



**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε**

# **ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**



**ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΛΟΥΜΙΣΤΑΚΗΣ ΑΜ:3647**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ. ΚΑΠΕΤΑΝΑΚΗΣ  
ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ**

**ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2016**

**ΣΤΟΝ ΓΙΩΡΓΟ**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αφιερώνω, την εργασία στον αδικοχαμένο μου αδερφό Γιώργο που από εκεί ψηλά θα χαίρεται τώρα που ολοκληρώνω τις σπουδές μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Τάσο και Δήμητρα για την αγάπη και την υποστήριξη τους τόσα χρόνια.

Επίσης τον επιβλέποντα καθηγητή μου Αναπληρωτή καθηγητή Δρ.Καπετανάκη Ελευθέριο η επιστημονική του επάρκεια γνωστή αλλά και σαν άνθρωπος σπουδαίος .για την υπομονή του και την καθοδήγηση του όποτε το χρειάστηκα, όπως και για την κατανόηση του στο πολύ μεγάλο προσωπικό πρόβλημα που πρόέκυψε κατά την διάρκεια της καταπόνησης της παρούσας εργασίας, γεγονός που παρέτεινε κατά πολύ την χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της.

## ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στο **κεφάλαιο 1** περιγράφεται ο ορισμός της έννοιας της ιοντίζοντας ακτινοβολίας όπως και κάποιων βασικών μεγεθών για την μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας Στο **κεφάλαιο 2** αναλύονται οι εφαρμογές τους αλλά και οι επιδράσεις τους στον ανθρωπινό οργανισμό. Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται μια εισαγωγή στους ανιχνευτές ακτινοβολίας που είναι οι συσκευές μέτρησης, όπως και στους ανιχνευτές αερίων. Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναλύονται οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης όπως οι ανιχνευτές ημιαγωγών και **στο 5<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο** κλείνουμε με τους ανιχνευτές σπινθηρισμού και επίσης μια σημαντική κατηγορία ανιχνευτών τους ανιχνευτές θερμοφωταύγειας όπως και τους ανιχνευτές που λειτουργούν ως προσωπικά δοσίμετρα.

---

## Περιεχόμενα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανιχνευτές ιοντίζοντας ακτινοβολίας είναι η μέθοδος που ανακάλυψε ο άνθρωπος για να εντοπίζει την ακτινοβολία που παράγεται από την παραγωγή ιόντων. Η ανάγκη αυτή προέκυψε από την πρόθεση να περιοριστούν οι επιπτώσεις που έχει αυτή στον ανθρωπινό οργανισμό. Επίσης διαπιστώθηκε ότι όταν ελεγχθεί και περιοριστεί σε ανεκτά επίπεδα μπορεί να είναι χρήσιμη για πολλές εφαρμογές(ιατρικές, βιομηχανικές). Έτσι με διάφορους τρόπους και με την χρήση μετρητικών διατάξεων και υλικά που υπάρχουν στην φύση(αέρια, ημιαγωγοί)αξιοποιώντας την αλληλεπίδραση τους με τις διαφορές μορφές ακτινοβολίας μπορούμε να την εντοπίσουμε και ως εκ τούτου να την καταστήσουμε ωφέλιμη .Στην παρούσα εργασία κάνουμε μια περιγραφή των διαφόρων ειδών ανιχνευτών καθώς και κάποιων εμπορικών παραδειγμάτων που υπάρχουν στην αγορά.

## ABSTRACT

The detectors of ionizing radiation are the method that was invented by humanity to detect the radiation produced by the ionization of the atoms. This need arose from the intention to limit the impact on the human body when it comes to major exhibition in radiation. Also found when it tested at acceptable levels may be useful for many applications (medical, industrial) .So using different ways and by use of measurement and materials available in nature (gas, semiconductors) utilizing their interaction with various forms of radiation we can detect and is therefore be measured. In this work we present a description of the various types of detectors and some commercial examples available in the market.

## *Κεφάλαιο 1 Ιοντίζουσα ακτινοβολία*

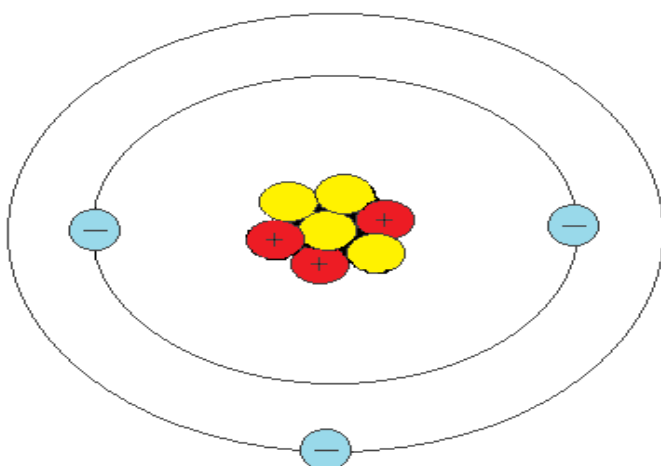
## Περιεχόμενα 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

<b><u>1.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</u></b> .....	10
<b><u>1.1.1 Άτομο</u></b> .....	10
<b><u>1.1.2 Περιοδικός πίνακας στοιχείων</u></b> .....	11
<b><u>1.1.3 Διέγερση</u></b> .....	11
<b><u>1.1.5 Ιοντισμός η ιονισμός</u></b> .....	13
<b><u>1.1.6 Η/Μ Ακτινοβολίες</u></b> .....	14
<b><u>1.1.7 Ιοντίζουσα ακτινοβολία</u></b> .....	15
<b><u>1.1.7 Τα είδη της ιοντίζουσας ακτινοβολίας</u></b> .....	16
<b><u>1.1.8 Μη ιοντίζουσα Ακτινοβολία</u></b> .....	20
<b><u>1.2 Μεγέθη και μονάδες μέτρησης ιοντίζουσας ακτινοβολίας</u></b> .....	21
<b><u>1.2.1 Δόση Ακτινοβολίας η Απορροφούμενη Δόση</u></b> .....	21
<b><u>1.2.2 Έκθεση</u></b> .....	22
<b><u>1.2.3 Δόση-Έκθεση</u></b> .....	22
<b><u>1.2.4 Ευθύγραμμη μετάδοση ενέργειας</u></b> .....	22
<b><u>1.2.5 Ισοδύναμη Δόση</u></b> .....	22
<b><u>1.2.6 Ενεργός δόση</u></b> .....	23

