

4. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Ο άνθρωπος δεν διαθέτει αισθητήρια όργανα ικανά να ανιχνεύσουν την πυρηνική ακτινοβολία. Έτσι η ακτινοβολία ανιχνεύεται με τη βοήθεια των φαινομένων διέγερσης και ιονισμού, που προκαλεί κατά την αλληλεπίδρασή της με την ύλη.

Τα συστήματα ανίχνευσης και μέτρησης της ακτινοβολίας μπορούν να χωρισθούν σε δύο μεγάλες ομάδες, τα **ηλεκτρονικά** και τα **μη ηλεκτρονικά**. Στα ηλεκτρονικά συστήματα ανήκουν οι ανιχνευτές με αέριο (θάλαμοι ιονισμού, αναλογικοί απαριθμητές και ανιχνευτές Geiger – Müller), οι σπινθηριστές και οι ημιαγωγικοί ανιχνευτές ενώ στα μη ηλεκτρονικά οι φωτογραφικές πλάκες, τα χημικά δοσίμετρα, οι θερμιδομετρικοί ανιχνευτές, οι θάλαμοι νεφελωμάτων και φυσαλίδων και οι θερμοφωταυγειακοί ανιχνευτές.

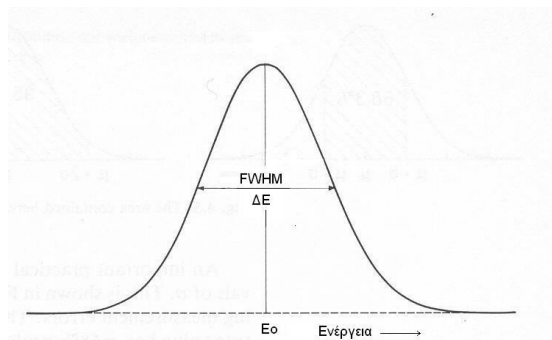
Με τον όρο **απόδοση ενός ανιχνευτή ακτινοβολίας** (ϵ , *detector efficiency*) χαρακτηρίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας ενός παρασκευάσματος, που καταγράφεται από αυτόν. Η απόδοση ενός ανιχνευτή εξαρτάται τόσο από το είδος και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας όσο κι από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή (π.χ. δραστικός όγκος, υλικό περιβλήματος κλπ).

Η **διακριτικότητα ενέργειας** (R , *energy resolution*) χαρακτηρίζει την ιδιότητα ενός ανιχνευτή να διακρίνει δύο ακτινοβολίες διαφορετικών αλλά παραπλήσιων ενεργειών

$$R = \frac{\Delta E}{E_0}$$

όπου E_0 η κορυφή της κατανομής ενεργειών μίας ακτινοβολίας και ΔE το πλήρες εύρος στο ήμισυ του μεγίστου ύψους της κορυφής (*FWHM, full width at half maximum*) (Σχήμα 4-1).

Ο **νεκρός χρόνος** (τ , *dead time*) δίνει το χρόνο, που απαιτείται για να ανακάμψει ένας ανιχνευτής από την καταγραφή ενός σωματιδίου ή φωτονίου και να καταστεί έτοιμος για την καταγραφή του επομένου. Ο



Σχήμα 4-1: Χαρακτηριστικά της κορυφής κατανομής της ενέργειας μίας ακτινοβολίας.

νεκρός χρόνος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μέτρηση ισχυρών ραδιενεργών παρασκευασμάτων. Στην περίπτωση αυτή

$$I_{\text{ολικό}} = \frac{I_{\text{μετρ}}}{1 - \tau I_{\text{μετρ}}}$$

όπου $I_{ολικό}$ και $I_{μετρ}$ ο ολικός και ο μετρούμενος ρυθμός διασπάσεως και τ ο νεκρός χρόνος του ανιχνευτή. Ο νεκρός χρόνος ενός ανιχνευτή μπορεί να προσδιορισθεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο συνηθισμένος είναι χρησιμοποίηση δύο πηγών ακτινοβολίας, που μετρούνται αρχικά ξεχωριστά και μετά μαζί. Ο νεκρός χρόνος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τους επιμέρους ρυθμούς διασπάσεως ($I_1, I_2, I_{1,2}$)

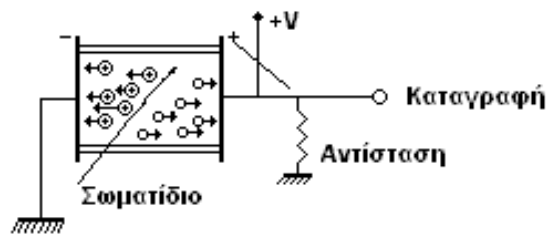
$$\frac{I_1}{1-\tau I_1} + \frac{I_2}{1-\tau I_2} = \frac{I_{1,2}}{1-\tau I_{1,2}}$$

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν τα πλέον συνηθισμένα είδη ανιχνευτών ακτινοβολίας και θα παρουσιασθούν οι χρήσεις τους και τα πεδία εφαρμογής τους.

