

ΑΣΚΗΣΗ 6

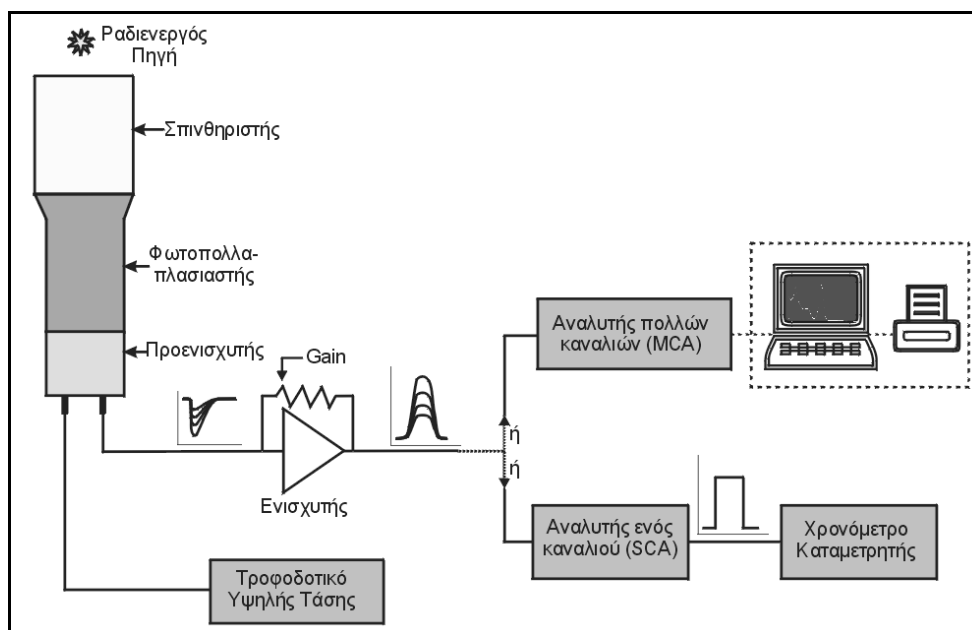
ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ- γ

Με τον όρο φασματοσκοπία ακτίνων- γ εννοούμε την ανίχνευση της ακτινοβολίας γ και την καταμέτρηση της έντασής της σαν συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων της. Το λαμβανόμενο φάσμα όμως, εξαρτάται εκτός από την ενέργεια της ακτινοβολίας γ και από το είδος του ανιχνευτή. Στην άσκηση αυτή θα δούμε την μορφή του φάσματος όταν χρησιμοποιείται ανιχνευτής σπινθηρισμών NaI(Tl).

6.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

6.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ - γ

Το σύστημα φασματοσκοπίας ακτίνων γάμμα, αποτελείται από τον σπινθηριστή, τον φωτοπολλαπλασιαστή (photomultiplier, PM), τον προενισχυτή, τον ενισχυτή και τον αναλυτή ύψους παλμών (Σχήμα 6.1). Αν ο αναλυτής είναι ενός καναλιού, (Single Channel Analyzer, SCA), συνοδεύεται από καταμετρητή παλμών και χρονόμετρο. Αν ο αναλυτής είναι πολλών καναλιών (Multi Channel Analyzer, MCA), συνοδεύεται από υπολογιστή εφοδιασμένο με ADC και το ανάλογο πρόγραμμα.



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα συστήματος γάμμα φασματοσκοπίας.

Η λογική λειτουργίας του συστήματος είναι, συνοπτικά, η εξής: τα φωτόνια της ακτινοβολίας γ της πηγής που αλληλεπιδρούν με τον σπινθηριστή, παράγουν με μία σειρά φαινομένων έναν παλμό φωτός το καθένα, ο οποίος παλμός προσπίπτει στη φωτοκάθοδο του PM. Ο κάθε φωτεινός παλμός προκαλεί εκεί τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού παλμού στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή (άνοδος), το ύψος του οποίου είναι ανάλογο της ενέργειας που έχει αποτεθεί στον σπινθηριστή από το αρχικό φωτόνιο γ . Οι φωτεινοί παλμοί ακολούθως οδηγούνται μέσω του προενισχυτή, στον ενισχυτή, όπου και ενισχύονται φτάνοντας σε ύψος μερικών Volt.

Για την καταχώρηση των παλμών ανάλογα με το ύψος τους, χρησιμοποιείται, είτε ο αναλυτής ενός καναλιού, είτε ο αναλυτής πολλών καναλιών.

Ο αναλυτής ενός καναλιού επιλέγει, από όλους τους παλμούς που δέχεται στην είσοδό του, μόνον αυτούς που το ύψος τους βρίσκεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο "κανάλι", δηλαδή σε μια περιοχή ύψους από V ως $V+\Delta V$. Το κανάλι αυτό καθορίζεται στον αναλυτή από την τιμή κατωφλίου V και το άνοιγμα του παραθύρου ΔV . Όσοι παλμοί τυχαίνει να έχουν ύψος μέσα στα όρια αυτά του καναλιού, προκαλούν τη δημιουργία ενός τετράγωνου παλμού στην έξοδο του αναλυτή (λογικός παλμός). Μετρώντας τον αριθμό των λογικών παλμών για κάποιο χρονικό διάστημα με τον καταμετρητή, ουσιαστικά μετράμε τον αριθμό των παλμών που έφτασαν στον αναλυτή με ύψος από V ως $V+\Delta V$.

Ο αναλυτής πολλών καναλιών κατατάσσει κατά ύψος όλους τους παλμούς που δέχεται στην είσοδό του ταυτόχρονα και γεμίζει τα αντίστοιχα κανάλια, σχηματίζοντας έτσι όλο το φάσμα.

Το πως λειτουργούν τα διάφορα μέρη του συστήματος φασματοσκοπίας αναπτύσσεται λεπτομερειακά στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

6.1.2 ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ

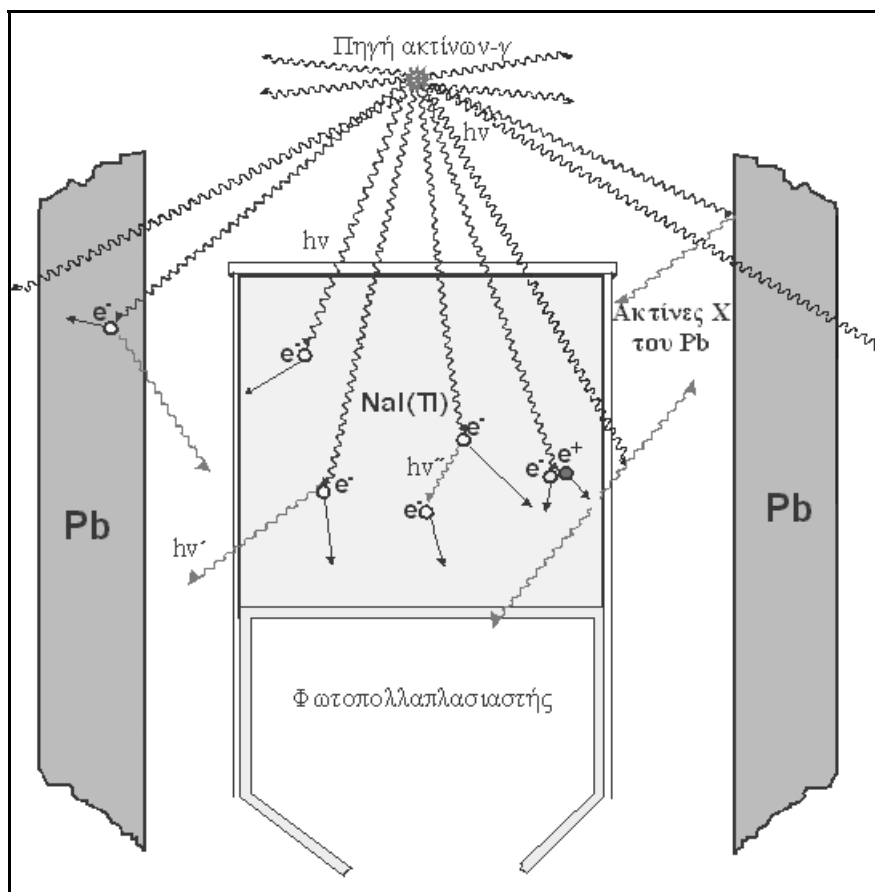
Η απώλεια ενέργειας κατά τη διέλευση ιονιστικής ακτινοβολίας από την ύλη γίνεται με διάφορους μηχανισμούς (Τμήμα 1, παράγραφος 2.2), όπως ιονισμούς και διεγέρσεις ή ακτινοβολία πέδησης (Brehmstrahlung). Το υλικό μέσα από το οποίο διήλθε ένα ιονιστικό σωματίδιο, μετά τη διέγερσή του, αποδιεγείρεται με διάφορους τρόπους, μεταξύ των οποίων είναι και οι ακτινοβολούσες αποδιεγέρσεις, αποδιεγέρσεις δηλαδή με εκπομπή φωτονίων (φωτονίων φθορισμού). Όταν ένα σχετικά μεγάλο ποσοστό της ενέργειας (του ιονιστικού σωματιδίου) που αποτέθηκε στο υλικό, αποδίδεται με τη μορφή φωτονίων φθορισμού, αυτά διαδίδονται εντός του υλικού χωρίς να απορροφώνται και τελικά εξέρχονται ως φωτεινός παλμός, τότε χαρακτηρίζουμε το υλικό αυτό ως **σπινθηριστή** (αναλυτικότερα στην θεωρητική εισαγωγή περί σπινθηριστών, παράγραφος 2). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να καταγραφεί η ενέργεια που αποτίθεται από το ιονιστικό σωματίδιο στον σπινθηριστή, δεδομένου ότι ο αριθμός των παραγομένων φωτονίων φθορισμού είναι ανάλογος της ενέργειας αυτής.

Κατά το μέτρο που η διάδοση των φωτονίων φθορισμού γίνεται ελεύθερα μέσα στο υλικό, μπορούμε να τοποθετήσουμε κατάλληλες διατάξεις στα όρια του υλικού ώστε να αναγνώσουμε την πληροφορία που μεταφέρει ο φωτεινός παλμός που δημιουργούν. Εξυπακούεται προφανώς, ότι το υλικό του σπινθηριστή είναι διαφανές στην παραγόμενη ακτινοβολία του.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ένας καλός σπινθηριστής είναι ο μικρός χρόνος αποδιέγερσης. Δηλαδή, οι διεγερμένες καταστάσεις που δημιουργούνται από τη διέλευση του ιονιστικού σωματιδίου πρέπει να αποδιεγείρονται γρήγορα, ώστε το φωτεινό σήμα να είναι κατά το δυνατόν ταχύτερο. Έτσι είναι δυνατόν να γίνει εκμεταλλεύσιμη και η χρονική πληροφορία για την διέλευση του σωματιδίου πέραν της ενεργειακής.

6.1.3 ΑΠΟΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟ

Είναι γνωστό ότι το φάσμα των ακτίνων γάμμα που εκπέμπουν τα ραδιενεργά ισότοπα είναι γραμμικό, δηλαδή αποτελείται από μονοενεργειακές ακτίνες γάμμα. Υπάρχουν πηγές που εκπέμπουν ακτίνες γάμμα μιας και μόνο συγκεκριμένης ενέργειας. Όμως, ο αριθμός των φωτονίων φθορισμού που παράγονται από τον σπινθηριστή, δεν είναι σταθερός για ίδιας ενέργειας ακτίνες-γ.



Σχήμα 6.2 Εναλλακτικοί τρόποι αλληλεπίδρασης φωτονίου με τον κρύσταλλο NaI(Tl) και η ενέργεια που αποτίθεται αντίστοιχα από μονοενεργειακή πηγή ακτίνων-γ με ενέργεια E_0 .

Από αριστερά προς τα δεξιά:

- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (ΦΦ). Η συλλεγόμενη ενέργεια είναι περίπου $E_0 = h\nu$.
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με φαινόμενο Compton (ΦC) και το φωτόνιο Compton διαφεύγει από τον σπινθηριστή. Η συλλεγόμενη ενέργεια είναι $E_e < E_0$.
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ΦC και το φωτόνιο Compton απορροφάται από τον σπινθηριστή, π.χ. με ΦΦ. Η συλλεγόμενη ενέργεια είναι E_0 .
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με δίδυμη γένεση (μόνον αν $E_0 > 1.022$ MeV). Τα παραγόμενα ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο αφήνουν το σύνολο της ιονιστικής τους ενέργειας στον σπινθηριστή, αλλά τα φωτόνια εξαύλωσης του ποζιτρονίου διαφεύγουν. Η συλλεγόμενη ενέργεια θα είναι ίση με $E_0 - 1.02$ MeV. Δεν αποκλείεται φυσικά να απορροφηθεί είτε ένα είτε και τα δύο φωτόνια εξαύλωσης.