## 1.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 1.1.1 Άτομο

Το άτομο<sup>[1.4]</sup> αποτελείται από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα και τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν (Σχήμα 1). Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια (με θετικό φορτίο, +1) και νετρόνια (ουδέτερα). Τα πρωτόνια έχουν ίσο και αντίθετο φορτίο με τα ηλεκτρόνια (-1). Επειδή στα άτομα το πλήθος των πρωτονίων είναι ίσο με το πλήθος των ηλεκτρονίων τα ηλεκτρικά φορτία αλληλοεξουδετερώνονται και το άτομο εμφανίζεται ηλεκτρικά ουδέτερο. Στο παράδειγμα του Σχήματος 1 φαίνεται ότι ο πυρήνας περιέχει 3 πρωτόνια και γύρω από αυτόν περιστρέφονται 3 ηλεκτρόνια. Οι κυκλικές τροχιές των ηλεκτρονίων ονομάζονται στοιβάδες και οι επιτρεπόμενες ακτίνες τους είναι συγκεκριμένες. Όσο πιο μεγάλη είναι η ακτίνα της στοιβάδας τόσο μεγαλύτερη ενέργεια έχει το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε αυτή, επειδή βρίσκεται μακριά από τον πυρήνα του ατόμου<sup>[1.4]</sup>.



**Σχήμα 1.1.** Δομή Ατόμου λιθίου (Li). Χαρακτηριστικό παράδειγμα δομής ατόμου (3 πρωτόνια και 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα)<sup>[1.5]</sup>

Επειδή οι ακτίνες των στοιβάδων κάθε ατόμου είναι συγκεκριμένες αυτόματα συνεπάγεται ότι και η ενέργεια που έχει κάθε ηλεκτρόνιο σε μια στοιβάδα είναι συγκεκριμένη. Επίσης, το πλήθος των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην πιο απομακρυσμένη (εξωτερική) στοιβάδα του ατόμου καθορίζει τις χημικές ιδιότητες του.<sup>[1.4]</sup> Στη φύση τα άτομα είναι πάντα ουδέτερα και τα ηλεκτρόνια διατάσσονται έτσι ώστε να βρίσκονται σε τροχιές όσο το δυνατόν πλησιέστερες στον



πυρήνα. Η ανάγκη των ηλεκτρονίων να βρίσκονται κοντά στον πυρήνα υπογορεύεται από την αρχή της ελάχιστης ενέργειας<sup>[1.4]</sup>. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όσο πιο κοντά στον πυρήνα είναι η στοιβάδα που κινείται το ηλεκτρόνιο τόσο μικρότερη ενέργεια διαθέτει.

### 1.1.2 Περιοδικός πίνακας στοιχείων

Έχει βρεθεί ότι το πλήθος των πρωτονίων του πυρήνα παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες του ατόμου. Για παράδειγμα, τί ξεχωρίζει τον πυρήνα του αζώτου από αυτόν του οξυγόνου; Η απάντηση είναι απλή. Ο πυρήνας του αζώτου περιέχει 7 πρωτόνια, ενώ του οξυγόνου 8[1.4]. Με λίγα λόγια, το πλήθος των πρωτονίων του πυρήνα καθορίζει την ταυτότητα του ατόμου. Το πλήθος των πρωτονίων ονομάζεται ατομικός αριθμός και συμβολίζεται με Z. Το πλήθος των πρωτονίων (Z) και των νετρονίων (N) ονομάζεται μαζικός αριθμός και συμβολίζεται με A (δηλαδή  $A=Z+N$ ). Σε ένα ουδέτερο άτομο ο ατομικός αριθμός ισούται και με το πλήθος των ηλεκτρονίων που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Γενικά τα στοιχεία συμβολίζονται  $A Z X$ , όπου X το σύμβολο του στοιχείου. Για την ευκολότερη μελέτη των στοιχείων, αυτά έχουν ταξινομηθεί σε έναν πίνακα κατά αύξοντα ατομικό αριθμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Ο πίνακας αυτός ονομάζεται Περιοδικός Πίνακας των Στοιχείων<sup>[1.5]</sup>.

Για στοιχεία που δεν έχουν σταθερά ισότοπα, ο μαζικός αριθμός του ισότοπου με το μεγαλύτερο χρόνο υποδιπλασιασμού βρίσκεται σε παρενθέσεις.

Περιοδικός Πίνακας Πνευματικά δικαιώματα σχεδιασμού και διεπαφής © 1997 Michael Davah, Ptable.com Τελευταία ενημέρωση 16 Σεπ 2012

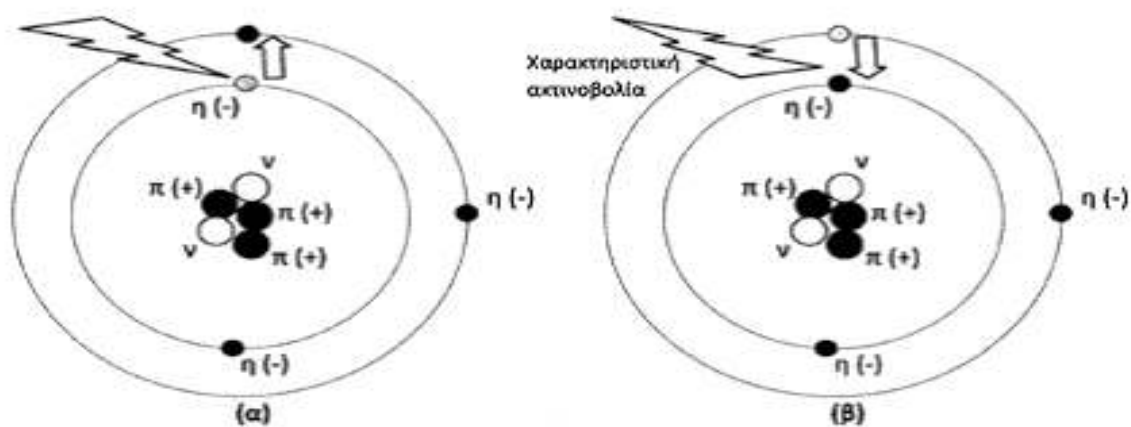
Σχήμα 1.2 Περιοδικός πίνακας στοιχείων.<sup>[1.5]</sup>

Στον περιοδικό πίνακα του Σχήματος 2 από κάθε στοιχείο φαίνεται ο ατομικός αριθμός Z. Οι κάθετες γραμμές του πίνακα ονομάζονται ομάδες και τα στοιχεία που ανήκουν στην ίδια ομάδα έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων στην εξωτερική τους στοιβάδα. Συνεπώς,

παρουσιάζουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες (βλ. προηγούμενη παράγραφο)<sup>[1.4]</sup> Οι οριζόντιες γραμμές του πίνακα ονομάζονται περίοδοι και τα στοιχεία σε κάθε περίοδο παρουσιάζουν την ίδια μεταβολή διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων.

