

## Ανιχνευτές σωματιδίων

Προκειμένου να κατανοήσουμε την φύση του πυρήνα αλλά και να καταγράψουμε τις ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων **εκτός των επιταχυντικών συστημάτων** και υποδομών εξίσου **απαραίτητη είναι και η χρήση ανιχνευτικών συστημάτων**. Με τον όρο **ανιχνευτή σωματιδίου** εννοούμε **οποιοδήποτε όργανο μας επιτρέπει την καταγραφή ενός η περισσότερων ειδών σωματιδίων**. Ένας ανιχνευτής μπορεί να καταγράψει την άφιξη ενός σωματιδίου ή ακόμα καλύτερα την ενέργειά του, την ακριβή χρονική στιγμή ανίχνευσης του ή και ακόμα να παρέχει πληροφορίες ικανές για την ταυτοποίηση του σωματιδίου που ανιχνεύτηκε. Φυσικά με το πέρασμα του χρόνου η τεχνολογία των ανιχνευτών άλλαξε σημαντικά. Από τα σχετικά πρωτόγονα συστήματα όπου η διαδικασία ανίχνευσης ενός σωματιδίου στηριζόταν στην οξύτητα όρασης και στην ικανότητα γρήγορης απαρίθμησης του ερευνητή, σήμερα έχουμε περάσει σε ολοκληρωμένα συστήματα ανιχνευτών που υποστηρίζονται από πανίσχυρους υπολογιστές και από τελευταίας τεχνολογίας συστήματα πληροφορικής και επικοινωνίας.

**Ο ποιο συνηθισμένος διαχωρισμός των ανιχνευτών σε κατηγορίες είναι ανάλογα το υλικό με το οποίο αλληλεπιδρά το σωματίδιο που θέλουμε να ανιχνεύσουμε**. Έτσι έχουμε: **ανιχνευτές αερίου, σπινθηριστές - όπου κατά την διέλευση η ακτινοβολία παράγει φως, ανιχνευτές στερεάς κατάστασης - πρόκειται για ημιαγωγούς, ανιχνευτές ακτινοβολίας Cherenkov, Calorimeters** κτλ.

Προκειμένου να ανιχνεύσουμε ένα σωματίδιο θα πρέπει αυτό να αλληλεπιδράσει με το υλικό του ανιχνευτή. Φυσικά αυτό από μόνο του δεν φτάνει. Θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ο ανιχνευτής μας ώστε αυτή η αλληλεπίδραση αυτή να καταγραφεί από το ηλεκτρονικό κύκλωμα του ανιχνευτή και στη συνέχεια να επεξεργαστεί/αποθηκευτεί από το σύστημα συλλογής δεδομένων.

### Κύριοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας-ύλης

Ο βασικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη και ειδικότερα για την περίπτωση **φορτισμένων σωματιδίων είναι ο ιονισμός και η διέγερση των ατομικών ηλεκτρονίων του υλικού του ανιχνευτή κατά την διέλευση της ακτινοβολίας εντός του υλικού του ανιχνευτή**.

Ένας άλλος μηχανισμός αλληλεπίδρασης **είναι μέσω της ισχυρής ή της ασθενούς αλληλεπίδρασης με τους πυρήνες των ατόμων του υλικού του ανιχνευτή**.

Επίσης κατά της επιτάχυνση ή επιβράδυνση ενός φορτισμένου σωματιδίου όπως είναι γνωστό εκπέμπεται ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή είναι γνωστή ως **ακτινοβολία πέδησης**. Καθώς ένα σωματίδιο "ταξιδεύει" στο εσωτερικό ενός υλικού η κίνησή του μεταβάλλεται υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου των ατόμων του ανιχνευτή με αποτέλεσμα την αντίστοιχη εκπομπή ακτινοβολίας.