4.1 Είδη ανιχνευτών

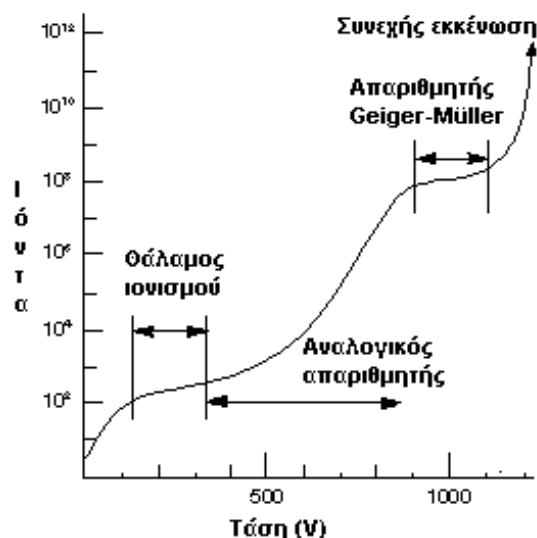
4.1.1 Ανιχνευτές με αέριο

Στην κατηγορία των ανιχνευτών με αέριο ανήκουν διάφοροι ανιχνευτές με κοινό χαρακτηριστικό τη δομή τους. Όλοι οι ανιχνευτές με αέριο αποτελούνται από έναν θάλαμο, ο οποίος περιέχει ένα αέριο, ή από ένα θάλαμο με συνεχή ροή αερίου. Μία διαφορά δυναμικού (τάση) ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια δημιουργεί, μέσα στον όγκο του αερίου, ένα ηλεκτρικό πεδίο. Όταν μία ακτινοβολία διασχίσει τον ενεργό όγκο του ανιχνευτή, που περιέχει το αέριο, προκαλεί ιονισμό του και δημιουργία ζευγών ιόντων και ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια και τα θετικά φορτισμένα ιόντα, καθώς έλκονται προς τα ηλεκτρόδια από το ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργούν μία εκκένωση και παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα (παλμό), που οδηγεί στην ανίχνευσή τους (βλ. Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-2: Γενικευμένη γραφική παράσταση ενός ανιχνευτή με αέριο.

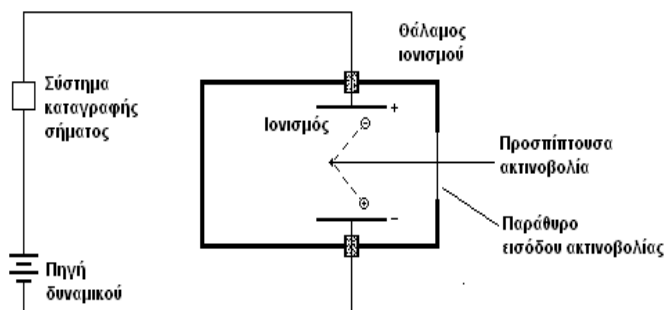
Η γραφική παράσταση του Σχήμα 4-3 παρουσιάζει τον αριθμό των ζευγών ιόντων, που σχηματίζονται κατά τη διέλευση ενός σωματιδίου μέσα από το αέριο ενός ανιχνευτή ως προς την τάση των ηλεκτροδίων του.



Σχήμα 4-3: Αριθμός των ζευγών ιόντων, που παράγονται κατά τη διέλευση ενός σωματιδίου μέσα από τον ενεργό όγκο ενός ανιχνευτή με αέριο, σε συνάρτηση με την διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων του.

Στο διάγραμμα αυτό διακρίνονται διάφορες περιοχές τάσεως, που χαρακτηρίζουν επίσης τις διάφορες κατηγορίες ανιχνευτών με αέριο. Στην περιοχή χαμηλών τάσεων η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων και των θετικά φορτισμένων ιόντων προς τα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή είναι τόσο μικρή, που τα ζεύγη δεν μπορούν να απομακρυνθούν και επανασυνδέονται μεταξύ τους (**περιοχή επανασυνδέσεως**, *recombination region*). Αυτή η περιοχή τάσεων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της ακτινοβολίας. Η αύξηση της τάσεως στα ηλεκτρόδια οδηγεί στην περιοχή λειτουργία του **θαλάμου ιονισμού** (*ionization chamber*).

Ο θάλαμος ιονισμού είναι από τα πιο παλιά είδη ανιχνευτών ακτινοβολίας και μπορεί να θεωρηθεί, στην απλούστερη μορφή του, ως ένας πυκνωτής με αέριο διηλεκτρικό (Σχήμα 4-4). Η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων του βοηθά στη γρήγορη συλλογή των ηλεκτρονίων και των



Σχήμα 4-4: Σχηματική παράσταση της διάταξης ενός θαλάμου ιονισμού

ιόντων, που σχηματίζονται κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας. Η τάση, η οποία επιτρέπει τη συλλογή όλων των ζευγών ιόντων, που σχηματίστηκαν, ονομάζεται **τάση κορεσμού**

(saturation voltage) του ανιχνευτή.

Η ένταση του ηλεκτρικού σήματος (παλμού), που καταγράφεται αθροιστικά από τον θάλαμο ιονισμού εξαρτάται μόνον από το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας. Όπως αναμένεται, ο ιονισμός που προκαλείται από τα σωματίδια-α είναι, λόγω της μάζας τους, υψηλότερος από τον αντίστοιχο των ηλεκτρονίων. Παρ' όλα αυτά οι ηλεκτρικοί παλμοί, που παράγονται στους θαλάμους ιονισμού, είναι ασθενείς και χρειάζονται ενίσχυση για την καταγραφή τους από τα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή. Για παράδειγμα, ένα σωματίδιο-α ενέργειας 3.5 MeV δημιουργεί κατά τη διέλευσή του μέσα από ένα αέριο περίπου 10^5 ζεύγη ιόντων και συνεπώς έναν ηλεκτρικό παλμό εντάσεως

$$i = N \times e = 10^5 \times (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) = 1.602 \times 10^{-14} \text{ C}$$

Τα πλεονεκτήματα των θαλάμων ιονισμού είναι το χαμηλό κόστος και το γεγονός ότι παρουσιάζουν πολύ μικρό νεκρό χρόνο παρέχοντας τη δυνατότητα μετρήσεως πολύ ισχυρών ραδιενεργών παρασκευασμάτων. Οι μετρήσεις ακτινοπροστασίας αποτελούν μία σημαντική περιοχή εφαρμογών των θαλάμων ιονισμού (π.χ. προσωπικά δοσίμετρα, βλ. Σχήμα 4-5).