Η ένταση των φωτεινών παλμών παρουσιάζει μία κατανομή, που αντιστοιχεί στο ποσοστό της ενέργειας που αποτίθεται κάθε φορά στο σπινθηριστή από το ιονιστικό σωματίδιο που παράγεται από την αλληλεπίδραση των ακτίνων- γ με τον κρύσταλλο. Είναι προφανές ότι αν γίνει π.χ. φαινόμενο Compton, το ηλεκτρόνιο Compton μπορεί να έχει από μία ελάχιστη, σχεδόν μηδενική, ενέργεια μέχρι μία μέγιστη που είναι ένα ποσοστό της ενέργειας του αρχικού φωτονίου. Αν το φωτόνιο Compton διαφύγει από τον κρύσταλλο, τότε θα αποτεθεί μόνο η ενέργεια του ηλεκτρονίου Compton, άρα ο τελικός φωτεινός παλμός θα έχει αντίστοιχη ένταση η οποία σίγουρα θα είναι μικρότερη από την ένταση του παλμού που παράγεται όταν το σύνολο της ενέργειας του φωτονίου αποτίθεται στον σπινθηριστή. Στο σχήμα 6.2 φαίνονται διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να αλληλεπιδράσει ένα φωτόνιο με το υλικό του σπινθηριστή και η ενέργεια που αποτίθεται στον κρύσταλλο αντίστοιχα (αναλυτικότερα στο Τμήμα 1, παράγραφος 2.3).

Στις μικρές ενέργειες ακτίνων- γ (π.χ. < 400 keV) η πιθανότερη αλληλεπίδραση, είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Δεδομένου όμως ότι σε μεγαλύτερες ενέργειες η ενεργός διατομή του FC είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτής του ΦΦ, το φαινόμενο αυτό είναι ο κύριος μηχανισμός αλληλεπίδρασης των ακτίνων- γ με την ύλη. Το προκύπτον όμως φωτόνιο Compton, έχοντας μικρότερη ενέργεια μπορεί να αλληλεπιδράσει με ΦΦ. Σαν αποτέλεσμα έχουμε πλήρη απορρόφηση της ενέργειας του αρχικού φωτονίου (όπως και σε ένα απλό ΦΦ).

6.1.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ

Το φαινόμενο χαρακτηρίζει και τις τρεις καταστάσεις της ύλης, είναι δηλαδή δυνατόν να έχουμε αέριους, υγρούς ή στερεούς σπινθηριστές, με διαφορετικές μεταξύ τους ιδιότητες. Κατά τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, επιλέγεται κάθε φορά ο καταλληλότερος σπινθηριστής.

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι σπινθηριστές είναι οι στερεάς κατάστασης, οι οποίοι διαιρούνται στους ανόργανους και τους οργανικούς. Οι ανόργανοι υπερέχουν γενικά στην απόδοση παραγωγής φωτονίων, ενώ οι οργανικοί είναι συνήθως ταχύτεροι. Στην παρούσα άσκηση, που αφορά την γάμμα φασματοσκοπία, θα χρησιμοποιηθεί σπινθηριστής σε στερεά κατάσταση, πιο συγκεκριμένα Ιωδιούχο Νάτριο με ενεργοποιητή Θάλλιο, NaI(Tl).

Οι μηχανισμοί παραγωγής φωτός στους οργανικούς και τους ανόργανους σπινθηριστές είναι εντελώς διαφορετικοί. Στους μεν οργανικούς ο μηχανισμός σχετίζεται με τη δομή του μορίου, γι' αυτό και είναι ανεξάρτητος του αν το υλικό είναι σε στερεά, υγρή ή αέρια φάση. Αντιθέτως, όπως θα δούμε, στους ανόργανους σπινθηριστές ο μηχανισμός συνδέεται με την κρυσταλλική δομή του υλικού, άρα περιορίζεται αποκλειστικά στη στερεά φάση.

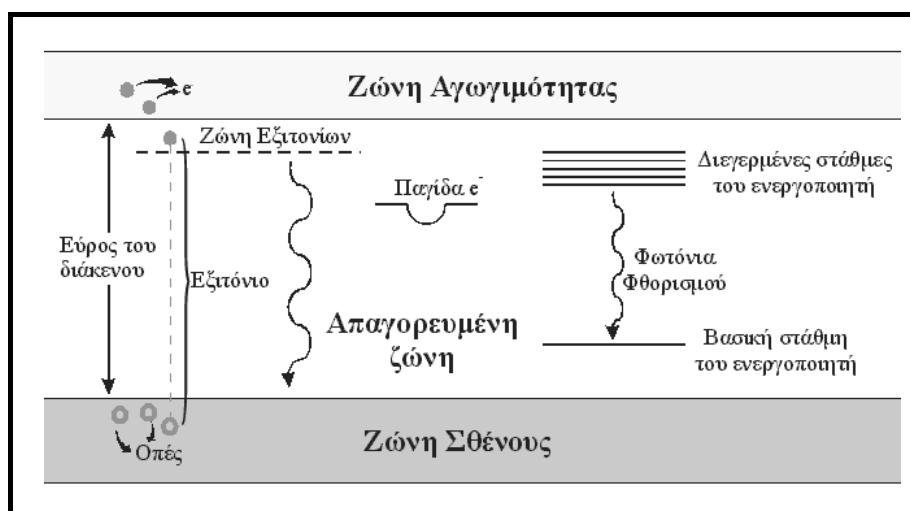
Στα περαιτέρω θα επικεντρωθούμε στους ανόργανους σπινθηριστές και κυρίως στο NaI(Tl) , δίνοντας μια σχετικά απλοποιημένη εικόνα του μηχανισμού παραγωγής φωτός, δεδομένου ότι η συνολική διαδικασία είναι εξαιρετικά πολύπλοκη.

Στην κρυσταλλική κατάσταση τα άτομα του υλικού, π.χ. τα άτομα νατρίου και ιωδίου στην συζητούμενη περίπτωση, είναι διατεταγμένα στο χώρο με κανονικό τρόπο. Το Ιωδιούχο Νάτριο κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα, ως εκ τούτου τα άτομα βρίσκονται στις κορυφές κύβων και το κάθε άτομο έχει στην εγγύς γειτονία του έξι άτομα του άλλου είδους, δηλαδή το κάθε άτομο νατρίου γειτονεύει άμεσα με 6 άτομα ιωδίου και αντιστρόφως. Αυτή η διάταξη εκτείνεται και στις τρεις κατευθύνσεις στο χώρο, δημιουργώντας το κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού. Με δεδομένες τις θέσεις των πυρήνων στο χώρο, διαμορφώνεται και μία κατανομή δυναμικού η οποία χαρακτηρίζεται προφανώς από μία κανονικότητα. Οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων καθορίζονται από το δυναμικό μέσα στο οποίο κινούνται, είτε αυτό είναι το δυναμικό ενός πυρήνα, είτε οποιοδήποτε άλλο δυναμικό.

Οι ενεργειακές στάθμες των εσωτερικών ηλεκτρονίων κάθε ατόμου στην κρυσταλλική δομή δεν θα είναι πολύ διαφορετικές από αυτές των εσωτερικών ηλεκτρονίων στο ελεύθερο άτομο, διότι δεν επηρεάζονται ισχυρά από τα γειτονικά άτομα. Τα πιο εξωτερικά όμως ηλεκτρόνια δέχονται και την επίδραση των γειτονικών ατόμων, άρα διαμορφώνονται ανάλογα και οι ενεργειακές τους καταστάσεις, οι οποίες γίνονται τόσο πυκνά τοποθετημένες ενεργειακά που διαμορφώνονται σε ζώνες ενεργειακών περιοχών.

Τα πλέον εξωτερικά ηλεκτρόνια είναι προφανώς τα ηλεκτρόνια σθένους. Οι επιτρεπτές ενεργειακές καταστάσεις των ηλεκτρονίων αυτών στα κρυσταλλικά υλικά διαμορφώνουν την λεγόμενη **ζώνη σθένους** (Σχήμα 6.4). Τα ηλεκτρόνια στην περιοχή αυτή, αν και χαλαρά, παραμένουν συνδεδεμένα στις θέσεις στις οποίες βρίσκονται. Πάνω από τη ζώνη αυτή υπάρχει μία ενεργειακή περιοχή κενή από ηλεκτρόνια. Δεν είναι δηλαδή δυνατόν να υπάρχουν ηλεκτρόνια στο υλικό με ενέργειες μέσα στην περιοχή αυτή. Η ζώνη αυτή λέγεται **απαγορευμένη ζώνη**. Ακόμη υψηλότερα

εμφανίζεται μία και πάλι επιτρεπτή ενεργειακή περιοχή, η λεγόμενη **ζώνη αγωγιμότητας**. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε αυτήν την ενεργειακή περιοχή μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο, ως εκ τούτου συνεισφέρουν στην αγωγιμότητά του, από όπου και το όνομα της ζώνης αυτής. Όπως όμως ήδη αναφέρθηκε, τα πλέον εξωτερικά ηλεκτρόνια είναι τα ηλεκτρόνια σθένους, τα οποία φυσικά βρίσκονται ενεργειακά στην αντίστοιχη ζώνη. Άρα η ζώνη αγωγιμότητας θα είναι κενή, εκτός αν για κάποιο λόγο ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους καταστεί δυνατόν να υπερβούν την απαγορευμένη ζώνη και να βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Ένας τέτοιος λόγος θα μπορούσε να είναι η υψηλή θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι στις χαμηλές θερμοκρασίες η ζώνη σθένους είναι πλήρης, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας κενή. Όσο όμως αυξάνεται η θερμοκρασία, ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους μπορεί να πάρουν επαρκή ενέργεια ώστε να υπερπηδήσουν την απαγορευμένη ζώνη και να βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 6.4 Ενεργειακό διάγραμμα κρυσταλλικού σπινθηριστή σύμφωνα με την θεωρία ζωνών.

Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης καθορίζει αν το υλικό θα είναι καλός αγωγός, ημιαγωγός ή μονωτής. Στην τελευταία περίπτωση το εύρος είναι μεγάλο, της τάξης των 10 eV και τα ηλεκτρόνια στη θερμοκρασία δωματίου παραμένουν στη ζώνη σθένους. Ως εκ τούτου το υλικό δεν έχει ελεύθερους φορείς και δεν άγει. Οι ημιαγωγοί είναι μία ενδιάμεση κατάσταση (εύρος της απαγορευμένης ζώνης της τάξης του 1 eV). Οι καλοί αγωγοί τέλος, όπως τα μέταλλα, χαρακτηρίζονται από μικρό έως ανύπαρκτο χάσμα (απαγορευμένη ζώνη), άρα ήδη από χαμηλές θερμοκρασίες διαθέτουν πλήθος

ελευθέρων φορέων. Οι ιοντικοί κρύσταλλοι, όπως το Ιωδιούχο Νάτριο, είναι μονωτές (ενεργειακό διάκενο ~ 8 eV).

Κατά τη διέλευση ιονιστικού σωματιδίου από την ύλη, η ενέργεια αποδίδεται τελικά σε ιονισμούς και διεγέρσεις. Για τις ακτίνες γάμμα, προηγείται η παραγωγή ιονιστικού(ων) σωματιδίου(ων) μέσω των τριών φαινομένων με τα οποία αλληλεπιδρούν συνήθως τα φωτόνια με την ύλη, δηλαδή το φωτοηλεκτρικό, το φαινόμενο Compton και την δίδυμη γένεση (αναλυτικότερα στο Τμήμα 1, παράγραφος 2.3). Στο σχήμα 6.2 φαίνονται εποπτικά μερικές ενδεικτικές δυνατότητες αλληλεπίδρασης ακτίνων γάμμα με το υλικό του σπινθηριστή.

Κατά τη διαδρομή του ιονιστικού σωματιδίου μέσα στην ύλη, όπως αναφέρθηκε, έχουμε ιονισμούς και διεγέρσεις (Τμήμα 1, παράγραφος 2.2.2). Τελικά η ενέργεια αποδίδεται σε έναν αριθμό ηλεκτρονίων που από τη ζώνη σθένους μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Όπως είναι γνωστό, η φύση αρέσκεται στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, επομένως θα ακολουθήσει αποδιέγερση του συστήματος με την μετάπτωση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους. Δεδομένου του εύρους της απαγορευμένης ζώνης, τα φωτόνια που προκύπτουν έχουν ενέργεια στην περιοχή του υπεριώδους. Η επιθυμητή όμως περιοχή ενεργειών για τα φωτόνια αυτά είναι η περιοχή του ορατού φάσματος, ώστε να είναι εύκολα αναγνώσιμα με τα διαθέσιμα συστήματα. Ακόμη, δεδομένου ότι η ενέργεια των φωτονίων είναι τουλάχιστον όσο και το εύρος της απαγορευμένης ζώνης, αυτά είναι ικανά να διεγείρουν εκ νέου ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και έτσι να απορροφηθούν. Ας μην υποτεθεί εδώ ότι αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται αενάως χωρίς πρόβλημα, δηλαδή απορρόφηση φωτονίου με διεγερση ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας, αποδιέγερση του ηλεκτρονίου με εκπομπή νέου φωτονίου κοκ. Ο λόγος είναι ότι από το σύνολο των μεταπτώσεων από τη ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους, ένα ποσοστό είναι μη ακτινοβολούσες μεταπτώσεις, δηλαδή την ενέργεια της μετάπτωσης δεν την απάγει φωτόνιο. Ο συνήθης εναλλακτικός τρόπος είναι με απαγωγή της ενέργειας της μεταπτώσεως από το πλέγμα, ως ταλάντωση πλέγματος. Υπενθυμίζουμε ότι οι τρόποι (συχνότητες) ταλαντώσεως του πλέγματος είναι κβαντισμένοι και καλούνται **φωνόνια**.