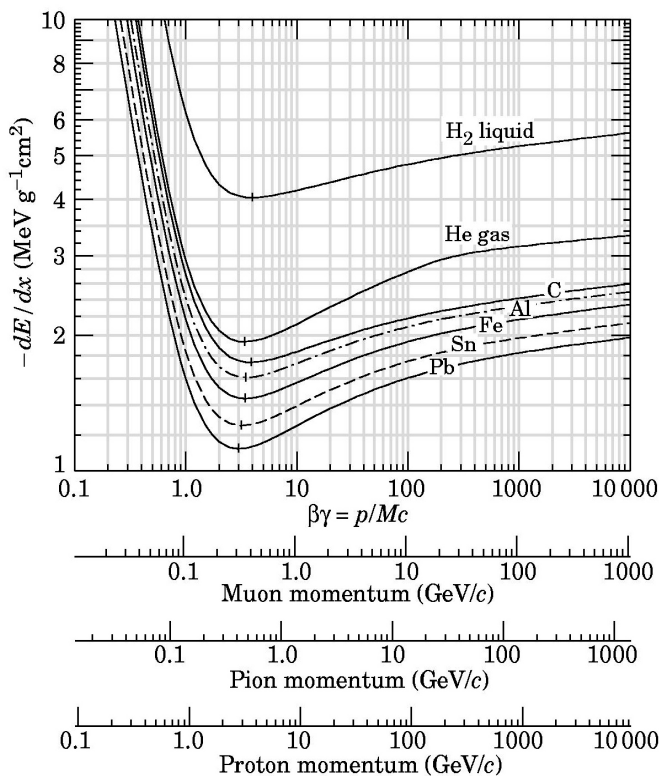
### Μέση ελεύθερη διαδρομή

Προκειμένου να προσδιορίσουμε την πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός αδρονίου με ένα υλικό χρειάζεται να προσδιορίσουμε **την μέση ελεύθερη διαδρομή της ακτινοβολίας εντός του υλικού**. Με τον όρο μέση ελεύθερη διαδρομή εννοούμε την μέση διαδρομή που διανύει ένα σωματίδιο εντός ενός υλικού πριν αυτό αλληλεπιδράσει με οποιοδήποτε τρόπο με ένα από τα άτομα του υλικού του στόχου. Ειδικά για την περίπτωση όπου ο πυρήνας - αδρόνιο ταξιδεύει εντός ενός υλικού μικρού πάχους ή για την περίπτωση ουδέτερου σωματιδίου η μέση ελεύθερη διαδρομή δίνεται από την εξίσωση:

$$l = \frac{1}{n \sigma_{tot}}$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των πυρήνων ανά μονάδα όγκου του υλικού του ανιχνευτή και  $\sigma_{tot}$  η ολική ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης.

Φυσικά για τα φορτισμένα σωματίδια ο βασικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης είναι αυτός της απώλειας ενέργειας λόγω ιονισμού.



Σχήμα 1: Γραφική απεικόνιση της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους για διάφορα υλικά και διαφορετικά σωματίδια.

Στην πιο πάνω γραφική παράσταση βλέπουμε την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους για διάφορα σωματίδια σε διαφορετικά υλικά. Κάποιες βασικές παρατηρήσεις σε αυτό το σχήμα είναι: **η απώλεια ενέργειας εξαρτάται από το υλικό αλλά και από την ενέργεια και το είδος του σωματιδίου**. Βλέπουμε επίσης ότι η **απώλεια ενέργειας** κατά μήκος της διαδρομής ενός φορτισμένου σωματιδίου μεταβάλλεται σημαντικά και γίνεται **υψηλή στις μικρότερες ενέργειες**. Η μαθηματική περιγραφή της απώλειας ενέργειας έχει γίνει με πολύ καλή ακρίβεια από την σχέση Bethe-Bloch για διάφορα υλικά και σωματίδια.

Η εξίσωση Bethe : η ανάσχεση ενέργειας ανά μονάδα μήκους

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_0 v^2} \cdot N \cdot B, \text{ όπου } B = Z \left[ \ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right) - \ln(1 - v^2/c^2) - v^2/c^2 \right]$$

Στην παραπάνω σχέση:

