

## *Πειραματική Ενότητα I*

### *ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ*

#### **Σκοπός**

Το πείραμα αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να εξοικειώσει το φοιτητή με τις βασικές αρχές της Φασματοσκοπίας με Σπινθηριστή NaI(Tl). Κατά την εκτέλεση αυτής της σειράς των πειραμάτων, ο φοιτητής μαθαίνει τη βασική φυσική που συνδέεται με την αποδιέγερση πυρήνων μέσω εκπομπής ακτίνων  $\gamma$ , καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη.

#### **Θεωρία**

Όταν μια ακτίνα  $\gamma$  από μια ραδιενεργό πηγή αλληλεπιδρά με την ύλη, υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι με τις οποίες απορροφάται:

- 1) Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο
- 2) Αλληλεπίδραση Compton
- 3) Δίδυμη Γέννηση

Σ' αυτό το πείραμα θα μελετήσουμε συστηματικά αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Το σχήμα I.1 δείχνει την ειδική περίπτωση που μια πηγή ακτινοβολίας  $\gamma$  μετρίεται από έναν ανιχνευτή Ιωδιούχου Νατρίου NaI(Tl). Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από θωράκιση μολύβδου. Για την ώρα, θα αγνοήσουμε όλα τα γεγονότα που παρουσιάζονται στο σχήμα I.1, εκτός από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, την αλληλεπίδραση Compton και τη δίδυμη γέννηση.

Σχήμα I.1 Πηγή  $\gamma$ , ανιχνευτής NaI(Tl), φωτοπολλαπλασιαστής, θωράκιση μολύβδου. Διακρίνονται διάφορες αλληλεπιδράσεις

#### **1. Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**

Το Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μας δίνει μια καλά καθορισμένη κορυφή στο φάσμα. Οι ακτίνες  $\gamma$  εισέρχονται στον κρύσταλλο NaI(Tl) και αλληλεπιδρούν πρωταρχικά με τα δέσμια ηλεκτρόνια των φλοιών K και L του Νατρίου στον

κρύσταλλο. Ουσιαστικά, μια ακτίνα  $\gamma$  δίνει όλη την ενέργειά της στο δεσμευμένο ηλεκτρόνιο και το αποδεσμεύει από το άτομο, με μια ενέργεια ( $E_e$ ) που δίνεται από:

$$E_e = E_\gamma - B \quad (I.1)$$

όπου  $B$  είναι η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου. Αφού η  $B$  είναι μόνο 33 keV για τον φλοιό  $K$  του Νατρίου, Μπορούμε να δούμε ότι το ηλεκτρόνιο αποκτά την περισσότερη από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτίνας  $\gamma$ , η οποία είναι συνήθως της τάξης του 1 MeV ή και περισσότερο. Καθώς το ηλεκτρόνιο περνά μέσα από τον κρύσταλλο NaI(Tl) χάνει την ενέργειά του από ιονισμό, διέγερση και παραγωγή θερμικής ενέργειας. Ένα σταθερό μέρος της ενέργειας του ηλεκτρονίου θα μετασχηματιστεί σε φωτόνια χαμηλής ενέργειας που μετά προσκρούουν στη φωτοκάθοδο του σωλήνα του φωτοπολλαπλασιαστή που φαίνεται στο σχήμα II. Αυτά τα φωτόνια θα παράγουν φωτοηλεκτρόνια από την επιφάνεια της φωτοκαθόδου του φωτοπολλαπλασιαστή. Μόνο ένα φαίνεται στο σχήμα. Τα φωτοηλεκτρόνια έλκονται στην πρώτη δύνοδο του φωτοπολλαπλασιαστή μέσω ενός θετικού δυναμικού που παρέχεται από το σύστημα αντιστάσεων (διαίρετη τάσης) που είναι συνδεδεμένο με τη φωτοκάθοδο και τις δυνόδους του φωτοπολλαπλασιαστή. Δευτερογενή ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την πρώτη δύνοδο έλκονται στη δεύτερη δύνοδο, κ.ο.κ. Ο τελικός καταγισμός ηλεκτρονίων φτάνει στην άνοδο και παράγει ένα ηλεκτρικό παλμό που είναι ανάλογος προς την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτίνας  $\gamma$ . Οι παλμοί από την άνοδο τροφοδοτούνται μέσω του προενισχυτή και του ενισχυτή στον αναλυτή πολλών καναλιών για ανάλυση. Το σχήμα I.2 δείχνει το ηλεκτρονικό διάγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί για όλα τα μέρη της ΠΕ.

Σχήμα I.2 Στοιχεία μιας τυπικής διάταξης για φασματοσκοπία  $\gamma$

Το σχήμα I.3 δείχνει ένα τυπικό φάσμα ύψους παλμών που παρατηρείται στο MCA του σχήματος I.1. Η φωτοκορυφή φαίνεται καθαρά στο μέσον περίπου του φάσματος. Παρουσιάζεται επίσης στο φάσμα η πλατιά κατανομή των παλμών από την αιχμή Compton έως την ηλεκτρονική αποκοπή. Αυτή η κατανομή των παλμών παράγεται από αλληλοεπιδράσεις Compton στον κρύσταλλο NaI(Tl).

Σχήμα I.3 Φάσμα ύψους παλμών πηγής  $^{137}\text{Cs}$  όπως παρατηρείται στο MCA

## 2. Αλληλεπίδραση Compton

Η αλληλεπίδραση Compton είναι γνήσια μια κινηματική σκέδαση μεταξύ του προσπίπτοντος φωτονίου  $\gamma$  και ενός ηλεκτρονίου στον κρύσταλλο, που είναι είτε ελεύθερο είτε χαλαρά δεσμευμένο.

Σχήμα I.4 Κινηματική εικόνα της αλληλεπίδρασης

Η προσπίπτουσα ακτίνα  $\gamma$  έχει ενέργεια  $E = h\nu$ . Αυτή η ενέργεια διαμοιράζεται ανάμεσα στο σκεδαζόμενο φωτόνιο Compton και το ηλεκτρόνιο ανάκρουσης Compton. Το σκεδαζόμενο φωτόνιο έχει ενέργεια  $E = h\nu'$  και το ηλεκτρόνιο ενέργεια  $T_e$ . Αφού η ολική ενέργεια διατηρείται στην αλληλεπίδραση, μπορούμε να γράψουμε:

$$h\nu = h\nu' + T_e \quad (\text{I.2})$$

Η ορμή διατηρείται επίσης στην αλληλεπίδραση και από τη διατήρηση αυτή μπορούμε να γράψουμε τις δύο παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + P \cos \theta \quad (\text{x- συνιστώσα της ορμής}) \quad (\text{I.3})$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \theta + P \sin \theta \quad (\text{y- συνιστώσα της ορμής}) \quad (\text{I.4})$$

όπου  $P$  η ορμή του ηλεκτρονίου.