Είναι εμφανές ότι η παραγωγή φωτονίων κατά τις αποδιεγέρσεις ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους δεν επαρκεί για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό ως σπινθηριστής. Θα πρέπει να εξασφαλιστεί και η ελεύθερη διάδοση των παραγομένων φωτονίων. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την παρουσία

στο υλικό του σπινθηριστή, μικρών ποσοτήτων από κάποιο κατάλληλο στοιχείο, το οποίο καλείται **ενεργοποιητής**. Η κατανομή δυναμικού μέσα στο υλικό, η οποία έχει κάποια κανονικότητα στο χώρο λόγω της συνεχούς εναλλαγής συγκεκριμένου είδους ατόμων, διαταράσσεται στην περιοχή όπου βρίσκονται τα άτομα του ενεργοποιητή. Με τον τρόπο αυτό αλλάζουν και οι επιτρεπτές στάθμες των ηλεκτρονίων σε σχέση με αυτές του τελείου κρυστάλλου και κάποιες από αυτές δημιουργούνται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη.

Κατά τη διέλευση ιονιστικού σωματιδίου παράγονται τελικά μέσα στον κρύσταλλο ζεύγη ηλεκτρονίων–οπών. Οι οπές έχουν υψηλή κινητικότητα και ουδετεροποιούνται με ηλεκτρόνιο του ενεργοποιητή, ο οποίος εμφανίζεται πλέον σε ιονισμένη κατάσταση. Αυτό γίνεται διότι η ενέργεια ιονισμού του ενεργοποιητή είναι συνήθως μικρότερη από αυτή του υλικού, άρα το ηλεκτρόνιο μετακινούμενο από άτομο του ενεργοποιητή σε άτομο του υλικού, μεταβαίνει σε βαθύτερο πηγάδι δυναμικού, δηλ. ευσταθέστερη κατάσταση. Έτσι το άτομο του ενεργοποιητή εμφανίζει ένα δραστικό θετικό φορτίο, αφού του λείπει ένα ηλεκτρόνιο. Το αρχικό ηλεκτρόνιο του ζεύγους, το οποίο κινείται πλέον στη ζώνη αγωγιμότητας αρπάζεται σε διεγερμένη κατάσταση από τον ενεργοποιητή και στη συνέχεια μεταπίπτει στην βασική κατάσταση εκπέμποντας φωτόνιο. Με δεδομένο ότι οι καταστάσεις αυτές βρίσκονται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη (Σχήμα 6.4), η ενέργεια της μετάπτωσης (~ 3 eV για το NaI(Tl)) θα είναι αρκετά μικρότερη από το πλήρες εύρος του διάκενου (~ 8 eV για το NaI(Tl)). Ως εκ τούτου τα προκύπτοντα φωτόνια δεν έχουν επαρκή ενέργεια ώστε να ξαναδιεγείρουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, οπότε διαδίδονται ελεύθερα. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι *ο ενεργοποιημένος κρύσταλλος είναι διαφανής στη ίδια ακτινοβολία του.*

Τα φωτόνια διαδίδονται ελεύθερα εντός του κρυστάλλου, οπότε καλύπτοντας όλες εκτός μιας τις πλευρές με ανακλαστικό υλικό, οδηγούμε τα φωτόνια σε μία πλευρά όπου έχουμε τοποθετήσει κατάλληλη διάταξη αναγνώσεως της πληροφορίας που φέρουν τα φωτόνια. Τα φωτόνια αυτά έχουν ένα φάσμα μηκών κύματος το οποίο είναι χαρακτηριστικό του είδους του σπινθηριστή.

Σε όλη την μέχρι τώρα διαδικασία η πληροφορία της ενέργειας που φέρεται από το προς μέτρηση φωτόνιο διατηρείται, αρκεί να αποδοθεί το σύνολο της ενέργειάς του μέσα στον σπινθηριστή. Όσο μεγαλύτερη η ενέργειά του, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ενέργεια που θα έχουν συνολικά τα ιονιστικά σωματίδια που θα προκύψουν. Τα ιονιστικά σωματίδια θα προκαλέσουν αντίστοιχα πολλές διεγέρσεις ηλεκτρονίων του

κρυστάλλου στη ζώνη αγωγιμότητας και με τις αποδιεγέρσεις θα παραχθούν αντίστοιχα πολλά φωτόνια του ορατού φάσματος (Πίνακας 6.1).

6.1.5 ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ

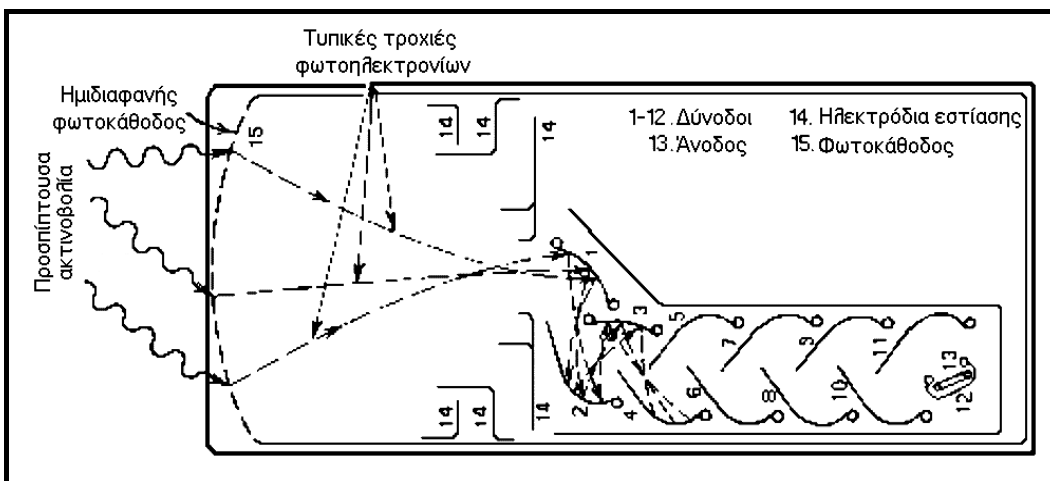


Σχήμα 6.5 Φωτοπολλαπλασιαστής.

Η πληροφορία αυτή της ενέργειας διατηρείται και στα επόμενα στάδια, το πρώτο από τα οποία είναι η πρόσπτωση των φωτονίων σε μία φωτοευαίσθητη επιφάνεια που λέγεται **φωτοκάθοδος** και αποτελεί το πρώτο τμήμα του λεγομένου φωτοπολλαπλασιαστή. Το χαρακτηριστικό της φωτοκαθόδου είναι ότι κατά την πρόσπτωση φωτονίων, εξάγονται από αυτήν ηλεκτρόνια. Η επιλογή της φωτοκαθόδου γίνεται

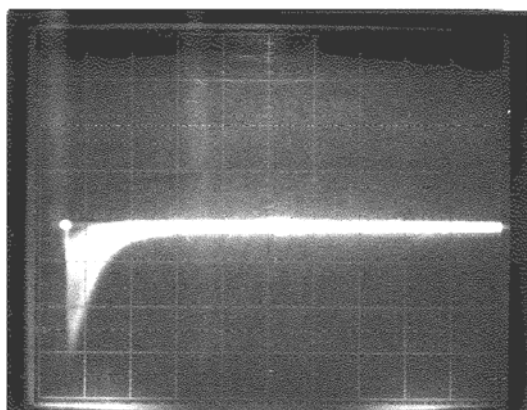
έτσι ώστε το φάσμα των φωτονίων φθορισμού του σπινθηριστή να συμπίπτει με την περιοχή ευαισθησίας της και επιπλέον, να υπάρχει ικανοποιητική απόδοση παραγωγής ηλεκτρονίων (συνήθως 20-30%).

Τα ηλεκτρόνια που εξάγονται από τη φωτοκάθοδο ενισχύονται κατά πολλές τάξεις μεγέθους από τον φωτοπολλαπλασιαστή επιταχυνόμενα από μία σειρά διαδοχικών ηλεκτροδίων τα οποία φέρονται σε συνεχώς αυξανόμενο θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο, με χρήση ενός διαιρέτη τάσεως. Τα ηλεκτρόδια αυτά ονομάζονται **δύνοδοι** και ο συνήθης αριθμός τους κυμαίνεται μεταξύ 6 και 14 (Σχήμα 6.6). Κατά την πρόσ-

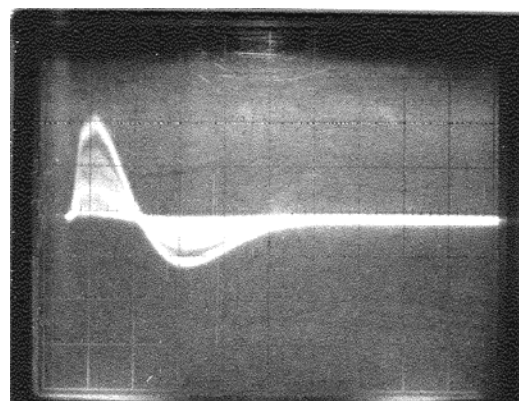


Σχήμα 6.6 Διάγραμμα φωτοπολλαπλασιαστή.

πτωση ενός αριθμού ηλεκτρονίων επί μιας δυνόδου εξάγεται πολλαπλάσιος αριθμός ηλεκτρονίων λόγω της ενδιάμεσης επιτάχυνσης, κατά παράγοντα 6 έως 10 συνήθως.



Σχήμα 6.7 Η έξοδος του φωτοπολλαπλασιαστή στον παλμογράφο (πηγή ^{137}Cs , 50 mV/υποδιαίρεση, 0.5 μsec /υποδιαίρεση).



Σχήμα 6.8 Η έξοδος του ενισχυτή στον παλμογράφο (πηγή ^{137}Cs , 2 V/υποδιαίρεση, 2 μsec /υποδιαίρεση).

Φυσικά ο πολλαπλασιαστικός παράγων αυξάνει όσον αυξάνεται η διαφορά δυναμικού στην οποία επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια, ενώ παράλληλα βελτιώνεται και η ακρίβεια της χρονικής πληροφορίας την οποίαν φέρει ο παλμός.

6.1.6 ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΥΨΟΥΣ ΠΑΛΜΩΝ

Το ζητούμενο είναι η κατά ύψος ανάλυση των παλμών στην έξοδο του ενισχυτή (Pulse Height Analysis: PHA) και επιτυγχάνεται είτε με μία ηλεκτρονική μονάδα που καλείται **Αναλυτής Ενός Καναλιού** (Single Channel Analyzer, SCA), είτε με **Αναλυτή Πολλών Καναλιών** (Multi Channel Analyzer, MCA).

Ο SCA είναι μία απλή λογική μονάδα, η οποία δέχεται στην είσοδό της όλους τους παλμούς από την έξοδο του ενισχυτή. Υποτίθεται (και είναι γενικά σωστό) ότι οι παλμοί αυτοί δεν αλληλεπικαλύπτονται χρονικά. Όταν έλθει στην είσοδο της μονάδας ένας παλμός, ελέγχεται αν το ύψος του είναι μεταξύ δύο ορίων που τίθενται από τον χρήστη, του κάτω κατωφλίου και του άνω κατωφλίου (ουσιαστικά πρόκειται για δύο απλές μονάδες διευκρινιστών). Αν ο παλμός είναι μικρότερος από το κάτω κατώφλι, η μονάδα δεν δίνει έξοδο. Αν υπερβαίνει το κάτω κατώφλι χωρίς να υπερβαίνει το άνω κατώφλι τότε ευρίσκεται μεταξύ των ορίων που τέθηκαν και η μονάδα δίνει στην έξοδό της έναν λογικό παλμό (τετραγωνικός παλμός $\sim 5\text{V}$). Αν ο παλμός υπερβαίνει το άνω

κατώφλι, τότε και πάλι δεν ευρίσκεται μεταξύ των δύο ορίων και η μονάδα δεν δίνει έξοδο. Όλα αυτά φαίνονται ευκρινέστερα στο λογικό πίνακα της μονάδας SCA που ακολουθεί.

> Κάτω κατώφλι	> Άνω κατώφλι	Έξοδος
OXI	OXI	OXI
OXI	NAI	OXI
NAI	OXI	NAI
NAI	NAI	OXI

Η περίπτωση που αναφέρεται στη δεύτερη σειρά του ανωτέρω πίνακα είναι προφανώς αδύνατη.