z – ατομικός αριθμός του σωματιδίου

v - ταχύτητα του σωματιδίου

m<sub>0</sub> - μάζα του σωματιδίου

N – πυκνότητα ατόμων στον στόχο

Z – ατομικός αριθμός του στόχου

I – μέση ενέργεια διέγερσης και ιονισμού του υλικού του στόχου

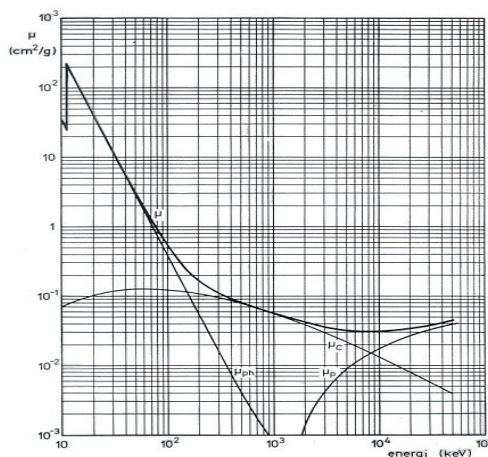
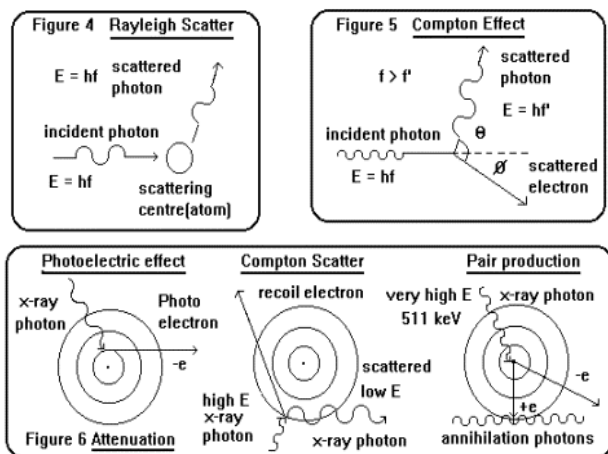


Fig. 7.8 Massabsorptionskonstanten  $\mu$  för Ge som funktion av  $\gamma$ -strålningens energi. C, p och ph hänförs sig till processerna Compton-spridning, parbildning och fotoeffekt.

Σχήμα 2: Οι τρεις τρόποι αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη

### Αλληλεπιδράσεις φωτονίων με την ύλη

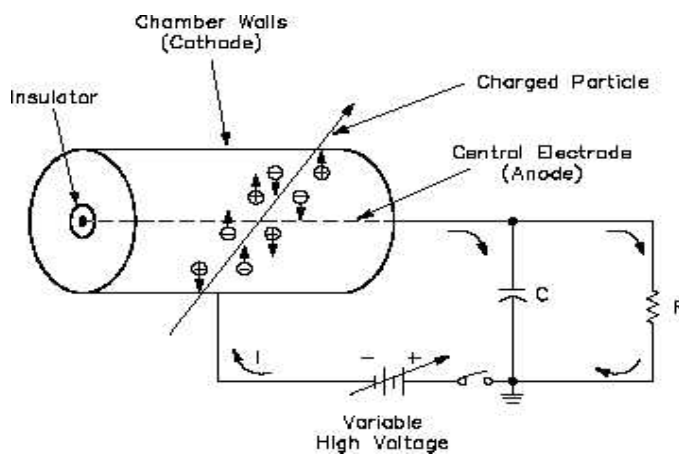
Στην ιστορία της εξέλιξης των ανιχνευτών ένα μεγάλο κεφάλαιο αφορά στην ανίχνευση των φωτονίων. Οι βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη είναι:

- 1) Η σκέδαση Rayleigh ή αλλιώς σύμφωνη σκέδαση. Η ενέργεια του φωτονίου δεν αλλάζει αλλά αλλάζει απλώς η κατεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Γενικά αυτός ο μηχανισμός σκέδασης γίνεται σημαντικός για μικρές ενέργειες φωτονίων (της τάξης των KeV). Λόγω του γεγονότος ότι δεν αποδίδεται κάποιο ποσό ενέργειας στο υλικό του ανιχνευτή μέσω ιονισμού ή διέγερσης ατόμων σε μια πρώτη προσέγγιση αυτή η σκέδαση δεν παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο στην λειτουργία των ανιχνευτών φωτονίων.
- 2) Η **σκέδαση Compton** αφορά σε εκείνη την περίπτωση όπου ένα φωτόνιο σκεδάζεται από ένα ατομικό ηλεκτρόνιο στο οποίο αποδίδει μέρος της ενέργειάς του και συνεχίζει με μικρότερη ενέργεια και διαφορετική πορεία.
- 3) Το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** όπου εδώ η ενέργεια του φωτονίου απορροφάται πλήρως από το ατομικό ηλεκτρόνιο με αποτέλεσμα και πάλι τον ιονισμό του

ατόμου.