### 1.1.3 Διέγερση

Αν σε ένα άτομο προσφερθεί με κάποιο τρόπο ενέργεια τότε υπάρχει η πιθανότητα κάποιο ηλεκτρόνιο του να την απορροφήσει και να μεταπηδήσει σε στοιβάδα μεγαλύτερης ενέργειας (δηλ. σε στοιβάδα με μεγαλύτερη ακτίνα από το κέντρο του πυρήνα). Τότε λέμε ότι το άτομο είναι **διεγερμένο**, διότι δεν βρίσκεται πλέον στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας με τα ηλεκτρόνια του όσο το δυνατό πλησιέστερα στον πυρήνα. Ας αναλύσουμε λίγο βαθύτερα την απορρόφηση της προσφερόμενης ενέργειας από το ηλεκτρόνιο. Όπως είδαμε στην παρ. 1.1.1, τα ηλεκτρόνια κινούνται σε συγκεκριμένες στοιβάδες καθορισμένης ενέργειας. Ένα ηλεκτρόνιο θα απορροφήσει την ενέργεια που του προσφέρεται μόνο αν αυτή είναι **ίση** με την ενεργειακή διαφορά που χωρίζει τη στοιβάδα του με μια άλλη υψηλότερη. Αν η προσφερόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη τότε το ηλεκτρόνιο θα την αγνοήσει<sup>[1.4]</sup>.



**Σχήμα 1.3:** (α) Η απορρόφηση ενέργειας από το ηλεκτρόνιο του δίνει τη δυνατότητα να μεταπηδήσει σε στοιβάδα (τροχιά) μεγαλύτερης ενέργειας. Τώρα το άτομο είναι διεγερμένο.  
<sup>[1.5]</sup> (β) Η διέγερση διαρκεί για μικρό χρονικό διάστημα. Το ηλεκτρόνιο επιστρέφει στην

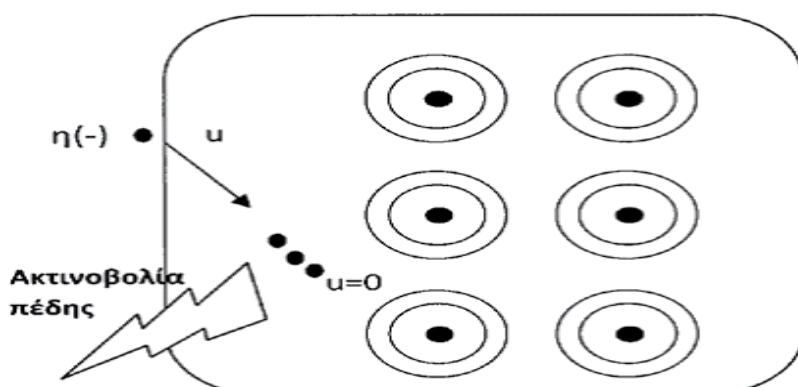
προηγούμενη στοιβάδα με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας.<sup>[1.5]</sup>

Στο **Σχήμα 1.3α** φαίνεται η διαδικασία απορρόφησης ενέργειας από το ηλεκτρόνιο και η μεταπήδησή του σε στοιβάδα υψηλότερης ενέργειας. Ας επιστρέψουμε στο διεγερμένο άτομο. Επειδή το άτομο δεν μπορεί να παραμείνει για αρκετό χρόνο στην κατάσταση αυτή, το ηλεκτρόνιο που απορρόφησε την ενέργεια θα επιστρέψει στην προηγούμενη στοιβάδα εκπέμποντας ταυτόχρονα την ενέργεια που απορρόφησε με τη μορφή ακτινοβολίας (φωτόνια).

Στο **Σχήμα 1.3β** φαίνεται η διαδικασία αποδιέγερσης με την επιστροφή του ηλεκτρονίου στην προηγούμενη θέση του και την ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή είναι διαφορετική από άτομο σε άτομο και είναι χαρακτηριστική του είδους του ατόμου (για τον λόγο αυτό ονομάζεται **χαρακτηριστική ακτινοβολία**). Δηλαδή ανιχνεύοντας την ακτινοβολία αυτή μπορούμε να προσδιορίσουμε το είδος του ατόμου που την εξέπεμψε<sup>[1.4]</sup>.

#### 1.1.4 Ακτινοβολία πέδης (bremsstrahlung)

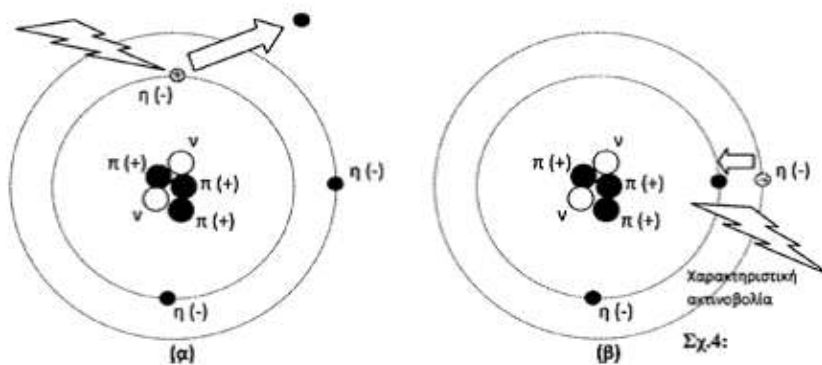
Όπως μαρτυρά το όνομα της, η ακτινοβολία πέδης οφείλεται στην πέδηση («φρενάρισμα») που προκαλείται στα ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια, πρωτόνια, σωματία α κλπ) από την άπωση του ηλεκτρικού πεδίου των ατόμων. Ας υποθέσουμε ότι ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο διασχίζει ένα υλικό (Σχήμα 1.4). Το ηλεκτρόνιο δέχεται συνεχώς ηλεκτρικές δυνάμεις από τα άτομα του υλικού με αποτέλεσμα να μειώνεται συνεχώς η ταχύτητα του ώσπου στο τέλος σταματά εντελώς. Η ενέργεια που χάνει το ηλεκτρόνιο κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσής του εκπέμπεται υπό τη μορφή ακτινοβολίας (φωτόνια). Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **ακτινοβολία πέδης**<sup>[1.4]</sup>