Από ταυτόχρονη λύση των τριών εξισώσεων, μπορούμε να εξάγουμε το γνωστό τύπο του Compton για την ενέργεια του σκεδαζομένου ηλεκτρονίου σε σχέση με την αρχική ενέργεια,  $h\nu$  και τη γωνία σκέδασης:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (1 - \cos \theta)h\nu/m_2c^2} \quad (\text{I.5})$$

Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου Compton μπορεί να γραφτεί:

$$T_e = h\nu - h\nu' \quad (\text{I.6})$$

Εξέταση των δύο τελευταίων εξισώσεων (I.5) και (I.6) δείχνει ότι το σκεδαζόμενο φωτόνιο,  $h\nu'$ , μπορεί να κατευθυνθεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτίνα  $\gamma$ . Αντίθετα, το ηλεκτρόνιο μπορεί να σκεδαστεί μόνο στη μπροστινή διεύθυνση. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (I.5) και (I.6) για τις ενέργειες του σκεδαζομένου φωτονίου και ηλεκτρονίου και αντικαθιστώντας διαφορετικές τιμές της γωνίας σκέδασης και διαφορετικές ενέργειες της προσπίπτουσας ακτίνας  $\gamma$ , παίρνουμε τον πίνακα I.1.

	$h\nu = 1022 \text{ keV}$		$h\nu = 662 \text{ keV}$		$h\nu = 323 \text{ keV}$	
	$h\nu'$	$T_e$	$h\nu'$	$T_e$	$h\nu'$	$T_e$
0	1022	0	662	0	323	0
30	806	216	564	98	298	25
60	511	511	402	250	245	78
90	341	681	288	374	198	125
120	256	766	225	437	186	157
150	216	806	194	468	148	175
180	204	818	184	478	143	180

Πίνακας I.1

Από το σχήμα I.4 και από το γεγονός ότι όλες οι γωνίες για το  $h\nu'$  είναι περίπου ισοπίθανες, οι ενέργειες του ηλεκτρονίου ανάκρουσης,  $T_e$ , είναι ισοπίθανες (Πίνακας I.1) για το  $^{137}\text{Cs}$  από το μηδέν έως τη μέγιστη ενέργεια ανάκρουσης Compton, που είναι 0,478 MeV για το  $^{137}\text{Cs}$ . Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στην αιχμή Compton στο σχήμα I.3.

### 3. Δίδυμη Γέννηση

Για προσπίπτουσες ακτίνες  $\gamma$  που έχουν ενέργειες μεγαλύτερες από 5 MeV, η κυριότερη αλληλεπίδραση στον κρύσταλλο NaI(Tl) είναι η δίδυμη γέννηση, σχήμα I.5. Σ' αυτήν τη διαδικασία, ένα φωτόνιο με αρκετή ενέργεια δίνει όλη του την ενέργεια και σχηματίζει δύο σωματίδια, ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Αυτή η διαδικασία παριστάνεται να συμβαίνει κοντά στον πυρήνα ενός ατόμου, γιατί μόνο με

τον τρόπο αυτό η ορμή μπορεί να διατηρηθεί. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη δίδυμη γέννηση δίνεται από  $E = 2m_0c^2$ , όπου  $m_0$  είναι η μάζα ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου. Αφού η μάζα ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου αντιστοιχεί σε 0,511 MeV, το φωτόνιο πρέπει να έχει ενέργεια  $\geq 1,02$  MeV για να χρησιμοποιηθεί η δίδυμη γέννηση. Επομένως, η δίδυμη γέννηση είναι σημαντική μόνο για φωτόνια υψηλής ενέργειας. Η διαδικασία είναι επίσης ανάλογη του  $Z^2$  του Απορροφητή.

Σχήμα I.5 Δίδυμη γέννηση. Το φωτόνιο εισέρχεται από αριστερά και δημιουργεί ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου κοντά στον πυρήνα. Μερικά nsec αργότερα, το ποζιτρόνιο θα εξαϋλωθεί δίνοντας δυο φωτόνια ενέργειας 0,511 MeV.

Όταν αυτή η διαδικασία συμβαίνει, η ενέργεια του φωτονίου πάνω από 1,02 MeV μεταδίδεται σαν κινητική ενέργεια στο ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου και ένα τμήμα της στον πυρήνα, προκειμένου να διατηρηθεί η ορμή. Τόσο το ηλεκτρόνιο όσο και το ποζιτρόνιο χάνουν κινητική ενέργεια μέσω ιονισμού των ατόμων στον κρύσταλλο. Μέσα σε λίγα νανοδευτερόλεπτα, το ποζιτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο στον ανιχνευτή σε μια διαδικασία που ονομάζεται εξαϋλωση. Σ' αυτήν τη διαδικασία, η μάζα των σωματιδίων μεταβάλλεται σε δύο φωτόνια των 0,511 MeV το καθένα, που εκπέμπονται σε σχεδόν αντίθετες διευθύνσεις. Αυτά στη συνέχεια μπορούν να αλληλεπιδράσουν περαιτέρω μέσω των φαινομένων φωτοηλεκτρικού ή Compton.

Το σχήμα I.6 δείχνει τις ενεργές διατομές για το Φωτοηλεκτρικό, το Compton, τη Δίδυμη Γέννηση και την ολική αλληλεπίδραση του Φωτονίου με έναν ανιχνευτή NaI(Tl).

Σχήμα I.6 Ενεργές διατομές για το Φωτοηλεκτρικό, το Compton, τη Δίδυμη Γέννηση και την ολική αλληλεπίδραση του Φωτονίου με έναν ανιχνευτή NaI(Tl) σε συνάρτηση της ενέργειας.

## *Πείραμα I-1*

### *Βαθμονόμηση της ενέργειας ακτινοβολίας $\gamma$*

#### **Πειραματική διαδικασία**

Το σχήμα I.2 δείχνει τη διάταξη των ηλεκτρονικών που θα χρησιμοποιηθούν για όλα τα τμήματα αυτού του πειράματος. Βεβαιωθείτε πως έχετε διαβάσει τα εγχειρίδια οδηγιών για τα διάφορα μέρη πριν εγκαταστήσετε τα ηλεκτρονικά και ότι όλοι οι διακόπτες παροχής ηλεκτρικού ρεύματος είναι κλειστοί, πριν να κάνετε τις εσωτερικές συνδέσεις.

Όλες οι καλωδιακές συνδέσεις γίνονται με τη χρησιμοποίηση RG58U εκτός από το καλώδιο 5HV που συνδέει την πηγή υψηλού δυναμικού στην είσοδο HV της φωτοκαθόδου. Για όλα τα πειράματα με NaI(Tl) τα 256 κανάλια στον MCA είναι αρκετά.