- 4) Η τελευταία μορφή αλληλεπίδρασης η/μ ακτινοβολίας και ύλης είναι μέσω του **μηχανισμού της δίδυμης γέννησης**. Εδώ το φωτόνιο αλληλεπιδρά με το πεδίο του πυρήνα όπου και παράγονται ένα ποζιτρόνιο και ένα φωτόνιο. Φυσικά λόγω του γεγονότος ότι παράγονται δύο σωματίδια ολικής μάζας 1.02 MeV ο μηχανισμός αυτός γίνεται σημαντικός μόνο για ενέργειες μεγαλύτερες του 1.02 MeV.

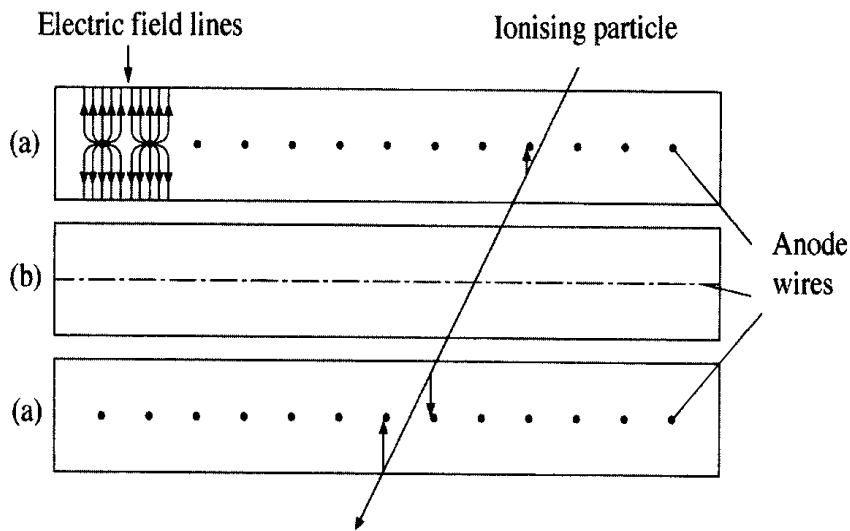
Από το σχήμα πιο πάνω βλέπουμε ότι από τους τρεις μηχανισμούς που οδηγούν σε απώλεια ενέργειας του διερχόμενου φωτονίου μέσα από την ύλη στις χαμηλότερες ενέργειες σημαντικότερη συνεισφορά είναι αυτή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στις ενδιάμεσες ενέργειες η σκέδαση Compton γίνεται σημαντική, ενώ στις πιο υψηλές ενέργειες ο μηχανισμός της δίδυμης γέννησης κυριαρχεί.



Σχήμα 3: Γραφική απεικόνιση της λειτουργίας ανιχνευτή αερίου.