**Σχήμα 1.4:** Το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο υλικό με ταχύτητα  $u$ . Τα άτομα του υλικού του ασκούν δυνάμεις με αποτέλεσμα τη συνεχή μείωση της ταχύτητας του ώσπου αυτό σταματά ( $u=0$ ). Η ενέργεια που χάνει το ηλεκτρόνιο κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης εκπέμπεται υπό τη μορφή ακτινοβολίας<sup>[1.5]</sup>

### 1.1.5 Ιοντισμός η ιονισμός

Αν η ενέργεια που προσφέρεται στο άτομο είναι ικανή να απομακρύνει τελείως ένα ηλεκτρόνιο από αυτό, τότε το άτομο θα έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο και θα εμφανίσει θετικό φορτίο<sup>(1.1)</sup>. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ιονισμός** και παίζει σημαντικό ρόλο στη φυσική των ακτινοβολιών, καθώς και στις συνέπειες τους στο ανθρώπινο σώμα. Τη θέση του ηλεκτρονίου που απομακρύνθηκε την καταλαμβάνει άλλο από υψηλότερη στοιβάδα, με αποτέλεσμα την εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται η διαδικασία του ιονισμού.



**Σχήμα 1.5:(α)** Η απορρόφηση ενέργειας από το ηλεκτρόνιο του δίνει τη δυνατότητα να εγκαταλείψει το άτομο και να απομακρυνθεί από αυτό.

**(β)** Τη θέση που άδειασε στη στοιβάδα καταλαμβάνει ηλεκτρόνιο από την υψηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας. Το άτομο πλέον έχει 2 ηλεκτρόνια και 3 πρωτόνια. Άρα εμφανίζει θετικό φορτίο και για αυτό το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ιονισμός<sup>[1.5]</sup>

### 1.1.6 Η/Μ Ακτινοβολίες

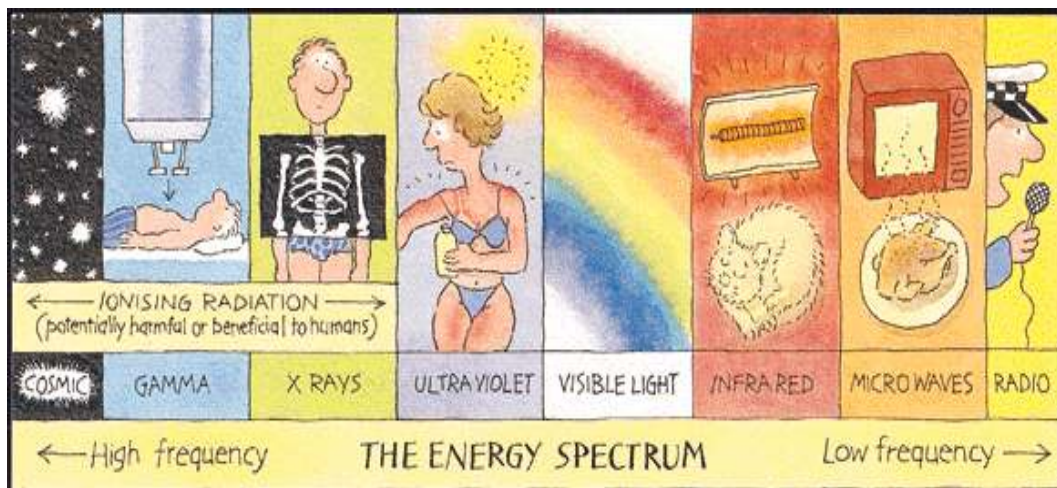
Στη φυσική, ως **ακτινοβολία** περιγράφεται οποιαδήποτε διαδικασία από την οποία η

ενέργεια που εκλύεται από κάποιο σώμα μεταδίδεται διαμέσου της ύλης ή του κενού διαστήματος μέχρι να απορροφηθεί από κάποιο άλλο σώμα. Συχνά η έννοια της ακτινοβολίας συγγέεται είτε με την έννοια της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, είτε με την **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων που κυμαίνεται από την περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων, μέχρι την περιοχή των ακτινών γ [1.4]

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη διαφοροποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι:

1. Το μήκος κύματος/συχνότητα 2. Τα φυσικά της χαρακτηριστικά 3. Τις επιπτώσεις που προκαλεί στα μέσα διάδοσης/αποδέκτες

Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσει η κατηγοριοποίηση της ακτινοβολίας με βάση τις επιπτώσεις στο περιβάλλον ή στα μέσα διάδοσης σε ιοντίζουσα και σε μη-ιοντίζουσα. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία αναφέρεται ο όρος ιοντίζουσα ακτινοβολία ως μετάφραση του αγγλικού όρου ionizing, ο οποίος με τη σειρά του προέρχεται από μεταγραφή στην αγγλική του ελληνικού όρου(ιόν/ιόντος). Για αυτό το λόγο εκτιμούμε ο όρος ιοντίζουσα ακτινοβολία είναι πιο δόκιμος και αυτόν θα χρησιμοποιούμε στο εξής.