Με την μονάδα αυτή μπορούμε κάθε φορά να μετράμε τον αριθμό των παλμών με ύψος μεταξύ δύο καθορισμένων τιμών. Αν αρχίσουμε μετρώντας από 0 έως 0.2 Volt, συνεχίζουμε μεταθέτοντας τα όρια σε 0.2 και 0.4 Volt, στη συνέχεια μετράμε από 0.4 έως 0.6 Volt και ούτω καθεξής. Λαμβάνουμε με τον τρόπο αυτό ένα πλήρες φάσμα της κατανομής υψών των παλμών που διαβάζουμε από την έξοδο του ενισχυτή. Στην πράξη, δεν χρειάζεται να μεταβάλλουμε κάθε φορά και τα δύο όρια (άνω και κάτω), διότι οι μονάδες SCA παρέχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλει κανείς μόνο το κάτω όριο (κατώφλι) έχοντας ορίσει ότι το εύρος της περιοχής μέχρι το άνω όριο (παράθυρο) έχει κάποια συγκεκριμένη τιμή πχ. στο παράδειγμα που μόλις συζητήθηκε το εύρος αυτό είναι 0.2 Volts.

Η διαδικασία αυτή για τη λήψη του φάσματος δεν είναι και η καλύτερη δυνατή, αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι όταν μετρούμε τον αριθμό των παλμών που έρχονται και έχουν ύψος πχ. μεταξύ 4 και 4.2 Volts, τότε δεν έχουμε καμία πληροφορία για παλμούς που έχουν ύψη εκτός της περιοχής αυτής και ως εκ τούτου κάνουμε ειδική μέτρηση για κάθε μία περιοχή ώστε να σαρώσουμε όλο το φάσμα. Τέτοιου είδους προβλήματα δεν υπάρχουν όταν χρησιμοποιούμε ένα σύστημα Αναλυτή Πολλών Καναλιών (MCA), το οποίο επεξεργάζεται όλους τους παλμούς που οδηγούνται στην είσοδό του, χωρίς να επιλέγει κάποιους που έχουν ύψη μόνον σε κάποια περιοχή τιμών.

6.1.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

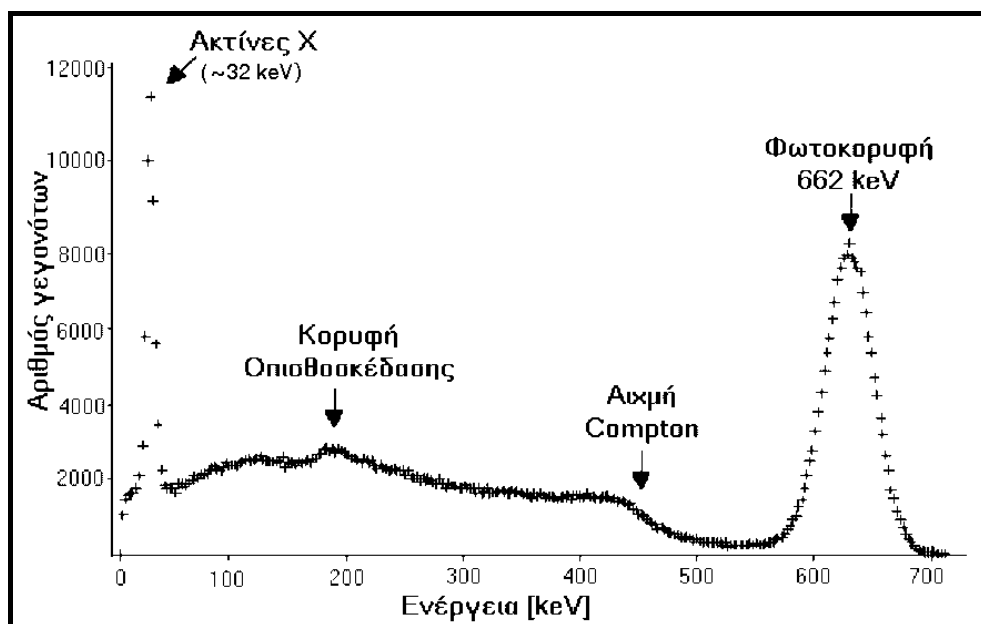
Όπως ήδη αναφέρθηκε, μεγάλο μέρος της ενέργειας των ηλεκτρονίων (ή και ποζιτρονίων) που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση των ακτίνων- γ με τον ανιχνευτή σπινθηρισμών, αποδίδεται από τον κρύσταλλο με την μορφή φωτονίων φθορισμού. Η ένταση της παραγόμενης ακτινοβολίας φθορισμού από τον σπινθηριστή είναι ανάλογη της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων που αποτέθηκε σ' αυτόν. Ακόμα, ανάλογος της έντασης της ακτινοβολίας φθορισμού είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται στην φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή. Η αναλογία μεταφέρεται στον αριθμό των συλλεγομένων ηλεκτρονίων στην άνοδο του φωτοπολλαπλασιαστή, και επομένως στο ύψος του παλμού. Έτσι τελικά, το ύψος του παλμού που λαμβάνεται στην έξοδο του ενισχυτή, είναι ανάλογο της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου (ή των ηλεκτρονίων) που αποτέθηκε στον σπινθηριστή και επομένως εξαρτάται από την ενέργεια των ακτίνων- γ . Με την αξιοποίηση του παραπάνω συσχετισμού, είναι δυνατόν από το ύψος των παλμών να ληφθεί πληροφορία για την ενέργεια του αρχικού φωτονίου. Για τον λόγο αυτό, γίνεται ανάλυση των παλμών κατά ύψος και καταγράφεται ο αριθμός των παλμών που συλλέγονται κατά την διάρκεια της μέτρησης, συναρτήσει του ύψους τους. *Το φάσμα που προκύπτει από την παραπάνω καταγραφή, είναι ουσιαστικά το φάσμα των κινητικών ενεργειών των ηλεκτρονίων που προέκυψαν από την αλληλεπίδραση των ακτίνων- γ .*

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.1.1, σκοπός μας στη φασματοσκοπία γάμμα είναι η καταμέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια πηγή γάμμα σαν συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων. Θα περιμέναμε λοιπόν ότι για μονοενεργειακή πηγή γάμμα, στο φάσμα της να εμφανίζεται μία μόνο κορυφή. Αυτό όμως δεν συμβαίνει. Ο λόγος είναι ότι τα φωτόνια της πηγής, παρά το ότι έχουν όλα την ίδια ενέργεια, δεν αλληλεπιδρούν με τον σπινθηριστή όλα με τον ίδιο τρόπο και έτσι δεν αποθέτουν σ' αυτόν όλα την ίδια ενέργεια.

Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός φάσματος μονοενεργειακής πηγής ακτίνων- γ (με ενέργεια μικρότερη των $2m_e c^2$) που συλλέχθηκε με ανιχνευτή NaI(Tl). Η ραδιενεργός πηγή ήταν ^{137}Cs το οποίο εκπέμπει ακτίνες γάμμα ενέργειας ~ 662 keV και ακτίνες X ενέργειας ~ 32 keV.

Για το σχολιασμό και την κατανόηση των χαρακτηριστικών του φάσματος θα χρησιμοποιήσουμε τους βασικούς ορισμούς και τύπους των φαινομένων που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.3, τμήμα 1 και στο υποκεφάλαιο 6.1.2, τμήμα 2. Τα

κύρια χαρακτηριστικά του φάσματος είναι η φωτοκορυφή, η αιχμή Compton και η κορυφή οπισθοσκέδασης.



Σχήμα 6.9 Φάσμα ακτίνων- γ του ^{137}Cs που λήφθηκε με ανιχνευτή NaI(Tl).

(α) Φωτοκορυφή. Το φάσμα της ολικής κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων που αποτίθεται στον σπινθηριστή όταν δέσμη ακτίνων- γ ενέργειας 1 MeV προσπίπτει σε αυτόν και γίνεται μόνον φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Τμήμα 1, παράγραφος 2.3). Στο σχήμα έχει υποτεθεί ότι οι ακτίνες X που εκπέμπονται κατά την πλήρωση των φλοιών που κενώθηκαν κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (συνήθως ο φλοιός K), έχουν απορροφηθεί από τον ανιχνευτή μέσω δευτερογενών φωτοηλεκτρικών φαινομένων. Έτσι, η κορυφή που παρουσιάζεται στο σχήμα (α) αντιστοιχεί σε *ολική απορρόφηση της ενέργειας των αρχικών ακτίνων- γ* και συνήθως ονομάζεται **φωτοκορυφή**.

Αν οι ακτίνες X διαφεύγουν από τον σπινθηριστή τότε εμφανίζεται η **διαφεύγουσα κορυφή**, αριστερά της φωτοκορυφής, με διαφορά ενέργειας από αυτήν ίση με την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων στα άτομα του σπινθηριστή. Για το NaI ισχύει $b_K(\text{I})=33.17$ keV και $b_K(\text{Na})=1.06$ keV, μέση ενέργεια των εκπεμπόμενων K ακτίνων-X είναι 29.2 keV. Η διαφεύγουσα κορυφή για το σύνηθες μέγεθος των ανιχνευτών σπινθηρισμών είναι ασθενής και δεν παρατηρείται.

(β) Αιχμή Compton. Στο σχήμα (b) παρουσιάζεται η μορφή του φάσματος στην περίπτωση που δέσμη ακτίνων- γ ενέργειας $E_0=1$ MeV αλληλεπιδρά με το υλικό του κρυστάλλου μόνο με φαινόμενο Compton. Στο φάσμα εμφανίζεται εκτός από την

φωτοκορυφή και μία περιοχή με συνεχές φάσμα. Η φωτοκορυφή παράγεται σαν συνέπεια της ολικής απορρόφησης της ενέργειας του φωτονίου E_0 , δηλ. πρακτικά εφόσον αυτό έχει αλληλεπιδράσει με ΦC με απορρόφηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου Compton, T_c , και του φωτονίου Compton, ενέργειας E_c :

$$E_0 = T_c + E_c$$

Το συνεχές φάσμα οφείλεται σε απορρόφηση μόνον της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων Compton, T_c , και διαφυγή της ενέργειας E_c του φωτονίου Compton.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται με στικτή γραμμή η θεωρητική κατανομή των ενεργειών των ηλεκτρονίων Compton. Η κύρια διαφορά μεταξύ αυτής της κατανομής και του φάσματος, αν εξαιρεθεί η περιοχή της φωτοκορυφής, εμφανίζεται στην περιοχή της **αιχμής Compton**. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι από το σύνολο των φωτονίων Compton μεγαλύτερη πιθανότητα έχουν να απορροφηθούν εκείνα που έχουν μικρή ενέργεια, δηλαδή εκείνα που τα συζυγή τους ηλεκτρόνια κατανέμονται περί την αιχμή Compton. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ελάττωση της αιχμής Compton και αντίστοιχη αύξηση της φωτοκορυφής. Η σχετική ένταση της φωτοκορυφής και του συνεχούς τμήματος Compton του φάσματος εξαρτάται, όπως είναι προφανές, από τις διαστάσεις του απαριθμητή και την ενέργεια των ακτίνων-γ.

(c) Κορυφή οπισθοσκέδασης. Η διαπλατυσμένη, σκιασμένη, κορυφή στην αρχή του φάσματος (b), ονομάζεται **κορυφή οπισθοσκέδασης**, αντιστοιχεί δε σε φωτόνια που παρήχθησαν από σκέδαση Compton των αρχικών ακτίνων-γ (της δέσμης 1 MeV) με τα υλικά που περιβάλλουν τον σπινθηριστή. Το ηλεκτρόνιο Compton απορροφάται από αυτά τα υλικά ενώ το φωτόνιο από την σκέδαση Compton εισέρχεται στον σπινθηριστή και αλληλεπιδρά με αυτόν πχ. με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Το πραγματικό φάσμα της ολικής κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων που αποτίθεται στον σπινθηριστή όταν δέσμη ακτίνων-γ ενέργειας 1 MeV προσπίπτει σε αυτόν, προκύπτει από την υπέρθεση - πρόσθεση των φασμάτων (α) και (b). Το φάσμα της έντασης των φωτονίων φθορισμού του κρυστάλλου θα είναι παρόμοιο και επομένως παρόμοια θα είναι και η κατανομή του ύψους των λαμβανομένων παλμών στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή, προενισχυτή και ενισχυτή, εκτός από το γεγονός ότι ορισμένες στατιστικές διαδικασίες προκαλούν διεύρυνση της κατανομής των παλμών σε σχέση με αυτήν των ενεργειών των ηλεκτρονίων (βλ. άσκηση 7.1.3 - διακριτική ικανότητα).

Το φάσμα της ολικής κινητικής ενέργειας που αποτίθεται σε υλικό με μέσο $Z=32$ από τα ηλεκτρόνια που παράγονται από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και φαινόμενο Compton, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9 (c) και (d) αντίστοιχα, για ακτίνες- γ ενέργειας 2.5 MeV. Τα φάσματα αυτά είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα (a) και (b), με μόνη διαφορά την σχετική ένταση μεταξύ τους που οφείλεται στην μικρότερη πιθανότητα αλληλεπίδρασης των ακτίνων- γ ενέργειας 2.5 MeV έναντι της πιθανότητας αλληλεπίδρασης των ακτίνων- γ ενέργειας 1 MeV με το υλικό. Όμως, στα 2.5 MeV υπάρχει πιθανότητα να συμβεί δίδυμη γένεση. Θυμίζουμε ότι κατά τη δημιουργία ζεύγους (ή δίδυμη γένεση) παράγονται ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο των οποίων η συνολική μάζα ηρεμίας είναι 1.022 MeV. Η ενέργεια του αρχικού φωτονίου αναλώνεται στην δημιουργία των παραπάνω σωματιδίων, το δε υπόλοιπο της ενέργειας μοιράζεται εξίσου στα δύο σωματίδια σαν κινητική ενέργεια. Το ποζιτρόνιο, αφού αναλώσει την κινητική του ενέργεια, εξαυλώνεται με κάποιο ηλεκτρόνιο του υλικού παράγοντας 2 συνήθως φωτόνια ενέργειας ίσης με την μάζα ηρεμίας των 2 σωματιδίων (2×511 keV).