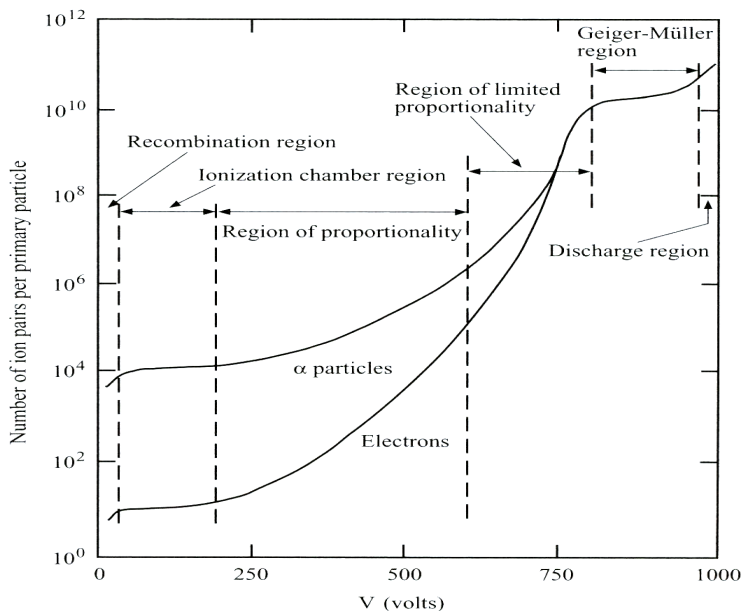
### Ανιχνευτές Αερίου

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως μια μεγάλη κατηγορία ανιχνευτών είναι οι ανιχνευτές αερίου. Η βασική αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών αυτών **στηρίζεται στην συλλογή των προϊόντων ιονισμού που παράγονται από την διέλευση της ακτινοβολίας στο αέριο του ανιχνευτή**. Στην συνέχεια τα προϊόντα ιονισμού (ηλεκτρόνια και θετικά φορτισμένα ιόντα) συλλέγονται από την άνοδο και την κάθοδο δημιουργώντας έτσι έναν ηλεκτρικό παλμό. Σήμερα υπάρχουν ανιχνευτές αερίου με αρκετά σύνθετες πολυσυρματικές διατάξεις όπως στο σχήμα 4 όπου εκτός από τον ηλεκτρικό παλμό που είναι ανάλογος της ενέργειας του σωματιδίου παρέχεται η δυνατότητα ανακατασκευής της τροχιάς του σωματιδίου.



Σχήμα 4: Πολυσυρματικός ανιχνευτής αερίου. Σε αυτούς τους ανιχνευτές καταγράφεται όλη η πληροφορία της τροχιάς του διερχόμενου σωματιδίου.

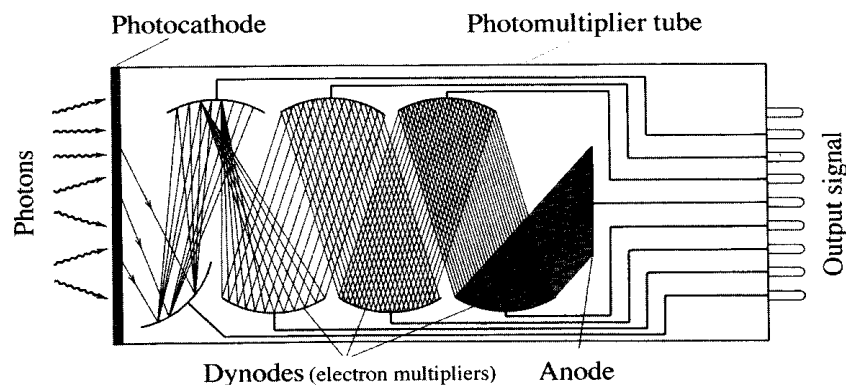
Για την περίπτωση των **ανιχνευτών αερίου υπάρχουν διαφορετικές περιοχές λειτουργίας ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται** μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.



Σχήμα 5: Οι διαφορετικές περιοχές λειτουργίας των ανιχνευτών αερίου ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ ανόδου και καθόδου.

Όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα για πολύ χαμηλές τάσεις υπάρχει ο κίνδυνος να μην έχουμε καθόλου ηλεκτρικό παλμό διότι τα ζεύγη ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων επανασυνδέονται πριν ακόμα προσεγγίσουν την άνοδο και την κάθοδο. Αυξάνοντας την

τάση το πεδίο γίνεται ισχυρότερο. Στην περιοχή αυτή το φορτίο που τελικά συλλέγεται από τα ηλεκτρόδια είναι ανάλογο του αριθμού των αρχικών ζευγών ηλεκτρονίων-ιόντων που δημιουργήθηκαν και επομένως ανάλογο της εναπόθεσης ενέργειας των σωματιδίων στο αέριο του ανιχνευτή. Αυξάνοντας επιπλέον την τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου η αναλογία αυτή παύει να ισχύει μέχρι το τελικό σημείο κορεσμού για πολύ υψηλές τάσεις λειτουργίας όπου τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που τελικά καταλήγουν στα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή έχουν πολλαπλασιαστεί τόσο πολύ, λόγω του ισχυρού πεδίου, ώστε πλέον δεν υπάρχει αναλογία με τον αρχικό αριθμό φορέων που δημιουργήθηκαν από την διέλευση της ακτινοβολίας. Αυτή είναι η **περιοχή λειτουργίας των ανιχνευτών Geiger-Muller όπου η μόνη πληροφορία που παρέχεται είναι απλώς η καταμέτρηση των σωματιδίων**. Έχει καθεί δηλαδή η πληροφορία της ενέργειας των σωματιδίων. Σε περιπτώσεις όμως χρήσης ενός ανιχνευτή ως απεριθμητή ιονίζουσας ακτινοβολίας μπορεί απλώς η καταμέτρηση των γεγονότων ανά μονάδα χρόνου να είναι αρκετή.