1. Τοποθετήστε την πηγή  $^{137}\text{Cs}$  (1 $\mu\text{Ci}$ ) σε απόσταση 3 cm από τον ανιχνευτή.
2. Ανοίξτε και αυξήστε αργά την υψηλή τάση στην τιμή των (+) 1000V.
3. Το καλώδιο εξόδου από τον προενισχυτή πρέπει να είναι συνδεδεμένο με την αρνητική είσοδο του ενισχυτή. Ενώστε τη διπολική έξοδο του ενισχυτή. Ενώστε τη διπολική έξοδο του ενισχυτή με τον MCA. Ρυθμίστε την ενίσχυση του ενισχυτή ώστε η φωτοκορυφή (βλ. Σχήμα I.5) από το  $^{137}\text{Cs}$  να βρίσκεται στο κανάλι 66 του αναλυτή πολλών καναλιών. Πάρτε ένα φάσμα για χρόνο μέτρησης 100 sec. Το φάσμα που παρατηρήθηκε πρέπει να είναι παρόμοιο με εκείνο του σχήματος I.3. Με τη γεωμετρία που έχει χρησιμοποιηθεί θα υπάρχουν περίπου 4000 κρούσεις στο συγκεκριμένο ύψος της φωτοκορυφής. Ο ολικός αριθμός των κρούσεων κάτω από τη φωτοκορυφή θα πρέπει να είναι περίπου 20.000. Η ενέργεια της φωτοκορυφής από το  $^{137}\text{Cs}$  είναι 662 keV, επομένως η ενέργεια ανά αριθμό καναλιού είναι 662 keV/66 κανάλια ή 10 keV/κανάλι περίπου.

Διαβάστε το φάσμα ή χρησιμοποιήστε το δρομέα MCA και βρείτε την ακριβή θέση της φωτοκορυφής των 662 keV. Καταγράψτε τον αριθμό καναλιού της θέσης της κορυφής στον Πίνακα I.1

Event	Energy (MeV)	Channel Number
1 $^{137}\text{Cs}$ Photopeak	0,662	
2 $^{60}\text{Co}$ Photopeak	1,17	
3 $^{60}\text{Co}$ Photopeak	1,33	

Πίνακας I.1

4. Αντικαταστήστε την πηγή  $^{137}\text{Cs}$  με  $^{60}\text{Co}$  και συσσωρεύστε μετρήσεις για 100 sec. Καταγράψτε τις θέσεις των δύο φωτοκορυφών από το  $^{60}\text{Co}$  στον Πίνακα I.1, όπως στο προηγούμενο βήμα 3. Το σχήμα I.7 δείχνει ένα φάσμα  $^{60}\text{Co}$  που έχει καταγραφεί από έναν MCA.

Σχήμα I.7 Φάσμα ύψους παλμών πηγής  $^{60}\text{Co}$

5. Αντικαταστήστε την πηγή  $^{60}\text{Co}$  με  $^{133}\text{Ba}$  και καταγράψτε τη θέση της φωτοκορυφής των 0,356, 0,081 MeV στον Πίνακα I.1

**Άσκηση Α:** Από τα δεδομένα που φαίνονται στον Πίνακα I.1, κάνετε ένα διάγραμμα σε γραμμικό χαρτί γραφήματος της ενέργειας της φωτοκορυφής ως προς τον αριθμό καναλιού του κεντροειδούς. Το σχήμα I.8 δείχνει μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης για τα παραπάνω δεδομένα.

Σχήμα I.8 Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης

**Άσκηση Β:** Ο Πίνακας I.2 δείχνει μια πλήρη ταξινόμηση των πηγών ακτινοβολίας  $\gamma$  και των ενεργειών των φωτοκορυφών τους για μια σειρά πηγών  $\gamma$ . Συγκεντρώστε φάσματα για το  $^{22}\text{Na}$  και συμπεριλάβετε αυτά τα σημεία στον πίνακα δεδομένων σας και στην καμπύλη βαθμονόμησης.

Isotope	Half Life	$f_B$ Fraction of $\gamma$ 's per decay	Gamma Peaks of interest
$^{60}\text{Co}$	5.62 years	0.99	1.173, 1.332
$^{22}\text{Na}$	2.62 years	.999	0.511, 1.275
$^{137}\text{Cs}$	30 years	0.92	0.662
$^{133}\text{Ba}$	7.2 years	see Ref. 1	.080, 0.276, 0.302 0.356, 0.382

Πίνακας I.2



## ***Πείραμα I-2.***

### ***Αναγνώριση "αγνώστων" πυρήνων μέσω της ακτινοβολίας $\gamma$***

#### **Σκοπός**

Θα χρησιμοποιήσουμε την καμπύλη βαθμονόμησης που έχει παραχθεί στο πείραμα I-1 για να αναγνωρίσουμε τις γραμμές  $\gamma$  διαφόρων αγνώστων πηγών που θα δοθούν από τον επιβλέποντα. Ο φοιτητής θα αναγνωρίσει τις φωτοκορυφές κάθε αγνώστης πηγής και στη συνέχεια θα ανατρέξει στον κατάλληλο πίνακα (Παράρτημα Α αυτού του εγχειριδίου), όπου έχουν τοποθετηθεί ορισμένες ακτίνες  $\gamma$  κατά φθίνουσα ενέργεια, και έτσι θα βρει το άγνωστο ισότοπο.

#### **Πειραματική Διαδικασία**

1. Πάρτε την πρώτη άγνωστη πηγή  $\gamma$  από τον επιβλέποντα. Συγκεντρώστε με μετρήσεις ένα φάσμα για χρονικό διάστημα που να είναι αρκετό ώστε να μπορείτε να αναγνωρίσετε καθαρά τις κορυφές στο φάσμα. Αντιστοιχίστε μια κεντροειδή θέση κορυφής σε κάθε μια από αυτές τις κορυφές. Από την καμπύλη βαθμονόμησης βρείτε την ενέργεια κάθε κορυφής.
2. Επαναλάβετε τη διαδικασία #1 για τις υπόλοιπες από τις άγνωστες πηγές που θα δοθούν από τον επιβλέποντα.

**Άσκηση Α:** Βρείτε το άγνωστο ισότοπο ή ισότοπα αφού συμβουλευτείτε το Παράρτημα Α ή τις αναφορές 1 και 2 στο τέλος αυτού του πειράματος.

#### ***Ανάλυση Φάσματος ακτινοβολίας $\gamma$***

Θα αναλύσουμε προσεκτικά τα αποτελέσματα των διαφόρων τύπων αλληλεπιδράσεων που φαίνονται στο σχήμα I.1 και θα διευκρινίσουμε τις επιδράσεις τους στο φάσμα του ύψους του παλμού που μετριέται. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν την αιχμή Compton, την οπισθοσκέδαση από τη θωράκιση μολύβδου, το φθορισμό ακτίνων - X από το μόλυβδο, που δίνει ακτίνες -

X 75 keV (Kα), τη διαδικασία εξαύλωσης που δίνει κορυφές διαφυγής ή πρόσθετες κορυφές των 0.511 MeV, που προφανώς δε θα έπρεπε να υπάρχουν στο φάσμα.

## Συζήτηση

**A. Οπισθοσκέδαση.** Το σχήμα I.3 δείχνει φάσμα από  $^{137}\text{Cs}$  το οποίο έχει, στο μεγαλύτερο μέρος, μια εμφανή φωτοκορυφή και μια κατανομή Compton. Μια μικρή κορυφή οπισθοσκέδασης μπορεί να παρατηρηθεί στην ενέργεια των 184 keV (κανάλι 31). Από που προήρθε; Η απάντηση μπορεί να βρεθεί αναλύοντας την ενέργεια ενός φωτονίου του  $^{137}\text{Cs}$ , το οποίο, αφού πάθει σκέδαση Compton από τη θωράκιση μολύβδου, εισέρχεται στον ανιχνευτή NaI(Tl) και απορροφάται με τη φωτοηλεκτρική διαδικασία. Αφού τα περισσότερα από αυτά τα φωτόνια σκεδάζονται κατά  $180^\circ$  περίπου, ονομάζονται φωτόνια οπισθοσκέδασης. Από την κινηματική ανάλυση της αλληλεπίδρασης Compton (Πίνακα I.1) η ενέργεια σκέδασης αυτών των οπισθοσκεδαζομένων φωτονίων είναι 184 keV. Ένα τέτοιο γεγονός παρουσιάζεται στο σχήμα I.1. Το φωτόνιο στα αριστερά οπισθοσκεδάζεται μέσα στον κρύσταλλο, όπως περιγράφεται προηγούμενα.