Η κατανομή των κινητικών ενεργειών των ηλεκτρονίων (-ποζιτρονίων) παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9 (e). Η κορυφή 0 του σχήματος, προκύπτει από την ολική απόθεση τόσο των κινητικών ενεργειών των πρωτογενών παραγομένων ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων κατά την δίδυμη γένεση, όσο και των κινητικών ενεργειών των ηλεκτρονίων που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις των φωτονίων των 511 keV της εξαύλωσης του ποζιτρονίου, με τον σπινθηριστή. Προφανώς, για να αποτεθεί όλη η ενέργεια του αρχικού φωτονίου των 2.5 MeV, θα πρέπει να απορροφηθούν πλήρως (μέσω φαινομένων Compton και φωτοηλεκτρικού) και τα δύο φωτόνια εξαύλωσης.

Στην περίπτωση που το ένα από τα 2 φωτόνια εξαύλωσης διαφύγει του κρυστάλλου (δεν αλληλεπιδράσει), το δε άλλο απορροφηθεί πλήρως, η ολική αποτιθέμενη ενέργεια είναι ίση με $h\nu-511$ keV, συνεισφέρει στην κορυφή 1 του φάσματος 6.9.(e) και ονομάζεται **απλή διαφεύγουσα**.

Όταν αντίθετα, διαφύγουν του σπινθηριστή και τα δύο φωτόνια εξαύλωσης, τότε στο σπινθηριστή αποτίθεται μόνον η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων της δίδυμης γένεσης. Αυτή αντιστοιχεί στην κορυφή 2 του φάσματος 6.9.(e) που ονομάζεται **διπλή διαφεύγουσα**. Η ενέργεια που αποτίθεται στον σπινθηριστή είναι $h\nu-1.022$ MeV.

Το συνεχές τμήμα του φάσματος 6.9.(e) μεταξύ των κορυφών 2 έως 1 και 1 έως 0 παράγεται από την μερική απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων εξαύλωσης, δηλ

το άθροισμα των κινητικών ενεργειών των ηλεκτρονίων Compton ενώ διαφεύγουν του σπινθηριστή τα φωτόνια της σκέδασης Compton.

Επειδή η δίδυμη γένεση μπορεί να συμβεί και με τα υλικά που περιβάλλουν τον κρύσταλλο, είναι δυνατόν το 1 από τα 2 φωτόνια εξαύλωσης να εισέλθει στον σπινθηριστή και να αλληλεπιδράσει με αυτόν είτε αποδίδοντας όλη την ενέργειά του, οπότε στο φάσμα εμφανίζεται η χαρακτηριστική **κορυφή εξαύλωσης** των 511 keV, είτε τμήμα της ενέργειάς του μέσω των ηλεκτρονίων της σκέδασης Compton οπότε στο φάσμα εμφανίζεται το αντίστοιχο χαρακτηριστικό συνεχές τμήμα Compton.

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όργανα

- i. Σπινθηριστής (1).
- ii. Φωτοπολλαπλασιαστής (2).
- iii. Προενισχυτής – Διαιρέτης τάσης (3).
- iv. Πλαίσιο/Τροφοδοτικό ηλεκτρονικών μονάδων τύπου NIM (NIM Crate) (4).
- v. Τροφοδοτικό Υψηλής Τάσης (HV) (5).
- vi. Ενισχυτής (AMP) (6).
- vii. Αναλυτής ενός καναλιού (SCA) (6).
- viii. Χρονόμετρο-Καταμετρητής (Timer Counter) (7).
- ix. Παλμογράφος (8).
- x. Υπολογιστής εφοδιασμένος με ADC και το ανάλογο πρόγραμμα.(9).
- xi. Ραδιενεργές πηγές (10).

6.2.1 ΣΕΙΡΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Ελέγχουμε τη συνδεσμολογία του συστήματος απαριθμητή σπινθηρισμών. Στη βάση του προενισχυτή έχουμε το καλώδιο υψηλής τάσεως για τον φωτοπολλαπλασιαστή, το καλώδιο τροφοδοσίας του προενισχυτή και το καλώδιο σήματος το οποίο οδηγείται στον ενισχυτή. Το σήμα εξόδου του ενισχυτή οδηγείται είτε στον SCA δια τα περαιτέρω.
2. Εφαρμόζουμε την τιμή υψηλής τάσεως που ενδείκνυται για το σύστημά μας, σύμφωνα με τις οδηγίες του Υπευθύνου του Εργαστηρίου (ΥΕ).

3. Θέτουμε πάνω από τον σπινθηριστή και σε απόσταση περί τα 10 cm, την ραδιενεργό πηγή που θα μας δοθεί από τον ΥΕ.
4. Οδηγούμε την έξοδο του ενισχυτή στον παλμογράφο και παρατηρούμε τους παλμούς. Αν η πηγή μας εκπέμπει τις γάμμα με την μεγαλύτερη ενέργεια μεταξύ όλων εκείνων που θα χρησιμοποιηθούν στην άσκηση, λαμβάνουμε πρόνοια ώστε το μέγιστο ύψος παλμών να είναι περί τα 8 Volt (η μονάδα SCA αναλύει παλμούς με ύψη από 0 έως 10 Volt).
5. Παρατηρούμε πόσο ισχυρά μεταβάλλεται το σήμα όταν μεταβάλλεται η υψηλή τάση, ή η ενίσχυση. Καταγράφουμε τον χρόνο ανόδου και τον χρόνο καθόδου του παλμού. Ελέγχουμε αν η μεταβολή είτε στην ενίσχυση είτε στην υψηλή τάση επηρεάζει τους χρόνους ανόδου και καθόδου του παλμού.
6. Παρατηρούμε στον παλμογράφο τους παλμούς εξόδου του προενισχυτή. Μετρούμε χρόνους ανόδου και καθόδου.
7. Επαναφέρουμε την συνδεσμολογία και οδηγούμε τους παλμούς εξόδου του ενισχυτή στον SCA. Από το σημείο αυτό και πέρα **δεν αλλάζουμε τίποτα** στην υψηλή τάση, την προενίσχυση και την ενίσχυση (γιατί;).
8. Λαμβάνουμε το φάσμα της μονοενεργειακής πηγής με βήμα 0.2 Volt.
9. Αναγνωρίζουμε την φωτοκορυφή, αιχμή Compton και κορυφή οπισθοσκέδασης.
10. Λαμβάνουμε φάσματα και άλλων πηγών που μας διατίθενται από τον ΥΕ.

ΑΣΚΗΣΗ 7

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ & ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ

7.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

7.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Περί της φυσικής του απαριθμητή σπινθηρισμών έχει γίνει αναφορά στην άσκηση της φασματοσκοπίας ακτίνων γάμμα. Ως εκ τούτου, στην παρούσα άσκηση θα περιοριστούμε στο ειδικότερο θέμα της ενεργειακής βαθμολογίας και της διακριτικής ικανότητας του απαριθμητή.

7.1.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΩΝ

Οι ακτίνες γάμμα αλληλεπιδρούν συνήθως με την ύλη με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton ή δίδυμη γένεση. Η φυσική των φαινομένων αυτών ευρίσκεται στην εισαγωγή του βοηθήματος αυτού και δεν θα αναπτυχθεί εδώ, δηλ. θεωρείται γνωστή. Με τα φαινόμενα αυτά παράγεται ιονιστικό σωματίδιο το οποίο, κινούμενο μέσα στον σπινθηριστή, παράγει τελικά μεγάλο αριθμό φωτονίων της περιοχής του ορατού φάσματος (Άσκηση 6).

Σε όλη την μέχρι τώρα διαδικασία η πληροφορία της ενέργειας που έχει αποτεθεί από το προς μέτρηση φωτόνιο γάμμα στον κρύσταλλο διατηρείται, αφού ο αριθμός των παραγομένων φωτονίων από την αποδιέγερση των διεγερμένων καταστάσεων είναι ανάλογος της ενέργειας που αποτέθηκε.

Η πληροφορία αυτή της ενέργειας διατηρείται και στα επόμενα στάδια, το πρώτο εκ των οποίων είναι η πρόσπτωση των φωτονίων σε μία φωτοευαίσθητη επιφάνεια που λέγεται φωτοκάθοδος και αποτελεί το πρώτο τμήμα του φωτοπολλαπλασιαστή. Τα ηλεκτρόνια που εξάγονται από τη φωτοκάθοδο ενισχύονται κατά πολλές τάξεις μεγέθους από τον φωτοπολλαπλασιαστή επιταχυνόμενα από μία σειρά διαδοχικών ηλεκτροδίων τα οποία φέρονται σε συνεχώς αυξανόμενο θετικό δυναμικό ως προς την κάθοδο, με χρήση ενός διαιρέτη τάσεως. Κατά την διαδικασία αυτή η ενεργειακή πληροφορία διατηρείται, αφού τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται αναλογικά από τις δυνόδους, μέχρι και την άνοδο του φωτοπολλαπλασιαστή. Από την άνοδο του φωτοπολλαπλασιαστή το σήμα φέρεται σε έναν προενισχυτή και στη συνέχεια στον ενισχυτή. Και στις βαθμίδες αυτές η πληροφορία της ενέργειας που απέδωσε το αρχικό φωτόνιο διατηρείται, το ύψος δηλαδή του παλμού θα είναι ανάλογο της ενέργειας που αποτέθηκε στον σπινθηριστή.

Το γεγονός ότι το σύστημα καταγράφει την ενεργειακή πληροφορία μέσω του ύψους του παλμού είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα. Με χρήση πηγών ακτίνων γάμμα γνωστής ενέργειας είναι δυνατόν να βαθμολογήσουμε το σύστημα, να αντιστοιχήσουμε δηλαδή την ενέργεια που αποτίθεται στον κρύσταλλο με ύψος παλμού. Η σχέση αυτή είναι γραμμική, οπότε δεν απαιτείται παρά η εύρεση της κλίσεως και ενός σταθερού όρου, κάνοντας μία απλή γραμμική προσέγγιση στα πειραματικά δεδομένα.

Με δεδομένη την πληροφορία της ενεργειακής βαθμολογίας μπορούμε να μετρήσουμε άγνωστες πηγές και, βρίσκοντας την ενέργεια των γάμμα που εκπέμπουν,

να τις ταυτοποιήσουμε. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν το ανιχνευτικό σύστημα έχει υψηλή διακριτική ικανότητα, όπως π.χ. οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης.

7.1.3 ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Στην ιδανική περίπτωση, το φάσμα των παλμών από μονοενεργειακές γάμμα θα ήταν απολύτως γραμμικό, δηλαδή όλοι οι παλμοί που παράγονται από τον απαριθμητή σπινθηρισμών θα είχαν το ίδιο ύψος. Στην πράξη όμως το φάσμα έχει ένα συνεχές μέσα στο οποίο περιέχονται η κορυφή οπισθοσκέδασης, η αιχμή Compton και η φωτοκορυφή. Η φωτοκορυφή αντιστοιχεί στις περιπτώσεις στις οποίες το φωτόνιο γάμμα αποδίδει το σύνολο της ενέργειάς του μέσα στο σπινθηριστή. Το συνεχές οφείλεται στις περιπτώσεις στις οποίες αποτίθεται μέρος μόνον της ενέργειας του φωτονίου στον κρύσταλλο. Θα δούμε τώρα με τη σειρά τους παράγοντες που συνεισφέρουν στη διαπλάτυνση της γραμμής της φωτοκορυφής.

Οι ακτίνες γάμμα προέρχονται από την αποδιέγερση διεγερμένων πυρήνων προς ευσταθέστερη πυρηνική στάθμη. Οι πυρηνικές στάθμες δεν είναι απολύτως συγκεκριμένες, αλλά έχουν ένα μικρό πλάτος λόγω απροσδιοριστίας, που σημαίνει ότι οι ενέργειες των γάμμα δεν είναι απολύτως οι ίδιες, αλλά έχουν μία κατανομή περί μία μέση τιμή. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαπλάτυνση αυτή είναι πάρα πολύ μικρή και δεν έχει καμία ποσοτική σημασία στις μετρήσεις μας. Αναφέρεται απλώς για λόγους πληρότητας της παρούσας συζήτησης, όπως και η δεύτερη πηγή διαπλατύνσεως, η οποία σχετίζεται με το φαινόμενο Doppler. Κατά τη στιγμή της εκπομπής ο πυρήνας εν γένει κινείται, αν όχι λόγω κάποιας κινητικής ενέργειας προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση, τουλάχιστον λόγω θερμοκρασίας. Οπότε η ενέργεια του φωτονίου γάμμα θα είναι μετατοπισμένη ανάλογα με την συνιστώσα κίνησης του πυρήνα κατά τη διεύθυνση εκπομπής του φωτονίου. Όπως όμως αναφέρθηκε ανωτέρω και αυτός ο λόγος διαπλάτυνσης της ενεργειακής κατανομής των φωτονίων γάμμα είναι ποσοτικά ασήμαντος.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι ακτίνες γάμμα από μεταπτώσεις μεταξύ δύο συγκεκριμένων πυρηνικών σταθμών μπορούν να θεωρηθούν απολύτως μονοενεργειακές. Η τελική κατανομή υψών των παλμών όμως της φωτοκορυφής έχει πλάτος το οποίο παραμετροποιείται με την ποσότητα δ - **διακριτική ικανότητα**, η οποία ορίζεται ως το πλήρες πλάτος της φωτοκορυφής στο μισό του ύψους της (Full Width at Half Maximum, FWHM).