*Σχήμα 6: Τυπική διάταξη φωτοπολλαπλασιαστή. Τα φωτόνια τα οποία προέρχονται από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με το υλικό του σπινθηριστή προσπίπτουν στην φωτοκάθοδο από την οποία εξέρχεται ένας μικρός αριθμός ηλεκτρονίων. Στην συνέχεια τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται μέσω διαδοχικών διαδρομών στις δυνόδους για να δημιουργηθεί ένας ανιχνεύσιμος ηλεκτρικός παλμός στην άνοδο.*

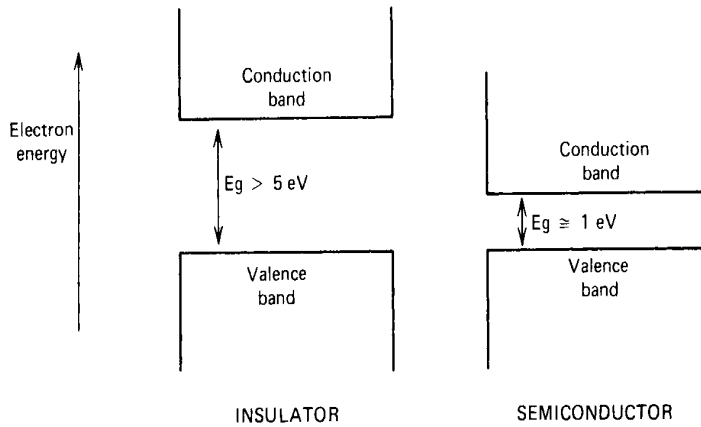
### **Σπινθηριστές**

Μια άλλη μεγάλη κατηγορία ανιχνευτών είναι αυτή των σπινθηριστών. Η λειτουργία των ανιχνευτών αυτών στηρίζεται στην συλλογή του φωτός που παράγεται από τον ιονισμό και την διέγερση των ατόμων/μορίων του σπινθηριστή. Πρακτικά πρόκειται για υλικά όπου η διέλευση ακτινοβολίας διεγείρει τα μόρια του σπινθηριστή σε κάποιες διεγερμένες καταστάσεις οι οποίες αποδιηγείρονται μέσω φθορισμού -δηλαδή με εκπομπή φωτός. Στην συνέχεια τα φωτόνια που παράγονται προσπίπτουν στο υλικό της φωτοκαθόδου. Το υλικό της φωτοκαθόδου είναι τέτοιο που να "διευκολύνει" την παραγωγή φωτοηλεκτρονίων. Στην συνέχεια τα ηλεκτρόνια που παράγονται προσπίπτουν στην πρώτη δύνοδο και πολλαπλασιάζονται. Αυξάνοντας συνεχώς το δυναμικό από δύνοδο σε δύνοδο τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται ώστε τελικά στην άνοδο να έχουμε έναν ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό παλμό.

### **Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης**

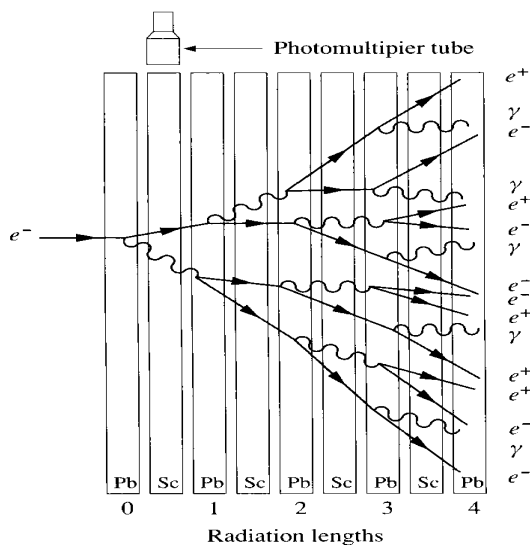
Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών στερεάς κατάστασης είναι παρόμοια με αυτή των ανιχνευτών αερίου. Έτσι και εδώ, η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην συλλογή των

προϊόντων ιονισμού που προκαλεί η διέλευση της ακτινοβολίας στο υλικό του ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης χαρακτηρίζονται από την υψηλή απόδοση, την εξαιρετική ενεργειακή διακριτική ικανότητα, και υπό ορισμένες συνθήκες, την εξαιρετική χωρική διακριτική ικανότητα (σε πολυσυρματικούς ανιχνευτές).



Σχήμα 7: Αναπαράσταση της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας για έναν μονωτή και έναν ημιαγωγό. Η μικρότερη ενέργεια που απαιτείται για την μετάβαση στην ζώνη αγωγιμότητας για την περίπτωση των ημιαγωγών καθιστά τα υλικά αυτά ιδανικά για την κατασκευή ανιχνευτών.