Οπισθοσκέδαση θα συμβεί επίσης και από το τραπέζι, το περίβλημα του ανιχνευτή, τα υποστηρίγματα, κτλ. Τα περισσότερα από αυτά τα οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια προέρχονται από τη μολύβδινη θωράκιση που περιβάλλει τον ανιχνευτή. Η θωράκιση, όμως, είναι απαραίτητη προκειμένου να μειωθεί το υπόβαθρο του δωματίου το οποίο δημιουργεί πολύ μεγαλύτερο πρόβλημα από την κορυφή οπισθοσκέδασης που προκαλείται από τη θωράκιση. Είναι εύκολο να υπολογιστεί η θέση της κορυφής οπισθοσκέδασης. Η εξίσωση (I.5) μπορεί να γραφεί: ( $m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ ,  $\theta = 180^\circ$  για οπισθοσκέδαση)

$$E'_\gamma \cong \frac{E_\gamma}{1 + 3.91 E_\gamma} \quad (\text{I.7})$$

Το σχήμα I.7 δείχνει ένα φάσμα ύψους παλμών του  $^{60}\text{Co}$ . Η κορυφή οπισθοσκέδασης φαίνεται καθαρά στο σχήμα. Η εξίσωση (I.7) θα δώσει την ενέργεια αυτής της κορυφής αν αντικαταστήσουμε σ' αυτήν  $E = 1.33 \text{ MeV}$  και υπολογίσουμε την  $E_\gamma$ .

**B. Ακτίνες-X Μολύβδου.** Τα φωτόνια που χτυπούν στη μολύβδινη θωράκιση μπορούν να παράγουν επίσης φθορισμό Kα ακτίνων-X, 74.96 keV. Μερικές από τις

ακτίνες αυτές θα αλληλεπιδράσουν με τον ανιχνευτή NaI(Tl) και θα παράγουν μια κορυφή ακτίνων-X των 74.96 keV στο φάσμα. Η ακτίνα-X του μολύβδου παράγεται από το αρχικό φωτόνιο της πηγής που αλληλεπιδρά με το μόλυβδο με φωτοηλεκτρική διαδικασία. Στη φωτοηλεκτρική διαδικασία το φωτόνιο  $\gamma$  δίνει όλη του την ενέργεια σ' ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο του K ή L φλοιού, εξάγοντάς το έτσι από την τροχιά του. Αν το ηλεκτρόνιο που εξάγεται ανήκει στον K φλοιό, η κενή θέση που θα δημιουργηθεί θα καλυφθεί από ένα ηλεκτρόνιο του L φλοιού που θα μεταπέσει σ' αυτήν τη θέση δίνοντας ακτίνα-X του Pb  $K_{\alpha}$ , που έχει ενέργεια 74.96 keV. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 1.7 καθώς το χαμηλότερο φωτόνιο στη δεξιά πλευρά κτυπά τη μολύβδινη θωράκιση. Η ακτίνα-X του μολύβδου  $K_{\alpha}$  φαίνεται καθαρά στο σχήμα 1.7. Προκειμένου να τονίσουμε αυτήν την ακτίνα-X από το μόλυβδο, έχουμε τοποθετήσει ένα παχύ φύλλο πίσω από την πηγή, προκαλώντας έτσι περισσότερο φθορισμό ακτίνων-X και κάνοντας πιο εμφανή την επίδρασή τους.

**Γ. Ακτινοβολία Εξαύλωσης.** Αυτή η διαδικασία μπορεί να παράγει κορυφές στο φάσμα, ανάλογα με το αν η εξαύλωση, η οποία προέρχεται από τη δίδυμη γέννηση, συμβαίνει στο μόλυβδο ή στον ανιχνευτή NaI(Tl). Και οι δύο αυτές πιθανότητες φαίνονται στο σχήμα I.1. Αν η εξαύλωση συμβεί στο μόλυβδο και ένα από τα δύο φωτόνια  $\gamma$  των 0.511 MeV αλληλεπιδράσει στον ανιχνευτή, τότε μια πρόσθετη κορυφή 0.511 MeV θα εμφανιστεί στο φάσμα που μετριέται. Πρέπει να υπενθυμιστεί ότι αυτή η διαδικασία μπορεί να συμβεί μόνο για ραδιενεργές πηγές που έχουν φωτόνια  $\gamma$  στο διάγραμμα διάσπασής τους μεγαλύτερα από 1.02 MeV. (σχήμα I.6)

Στη δεύτερη περίπτωση, που το προσπίπτον φωτόνιο εξαυλώνεται στον ανιχνευτή (σχήμα I.1), υπάρχουν, γενικά, τρεις κορυφές που μπορούν να παραχθούν. Αν το αρχικό φωτόνιο  $\gamma$  έχει ενέργεια  $E_{\gamma}$ , η πρώτη κορυφή που φαίνεται στο φάσμα αντιστοιχεί σε  $E_{\gamma}$ . Σ' αυτήν την περίπτωση, η  $E_{\gamma}$  εξαυλώνεται στον ανιχνευτή και τα δύο κβάντα που παράγονται από την εξαύλωση αλληλεπιδρούν μέσω της φωτοηλεκτρικής διαδικασίας πριν διαφύγουν από τον ανιχνευτή. Έτσι έχουμε πλήρη απορρόφηση της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου  $\gamma$ . Μια δεύτερη κορυφή θα εμφανιστεί σε ενέργεια  $E_{\gamma} = 0.511$  MeV. Αυτή η κορυφή παράγεται όταν ένα από τα κβάντα της εξαύλωσης απορροφηθεί και το άλλο διαφύγει. Στο φάσμα, αυτό ονομάζεται η πρώτη κορυφή διαφυγής.

Η τρίτη κορυφή ενέργειας  $E_\gamma = 1.02 \text{ MeV}$  παρατηρείται όταν και τα δύο κβάντα της εξαΰλωσης διαφύγουν από τον ανιχνευτή πριν απορροφηθούν. Η κορυφή αυτή ονομάζεται δεύτερη κορυφή διαφυγής. Η πιθανότητα να παρατηρηθεί η κορυφή ολικής απορρόφησης και οι δύο κορυφές διαφυγής εξαρτάται από την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου  $\gamma$  και το μέγεθος του ανιχνευτή. Το σχήμα I.9 δείχνει το φάσμα NaI(Tl) του  $^{228}\text{Th}$  και των θυγατρικών του πυρήνων. Σ' αυτήν την περίπτωση η  $E_\gamma$  είναι  $1.615 \text{ MeV}$  από το  $^{208}\text{Tl}$ . Η πρώτη κορυφή διαφυγής είναι  $1.104 \text{ MeV}$  και διπλή διαφυγή συμβαίνει στα  $1.595 \text{ MeV}$ .