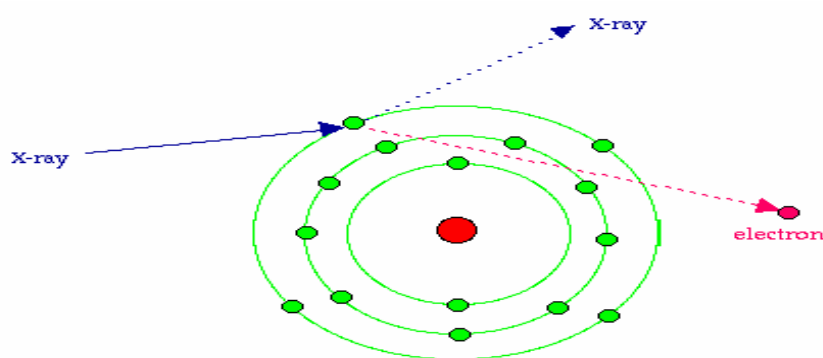


Ιοντίζουσα Ακτινοβολία Μη Ιοντίζουσα Ακτινοβολία

**Σχήμα 1.6** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από ενεργητική σκοπιά (χωριζόμενο σε ιοντίζουσες και μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες) [1.4]

### 1.1.7 Ιοντίζουσα ακτινοβολία

Ιοντίζουσα ονομάζεται η ακτινοβολία κατά την οποία η ενέργεια που εκπέμπεται προέρχεται από ραδιενεργά υλικά, μηχανήματα ακτίνων-X ή από πυρηνικές αντιδράσεις, μεταφέρεται μέσω σωματιδίων ή κυμάτων και επιπλέον έχει συχνότητα υψηλότερη από το ορατό φως<sup>[1.4]</sup>. Στην περίπτωση της Ιοντίζουσας ακτινοβολίας η ακτινοβολούμενη ενέργεια προκαλεί βίαια απόσπαση ηλεκτρονίων από τα μόρια τα οποία αντιδρώντας μεταξύ τους δημιουργούν ιόντα.



**Σχήμα 1.7** Ιοντίζουσα ακτινοβολία με χρήση Ακτίνων X. Η ακτίνα X προσπίπτει στα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας και το απομακρύνει από το μόριο οπότε το ηλεκτρόνιο Αλληλεπιδρά με άτομα της ύλης και σχηματίζει ιόντα. [1.4]

### 1.1.7 Τα είδη της ιοντίζουσας ακτινοβολίας

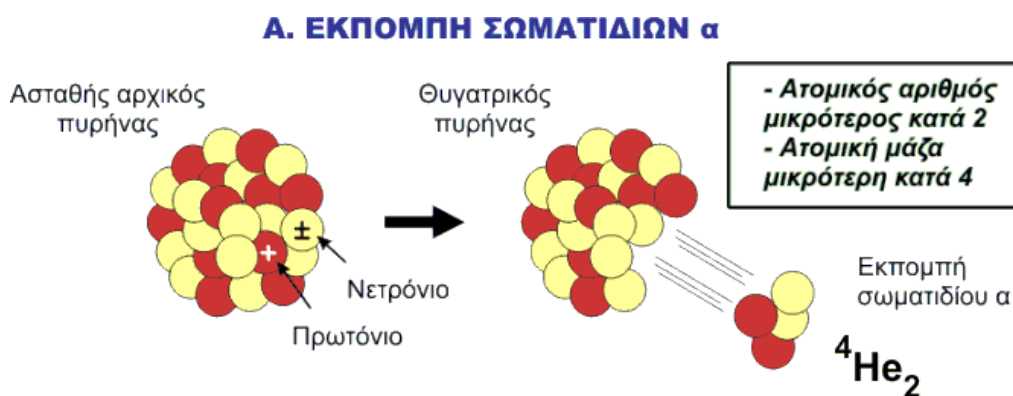
Η Ιοντίζουσα Ακτινοβολία χωρίζεται σε δυο κατηγορίες:

- Απευθείας Ιοντίζουσα Ακτινοβολία: Αποτελείται από ενεργά (φορτισμένα σωματίδια) όπως οι πυρήνες ηλίου (ακτίνες-α), και συνήθως ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια (ακτίνες-β).<sup>[1.4]</sup>
- Έμμεση Ιοντίζουσα Ακτινοβολία: Αποτελείται από αφόρτιστα σωματίδια όπως φωτόνια και νετρόνια. Οι μη σωματιδιακού τύπου ακτινοβολίες (δηλ. αυτές που αποτελούνται από φωτόνια) περιλαμβάνουν ακτίνες-γ, ακτίνες-X και ακτίνες-UV (ένα μέρος του φάσματος των ακτίνων UV, δηλ. αυτές που έχουν μήκος κύματος από 380 nm έως 60 nm ). Η σωματιδιακού τύπου ακτινοβολία (δηλ. αυτή που αποτελείται από

νετρόνια) παράγεται κατά τη διάρκεια πυρηνικής αντίδρασης.<sup>[1.4]</sup>

## Ακτίνες α

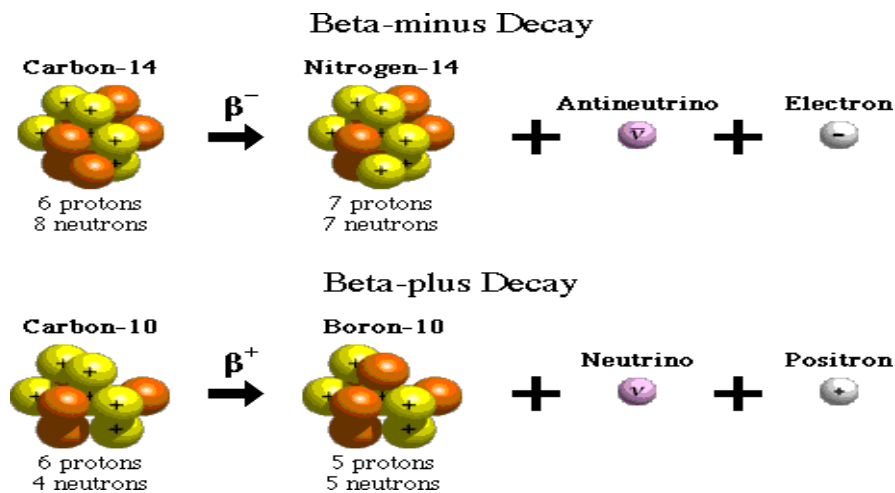
Οι ακτίνες α παράγονται από το σωματίδιο α που αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια και η δομή του είναι παρόμοια με αυτήν ενός πυρήνα ατόμου ηλίου. Εξαιτίας της σχετικά μεγάλης μάζας και του μεγάλου φορτίου, το σωματίδιο α παράγει ένα ιόν σε μία πολύ εντοπισμένη περιοχή. Το σωματίδιο α χάνει μέρος της ενέργειάς του κάθε φορά που παράγει ένα ιόν (η θετική του φόρτιση έλκει τα ηλεκτρόνια μακριά από τα άτομα που βρίσκονται στην πορεία του), αποκτώντας εντέλει δύο ηλεκτρόνια και μετατρέπόμενο σε ένα κανονικό άτομο ηλίου. Η ακτινοβολία α έχει μικρή ακτίνα δράσης(μερικά εκατοστά) στον αέρα και δεν μπορεί να διαπεράσει το εξωτερικό στρώμα του δέρματος.