Τόσο η απροσδιοριστία όσο και το φαινόμενο Doppler αποτελούν ενδογενείς λόγους φυσικής που συνεπάγονται τη διαπλάτυνση της ενεργειακής κατανομής των ακτίνων- γ . Στη συνέχεια θα δούμε τους λόγους για τους οποίους πειραματικά μετράμε διαπλατυσμένη την κατανομή αυτή. Το πρώτο κομμάτι του πειραματικού μας συστήματος είναι ο σπινθηριστής, μέσα στον οποίο το φωτόνιο αλληλεπιδρά και παράγεται ιονιστικό σωματίδιο.

Αν αυτό έχει γίνει μέσω φαινομένου Compton π.χ., τότε η ενέργεια του ιονιστικού σωματιδίου μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ του μηδενός και μιας μεγίστης που είναι ένα κλάσμα της ενέργειας του φωτονίου. Έχουμε επίσης και το φωτόνιο Compton το οποίο μπορεί να διαφύγει από τον κρύσταλλο ή να αλληλεπιδράσει και να αφήσει μέρος ή το σύνολο της ενέργειάς του μέσα στον κρύσταλλο. Αυτό που επιθυμούμε να γίνει κατανοητό από τη συζήτηση της παραγράφου αυτής είναι ότι παρά την συγκεκριμένη ενέργεια των φωτονίων, τα παραγόμενα ιονιστικά σωματίδια μπορούν να έχουν διάφορες ενέργειες που είναι όλες μικρότερες από την ενέργεια των γάμμα. Αλλά αυτό δεν σχετίζεται με τη διακριτική ικανότητα του συστήματός μας. Η διακριτική ικανότητα σχετίζεται με το πλάτος της κατανομής των μετρήσιμων παλμών όταν τα ιονιστικά σωματίδια που παράγονται από τις ακτίνες- γ , αποθέτουν όλα το ίδιο ποσό ενέργειας στον σπινθηριστή.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα σύνολο τέτοιων ιονιστικών σωματιδίων που προέρχονται από φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και αποθέτουν όλα ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας. Όπως έχει συζητηθεί στην άσκηση της φασματοσκοπίας ακτίνων- γ , τελικά ένας αριθμός ηλεκτρονίων διεγείρεται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Ο αριθμός αυτός όμως δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις ο ίδιος, δεδομένου ότι το ποσό ενέργειας που αποδίδεται σε κάθε διέγερση δεν είναι απολύτως σταθερό. Προφανώς λοιπόν, για στατιστικούς λόγους, ο αριθμός των διεγερμένων καταστάσεων που δημιουργούνται έχει μία κατανομή με μη μηδενικό πλάτος.

Η κατανομή αυτή διαπλάτνεται περαιτέρω στη συνέχεια, γιατί η πιθανότητα παραγωγής φωτονίου κατά την αποδιέγερση των καταστάσεων αυτών εισάγει μία επιπλέον στατιστική διεύρυνση. Το ίδιο γίνεται και στο επόμενο στάδιο, τη διάδοση δηλαδή των φωτονίων αυτών μέσα στον κρύσταλλο μέχρι να φθάσουν στην φωτοκάθοδο. Κατά την πρόσπτωση στη φωτοκάθοδο παράγονται φωτοηλεκτρόνια, των οποίων το πλήθος υπόκειται σε περαιτέρω στατιστική διαπλάτυνση, λόγω του ότι η παραγωγή τους είναι ζήτημα πιθανότητας.

Όπως βλέπουμε, για να κατανοήσουμε τους λόγους για τους οποίους ένα πειραματικό σύστημα μετρήσεων έχει μία διακριτική ικανότητα, ακολουθούμε βήμα προς βήμα τη λογική με την οποία από ένα φωτόνιο γάμμα παράγεται τελικά ένας μετρήσιμος παλμός. Συνεχίζοντας λοιπόν, από τη φωτοκάθοδο, περνάμε στις δυνόδους όπου έχουμε ενίσχυση του ηλεκτρονικού παλμού από δύνοδο σε δύνοδο και περαιτέρω στατιστική διεύρυνση. Για να γίνει αυτό πιο σαφές, υποθέστε ότι επί μιας δυνόδου προσπίπτουν κάθε φορά π.χ. 100 ηλεκτρόνια και ότι ο πολλαπλασιαστικός παράγων για την χρησιμοποιούμενη διαφορά δυναμικού είναι 7. Αντιλαμβανόμεθα ότι δεν παράγονται κάθε φορά 700 ακριβώς ηλεκτρόνια, αλλά ένας αριθμός ηλεκτρονίων περί μία μέση τιμή που θα είναι περίπου 700. Αυτό συνιστά μία διαπλάτυνση, όπως άλλωστε γίνεται και σε όλα τα βήματα της παραγωγής του τελικού παλμού από το φωτόνιο γάμμα.

Στην τελική φάση ο παλμός από την άνοδο του φωτοπολλαπλασιαστή οδηγείται στις ηλεκτρονικές μονάδες, προενισχυτή, ενισχυτή κλπ. Με δεδομένο ότι και οι παράγοντες ενίσχυσης ενέχουν και αυτοί κάποια αβεβαιότητα, θα έχουμε και εδώ κάποια συνεισφορά στην διεύρυνση της κατανομής των παλμών. Το γενικό μήνυμα από όλη αυτή τη συζήτηση είναι ότι κάθε στάδιο δημιουργίας-επεξεργασίας μιας πληροφορίας εισάγει οπωσδήποτε μία επιπλέον αβεβαιότητα, άρα και διαπλάτυνση. Στο σχήμα 7.1 φαίνεται μία καμπύλη φωτοκορυφής, όπως λαμβάνεται από αναλυτή πολλών καναλιών. Είναι σημειωμένο το FWHM και το κεντροειδές κανάλι της κορυφής.

Η εξάρτηση της διακριτικής ικανότητας από την ενέργεια δίνεται από τη σχέση

$$\delta = a + b \frac{1}{\sqrt{E}} \quad [7.1]$$

είναι δηλαδή ανάλογη του αντιστρόφου του τετραγώνου της ενέργειας.

Με δεδομένο τον ορισμό του δ (πλήρες πλάτος της φωτοκορυφής στο ήμισυ του ύψους της)

$$\delta = \frac{\Delta k}{k} \quad [7.2]$$

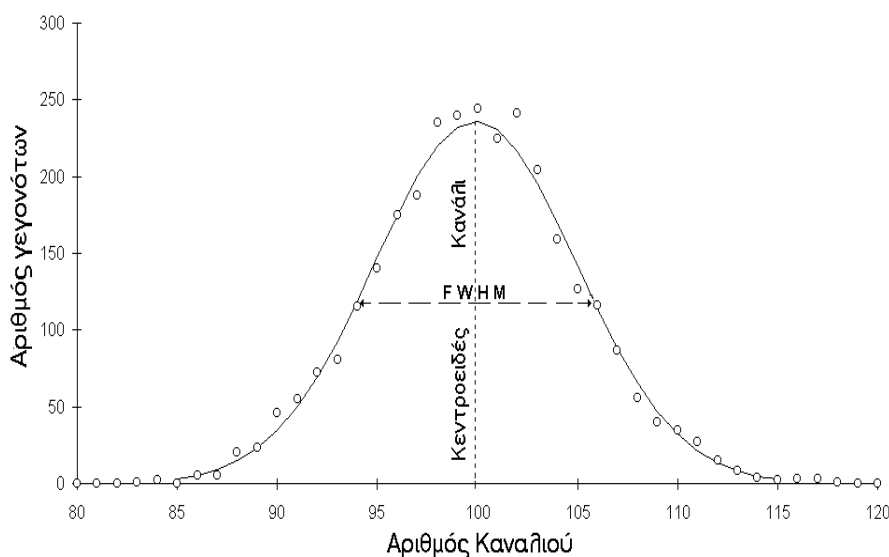
γράφουμε την ενεργειακή βαθμολογία του συστήματος απαριθμητή σπινθηρισμών δύο φορές:

$$E_1 = a + bk_1$$

$$E_2 = a + bk_2$$

οπότε αφαιρώντας κατά μέλη προκύπτει:

$$\Delta E = b \Delta k \quad [7.3]$$



Σχήμα 7.1 Καμπύλη φωτοκορυφής, στην οποία είναι σημειωμένα το FWHM και το κεντροειδές κανάλι της κορυφής.

Διαιρώντας κατά μέλη με τη σχέση ενεργειακής βαθμολογίας συνάγεται:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{b \Delta k}{a + bk} = \frac{\Delta k}{\frac{a}{b} + k} \quad [7.4]$$

οπότε αν το a/b είναι πολύ μικρό ώστε να προσεγγίζεται με το μηδέν, τότε το $\Delta k/k$ θα είναι ίσο με $\Delta E/E$. Πρέπει να σημειώσουμε ότι εν γένει η καμπύλη βαθμολογίας (ευθεία) θα πρέπει να διέρχεται από το μηδέν, οπότε και ο σταθερός όρος a θα είναι συμβατός με το μηδέν, μέσα στο όρια των σφαλμάτων.

7.1.4 ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΎΨΟΥΣ ΠΑΛΜΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

Για τη συλλογή του φάσματος χρησιμοποιούμε ένα σύστημα Αναλυτού Πολλών Καναλιών (MCA), το οποίο επεξεργάζεται όλους τους παλμούς που οδηγούνται στην είσοδό του, χωρίς να επιλέγει κάποιους που έχουν ύψη μόνον σε κάποια περιοχή τιμών. Ο MCA αποτελείται από τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC), ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που συνιστούν ένα τέτοιο σύστημα, παρέχονται κατά βάση από το περιβάλλον του ηλεκτρονικού υπολογιστή που φιλοξενεί το ADC. Εν ολίγοις, η λειτουργία του ADC είναι να δίνει ένα ψηφιακό αριθμό για κάθε αναλογικό παλμό που έρχεται στην είσοδό του, πχ. θα μπορούσε να

αντιστοιχίζει την περιοχή παλμών με ύψη από 0 έως 10 Volt στους αριθμούς από το 1 έως το 1024. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνουμε ένα φάσμα ανεπτυγμένο σε 1024 κανάλια όπου το κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε κάποιο ύψος παλμού μεταξύ 0 και 10 Volts.

Λεπτομερείς πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του MCA βρίσκονται στο Παράρτημα 1.

7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όργανα

- i. Σπινθηριστής
- ii. Προενισχυτής
- iii. Ενισχυτής
- iv. Τροφοδοτικό Υψηλής Τάσης
- v. Ηλεκτρονικός υπολογιστής
- vi. Αναλυτής πολλών καναλιών
- vii. Ραδιενεργές πηγές

7.2.1 ΣΕΙΡΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Ελέγχουμε τη συνδεσμολογία του συστήματος απαριθμητή σπινθηρισμών. Στη βάση του προενισχυτή έχουμε το καλώδιο υψηλής τάσεως για τον φωτοπολλαπλασιαστή, το καλώδιο τροφοδοσίας του προενισχυτή και το καλώδιο σήματος το οποίο οδηγείται στον ενισχυτή. Το σήμα εξόδου του ενισχυτή οδηγείται είτε στον SCA δια τα περαιτέρω.
2. Θέτουμε πάνω από τον σπινθηριστή και σε απόσταση περί τα 10 cm, την ραδιενεργό πηγή που θα μας δοθεί από τον ΥΕ.
3. Οδηγούμε την έξοδο του ενισχυτή στον παλμογράφο και παρατηρούμε τους παλμούς. Αν η πηγή μας εκπέμπει τις γάμμα με την μεγαλύτερη ενέργεια μεταξύ όλων εκείνων που θα χρησιμοποιηθούν στην άσκηση, λαμβάνουμε πρόνοια ώστε το μέγιστο ύψος παλμών να είναι περί τα 7 Volt (η μονάδα MCA αναλύει παλμούς με ύψη από 0 έως 8 Volt).
4. Το σήμα εξόδου του ενισχυτή οδηγείται στον MCA. Από το σημείο αυτό και πέρα δεν αλλάζουμε τίποτα στην υψηλή τάση, την προενίσχυση και την ενίσχυση (γιατί;). Προετοιμάζουμε το σύστημα MCA, σύμφωνα με τις οδηγίες που αναγράφονται στο σχετικό παράρτημα και κατά τις οδηγίες του ΥΕ.