Σχήμα I.9 Φάσμα ύψους παλμών πηγής  $^{228}\text{Th}$ . Παρατηρείτε την πρώτη και την διπλή κορυφή διαφυγής που ξεχωρίζουν από την κορυφή  $^{208}\text{Tl}$  στα  $2.614 \text{ MeV}$ .

**Δ. Αθροιστική Κορυφή.** Το σχήμα I.7 δείχνει ένα φάσμα ύψους παλμών των φωτονίων  $\gamma$  από το  $^{60}\text{Co}$ . Αυτό το ισότοπο είναι πλούσιο σε νετρόνια και θα ακολουθήσει τη διάσπαση  $\beta^-$  σε  $^{60}\text{Ni}$  στο επίπεδο των  $1.50 \text{ MeV}$ . Προκειμένου να αποδιεγερθεί στη βασική στάθμη, ένα φωτόνιο ( $\gamma_1$ ) εκπέμπεται αφήνοντας το  $^{60}\text{Ni}$  στη στάθμη της διέγερσης των  $1.33 \text{ MeV}$ . Αυτή η στάθμη αποσυντίθεται στη βασική στάθμη μέσα σ' ένα χρόνο  $7 \times 10^{-13} \text{ sec}$  με την εκπομπή ενός φωτονίου  $1.33 \text{ MeV}$  ( $\gamma_2$ ). Το κανονικό φάσμα περιέχει έτσι τα φωτόνια των  $1.33 \text{ MeV}$  και  $1.17 \text{ MeV}$ , όπως φαίνεται στο σχήμα I.7. Αυτά τα φωτόνια δίνονται σε ίσους αριθμούς εξαιτίας της διαδοχικής φύσης της διαδικασίας διάσπασης. Η κορυφή των  $1.17 \text{ MeV}$  θα έχει μεγαλύτερο άθροισμα στο μετρημένο φάσμα, επειδή ο ανιχνευτής NaI(Tl) έχει λίγο μεγαλύτερη απόδοση γι' αυτό το μικρότερης ενέργειας φωτόνιο. Προκειμένου να αναλύσουμε την αθροιστική κορυφή, μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα φωτόνια  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  εκπέμπονται ισότροπα (αργότερα θα δούμε ότι η γωνιακή συσχέτιση είναι ισοτροπική έως 16%). Με σημείο αναφοράς την ανάλυση, αν το  $\gamma_1$  εκπεμφθεί στη διεύθυνση του ανιχνευτή, τότε το  $\gamma_2$  μπορεί να εκπεμφθεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Επομένως, είναι δυνατό για τα  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  να εισέλθουν ταυτόχρονα στον ανιχνευτή. Όσον αφορά τον ανιχνευτή, αν και τα δύο  $\gamma$  απορροφηθούν πλήρως, θα παρατηρήσουμε μια αθροιστική κορυφή που το μέγεθός της είναι  $\gamma_1 + \gamma_2$ . Αυτή η αθροιστική κορυφή των  $2.50 \text{ MeV}$  μπορεί εύκολα να φανεί

στο σχήμα I.7. Αργότερα θα αναλύσουμε την πιθανότητα αυτής της κορυφής σε σύγκριση με το  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$ .

## Πείραμα I-3

### Ανάλυση $\gamma$ του φάσματος 835 keV του $^{137}\text{Cs}$

#### Πειραματική Διαδικασία

1. Χρησιμοποιήστε τα ίδια ηλεκτρονικά και τη βαθμονόμηση ενέργειας όπως στα πειράματα I-1 και I-2.
2. Τοποθετήστε την πηγή  $^{137}\text{Cs}$ .
3. Τοποθετήστε τους μολύβδινους απορροφητές πίσω από την πηγή προκειμένου να αυξήσετε την οπισθοσκέδαση και την παραγωγή ακτίνων-X Pb (Κα). Με αυτόν τον τρόπο έχουμε περίπου 2.5 εκ. μολύβδου.
4. Συγκεντρώστε ένα φάσμα για χρονικό διάστημα αρκετό ώστε να σας επιτρέψει να δείτε καθαρά την κορυφή οπισθοσκέδασης και την ακτίνα-X του μολύβδου Κα. Το σχήμα I.10 δείχνει το φάσμα του  $^{54}\text{Mn}$ .
5. Διαβάστε το φάσμα ή χρησιμοποιήστε τη λειτουργία του δρομέα για να βρείτε τον αριθμό καναλιού για: την αιχμή Compton, την κορυφή οπισθοσκέδασης και την ακτίνα-X του Pb.

**Άσκηση Α:** Συμπληρώστε τον Πίνακα I.4 από τις πληροφορίες που έχουν συγκεντρωθεί πιο πάνω και την καμπύλη βαθμονόμησης. Προσέξτε ότι η θεωρητική τιμή για την αιχμή Compton μπορεί να βρεθεί αντικαθιστώντας 0.662 MeV στην εξίσωση (I.6). Η ενέργεια οπισθοσκέδασης βρίσκεται λύνοντας την εξίσωση (I.5) για  $h\nu = 0.662 \text{ MeV}$  και  $\theta = 180^\circ$ .

Event	Channel No	Energy (Measured) MeV	Energy Theory MeV
1 $^{137}\text{Cs}$ (photopeak)			
2 $^{137}\text{Cs}$ Compton edge			
3 $^{137}\text{Cs}$ Backscatter			
4 Pb-Kα x-ray			

Πίνακας I.4

**Άσκηση Β:** Κάντε έναν πίνακα όμοιο με τον Πίνακα Ι.4 για τις αιχμές Compton και κορυφές οπισθοσκέδασης από το  $^{60}\text{Co}$  και  $^{22}\text{Na}$ . Συγκεντρώστε τα απαιτούμενα δεδομένα από αυτές τις πηγές και συμπληρώστε τον πίνακα.

## *Πείραμα I-4*

### *Διακριτική Ικανότητα ενέργειας του $^{137}\text{Cs}$*

#### **Συζήτηση**

Το σχήμα I.7 δείχνει το διάγραμμα διάσπασης και το φάσμα ύψους παλμών του  $^{60}\text{Co}$ . Στο φάσμα οι κορυφές των 1.17 και 1.33 MeV διακρίνονται καθαρά. Αυτές οι δύο κορυφές διαφέρουν περίπου 13% στην ενέργεια και ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται σ' αυτό το πείραμα διαχωρίζει καθαρά αυτά τα δύο φωτόνια. Η ικανότητα ενός ανιχνευτή NaI(Tl) να διαχωρίζει δύο φωτόνια ονομάζεται διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή. Για έναν ανιχνευτή NaI(Tl) η διακριτική ικανότητα μπορεί εύκολα να βρεθεί από το φάσμα ύψους παλμών λύνοντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$R = \frac{\Delta C}{C_0} \times 100\% \quad (\text{I.8})$$

όπου:

R = η διακριτική ικανότητα σε ποσοστό επί τοις εκατό,

$\Delta C$  = ο αριθμός των καναλιών στο πλήρες πλάτος στο μισό του μεγίστου της φωτοκορυφής (FWHM). Αυτή είναι η μετρούμενη διασπορά της κορυφής στο μισό του μεγίστου ύψους της κορυφής.