Όπως και στην περίπτωση των ανιχνευτών αερίου για την συλλογή του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου από τον ιονισμό που προκαλεί η διέλευση της ακτινοβολίας απαιτείται η ύπαρξη ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. **Προκειμένου να γίνει η συλλογή αυτού του φορτίου συνήθως χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί σε διάταξη αντίστροφα πολωμένης δίοδου.** Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το ηλεκτρικό πεδίο για την συλλογή των ηλεκτρικών φορτίων ενώ το μικρό ενεργειακό χάσμα μεταξύ ζώνης αγωγιμότητας και ζώνης σθένους επιτρέπει στους φορείς να προσεγγίσουν τα ηλεκτρόδια όπου συλλέγεται ο ηλεκτρικός παλμός.



Σχήμα 8: Γραφική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του καλοριμέτρου.

### **Καλορίμετρα**

Μια άλλη κατηγορία ανιχνευτών που χρησιμοποιείται εκτενώς στην φυσική υψηλών ενεργειών είναι τα καλορίμετρα. Η ονομασία τους πηγάζει από την ιδιότητα τους να μετρούν την ολική ενέργεια και επομένως την μάζα των ασταθών σωματιδίων που παράγονται. Ακριβώς επειδή πρόκειται για μεγάλες ενέργειες οι ανιχνευτές αυτοί συνήθως αποτελούνται από διάφορα στάδια ανίχνευσης και απορρόφησης όπου η φύση των σωματιδίων αλλάζει. Τα καλορίμετρα παρέχουν την δυνατότητα ανίχνευσης ακόμα και ουδετέρων σωματιδίων ενώ παρουσιάζουν και πολύ καλή χρονική απόκριση.

### **Σύνθετα ανιχνευτικά συστήματα**

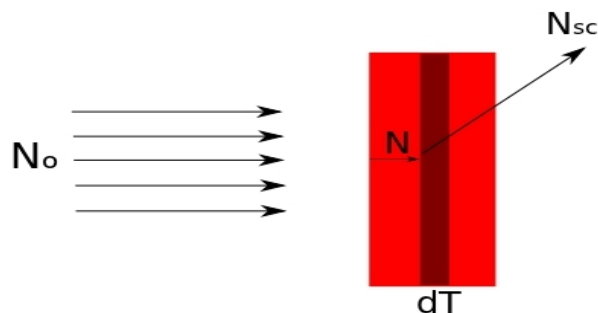
Φυσικά στις μέρες μας οι ανιχνευτικές διατάξεις γίνονται ολοένα και πιο πολύπλοκες προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή πληροφορία από κάθε πείραμα. Στην πυρηνική φυσική αλλά και στις υψηλές ενέργειες τις πιο πολλές φορές χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ανιχνευτές για το κάθε είδος ακτινοβολίας ανάλογα με το είδος του πειράματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το φασματόμετρο MINIBALL στις εγκαταστάσεις REX-ISOLDE στο CERN όπου μία πρωτότυπη διάταξη ανιχνευτών ακτινοβολίας  $\gamma$  συνδυάζεται με ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων όπου και οι δύο ανιχνευτές καλύπτουν στερεά γωνία σχεδόν  $4\pi$ .

Υπάρχουν άλλα παραδείγματα όπου ανιχνευτικά συστήματα συνδυάζονται με τους ογκώδεις και εντυπωσιακούς φασματογράφους μάζας (ισχυρά διπολικά μαγνητικά πεδία).

Φυσικά οι πιο πολύπλοκες και εντυπωσιακές σύνθετες ανιχνευτικές διατάξεις υπάρχουν στα δύο μεγάλα πειράματα του CERN στο CMS και στο πείραμα ATLAS

### **Παράδειγματα**

1) Η έννοια της μέσης ελεύθερης διαδρομής: Ποια είναι η μέση απόσταση που μπορεί να κινηθεί ένα σωματίο εντός ενός υλικού πριν συγκρουστεί με τα άτομα του.