5. Λαμβάνουμε το φάσμα της μονοενεργειακής πηγής και αναγνωρίζουμε την φωτοκορυφή, αιχμή Compton και κορυφή οπισθοσκέδασης. Εκτυπώνουμε τα αποτελέσματα, κατά τις οδηγίες του ΥΕ.
6. Λαμβάνουμε φάσματα και άλλων πηγών που μας διατίθενται από τον ΥΕ.
7. Από τις πληροφορίες που έχουμε καταγράψει κάνουμε την ενεργειακή βαθμολογία του συστήματος.
8. Κάνουμε το διάγραμμα ενέργειας – διακριτικής ικανότητας και βρίσκουμε την εξάρτηση της διακριτικής ικανότητας από την ενέργεια.

ΑΣΚΗΣΗ 8

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ

8.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πυρηνικές ακτινοβολίες παρουσιάζουν μεταξύ τους πολύ μεγάλες διαφορές ως προς την απορρόφησή τους από την ύλη. Αυτό είναι συνέπεια της διαφορετικής φύσης τους πχ. οι ακτινοβολίες α και β είναι άμεσα ιονιστικές, σαν σωματίδια που έχουν μάζα ηρεμίας και φέρουν ηλεκτρικό φορτίο. Τα σωματίδια αυτά διερχόμενα μέσα από την ύλη χάνουν την ενέργειά τους βήμα προς βήμα, αλληλεπιδρώντας συνεχώς με ηλεκτρόνια και πυρήνες, προκαλώντας κατά κυριότητα ιονισμούς και διεγέρσεις (Τμήμα 1, Κεφάλαιο 2.2).

Οι ακτίνες γάμμα είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και εκπέμπονται κατά τις πυρηνικές αποδιεγέρσεις και κατά την εξαύλωση σωματιδίου - αντισωματιδίου. Η αλληλεπίδρασή τους με την ύλη γίνεται μέσω πολλών φαινομένων, τα κυριότερα εκ των οποίων είναι:

- το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (ΦΦ),
- το φαινόμενο Compton (ΦC) και
- η δίδυμη γένεση (ΔΓ).

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας γάμμα κατά τη διέλευσή της από την ύλη προφανώς διέπεται από τη φυσική των φαινομένων αυτών. Ας σημειώσουμε εδώ ότι και οι ακτίνες X είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως και η διαφορά τους από τις ακτίνες γάμμα εντοπίζεται απλώς στην προέλευσή τους. Οι μεν γάμμα είναι αποτέλεσμα πυρηνικών αποδιεγέρσεων ή εξαυλώσεων σωματιδίου - αντισωματιδίου, οι δε ακτίνες X προέρχονται είτε από ατομικές αποδιεγέρσεις είτε από ακτινοβολία πεδήσεως (Bremstrahlung) που εκπέμπεται κατά την επιτάχυνση (με τη γενική έννοια) φορτισμένων σωματιδίων. Στους σωλήνες παραγωγής ακτίνων X, για παράδειγμα, τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν σε υλικό με μεγάλο ατομικό αριθμό, και υφίστανται με τον τρόπο αυτό ισχυρή επιβράδυνση.

Η χαρακτηριστική διαφορά στην απορρόφηση των ιονιστικών ακτινοβολιών σε σχέση με την απορρόφηση των ακτίνων γάμμα είναι η εξής: Τα ιονιστικά σωματίδια διέρχονται μέσα από την ύλη χάνοντας συνεχώς ενέργεια κατά την αλληλεπίδρασή τους με ηλεκτρόνια και πυρήνες μέχρις ισορροπίας με το περιβάλλον, ενώ ένα φωτόνιο που εισέρχεται σε δεδομένο στρώμα ύλης μπορεί είτε να αλληλεπιδράσει (συνήθως με ένα από τα προαναφερθέντα τρία φαινόμενα), είτε να το διαπεράσει και να διαφύγει χωρίς να αλληλεπιδράσει καθόλου. Για δέσμη φωτονίων, ένα ποσοστό θα αλληλεπιδράσει και θα απορροφηθεί ενώ το υπόλοιπο θα διαπεράσει το υλικό. Ο νόμος της απορρόφησης των ακτίνων-γ δίνει ακριβώς το ποσοστό των φωτονίων που διέρχεται χωρίς να αλληλεπιδράσει:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad [8.1]$$

όπου I η ένταση της διερχόμενης δέσμης, I_0 η αρχική ένταση, μ ο συντελεστής απορρόφησης και x το πάχος του απορροφητή. Ο συντελεστής απορρόφησης εκφράζεται με δύο τρόπους:

- 1) **γραμμικός συντελεστής απορρόφησης**, σε μονάδες αντιστρόφου μήκους, πχ. cm^{-1}
- 2) **μαζικός συντελεστής απορρόφησης**, σε μονάδες επιφάνειας δια μάζα, πχ. cm^2/gr . Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από διαίρεση του γραμμικού συντελεστού απορρόφησης με την πυκνότητα του απορροφητή.

Το γινόμενο μx είναι βέβαια αδιάστατος αριθμός. Ως εκ τούτου, στην πρώτη περίπτωση το πάχος μετράται σε μονάδες μήκους, πχ. cm. Στην δεύτερη περίπτωση, όπου το μ είναι ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης, το πάχος μετράται σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας, πχ. gr/cm^2 . Η **επιφανειακή πυκνότητα** σε gr/cm^2 δίνει το

ποσόν της ύλης σε gr που υπάρχει πίσω από μία επιφάνεια 1 cm^2 , ανεξάρτητα από την πυκνότητα του υλικού.

Σε σχέση με τον συντελεστή απορρόφησης ορίζεται και η **μέση ελεύθερη διαδρομή** των φωτονίων λ , ως η μέση απόσταση που διανύουν τα φωτόνια στον απορροφητή πριν αλληλεπιδράσουν. Το λ είναι το αντίστροφο του γραμμικού συντελεστού απορρόφησης.

$$\lambda = 1/\mu \quad [8.2]$$

Για φωτόνια με ενέργεια στην περιοχή του 1 MeV, το λ παίρνει τιμές της τάξεως των cm, ανάλογα βεβαίως και με το Z και την πυκνότητα του απορροφητή.

Μία απλή έννοια με βάση την οποία μπορούμε εύκολα να συγκρίνουμε την απορροφητική ικανότητα διαφόρων υλικών είναι το λεγόμενο **πάχος ημίσεως**, $\chi_{1/2}$. Η έννοια αυτή δίνει το πάχος δεδομένου υλικού για το οποίο η ένταση δέσμης φωτονίων δεδομένης ενέργειας μειώνεται στο μισό. Είναι:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \Rightarrow \ln 2 = \mu \chi_{1/2} \Rightarrow \chi_{1/2} = 0.693/\mu \quad [8.3]$$

Η απορρόφηση των ακτίνων-γ γίνεται, όπως αναφέρθηκε, κατά κυριότητα με τα φαινόμενα φωτοηλεκτρικό, Compton και δίδυμη γένεση. Για το κάθε ένα από αυτά τα φαινόμενα υπάρχει ένας ξεχωριστός συντελεστής απορρόφησης, ο **συντελεστής απορρόφησης τ για το ΦΦ, ο συντελεστής απορρόφησης σ για το ΦC και ο συντελεστής απορρόφησης κ για την ΔΓ**. Το άθροισμα των τριών αυτών επί μέρους συντελεστών απορρόφησης μας δίνει το συνολικό συντελεστή απορρόφησης:

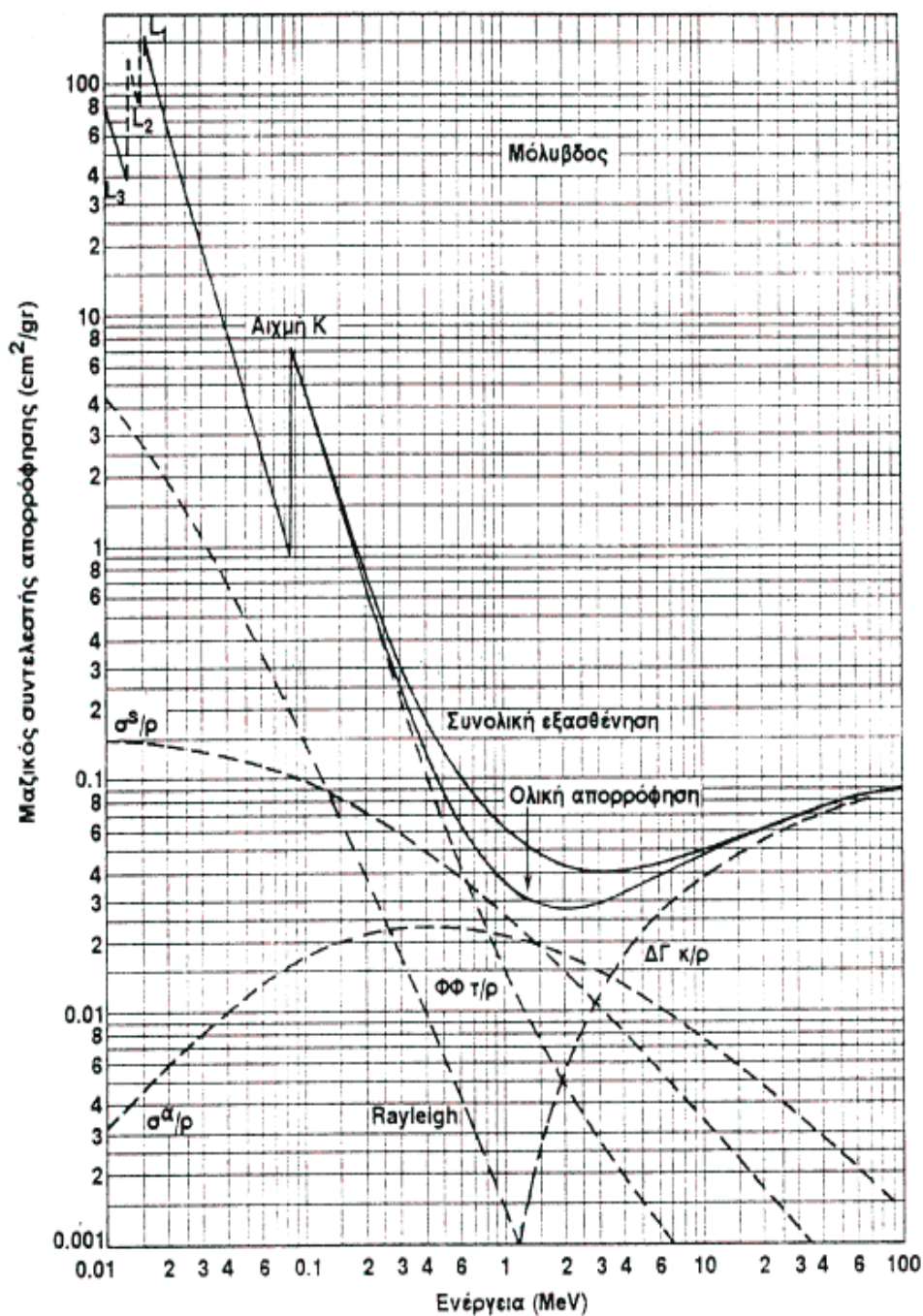
$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad [8.4]$$

Οι επί μέρους αυτοί συντελεστές, άρα προφανώς και ο μ , εξαρτώνται ισχυρά από την ενέργεια των φωτονίων. Στις μικρές ενέργειες πχ. υπερισχύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σε ενέργειες της τάξεως των εκατοντάδων keV γίνεται σημαντικότερο το φαινόμενο Compton. Η δίδυμη γένεση είναι δυνατή μόνο για ενέργειες φωτονίων μεγαλύτερες από 1.02 MeV, το άθροισμα δηλαδή των μαζών ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου.

$$E_{\min} = 2m_e c^2 = 2 \cdot 511 \text{ keV} = 1.022 \text{ MeV} \quad [8.5]$$

Τα 1.022 MeV είναι ενέργεια κατωφλίου, δηλαδή το κάτω όριο της απαιτούμενης ενέργειας για να συμβεί δίδυμη γένεση. Η ενεργός διατομή για δίδυμη γένεση γίνεται σημαντική για ενέργειες μεγαλύτερες από μερικά MeV. Η εξάρτηση των

συντελεστών απορρόφησης τ , σ , κ και μ από την ενέργεια των ακτίνων- γ για τον Pb, φαίνεται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1 Εξάρτηση του μαζικού συντελεστή απορρόφησης από την ενέργεια των ακτίνων- γ για τον Pb.

Με δεδομένη την ισχυρή εξάρτηση του μ από την ενέργεια, είναι προφανές ότι για να ισχύει η σχέση [8.1] θα πρέπει να αναφερόμεθα σε συγκεκριμένη ενέργεια

φωτονίων. Η ενεργειακή εξάρτηση του μ είναι περίπλοκη, δεδομένου ότι προέρχεται από τις αντίστοιχες ενεργειακές εξαρτήσεις των συντελεστών τ , σ και κ . Πρέπει ακόμη να έχουμε ομοαξονική δέσμη φωτονίων, ώστε όλα τα φωτόνια της δέσμης να βλέπουν το ίδιο πάχος απορροφητή και ο απεριθμητής να είναι θωρακισμένος ώστε να εισέρχονται σε αυτόν μόνον φωτόνια που προέρχονται απ' ευθείας από την πηγή τα οποία δεν αλληλεπιδράσανε με τον απορροφητή.