Σχήμα 4-5: Προσωπικό
δοσίμετρο βασιζόμενο σε
θάλαμο ιονισμού.



Αν η τάση στα ηλεκτρόδια ενός ανιχνευτή με αέριο αυξηθεί περαιτέρω (βλ. Σχήμα 4-3), τα ηλεκτρόνια, που δημιουργούνται από τον αρχικό ιονισμό, επιταχύνονται προς τα ηλεκτρόδια με αρκετή κινητική ενέργεια, ώστε να προκαλέσουν στην πορεία τους δευτερογενή ιονισμό του αερίου. Έτσι από ένα ζεύγος ιόντων προκύπτουν 10^3 ως 10^6 δευτερογενή ζεύγη ιόντων. Η ένταση του σήματος του ανιχνευτή σ' αυτή την περιοχή δεν είναι σταθερό αλλά παρουσιάζει μία γραμμική εξάρτηση από την τάση καθώς επίσης από την ενέργεια της ακτινοβολίας.

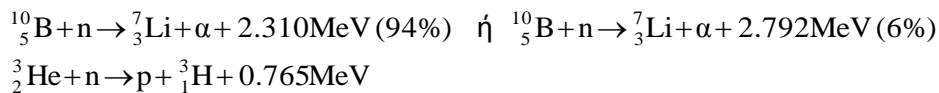
Οι ανιχνευτές, που λειτουργούν κάτω από αυτές τις συνθήκες, ονομάζονται **αναλογικοί απαριθμητές** (*proportional counters*) και επιτρέπουν τόσο τη διάκριση της ακτινοβολίας όσο και τον προσδιορισμό της ενέργειάς της. Οι ηλεκτρικοί παλμοί, που λαμβάνονται στους αναλογικούς απαριθμητές είναι ισχυρότεροι από αυτούς των θαλάμων ιονισμού και απαιτούν μικρότερη ενίσχυση.

Ως αέριο στους αναλογικούς απαριθμητές χρησιμοποιείται συνήθως μεθάνιο ή μείγματα μεθανίου (5 – 10%) με ευγενή αέρια (π.χ. αργό). Η σύγκρουση των ηλεκτρονίων με τα άτομα των αερίων στον ανιχνευτή προκαλεί την εκπομπή και υπεριώδους ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή προκαλεί, κατά την πρόσκρουση με τα τοιχώματα του ανιχνευτή φωτοϊονισμό. Τα ηλεκτρόνια, τα οποία προέρχονται από τον φωτοϊονισμό επιταχύνονται προς την άνοδο με αποτέλεσμα τον περαιτέρω ιονισμό του αερίου και τη δημιουργία μίας συνεχούς εκκένωσης, που παρεμποδίζει τη μέτρηση της ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό αποφεύγεται με τη χρησιμοποίηση αερίων (π.χ. μεθάνιο), τα οποία απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία και την παρεμποδίζουν να φθάσει στα τοιχώματα του ανιχνευτή. Τα αέρια αυτά ονομάζονται **αποσβεστικά αέρια** (*quenching gases*). Τα μόρια του αερίου

υφίστανται διάσπαση και η συνεχής ανανέωση του αποσβεστικού αερίου αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την καλή λειτουργία του ανιχνευτή.

Οι αναλογικοί απαριθμητές χρησιμοποιούνται για μετρήσεις ακτινοβολίας-α και -β, για μετρήσεις σε γεωμετρία 2π ή 4π καθώς επίσης για την ανίχνευση νετρονίων.

Η ανίχνευση των νετρονίων γίνεται έμμεσα με χρησιμοποίηση του BF_3 ή του ^3He ως αερίου του ανιχνευτή ή με την επικάλυψη της καθόδου με ^{235}U (ανίχνευση θερμικών νετρονίων) ή με ^{238}U (ανίχνευση ταχέων νετρονίων). Τα σωματίδια-α, που προέρχονται από την πυρηνική αντίδραση των νετρονίων με το βόριο-10 και το ήλιο-3

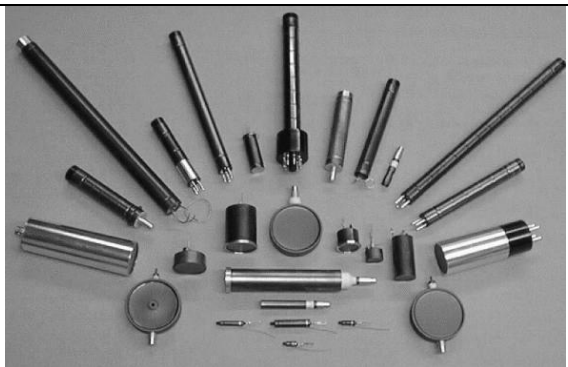


ή τα προϊόντα σχάσεως των ισοτόπων του ουρανίου προκαλούν τον ιονισμό, που είναι απαραίτητος για την ανίχνευση των νετρονίων.

Αν αυξηθεί η τάση στα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή με αέριο πέρα από τα όρια της περιοχής αναλογικότητας (βλ. Σχήμα 4-3), τότε, διαπερνώντας μία περιοχή περιορισμένης αναλογικότητας, φθάνει κανείς στην περιοχή λειτουργίας του **απαριθμητή Geiger – Müller**. Στην περιοχή αυτή, ο ισχυρός ιονισμός, που προκαλείται στο αέριο, οδηγεί σε μία εκτεταμένη εκκένωση σ' όλο το μήκος του σωλήνα του ανιχνευτή. Η εκκένωση κάποια στιγμή σταματά από τη συσσώρευση μεγάλου αριθμού θετικά φορτισμένων ιόντων, που κινούνται βραδύτερα, γύρω από την άνοδο του συστήματος.