**ΣΧΗΜΑ1. 8** *Ακτίνες α από τον αρχικό πυρήνα έχουμε απώλεια δυο πρωτονίων και δυο νετρονίων(ουδέτεροφορτίο) οπότε στον θυγατρικό πυρήνα έχουμε σχηματισμό ατόμου με δυο πρωτόνια και 2 νετρόνια.* <sup>[1.5]</sup>

## Ακτινοβολία β

Η ακτινοβολία β είναι υψηλής ενέργειας, υψηλής ταχύτητας [ηλεκτρόνια](#) ή [ποζιτρόνια](#) που εκπέμπονται από ορισμένες μορφές [ραδιενεργών πυρήνων](#). Τα βήτα σωματίδια που εκπέμπονται είναι μια μορφή [ιοντίζουσας ακτινοβολίας](#), επίσης γνωστή ως βήτα ακτίνες. Η παραγωγή βήτα σωματιδίων ονομάζεται [βήτα διάσπαση](#). Έχουν οριστεί από το [ελληνικό γράμμα](#) βήτα (β). Υπάρχουν δύο μορφές της βήτα διάσπασης, β<sup>-</sup> και β<sup>+</sup>, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.9



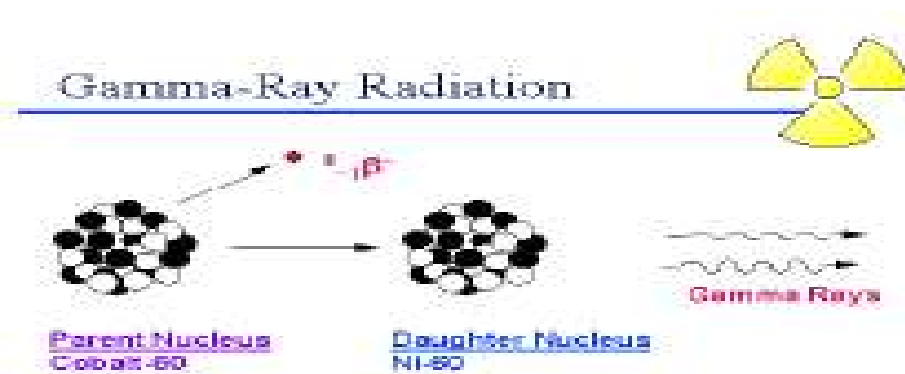
**Σχήμα 1.9** Ακτινοβολία β-και στις δύο μορφές-[1.5]

**Παράδειγμα με πυρήνα άνθρακα:** Στην πρώτη περίπτωση έχουμε εκπομπή ηλεκτρονίου μαζί με αντινεutrίνο και ένα νεutrόνιο που γίνεται πρωτόνιο στον πυρήνα του αζώτου(N). Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε εκπομπή ποζιτρονίου με νεutrίνο και ένα πρωτόνιο που γίνεται νεutrόνιο στον πυρήνα του Βορίου(B).[1.5]

### Ακτίνες γ

Οι ακτίνες γάμμα είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα άτομο ως μέσο απελευθέρωσης της υπερβολικής ενέργειας, για την ακρίβεια είναι δέσμες (κβάντα) ενέργειας που δεν είναι φορτισμένες δεν έχουν μάζα και μπορεί να διατρέξει μεγάλες αποστάσεις στον αέρα (μερικές εκατοντάδες μέτρα), στον ανθρώπινο ιστό και σε άλλα υλικά. Οι ακτίνες γάμμα μπορούν να περάσουν μέσα από το ανθρώπινο σώμα χωρίς να έρθουν σε επαφή με κανένα άτομο, ή μπορεί να έρθουν σε επαφή και να αλληλεπιδράσουν με κάποιο άτομο αποδίδοντάς του το σύνολο ή μέρος της ενέργειάς τους. Αυτό συνήθως προκαλεί τον ιονισμό κάποιου ηλεκτρονίου. Αυτό το ηλεκτρόνιο χρησιμοποιεί την ενέργεια που προσέλαβε από τις ακτίνες γ(βλέπε σχήμα 1.10) για να δημιουργήσει νέα ιόντα προσκρούοντας σε ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε άλλα άτομα. Επειδή μια ακτίνα γ είναι καθαρή ενέργεια παύει να υπάρχει μόλις χάσει όλη την ενέργειά της<sup>[1.2]</sup>





**Σχήμα 1.10. Ακτινοβολία  $\gamma$**  Ο πυρήνας του ατόμου του ραδιενεργού στοιχείου (κοβαλτίο-60) εκπέμποντας ακτίνες  $\gamma$  μεταστοιχειώνεται, δηλαδή υφίσταται αλλαγή στον ατομικό του αριθμό, οπότε ο πυρήνας που εξέπεμψε το σωματίδιο βήτα, μετατρέπεται σε πυρήνα κάποιου άλλου χημικού στοιχείου (Νικέλιο)

Τυπικά, η απορρόφηση των ακτίνων  $\gamma$  ως προς το βάθος ενός υλικού περιγράφεται μέσω της εκθετικής πτώσης της έντασης της αρχικής δέσμης σύμφωνα με τη σχέση<sup>[1.1]</sup>

:

**(Σχέση 1.1)**

Όπου:

$I(x)$  είναι η ένταση της δέσμης ακτίνων  $\gamma$  μετά από πάχος  $x$

$I_0$  είναι η αρχική ένταση της δέσμης ακτίνων  $\gamma$

$\mu$  είναι μια σταθερά, η σταθερά απορρόφησης, η οποία καθορίζει ποσοτικά το επίπεδο απορρόφησης των ακτίνων  $\gamma$  ανάλογα με το υλικό (και σε μικρότερο βαθμό την ενέργειά τους)<sup>(1.1)</sup>