$C_0$  = ο αριθμός καναλιού του κεντροειδούς της φωτοκορυφής

Το σχήμα 1.11 δείχνει ένα ανεπτυγμένο φάσμα της φωτοκορυφής του  $^{137}\text{Cs}$ . Οι αριθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας φαίνονται στον πίνακα που έχει προστεθεί. Σ' αυτό το πείραμα θα υπολογίσουμε τη διακριτική ικανότητα της φωτοκορυφής του  $^{137}\text{Cs}$  από τη σειρά των πηγών γ.

Σχήμα I.11 Ανεπτυγμένο φάσμα της φωτοκορυφής του  $^{137}\text{Cs}$  στα 0.662 MeV. Φαίνεται το FWHM και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή.

#### **Πειραματική Διαδικασία**

1. Τοποθετήστε την πηγή  $^{137}\text{Cs}$  και συγκεντρώστε ένα φάσμα για χρόνο αρκετό ώστε να πάρετε περίπου 5000 μετρήσεις στο κανάλι της μέγιστης φωτοκορυφής.



2. Διαβάστε το φάσμα ή χρησιμοποιήστε τη λειτουργία του δρομέα στον MCA για να υπολογίσετε τα  $C_0$  και  $\Delta C$ .

**Άσκηση Α:** Χρησιμοποιήστε την εξίσωση (I.8) για να υπολογίσετε τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή.

**Άσκηση Β:** Επαναλάβετε το προηγούμενο πείραμα για τη φωτοκορυφή 0.835 του  $^{54}\text{Mn}$ . (σχήμα I.10)

Σχήμα I.10 Φάσμα του  $^{54}\text{Mn}$  με μόλυβδο, πίσω από την πηγή ώστε να αυξηθεί η οπισθοσκέδαση.

## Πείραμα 1-5

### Προσδιορισμός ενεργότητας πηγής ακτινοβολίας $\gamma$ με τη "Σχετική Μέθοδο"

#### Συζήτηση

Το σχήμα I.12 δείχνει ένα διάγραμμα της απόλυτης μέγιστης απόδοσης ( $\epsilon_1$ ) ενός ανιχνευτή NaI(Tl) για διάφορες ενέργειες  $\gamma$ . Η απόλυτη μέγιστη απόδοση  $\epsilon_1$  είναι ο λόγος των μετρήσεων κάτω από τη φωτοκορυφή προς τον ολικό αριθμό των φωτονίων  $\gamma$  που φεύγουν από την πηγή. Για δοσμένη ενέργεια  $\gamma$  η απόδοση είναι σταθερή. Ο λόγος των ενεργοτήτων δύο πηγών είναι, επομένως, εύκολο να υπολογιστεί παίρνοντας το λόγο των αθροισμάτων κάτω από τις αντίστοιχες φωτοκορυφές τους. Η ενεργότητα μιας άγνωστης πηγής ( $A_x$ ) δίνεται από:

$$A_x = \frac{R_x}{R_s} A_s \quad (I.9)$$

όπου:

$R_x$  = μετρήσεις/sec κάτω από τη φωτοκορυφή της άγνωστης πηγής,

$R_s$  = μετρήσεις/sec κάτω από τη φωτοκορυφή της πηγής με γνωστή ενεργότητα,

$A_s$  = η γνωστή ενεργότητα της πρότυπης πηγής.

Σχήμα 1.12 Διάγραμμα της απόλυτης μέγιστης απόδοσης ανιχνευτή NaI(Tl) για διάφορες ενέργειες  $\gamma$ .

#### Πειραματική Διαδικασία

1. Τα ηλεκτρονικά και η βαθμονόμηση είναι τα ίδια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα I.1 έως I.5.
2. Πάρτε μια βαθμονομημένη πηγή  $^{137}\text{Cs}$  από τον επιβλέποντα και χρησιμοποιήστε το χρόνο ημιζωής της (30,174 έτη) για να υπολογίσετε τη σημερινή της ενεργότητα ( $A_s$ ).

3. Μετρήστε αυτήν την πηγή  $^{137}\text{Cs}$  για χρονικό διάστημα αρκετό ώστε να πάρετε περίπου 7000 μετρήσεις κάτω από την φωτοκορυφή. Υπολογίστε το λόγο μετρήσεις/sec κάτω από τη φωτοκορυφή.
4. Τοποθετήστε την  $^{137}\text{Cs}$  πηγή άγνωστης ενεργότητας και μετρήστε την για χρονικό διάστημα αρκετό ώστε να πάρετε περίπου 7000 μετρήσεις κάτω από την φωτοκορυφή. Υπολογίστε το λόγο μετρήσεις/sec κάτω από τη φωτοκορυφή.
5. Απομακρύνετε όλες τις πηγές και πάρτε μια μέτρηση του υποβάθρου για 200 sec. Υπολογίστε τη ρυθμό μετρήσεων για το υπόβαθρο κάτω από τα ίδια κανάλια που είχαν χρησιμοποιηθεί στα αθροίσματα των φωτοκορυφών του  $^{137}\text{Cs}$ . Ορίστε αυτή την ποσότητα να είναι  $R_b$ .

**Άσκηση Α:** Αφαιρέστε το ρυθμό μετρήσεων για το υπόβαθρο από τις φωτοκορυφές του  $^{137}\text{Cs}$ , τόσο για την πρότυπη, όσο και για τις άγνωστες πηγές. Επομένως θα είναι:

$R_x$  = Ρυθμός μετρήσεων κάτω από την άγνωστη φωτοκορυφή του  $^{137}\text{Cs}$  μείον  $R_b$ .

$R_s$  = Ρυθμός μετρήσεων κάτω από την γνωστή φωτοκορυφή του  $^{137}\text{Cs}$  μείον  $R_b$ .

Από τα παραπάνω δεδομένα και την εξίσωση (I.9) υπολογίστε την άγνωστη ενεργότητα  $A_x$ .

**Άσκηση Β:** Ο επιβλέπων θα σας προμηθεύσει με δύο πηγές  $^{22}\text{Na}$  μια με γνωστή και μια με άγνωστη ενεργότητα. Χρησιμοποιήστε την παραπάνω διαδικασία για να υπολογίσετε την άγνωστη ενεργότητα του  $^{22}\text{Na}$ .

Η “σχετική μέθοδος” προσδιορισμού της άγνωστης ενεργότητας μιας πηγής είναι η καλύτερη και η πιο πλατιά χρησιμοποιούμενη διαδικασία για τη βαθμονόμηση της έντασης μιας πηγής. Η πιθανότητα σφάλματος είναι πολύ μικρή.

## **Πείραμα I-6**

### **Προσδιορισμός ενεργότητας πηγής ακτινοβολίας $\gamma$ με την "Απόλυτη Μέθοδο"**

#### **Συζήτηση**

Τα ίδια δεδομένα που υπάρχουν από το πείραμα I-5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της άγνωστης ενεργότητας μιας πηγής με την "απόλυτη μέθοδο". Η ενεργότητα μιας άγνωστης πηγής μπορεί να γραφτεί:

$$A = \frac{R_x}{\epsilon_1 f_g} \quad (I.10)$$

όπου:

$\epsilon_1$  = η τιμή που διαβάζεται από το σχήμα I.12 για τα φωτόνια που εξετάζουμε.