Οι απαριθμητές Geiger – Müller, που δεν μπορούν να κάνουν διάκριση ούτε του είδους ούτε της ενέργειας της ακτινοβολίας, αποτελούν φθηνά και απλά ανιχνευτικά συστήματα ακτινοβολίας διαθέσιμα σε διάφορες μορφές για μέτρηση ακτινοβολίας στερεών, υγρών και αερίων δειγμάτων (βλ. Σχήμα 4-6).

Σχήμα 4-6: Απαριθμητές Geiger – Müller διαφόρων τύπων με λεπτό παράθυρο της εταιρίας LND.



Ως αέριο στους απαριθμητές Geiger – Müller χρησιμοποιείται συνήθως 97% ήλιο με περίπου 3% οργανικό αποσβεστικό. Ο νεκρός χρόνος αυτών των ανιχνευτών είναι σχετικά μεγάλος (100 -500 μs) και γι' αυτό δεν είναι κατάλληλοι για την μέτρηση ισχυρών ραδιενεργών παρασκευασμάτων.

Στο Σχήμα 4-7 δίνεται ένα εργαστηριακό σύστημα απαριθμησης με ανιχνευτή Geiger – Müller.



Σχήμα 4-7: Εργαστηριακό σύστημα απαριθμήσεως με ανιχνευτή Geiger – Müller.

4.1.2 Σπινθηριστές

Η χρησιμοποίηση **σπινθηριστών** (*scintillators*) ως ανιχνευτών ακτινοβολίας βασίζεται στην ιδιότητά τους να εκπέμπουν, κατά την επίδραση της, λάμπεις φωτός μικρής διάρκειας (σπινθήρες). Οι σπινθήρες, που εκπέμπονται από τον θειούχο ψευδάργυρο (ZnS) χρησιμοποιήθηκαν ήδη από τον Rutherford το 1908 για την ανίχνευση των σωματιδίων-α. Οι σπινθηριστές διακρίνονται σε **ανόργανους** και σε **οργανικούς**.

Οι ανόργανοι σπινθηριστές είναι συνήθως ιονικοί κρύσταλλοι (π.χ. αλογονίδια των αλκαλίων, θειούχος ψευδάργυρος, γερμανικό βισμούθιο κλπ). Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των ανόργανων σπινθηριστών, που μπορεί να ερμηνευθεί με βάση τη **θεωρία των ζωνών** (*band theory*), παίζουν ορισμένες προσμείξεις στοιχείων, οι **ενεργοποιητές** (*activators*).

Οι ενεργοποιητές δημιουργούν ελαττώματα στο κρυσταλλικό πλέγμα και ενεργειακές καταστάσεις στην απαγορευμένη περιοχή μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας του κρυστάλλου. Η απορρόφηση της πυρηνικής ακτινοβολίας από τον κρύσταλλο διεγείρει ορισμένα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους. Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλαμβάνονται από τις ενεργειακές καταστάσεις του ενεργοποιητή και επιστρέφονται, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, στη ζώνη σθένους με εκπομπή της διαφοράς της ενέργειας με τη μορφή φωτεινής ακτινοβολίας (φωτόνια της περιοχής του κυανού ως υπεριώδους). Έτσι η χρησιμοποίηση του θειούχου ψευδαργύρου ως σπινθηριστή βασίζεται στην παρουσία ιχών αργύρου (Zn(Ag)), ενώ το θάλλιο αποτελεί τον ενεργοποιητή του ωδιούχου νατρίου (NaI(Tl)), που είναι από τους πιο διαδεδομένους σήμερα σπινθηριστές για μέτρηση πυρηνικής ακτινοβολίας.

Οι κρύσταλλοι NaI(Tl) (Σχήμα 4-8) είναι κατάλληλοι για τη μέτρηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (κυρίως ακτίνων-γ), παρέχουν τη δυνατότητα διακρίσεως της ενέργειας της ακτινοβολίας, είναι διαθέσιμοι σε διάφορα μεγέθη και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος.

Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι η πτωχή διακριτικότητα ενέργειας (περίπου 6% για την ακτινοβολία 661.6 keV του ^{137}Cs), η υδροσκοπικότητά τους και ο μεγάλος χρόνος απόσβεσης του σπινθηρισμού (περίπου 230 ns) σε σχέση με άλλους σπινθηριστές. Ο μεγάλος χρόνος απόσβεσης του σπινθηρισμού απαγορεύει τη μέτρηση πολύ ισχυρών ραδιενεργών παρασκευασμάτων.

Σχήμα 4-8: Ανιχνευτές σπινθηρισμού διαφόρων τύπων της εταιρίας BICRON. Στο πίσω μέρος φαίνονται τα ηλεκτρόδια τρο-φοδοσίας και μεταφοράς του σήματος του φωτοπολλαπλασιαστή.



Άλλοι ανόργανοι σπινθηριστές, που χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς είναι το CsI(Tl), το LiI(Eu), το CsF και το $\text{Bi}_{14}\text{Ge}_3\text{O}_{12}$.