**Ακτίνες X**

Οι ακτίνες X, όπως και οι ακτίνες  $\gamma$ , είναι μία δέσμη (ή φωτόνια) ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη διαφορά ότι δεν εκπέμπονται από τον πυρήνα. Οι ακτίνες X παράγονται σαν αποτέλεσμα της αλλαγής θέσης των ηλεκτρονίων που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα, καθώς αυτά αλλάζουν ενεργειακές στάθμες. Ακτίνες X εκπέμπονται από τα ραδιοϊσότοπα ιώδιο-125 και ιώδιο-131.<sup>[1.5]</sup>

Οι ακτίνες X μπορεί να παραχθούν κατά τη διάρκεια ραδιενεργής διάσπασης ή σαν ακτινοβολία Bremsstrahlung, η διαδικασία εκπομπής της οποίας έχει περιγραφεί παραπάνω. Τα μηχανήματα ακτίνων X, εκπέμπουν ακτινοβολία Bremsstrahlung.

## ΑκτίνεςUV

**Υπεριώδης ακτινοβολία** ονομάζεται η περιοχή της [ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας](#) της οποίας το [μήκος κύματος](#) στο [κενό](#) κυμαίνεται περίπου μεταξύ 380 και 60 νανομέτρων<sup>[1.5]</sup>

Υπάρχουν τρία είδη υπεριώδους ακτινοβολίας

- UV-A: Αυτή η ακτινοβολία κυμαίνεται στο κενό μεταξύ 315 και 400 νανόμετρα. Είναι το πιο ακίνδυνο είδος.
- UV-B: Αυτή η ακτινοβολία κυμαίνεται στο κενό μεταξύ 280 και 315 nm. Αυτή προκαλεί το μαύρισμα, αλλά μπορεί να γίνει επικίνδυνη.
- UV-Γ: Αυτή η ακτινοβολία κυμαίνεται στο κενό μεταξύ 40 nm και 280 nm . Είναι το πιο επικίνδυνο είδος της υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς με αυτήν έχουν επιτευχθεί εργαστηριακά [μεταλλάξεις](#).<sup>[1.4]</sup>

## Νετρόνια

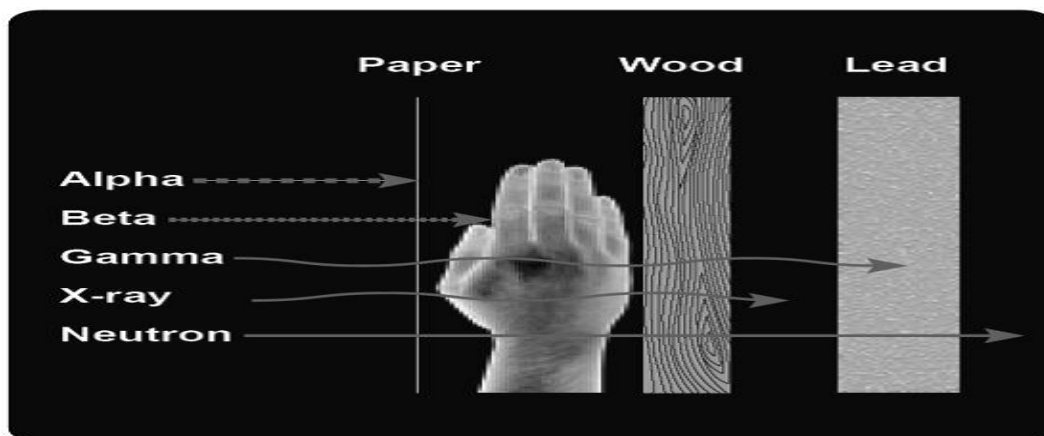
Πρόκειται για τα γνωστά σωματίδια με μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο τα οποία απαντώνται και ως βασικό συστατικό των πυρήνων των ατόμων της συνήθους ύλης. Νετρόνια εκπέμπονται κατά τη διαδικασία της Φυσικής ραδιενέργειας μέσω της σχάσης ενός βαριού μητρικού Πυρήνα σε δύο θυγατρικούς με παρόμοιες μάζες. Η εκπομπή Νετρονίων είναι όμως πολύ πιο συνηθισμένη κατά τη διαδικασία Της τεχνητής ραδιενέργειας, καθώς η παρουσία τους εκεί διαδραματίζει Θεμελιακό ρόλο Καθώς τα νετρόνια δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, χαρακτηρίζονται από μεγάλη Διεσδυτικότητα στην ύλη και η ανίχνευση τους, όσον αφορά την περίπτωση των ανιχνευτών GM, λαμβάνει χώρα με "έμμεσο" τρόπο.

Τα νετρόνια μπορούν υπό ορισμένες συνθήκες να "μετατρέψουν" μη Ραδιενεργά υλικά σε ραδιενεργά ή να προκαλέσουν μέσω της επίρρειας Τους την εκπομπή δευτερεύουσας ακτινοβολίας η οποία μπορεί να ανιχνευθεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού αποτελεί και ο τρόπος της αρχικής ταυτοποίησης των νετρονίων από τον Chadwick το 1932, μέσω της ανίχνευσης πρωτονίων τα οποία ανιχνεύθηκαν από παραφίνη στην οποία προσέπιπε μια δέσμη νετρονίων.<sup>[1.3]</sup>

### **Διαπερατότητα ραδιενεργών ακτίνων α, β, γ:**

- *σωματίδια α: δεν διαπερνούν πέτασμα από χαρτί*
- *σωματίδια β: δεν διαπερνούν πέτασμα από αλουμίνιο*  
*σωματίδια γ: δεν διαπερνούν πέτασμα από μόλυβδο πάνω από ορισμένο πάχος μέτρων*