$f_g$  = το κλάσμα των διασπάσεων του εκπομπού με άγνωστη ενεργότητα που δίνουν  $\gamma$ .

Αυτό είναι το κλάσμα των διασπάσεων, στις οποίες εκπέμπεται το φωτόνιο που μας ενδιαφέρει. (Πίνακα I.3 για μερικά από τα πιο συνηθισμένα ισότοπα).

#### **Πειραματική Διαδικασία**

1. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε όλα τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί στο πείραμα I-5 για το πείραμα αυτό.

**Άσκηση A:** Χρησιμοποιήστε την εξίσωση (I.10) για να υπολογίσετε την ενεργότητα της άγνωστης και της πρότυπης πηγής και συγκρίνετε τις τιμές σας με τις απαντήσεις που πήρατε στο Πείραμα I-5. Το σχήμα I.13 δείχνει το φάσμα για μια πηγή  $^{137}\text{Cs}$  (1 $\mu\text{Ci}$ ). Η περιοχή του ενδιαφέροντός μας έχει καθοριστεί ώστε να περιέχει τη φωτοκορυφή. Το υπόδειγμα υπολογισμού που φαίνεται σ' αυτό το σχήμα υποδεικνύει σφάλμα 8,8% που είναι μέσα στην ακρίβεια της ενεργότητας της πρότυπης πηγής από τη σειρά των πηγών.

Σχήμα I.13 Φάσμα του  $^{137}\text{Cs}$  για τη μέτρηση της απόλυτης μεγίστης απόδοσης ανιχνευτή NaI(Tl)

**Άσκηση Β:** (προαιρετική για κρυστάλλους NaI(Tl) διαφόρων μεγεθών).

Το σχήμα I.14 δείχνει την ενδογενή μέγιστη απόδοση  $\epsilon_3$  για έξι διαφορετικά μεγέθη κρυστάλλων. Οι τιμές  $\epsilon_a$  που έχουν σχεδιαστεί αντιστοιχούν σε απόσταση ανάμεσα στην πηγή και τον κρύσταλλο 9.3 cm. Αν διατεθεί ένας ανιχνευτής NaI(Tl) που έχει συμπεριληφθεί σ' αυτό το σχήμα, μπορείτε να προσδιορίσετε την άγνωστη ενεργότητα μιας πηγής χρησιμοποιώντας την εξίσωση (I.11):

$$A = \frac{R_x}{\epsilon_a G f_g} \quad (\text{I.11})$$

όπου:

$$G = \frac{\text{Μετωπική επιφάνεια του ανιχνευτή}}{4\pi S^2} (\text{cm}^2)$$

$s = 9.3 \text{ cm}$

Φυσικά, η απόλυτη μέθοδος προσδιορισμού της άγνωστης ενεργότητας πηγής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για τους ανιχνευτές στο σχήμα I.14. Η διαδικασία είναι η ίδια όπως στο πείραμα I-5.

Σχήμα I.14 Ενδογενής μέγιστη απόδοση ( $\epsilon_a$ ) για έξι διαφορετικά μεγέθη κρυστάλλων. Η απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή είναι 9.3 cm

## Πείραμα I-7

### Ανάλυση της Αθροιστικής Κορυφής στη Φασματοσκοπία NaI(Tl)

#### Συζήτηση

Το σχήμα I.7 δείχνει ένα φάσμα ύψους παλμών των δύο φωτονίων  $\gamma$  από το  $^{60}\text{Co}$  και την αθροιστική τους κορυφή στα 1.50 MeV. Στις παραπάνω συζητήσεις μας για την ανάλυση της αθροιστικής κορυφής, υποδείχτηκε ότι υπήρχε πεπερασμένη πιθανότητα για τα φωτόνια  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  να εισέλθουν στον ανιχνευτή ταυτόχρονα. Η λέξη ταυτόχρονα, όπως χρησιμοποιείται εδώ, σημαίνει ότι τα  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  αλληλεπιδρούν μέσα στον ανιχνευτή μέσα σε ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$  που είναι μικρότερο από το χρόνο διαχωρισμού του συστήματος (1 μικροδευτερόλεπτο). Όταν αυτό συμβεί, ο φωτεινός παλμός που θα εξέλθει από τον ανιχνευτή θα είναι  $\gamma_1 + \gamma_2$ . Στο σχήμα 1.7 το ολοκληρούμενο άθροισμα κάτω από το  $\gamma_1$  (την φωτοκορυφή των 1.17 MeV) δίνεται από:

$$\Sigma_1 = \varepsilon_1 f_g A t \quad (\text{I.12})$$

όπου:

$A$  = η ενεργότητα της πηγής  $^{60}\text{Co}$  σε μετρήσεις/sec,

$f_g = 1$  για το  $^{60}\text{Co}$  (Πίνακα 1-1.2),

$\varepsilon_1$  = η απόδοση από το σχήμα I.12 για το  $\gamma_1$

Με τον ίδιο τρόπο το θεωρητικό άθροισμα κάτω από το  $\gamma_2$  μπορεί να γραφτεί:

$$\Sigma_2 = \varepsilon_2 A t \quad (\text{I.13})$$

αφού το  $f_g$  ισούται με τη μονάδα.

Ο αριθμός των μετρήσεων κάτω από την αθροιστική κορυφή μπορεί να προσδιοριστεί συνδυάζοντας τις εξισώσεις (I.12) και (I.13):

όπου  $\{W(0^0)\} \cong 1$  για το  $^{60}\text{Co}$ .

#### Πειραματική Διαδικασία

1. Χρησιμοποιήστε την ίδια βαθμονόμηση ενέργειας όπως στο προηγούμενο πείραμα.

2. Τοποθετήστε την πρότυπη πηγή  $^{60}\text{Co}$  σε απόσταση από τον ανιχνευτή που είναι συμβατή με την καμπύλη απόδοσης που χρησιμοποιείται (σχήμα I.12)
3. Συγκεντρώστε ένα φάσμα για χρονική περίοδο αρκετή ώστε να πάρετε 2000 κρούσεις στην αθροιστική κορυφή (σχήμα I.7) Υπολογίστε το  $\left(\frac{\Sigma_s}{t}\right)$

**Άσκηση Α:** Χρησιμοποιήστε την εξίσωση (I.14) και τις τιμές των  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  από το σχήμα I.12 για να υπολογίσετε το  $\Sigma_{st}$  για την πρότυπη πηγή  $^{60}\text{Co}$ . Πως οι πειραματικές σας τιμές συγκρίνονται με την εξίσωση (I.14);

**Άσκηση Β:** Η παραπάνω άσκηση είναι για ανιχνευτή (κρύσταλλο) διαστάσεων  $1,5 \times 1''$ . Αν ο ανιχνευτής έχει ένα από τα μεγέθη που φαίνονται στο σχήμα I.14 μπορείτε να πάρετε δεδομένα με τη γεωμετρία που υποδεικνύεται στο σχήμα. Κάθε απόδοση δίνεται στη συνέχεια από την εξίσωση (I.11). Η ποσότητα  $\left(\frac{\Sigma_s}{t}\right)$  δίνεται

ύστερα από:

$$\left(\frac{\Sigma_s}{t}\right) = \varepsilon_1 \varepsilon_2 G^2 A$$

όπου τα  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  είναι οι ενδογενείς μέγιστες αποδόσεις για τα φωτόνια  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  από το σχήμα I.14.