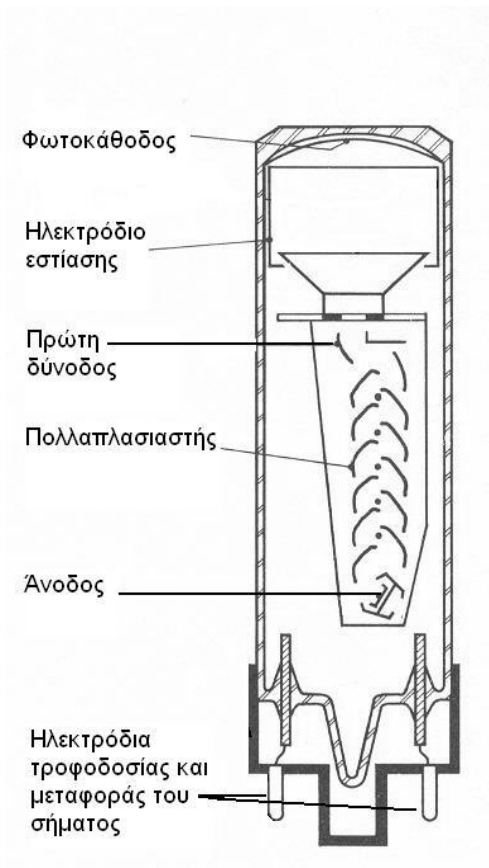
Οι οργανικοί σπινθηριστές είναι συνήθως οργανικές ενώσεις, που διαθέτουν ηλεκτρόνια και εμφανίζονται με τη μορφή μεγάλων μοριακών κρυστάλλων (π.χ., ανθρακένιο, το trans-στιλβένιο). Οι οργανικοί σπινθηριστές χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση της ακτινοβολίας-β. Ο μηχανισμός της απορρόφησης της ενέργειας της ακτινοβολίας και της εκπομπής των φωτονίων μπορεί να περιγραφεί με μία μοριακή διέγερση και αποδιέγερση. Οι οργανικοί σπινθηριστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με τη μορφή διαλυμάτων σε πολυμερή υλικά (π.χ. πολυμέθυλο-μετακρυλικά), που παρέχουν και τη δυνατότητα εξειδικευμένης μορφο-ποίησης. Ορισμένοι πλαστικοί σπινθηριστές παρέχουν επίσης για τη δυνατότητα ανίχνευσης νετρονίων.

Παρά τα ορισμένα πλεονεκτήματα κανείς από τους οργανικούς σπινθηριστές δεν βρίσκει την ευρύτητα χρησιμοποίησης, που έχουν οι ανόργανοι ή οι υγροί σπινθηριστές.

Οι υγροί σπινθηριστές, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιοχημεία, ιατρική και τη βιολογία, αποτελούνται από έναν οργανικό σπινθηριστή (π.χ. 2,5-διφαινυλ-οξαζόλιο (PPO), p-τερφαινύλιο ή τετραφαινυλο-βουταδιένιο) διαλυμένο σε τολουόλιο ή p-ξυλόλιο. Το δείγμα, που πρέπει να μετρηθεί πρέπει να διαλύεται στον οργανικό διαλύτη. Επειδή τα υδατικά διαλύματα δεν αναμειγνύονται εύκολα με τους οργανικούς διαλύτες προστίθεται στο μείγμα (**κοκτέιλ απινθηρισμού**, *scintillation cocktail*) και κάποιο άλλο οργανικό συστατικό που βοηθά στη διάλυση (π.χ. διοξάνιο). Στο διάλυμα συχνά προστίθενται μετατοπιστές μήκους κύματος (*wavelength shifters*), που μετατοπίζει το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από τον σπινθηριστή στην περιοχή, που απαιτεί η διάταξη καταγραφής. Ο μετατοπιστής πρακτικά απορροφά τη φωτεινή ακτινοβολία υψηλής ενέργειας και την επανεκπέμπει σε χαμηλότερη ενέργεια. Ένας συνηθισμένος μετατοπιστής μήκους κύματος είναι το POPOP (1,4-δισ-[2-(5-φαινυλοοξαζολυλ)]βενζόλιο).

Οι υγροί σπινθηριστές χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση ακτινοβολίας-β χαμηλής ενέργειας όπως αυτής του ^3H ή του ^{14}C , που είναι οι πλέον συχνοί ραδιενεργοί ιχνηθέτες οργανικών και βιολογικών μορίων.

Οι σπινθηριστές είναι πάντοτε συνδεδεμένοι με ένα **φωτοπολλαπλασιαστή** (*photomultiplier*), οποίος ενισχύει το οπτικό σήμα (σπινθήρα) μετατρέποντάς το και σε ηλεκτρικό παλμό κατάλληλο για καταμέτρηση (βλ. Σχήμα 4-9). Το σήμα, που λαμβάνεται από ένα σπινθηριστή, είναι ανάλογο της ενέργειας της αρχικής ακτινοβολίας, γεγονός που επιτρέπει την πραγματοποίηση φασματοσκοπικών μετρήσεων.



Σχήμα 4-9 Γραφική παράσταση ενός φωτοπολλαπλασιαστή.

Ο φωτοπολλαπλασιαστής (Σχήμα 4-9) αποτελείται από:

1. μία φωτοκάθοδο μεικτών οξειδίων (π.χ. $SbCsO$ ή $BiAgCsO$), η οποία εμφανίζει, κατά την πρόσπτωση του φωτός, εκπομπή ηλεκτρονίων (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Αυτή η στοιβάδα φωτοπαθούς υλικού βρίσκεται επάνω σε ένα πολύ λεπτό μεταλλικό υμένιο στο παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η θετική φόρτιση της φωτοκαθόδου.
2. από έναν αριθμό δυνόδων, που εξασφαλίζουν την ενίσχυση του ρεύματος ηλεκτρονίων με την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων. Όταν ένα ηλεκτρόνιο, επιταχυνόμενο από το ηλεκτρικό πεδίο, προσπέσει επάνω σε μία δύνοδο εκπέμπονται δευτερογενή ηλεκτρόνια. Έτσι η παρουσία στον φωτοπολλαπλασιαστή 10 δυνόδων εξασφαλίζει την ενίσχυση του αρχικού ρεύματος ηλεκτρονίων κατά 10^6 .
3. από μία άνοδο, που συλλέγει τα ηλεκτρόνια και παράγει έναν αρνητικό παλμό τάσεως. Ο παλμός αυτός, μετά από ενίσχυση, καταγράφεται ηλεκτρονικά.