Το πρόβλημα πολλές φορές δημιουργείται από φωτόνια φαινομένου Compton στον απορροφητή ή σε περιβάλλοντα υλικά, τα οποία εισέρχονται στον απεριθμητή. Τα φωτόνια αυτά όμως έχουν ενέργεια διαφορετική από αυτή των αρχικών, οπότε είναι εύκολα διαχωρίσιμα εφ' όσον έχουμε έναν απεριθμητή που έχει την κατάλληλη ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Υπάρχει βεβαίως η ακραία περίπτωση κατά την οποία έχουμε φαινόμενο Compton στον απορροφητή όπου τόσο η διεύθυνση του δευτερογενούς φωτονίου Compton όσο και η ενέργειά του διαφέρουν ελάχιστα από αυτές του αρχικού φωτονίου. Το φωτόνιο Compton στην περίπτωση αυτή μπορεί να εισέλθει στον απεριθμητή και να καταμετρηθεί σαν να μην έκανε αλληλεπίδραση με τον απορροφητή, εκτός εάν η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του απεριθμητή είναι επαρκώς υψηλή.

Στην περίπτωση του σχήματος 8.1 ο απορροφητής είναι ο μόλυβδος. Είναι γνωστό ότι, για δεδομένη ενέργεια φωτονίων, ο συντελεστής απορρόφησης για ΦΦ μεταβάλλεται αναλόγως προς το $Z^{9/2}$, για ΦC μεταβάλλεται αναλόγως προς το Z και για τη δίδυμη γένεση μεταβάλλεται αναλόγως προς το Z^2 . Ως εκ τούτου, οι τιμές των συντελεστών απορρόφησης αλλάζουν σημαντικά με το υλικό του απορροφητή, αν και η μορφή των καμπυλών παραμένει περίπου παρόμοια.

Επανερχόμενοι στη σχέση [8.1], η γραφική της παράσταση θα είναι προφανώς μία εκθετική πτώση του ρυθμού μετρήσεως συναρτήσει του πάχους του απορροφητή. Λογαρίθμηση της σχέσης 8.1 δίνει:

$$\ln I = \ln I_0 - \mu x \quad [8.6]$$

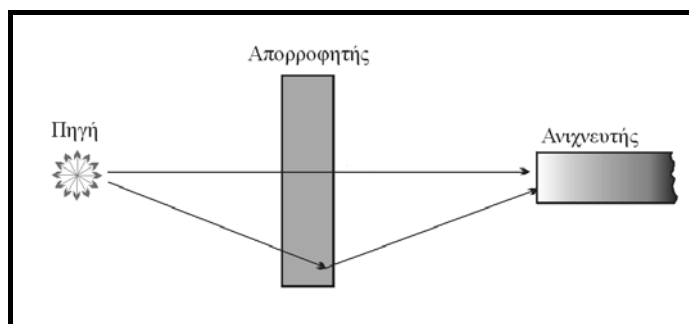
Η σχέση 8.6 περιγράφει μία γραμμική σχέση μεταξύ του $\ln I$ και του x , με κλίση ίση με το μ .

Αν υποθεθεί ότι η πηγή μας εκπέμπει φωτόνια δύο διαφορετικών ενεργειών, τότε το γράφημα που συσχετίζει το ρυθμό με το πάχος είναι δυνατόν να περιπλακεί. Αυτό ισχύει στην περίπτωση που το μετρητικό μας σύστημα δεν διακρίνει τις δύο αυτές

ενέργειες και μετρούμε τα διερχόμενα φωτόνια ως σύνολο, οπότε απαιτείται ανάλυση του γραφήματος για να βρεθούν οι δύο πλέον μαζικοί συντελεστές απορρόφησης μ_1 και μ_2 . Η ανάλυση αυτή συνίσταται σε προσέγγιση των πειραματικών σημείων με αναλυτική έκφραση που είναι άθροισμα δύο ευθειών της μορφής της 8.6.

Το πρόβλημα αυτό παύει να υπάρχει εφ' όσον τα φωτόνια είναι διακριτά ως προς την ενέργειά τους από το χρησιμοποιούμενο μετρητικό σύστημα. Τότε έχουμε δύο ομάδες δεδομένων ρυθμού συναρτήσεως του πάχους, οι οποίες προσεγγίζονται η κάθε μία από μία σχέση όπως η 8.6, οπότε προκύπτει για κάθε μία ομάδα φωτονίων ο αντίστοιχος συντελεστής απορρόφησης. Στο πείραμά μας αυτή η περίπτωση ισχύει για την πηγή ^{22}Na , η οποία εκπέμπει ακτίνες γάμμα στα 511 keV και στα 1274 keV.

Πολλές φορές σε μετρήσεις απορρόφησης ακτίνων-γ δεν έχουμε μία ιδανική γεωμετρία, δηλαδή λεπτή ομοαξονική δέσμη, κατευθυντήρες (collimators) κλπ. Μία τυπικά συνήθης γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2. Συνήθης γεωμετρία μετρήσεων απορρόφησης ακτίνων γάμμα

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 8.2, έχουμε περίπτωση σκέδασης Compton ενός φωτονίου που στη συνέχεια εισέρχεται στον απαριθμητή. Το φωτόνιο αυτό έχει μειωμένη ενέργεια ως προς το αρχικό. Στην περίπτωση που έχουμε ένα μετρητικό σύστημα που δεν μπορεί να διαχωρίσει ενεργειακά τα φωτόνια, το φωτόνιο αυτό θα καταμετρηθεί και θα θεωρηθεί σαν να διαπέρασε χωρίς αλληλεπίδραση τον απορροφητή (κακώς). Για να διορθωθούν τα κακώς κείμενα, υπεισέρχεται στη σχέση 8.1 σαν διόρθωση ο λεγόμενος **παράγοντας ανοικοδόμησης $B(x,E)$** . Η σχέση 8.1 γίνεται:

$$I = I_0 B(x, E) e^{-\mu x} \quad [8.7]$$

Στην περίπτωση που το σύστημα μετρά μόνο φωτόνια που διέρχονται χωρίς αλληλεπίδραση με τον απορροφητή, ο παράγοντας ανοικοδόμησης ισούται με μονάδα. Ο παράγοντας ανοικοδόμησης εξαρτάται προφανώς και από την ενεργειακή διακριτική

ικανότητα του μετρητικού μας συστήματος. Σε περίπτωση χρήσης ενός συστήματος με υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα, ελαχιστοποιείται η ανάγκη εισαγωγής του, αφού η τιμή του τείνει στην μονάδα

8.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όπως συζητήθηκε ανωτέρω, η απορρόφηση εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων, το πάχος του απορροφητή και το Z του υλικού του απορροφητή. Στο πειραματικό μέρος της άσκησης αυτής μελετάται η εξάρτηση από το πάχος του απορροφητή και η εξάρτηση από την ενέργεια των φωτονίων. Ως απορροφητές χρησιμοποιούνται φύλλα μολύβδου των οποίων η επιφανειακή πυκνότητα δίδεται.

Για τη μέτρηση της έντασης της διερχόμενης ακτινοβολίας από τον απορροφητή, χρησιμοποιείται σύστημα απαριθμητή σπινθηρισμών με κρύσταλλο ιωδιούχου νατρίου με ενεργοποιητή θάλλιο, NaI(Tl). Οι παλμοί εξόδου από την άνοδο του φωτοπολλαπλασιαστή οδηγούνται, μέσω του προενισχυτή, στον ενισχυτή, από την έξοδο του οποίου μπορούμε να τους δούμε στον παλμογράφο. Για την καταμέτρηση των παλμών χρησιμοποιείται αναλυτής πολλών καναλιών (Multi Channel Analyzer, MCA) ενσωματωμένος σε προσωπικό υπολογιστή.

Όργανα

- i. Σπινθηριστής
- ii. Προενισχυτής
- iii. Ενισχυτής
- iv. Τροφοδοτικό
- v. Ηλεκτρονικός υπολογιστής
- vi. Αναλυτής πολλών καναλιών
- vii. Ραδιενεργές πηγές

8.2.1 ΣΕΙΡΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Προετοιμάζεται το μετρητικό σύστημα. Τίθεται στον φωτοπολλαπλασιαστή η αναγραφόμενη στο σύστημα τιμή υψηλής τάσεως.
2. Από τις διαθέσιμες ραδιενεργές πηγές επιλέγεται αυτή που εκπέμπει τα μεγαλύτερης ενέργειας φωτόνια (στο παρόν εργαστήριο έχουμε την ευρέως χρησιμοποιούμενη πηγή ^{22}Na , η οποία εκπέμπει τις ακτίνες- γ των 1274 keV

μετά από εκπομπή ποζιτρονίου και στη συνέχεια τις ακτίνες- γ των 511 keV από την εξαύλωση των ποζιτρονίων). Η πηγή τίθεται σε απόσταση περί τα 8 cm από τον σπινθηριστή. Ρυθμίζεται η ενίσχυση ώστε οι παλμοί εξόδου του ενισχυτή να έχουν ύψος 7 Volt περίπου. Αυτό γίνεται διότι οι αναλυτές παλμών, τόσο οι ενός καναλιού όσο και οι πολλών καναλιών, δέχονται συνήθως παλμούς ύψους έως 8 Volt.

3. Συλλέγουμε το φάσμα της πηγής χρησιμοποιώντας αναλυτή πολλών καναλιών, για όσο χρόνο χρειάζεται ώστε να έχουμε μία επαρκή στατιστική. Παρατηρούμε το φάσμα ώστε να βεβαιωθούμε ότι η μορφή του είναι αυτή που αναμένεται και η φωτοκορυφή των μεγάλης ενέργειας φωτονίων (για το ^{22}Na τα 1274 keV) περιέχεται ολόκληρη μέσα στο φάσμα. Αντικαθιστούμε την πηγή με μία από τις μονοενεργειακές πηγές και παίρνουμε μέτρηση χωρίς παρεμβολή απορροφητή. Κατόπιν επιλέγουμε ως περιοχή ενδιαφέροντος (Region Of Interest, ROI) την φωτοκορυφή (ή τις φωτοκορυφές όταν θα χρησιμοποιήσουμε πηγή η οποία εκπέμπει πάνω από μίας ενέργειας γάμμα). Έχοντας ορίσει την ROI, καταγράφουμε στον εκτυπωτή τις πληροφορίες που σχετίζονται με την φωτοκορυφή, δηλαδή το ολοκλήρωμα των υπό την φωτοκορυφή παλμών (Gross integral), το ίδιο ολοκλήρωμα μετά την αφαίρεση του υποστρώματος (Net integral), το κεντροειδές (centroid) καθώς και το πλήρες πλάτος της φωτοκορυφής στο ήμισυ του ύψους της (Full Width at Half Maximum, FWHM).
4. Παρεμβάλλουμε περίπου στο μέσο της αποστάσεως μεταξύ πηγής και σπινθηριστή φύλλο απορροφητή μολύβδου και παίρνουμε πάλι μέτρηση για ίδιο χρονικό διάστημα. Καταγράφουμε τις πληροφορίες σχετικά με τις φωτοκορυφές. Συνεχίζουμε με τον ίδιο τρόπο παρεμβάλλοντας όλο και παχύτερους απορροφητές. Στο τέλος κάνουμε και μία μέτρηση παρεμβάλλοντας μαζί τους δύο παχύτερους απορροφητές.
5. Επαναλαμβάνουμε τις εργασίες που περιγράφονται στα βήματα 3 και 4 για κάθε μία από τις ραδιενεργές πηγές που διατίθενται.
6. Κάνουμε μία μέτρηση υποστρώματος, ώστε να εκτιμήσουμε κατά πόσον το υπόστρωμα επηρεάζει ή όχι τις μετρήσεις μας.

7. Θέτουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας για κάθε φωτοκορυφή σε χιλιοστομετρικό χαρτί και εκτιμούμε κατά προσέγγιση το πάχος ημίσεως για κάθε ενέργεια φωτονίων, καθώς και τον συντελεστή απορρόφησης (σχέση 8.3). Ελέγχουμε την εξάρτηση του συντελεστού απορρόφησης από την ενέργεια των φωτονίων.
8. **Στην γραπτή εργασία** προσδιορίζουμε από την σχέση 8.6 την καλύτερη ευθεία με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, υπολογίζουμε τον συντελεστή απορρόφησης μ και κατόπιν το πάχος ημίσεως $x_{1/2}$ για κάθε ενέργεια φωτονίων καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα.
9. Καθ' όλη την διάρκεια της άσκησης φροντίζουμε ώστε όλες οι πηγές εκτός της μετρούμενης να είναι τοποθετημένες μέσα στην μολύβδινη θωράκιση. Όταν τελειώσουν οι μετρήσεις επιβεβαιώνουμε ότι όλες οι πηγές είναι μέσα στη θωράκιση και κατεβάζουμε την υψηλή τάση με τα ποτενσιόμετρα. Στη συνέχεια κλείνουμε τους διακόπτες.