Δεδομένα:

$dT$  = στοιχειώδες πάχος στόχου

$T$  = ολικό πάχος στόχου

$n$  = αριθμός πυρήνων στον στόχο ανά μονάδα όγκου

$\sigma$  = ενεργός διατομή

$N_0$  = αριθμός σωματιδίων που προσπίπτουν στον στόχο

$N_{sc}$  = αριθμός πυρήνων που αλληλεπίδρασαν με οποιοδήποτε τρόπο από το στοιχειώδες



τμήμα με πάχος  $dT$

$N$  = αριθμός πυρήνων που προσπίπτουν στο στοιχειώδες τμήμα με πάχος  $dT$

$N_f$  = αριθμός πυρήνων που "διέφυγαν" της σκέδασης μετά από την διέλευση όλου του μήκους του στόχου ( $T$ ).

Αν θεωρήσουμε ότι στο στοιχειώδες πάχος  $dT$  προσπίπτουν τελικά  $N$  σωματίδια αυτά που αλληλεπιδρούν με οποιοδήποτε τρόπο με τα άτομα του στόχου θα είναι  $dN_{sc}$  επομένως η αρχική ροή των  $N$  σωματιδίων θα μεταβληθεί κατά  $dN$ . Όπου  $dN = -dN_{sc}$

Από τον ορισμό όμως της ενεργού διατομής για τον αριθμό  $dN_{sc}$

$$dN_{sc} = N \cdot n \cdot \sigma \cdot dT$$

$$\frac{dN_{sc}}{N} = \frac{-dN}{N} = n \cdot \sigma \cdot dT$$

$$-\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^T n \sigma dT$$

$$-\ln\left(\frac{N_f}{N_0}\right) = n \cdot \sigma \cdot T \Rightarrow N_f = N_0 e^{-n\sigma T} = N_0 e^{-\frac{T}{l_{MFP}}}, \text{ όπου } l_{MFP} = \frac{1}{n\sigma}$$

$$N_{sc} = N_0 \left(1 - e^{-\frac{T}{l_{MFP}}}\right)$$

2) Ποια είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή ενός νετρονίου ενέργειας 1 MeV στο  $^{27}\text{Al}$ . Δίνεται η ολική ενεργός διατομή  $\sigma_{tot}(E=1 \text{ MeV}) = 2.38 \text{ b}$

$$l = \frac{1}{n \cdot \sigma_{tot}}$$

$$d = 2.7 \text{ gr/cm}^3$$

$$n = \frac{d \cdot N_A}{27 \text{ gr}} \text{ άτομα/cm}^3$$

$$l = \frac{27 \text{ gr}}{2.7 \text{ gr/cm}^3 \cdot N_A \cdot 2.38 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2} = 7 \text{ cm}$$

3) Σε ένα πείραμα παρατηρείται ότι η προσπίπτουσα δέσμη νετρονίων σκεδάζεται σε ποσοστό 10% από έναν στόχο με πυκνότητα  $10.6 \text{ gr/cm}^3$ . Αν θεωρήσουμε ότι ο μαζικός αριθμός του στοιχείου του στόχου είναι  $A=200$  και η ολική ενεργός διατομή σκέδασης 1.1 b ποιο είναι το πάχος του στόχου;

$$n = \frac{10.6 (\text{gr/cm}^3) \cdot N_A}{200 \text{ gr}} = 3.2 \cdot 10^{22} (\text{1/cm}^3) [\text{πυρήνες στόχου ανά μονάδα όγκου}]$$

$$l_{MFP} = \frac{1}{n \sigma} = \frac{1}{3.2 \cdot 10^{22} (\text{1/cm}^3) 1.1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2} = 28.4 \text{ cm}$$

$$\frac{N_{sc}}{N_0} = 10^{-1} = 1 - e^{-\frac{T}{l_{MFP}}} \Rightarrow e^{-\frac{T}{28.4}} = 1 - 10^{-1}$$

$$\frac{-T}{28.4} = \ln(1 - 10^{-1}) \Rightarrow T = -28.4 \cdot (-0.10536) = 2.99 \text{ cm}$$

4) Από έναν φωτοπολλαπλασιαστή ποια είναι η πολικότητα του ηλεκτρικού παλμού που περιμένουμε από μια από τις τελευταίες δύνodos (όπου έχουμε ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό παλμό) και από την άνοδο.

Από την δύνοδο περιμένουμε θετικό παλμό διότι η κάθε δύνodos αποδίδει περισσότερα ηλεκτρόνια στην επόμενη από αυτά που "έλαβε"

Αντίθετα από την άνοδο περιμένουμε αρνητικό παλμό.