4.1.3 Οι ημιαγωγικοί ανιχνευτές

Οι ημιαγωγικοί ανιχνευτές μπορούν να θεωρηθούν ως ένα είδος θαλάμων ιονισμού στερεάς κατάστασης. Η λειτουργία αυτών των ανιχνευτών ακτινοβολίας μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τη **θεωρία των ζωνών των στερεών**.

Όπως σ' έναν θάλαμο ιονισμού η ακτινοβολία δημιουργεί ζεύγη θετικά φορτισμένων

ιόντων και ηλεκτρονίων, έτσι στους ημιαγωγικούς ανιχνευτές η ακτινοβολία διεγείρει ηλεκτρόνια στη **ζώνη αγωγιμότητας** (υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις) δημιουργώντας συγχρόνως κενές θέσεις ηλεκτρονίων (οπές) στη **ζώνη σθένους** του κρυσταλλικού πλέγματος του στερεού. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια και οι κενές θέσεις των ηλεκτρονίων είναι σ' αυτή την περίπτωση αντίστοιχα οι φορείς του αρνητικού και του θετικού φορτίου, που οδηγούν στην ανίχνευση της ακτινοβολίας.

Οι ημιαγωγοί, των οποίων οι ιδιότητες βασίζονται αποκλειστικά και μόνο στη θερμική δημιουργία ζευγών διεγερμένων ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας - κενών θέσεων ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους του πλέγματός τους, ονομάζονται **ενδογενείς ημιαγωγοί** (*intrinsic semiconductors*). Τυπικά παραδείγματα τέτοιων ημιαγωγών είναι το υπερκαθαρό γερμάνιο και πυρίτιο. Με ελεγχόμενη προσθήκη προσμείξεων, από την άλλη μεριά, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν σε ημιαγωγικά υλικά φορείς φορτίου ανεξάρτητοι από τη θερμική διέγερση των ηλεκτρονίων. Τα ημιαγωγικά αυτά υλικά ονομάζονται **ημιαγωγοί προσμείξεων ή εξωγενείς ημιαγωγοί** (*impurity or extrinsic semiconductors*). Οι τύποι των προσμίξεων, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, έχουν είτε ένα ηλεκτρόνιο σθένους περισσότερο (π.χ. φωσφόρος, αρσενικό) ή ένα λιγότερο (π.χ. βόριο, αλουμίνιο, γάλλιο) από τα τέσσερα που διαθέτουν κανονικά τα ουδέτερα άτομα του γερμανίου ή του πυριτίου. Για παράδειγμα, η προσθήκη φωσφόρου σε ένα κρύσταλλο γερμανίου οδηγεί σε μία περίσσεια ηλεκτρονίων, επειδή έχει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο σθένους από το γερμάνιο. Οι ημιαγωγοί αυτού του τύπου ονομάζονται **ημιαγωγοί n-τύπου**.

Η παρουσία του φωσφόρου δημιουργεί μία νέα στάθμη ενέργειας ανάμεσα στις ζώνες, που ονομάζεται **επίπεδο δότη** (*donor level*) και βρίσκεται πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια προωθούνται πολύ εύκολα στη ζώνη αγωγιμότητας και οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ημιαγωγού ρυθμίζονται από την περίσσεια ηλεκτρονίων που βρίσκονται σ' αυτήν. Από την άλλη πλευρά, αν ένα από τα άτομα του γερμανίου αντικατασταθεί από ένα άτομο βορίου, θα προκύψει περίσσεια κενών θέσεων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό και θα δημιουργηθεί ένας ημιαγωγός **p-τύπου**. Η παρουσία του βορίου δημιουργεί ένα ενεργειακό **επίπεδο δέκτη** (*acceptor level*) ανάμεσα στις ζώνες πολύ κοντά στη ζώνη σθένους.

Η διαφορά των ημιαγωγικών ανιχνευτών από το θάλαμο ιονισμού είναι ότι το αέριο του θαλάμου ιονισμού είναι μονωτής όταν δεν διέρχεται ακτινοβολία. Στους ημιαγωγούς η παρουσία φορέων φορτίου ακόμη και στην υπερκαθαρή τους κατάσταση δημιουργεί την ανάγκη δημιουργίας μίας ζώνης του υλικού χωρίς φορείς φορτίου, που θα δράσει ως ανιχνευτής ακτινοβολίας. Η ζώνη αυτή, που μπορεί να παρομοιασθεί με το αέριο του θαλάμου ιονισμού όταν δεν υπάρχει διέλευση ακτινοβολίας, δίνει τη δυνατότητα διακρίσεως και διαφόρων ειδών ημιαγωγικών ανιχνευτών.