## Πείραμα I-8

### Προσδιορισμός του Γραμμικού Συντελεστή Απορρόφησης

#### Συζήτηση

Το σχήμα I.6 δείχνει ένα διάγραμμα των ενεργών διατομών των διαδικασιών του Φωτοηλεκτρικού, του Compton και της Δίδυμης Γέννησης σαν συνάρτηση της ενέργειας του φωτονίου για ένα ανιχνευτή NaI(Tl). Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται επίσης η ολική ενεργός διατομή και για τις τρεις διαδικασίες μαζί. Αφού τα φωτόνια των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτό το πείραμα έχουν ενέργεια χαμηλότερη από 1,5 MeV, το ενδιαφέρον μας εστιάζεται κυρίως στις αλληλεπιδράσεις του Φωτοηλεκτρικού και του Compton. Από το σχήμα I.6 μπορεί κανείς να δει ότι σε ενέργεια 0.260 MeV η ενεργός διατομή του Φωτοηλεκτρικού και του Compton είναι σχεδόν ίσες. Σ' αυτό το σημείο ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης,  $\mu$ , έχει περίπου την τιμή  $0,35 \text{ cm}^{-1}$ . Σε σχέση με το μετρημένο φάσμα, αυτό θα σήμαινε θεωρητικά ότι η περιοχή κάτω από τη φωτοκορυφή για μια πηγή  $\gamma$  0.260 MeV θα ήταν ακριβώς ίση με την περιοχή κάτω από την κατανομή Compton. Πειραματικά, θα βρίσκαμε ότι σ' αυτή την ενέργεια, το άθροισμα της φωτοκορυφής είναι μεγαλύτερο από την κατανομή Compton. Η αιτία αυτού του γεγονότος είναι ότι, ακόμα και για μικρούς ανιχνευτές NaI(Tl), ορισμένα από τα σκεδαζόμενα φωτόνια από την αλληλεπίδραση Compton θα δώσουν φωτοηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις πριν διαφύγουν από τον κρύσταλλο και έτσι θα απορροφηθούν τελείως. Αυτοί οι παλμοί θα παρουσιαστούν κάτω από τη φωτοκορυφή. Υπάρχουν πολλοί τρόποι που αυτές οι πολλαπλές αλληλεπιδράσεις μπορούν να δώσουν ολική απορρόφηση και επομένως ένα καλύτερο όνομα για τη φωτοκορυφή είναι κορυφή ολικής απορρόφησης.

Ένα διάγραμμα του γραμμικού συντελεστή απορρόφησης για το μόλυβδο είναι παρόμοιο στη μορφή με το σχήμα I.6. Η κύρια διαφορά είναι ότι το μέγεθος του γραμμικού συντελεστή απορρόφησης για το μόλυβδο είναι μεγαλύτερο από τις τιμές στο σχήμα I.6, αφού ο ατομικός αριθμός του μολύβδου είναι μεγαλύτερος. Όμοια οι τιμές για το αλουμίνιο θα είναι μικρότερες. Προκειμένου να μελετήσουμε την εξασθένιση της ακτινοβολίας  $\gamma$  μέσα από διάφορα υλικά, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη το νόμο του Lambert (βλ. αναφορά 3). Η ελάττωση στην ένταση της ακτινοβολίας  $\gamma$ , καθώς περνά μέσα από έναν απορροφητή, δίνεται από:



$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (I.15)$$

όπου:

$I$  = η ένταση μετά από τον απορροφητή,

$I_0$  = η αρχική ένταση,

$\mu$  = ο ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης σε cm /g,

$x$  = η πυκνότητα πάχους σε g/cm<sup>2</sup> (πυκνότητα πάχους είναι η πυκνότητα του ελάσματος του απορροφητή πολλαπλασιασμένο με το πάχος του)

Ο Πίνακας I.5 δίνει τον ολικό συντελεστή μαζικής εξασθένησης στο μόλυβδο για τέσσερα ισότοπα.

Isotope	Energy (MeV)	$\mu$ (Lead) $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$
<sup>60</sup> Co	1.17, 1.33 (average 1.25)	0.063
<sup>54</sup> Mn	0.835	0.083
<sup>137</sup> Cs	0.662	0.105
<sup>57</sup> Co	0.122	3.10

Πίνακας 1.5 Ολικός συντελεστής μαζικής εξασθένησης στο μόλυβδο

### Πειραματική Διαδικασία

1. Η ίδια ενίσχυση και καμπύλη βαθμονόμησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στα προηγούμενα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν και γι' αυτό το πείραμα.
2. Τοποθετήστε την πηγή <sup>137</sup>Cs (1μCi) και τον απορροφητή. Συγκεντρώστε ένα φάσμα για 100sec. Διαβάστε το φάσμα ή χρησιμοποιήστε το δρομέα και τις λειτουργίες του MCA για να προσδιορίσετε το άθροισμα της ολικής φωτοκορυφής. Μηδενίστε το MCA.
3. Τοποθετήστε τον πρώτο απορροφητή μολύβδου ( $900 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ ) και συγκεντρώστε ένα φάσμα για 100sec. Αθροίστε το ολικό φάσμα, όπως στο βήμα 1.
4. Επαναλάβετε το βήμα 3 για τους υπόλοιπους από τους απορροφητές μολύβδου και συνδυασμούς των ίδιων προκειμένου να έχετε μια ολική πυκνότητα πάχους τουλάχιστο  $13 \text{ g/cm}^2$ . Έτσι θα πάρετε συνολικά 8 περίπου σημεία δεδομένων.

**Άσκηση Α:** Κατασκευάστε ένα διάγραμμα σε ημιλογαριθμικό χαρτί του αθροίσματος που έχει συγκεντρωθεί ως προς το πάχος του απορροφητή. Από αυτήν την ευθεία γραμμή υπολογίστε το στρώμα ημίσειας τιμής (HVL). Το HVL ορίζεται ως το πάχος του μολύβδου που απαιτείται για να μειώσει το άθροισμα των  $\gamma$  στο μισό της τιμής που θα είχε χωρίς την παρουσία του απορροφητή. Από την εξίσωση (I.15) για  $x =$  έχουμε  $I/I_0 = 0.5$ . Μπορούμε, επομένως, να προσδιορίσουμε το  $\mu$  από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mu = \frac{0,693}{(\text{HVL})} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad (\text{I.16})$$

Η δεκτή τιμή για το  $\mu$  από τον Πίνακα I.5 για το  $^{137}\text{Cs}$  είναι  $0,105 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Οι μετρημένες σας τιμές δε θα πρέπει να αποκλίνουν περισσότερο από 10% από αυτήν την τιμή.