίμηση του σφάλματος στην ενεργότητα.
8. Τοποθετήστε πηγής γνωστής ενεργότητας (θα σας δοθεί από το διδάσκοντα) σε τυχαία απόσταση από τον ανιχνευτή. Βρείτε την απόσταση και το σφάλμα της. Συγκρίνετε το αποτέλεσμα με τη μέτρηση της απόστασης με χάρακα. Πού αποδίδετε πιθανές διαφορές;
9. **Bonus:** Κατασκευάστε υπολογιστικό κώδικα που θα παράγει την ελαχιστοποίηση της πολυπαραμετρικής συνάρτησης της Εξ. (4) με βάση τα πειραματικά δεδομένα που έχετε συλλέξει και δώστε το 3D γράφημά της.

Βιβλιογραφία

1. Θ. Μερτζιμέκης, Φυλλάδιο εργαστηριακής άσκησης K4 (2023)
2. L.C. Longoria & J.S. Benitez, Appl. Rad. Isot. 3, 339 (1996), doi: 10.1016/0969-8043(95)00292-8
3. P.W. Gray and A. Ahmad, Nucl. Instrum. Meth. A 237, 577 (1985)

4. V. Lagaki et al., JINST 18 T05001, doi: 10.1088/1748-0221/18/05/T05001