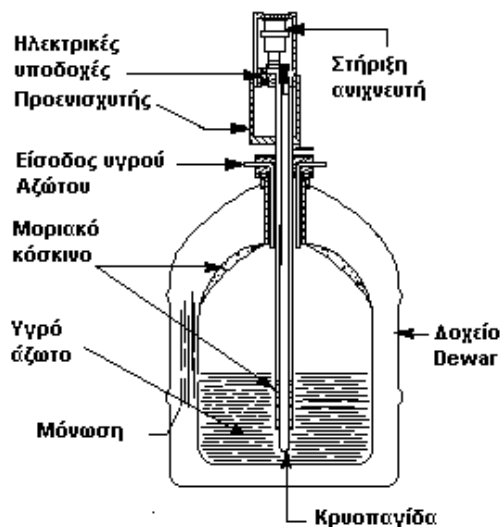
Στους ημιαγωγικούς ανιχνευτές ανήκουν και οι ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι για τη μέτρηση ακτίνων-γ και -X **ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας** (*High Purity Germanium detectors, HPGe*) ή **ενδογενείς ανιχνευτές γερμανίου** (*Intrinsic Germanium detectors, Ge(i)*) (Σχήμα 4-10). Οι ανιχνευτές αυτοί απαιτούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους ψύξη σε θερμοκρασία υγρού αζώτου για την αποφυγή του ηλεκτρονικού θορύβου εξαιτίας της θερμικής διεγέρσεως ηλεκτρονίων, που θα μείωνε και τη διακριτική τους ικανότητα.

Η διακριτικότητα των ανιχνευτών ακτίνων-γ ή -X δίνεται με την τιμή του εύρους της φωτοκορυφής στο μισό του ύψους της (FWHM σε keV) για δεδομένη ενέργεια ακτινοβολίας (π.χ. για την κορυφή ακτίνων-γ στα 1332 keV του ^{60}Co ή για 5.9 keV στην περίπτωση των ακτίνων-X). Οι συνήθεις κρύσταλλοι γερμανίου παρουσιάζουν τιμές διακριτικότητας της

τάξεως των 1.8 keV για την κορυφή στα 1332 keV του ^{60}Co ή 0.18 keV για την ακτινοβολία των 5.9 keV. Για σύγκριση μπορεί αναφερθεί, ότι ένας τυπικός κρύσταλλος NaI(Tl) διαστάσεων 3 x 3 ιντσών έχει διακριτικότητα της τάξεως των 60 keV στα 1332 keV και ένας κρύσταλλος NaI(Tl) για ακτίνες-X περίπου 3 keV στα 5.9 keV.

Η σύγκριση του φάσματος μίας πρότυπης πηγής, που μετρήθηκε με HPGe και με NaI(Tl), κάνει εμφανή τη διαφορά στη διακριτικότητα των δύο ανιχνευτών (Σχήμα 4-11).

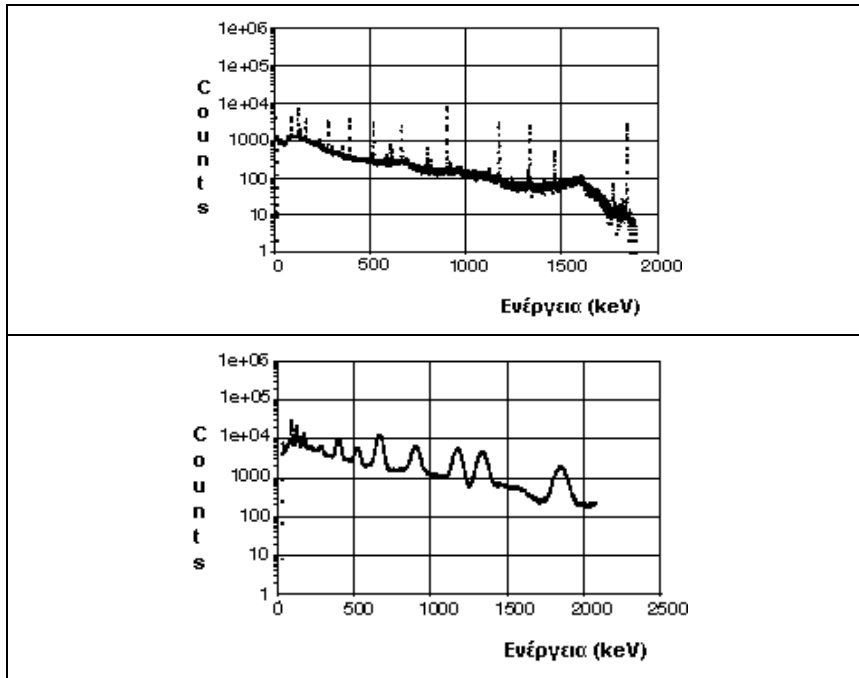
Η απόδοση ενός ημιαγωγικού ανιχνευτή εξαρτάται από τον όγκο του και εκφράζεται συνήθως σε σχέση με την αντίστοιχη ενός πρότυπου κυλινδρικού ανιχνευτή NaI(Tl) διαμέτρου 3 ιντσών, χρησιμοποιώντας σημειακή πηγή ραδιενέργειας σε απόσταση 25 cm από την επιφάνειά του. Σύγχρονοι HPGe παρουσιάζουν αποδόσεις, που μπορούν να ξεπεράσουν και τα 100%. Το κόστος του ανιχνευτή αυξάνει περ. 1000 € ανά 1% απόδοσης.



Σχήμα 4-10: Σχηματική παράσταση κρυοστάτη με ημιαγωγικό ανιχνευτή για ακτίνες-γ ή -Χ.

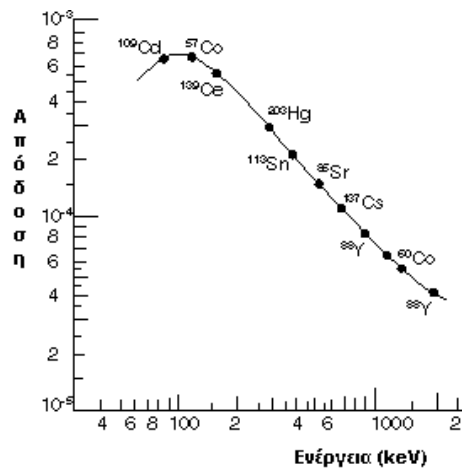
Η απόδοση και η διακριτικότητα ενέργειας των ημιαγωγικών ανιχνευτών για μέτρηση ακτινοβολίας-γ μετριέται χρησιμοποιώντας πρότυπες πηγές ακτινοβολίας. Η απόδοση των ημιαγωγικών ανιχνευτών μειώνεται αυξανόμενης της ενέργειας της ακτινοβολίας (Σχήμα 4-12). Σπουδαιότητα για την ποιότητα ενός ανιχνευτή αποτελεί επίσης ο λόγος του ύψους της φωτοκορυφής ως προς το αντίστοιχο της περιοχής κατανομής Compton. Κρύσταλλοι με μεγάλο λόγο ύψους φωτοκορυφής ως προς την κατανομή Compton παρουσιάζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα για τη φασματοσκοπία ακτίνων-γ και προτιμούνται.

Ανιχνευτές HPGe και Si(Li) μπορούν να κατασκευασθούν με πολύ λεπτά παράθυρα για την ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χαμηλής ενέργειας και σωματιδιακής ακτινοβολίας. Όλοι οι ημιαγωγικοί ανιχνευτές έχουν χαμηλούς νεκρούς χρόνους και δεν είναι ευαίσθητοι στα μαγνητικά πεδία. Τα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνουν την αναγκαιότητα ψύξεως με υγρό άζωτο, το μικρό ύψος του παραγόμενου σήματος, το οποίο συνεπάγεται την αναγκαιότητα μεγαλύτερης ενισχύσεως και το υψηλό κόστος τους, σε σύγκριση με τους στερεούς σπινθηριστές για φασματοσκοπία ακτίνων-γ.



Σχήμα 4-11: Σύγκριση των φασμάτων ακτίνων-γ ενός παρασκευάσματος αναφοράς, που μετρήθηκαν με HPGe (άνω) και με ανιχνευτή NaI(Tl) (κάτω)

Σχήμα 4-12: Απόδοση ημιαγωγικού ανιχνευτή για ακτι-νοβολία-γ μετρημένη με μία σειρά πρότυπων ραδιενεργών πηγών.



Ημιαγωγικοί ανιχνευτές χρησιμοποιούνται και για την ανίχνευση και τη φασματοσκοπία σωματιδιακής ακτινοβολίας (ακτίνες-α και -β). Ένα κλασικό παράδειγμα ανιχνευτών είναι οι **ανιχνευτές πυριτίου με επιφανειακή παρεμποδιστική στοιβάδα** (*Silicon Surface Barrier detector – SSB-detector*), που αποτελούνται από ένα κρύσταλλο πυριτίου n-τύπου με μία επιφανειακή παρεμποδιστική στοιβάδα από χρυσό, που παίζει το ρόλο του θετικού ηλεκτροδίου. Η πίσω πλευρά του κρυστάλλου είναι επικαλυμμένη με μία στοιβάδα αργιλίου, που αποτελεί και την ωμική επαφή. Σε νεώτερους τύπους ανιχνευτών η επιφανειακή επαφή (παρεμποδιστική στοιβάδα) μπορεί να αντικατασταθεί με μία εμφυτευμένη, γεγονός, που παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στη λειτουργία του ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές αυτοί χαρακτηρίζονται ως ανιχνευτές **PIPS** (*Passivated Implanted Planar*

Σχήμα 4-1: Ανιχνευτές PIPS διαφόρου μεγέθους της εταιρίας CANBERRA.



Silicon detectors) και τείνουν να αντικαταστήσουν τους κοινούς ανιχνευτές πυριτίου με επιφανειακή παρεμποδιστική στοιβάδα (Σχήμα 4-13).

Όλοι οι ανιχνευτές με επιφανειακή στοιβάδα καθώς και οι PIPS απαιτούν συνθήκες κενού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

4.2 Βασικά συστήματα μετρήσεως ακτινοβολίας

Οι βασικές μονάδες ενός συστήματος μετρήσεως πυρηνικής ακτινοβολίας είναι:

- Ο **προενισχυτής** (*preamplifier*) και ο **ενισχυτής** (*amplifier*) του σήματος του ανιχνευτή.
- Οι **μονάδες επεξεργασίας του σήματος**, που είναι τοποθετημένες σε προτυποποιημένο κλωβό, που παρέχει και την απαραίτητη τροφοδοσία ± 6 , ± 12 και ± 24 V (N.I.M. crate). Η ανάλυση του ύψους των παλμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, με τη χρησιμοποίηση ενός **μονοδιαυλικού αναλυτή** (*single channel analyzer, SCA*) κι **ενός απαριθμητή παλμών** (*counter*) ή ενός **πολυδιαυλικού αναλυτή** (*multichannel analyzer, MCA*).
- Το **σύστημα συλλογής και καταγραφής των δεδομένων**.

Η βιομηχανία ηλεκτρονικών συστημάτων μετρήσεως πυρηνικής ακτινοβολίας έχει προτυποποιήσει τόσο τα σήματα των ανιχνευτών όσο και τις μονάδες, που απαιτούνται για τη λειτουργία τους. Οι επιμέρους μονάδες βρίσκονται επίσης πολλές φορές ενσωματωμένες σε κάρτες ηλεκτρονικών υπολογιστών.