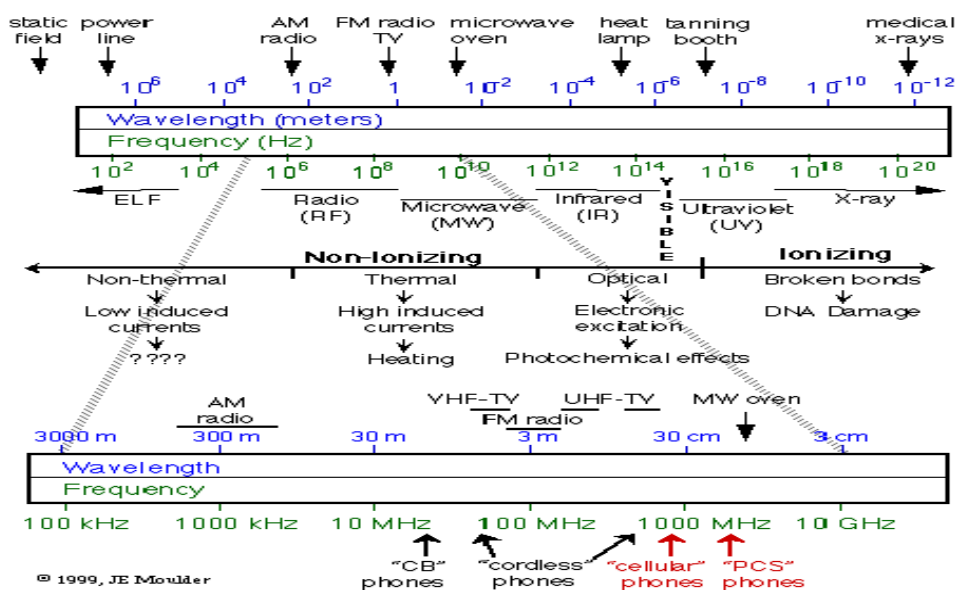
Τα Σωματίδια άλφα συχνά φέρουν την περισσότερη ενέργεια, αλλά-λόγω του διπλού θετικού τους φορτίο αλληλεπιδρούν έντονα με την ύλη και εύκολα εμποδίζονται, για παράδειγμα, από ένα φύλλο χαρτί. Τα Βήτα σωματίδια, με ένα και μόνο αρνητικό φορτίο, είναι συνήθως περισσότερο διεισδυτικά από ότι τα σωματίδια άλφα και μπορεί να διακοπούν από ένα λεπτό φύλλο ξύλου. Το νετρόνιο είναι αφόρτιστο και αλληλεπιδρά μόνο με την ύλη κατά τη διέλευση κοντά στον ατομικό πυρήνα, έτσι η ακτινοβολία νετρονίων είναι πολύ διεισδυτική. Η Γάμα ακτινοβολία είναι η πιο διεισδυτική από όλες και μπορεί να απαιτήσει πολλά εκατοστά από βαρέα μέταλλα ή περισσότερα μέτρα μπετόν για να σταματήσει όταν βρίσκεται σε υψηλή ενέργεια(μικρό μήκος κύματος).



**Σχήμα 1.11** Είδη Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας και επίπεδα διείσδυσης στην ύλη<sup>[1.5]</sup>

### **1.1.8 Μη ιοντίζουσα Ακτινοβολία**

Ως μη ιοντίζουσα ακτινοβολία ορίζεται κάθε είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία δε φέρει την απαιτούμενη ενέργεια ανά σωματίδιο, ώστε να ιοντίσει τα άτομα ή τα μόρια με τα οποία έρχεται σε επαφή. Η ενέργεια που φέρουν μπορεί να μην είναι ικανή να προκαλέσει πλήρη ιοντισμό των ατόμων, αλλά προκαλεί διέγερση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση<sup>[1.2]</sup>



Εικόνα 1.12. Η/μ φάσμα και ανάλυση μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών<sup>[1,2]</sup>

## 1.2 Μεγέθη και μονάδες μέτρησης ιοντίζουσας ακτινοβολίας

### 1.2.1 Δόση Ακτινοβολίας η Απορροφούμενη Δόση

Δόση ακτινοβολίας (D)<sup>(1.1)</sup> ονομάζεται το πηλίκο της μέσης ενέργειας (dE), που αποδίδεται σε μια στοιχειώδη μάζα του ακτινοβολουμένου υλικού (dm), προς τη μάζα αυτή. Πιο απλά, δόση είναι το φυσικό μέγεθος, που εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται ανά μονάδα μάζας. Έτσι:

$$D = dE / dm \quad (\text{Σχέση 1.2})$$

Μονάδα μέτρησης- **1 Gray (Gy)**, που είναι η επίσημη μονάδα του συστήματος S.I. και ορίζεται ως η απορρόφηση ενέργειας 1 Joule ανά kg ακτινοβολουμένου υλικού. Ισχύει:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$$

Η παραπάνω μονάδα χρησιμοποιείται τόσο για ακτινοβολίες X και γ οποιασδήποτε

ενέργειας, όσο και για σωματιδιακές ακτινοβολίες.

### **1.2.2 Έκθεση**

Το μέτρο της ικανότητας της ακτινοβολίας να προκαλεί ιοντισμούς στον αέρα, ονομάστηκε έκθεση. Ο τελικός ορισμός, που δόθηκε το 1962, ορίζει ως έκθεση ακτινοβολίας ( $X$ ), το πηλίκο της απόλυτης τιμής του συνολικού φορτίου ( $Q$ ) των ιόντων ενός σημείου και του ιδίου πρόσημου, θετικού ή αρνητικού, τα οποία παράγονται σε μάζα αέρα ( $dm$ ), όταν όλα τα ιόντα (ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια) που ελευθερώνονται από την αλληλεπίδραση των φωτονίων, σταματούν πλήρως στον αέρα, δια τη μάζα αυτή<sup>[1.1]</sup>. Ισχύει, λοιπόν:

$$X = dQ / dm \quad (\text{Σχέση 1.3})$$

Μονάδα μέτρησης της έκθεσης στο διεθνές σύστημα μονάδων, S.I., είναι το C/kg.

Η έκθεση αναφέρεται αποκλειστικά σε πεδία φωτονίων ( $X$  ή  $\gamma$ ), ενώ η εφαρμογή της περιορίζεται σε πεδία ενέργειας μικρότερης των 3 MeV, περίπου. Άμεση μέτρηση της έκθεσης επιτυγχάνεται από ένα μόνο όργανο, που είναι γνωστό ως πρότυπος θάλαμος ιονισμού.

### **1.2.3 Δόση-Έκθεση**

Η έκθεση, είναι χαρακτηριστικό της δέσμης της ακτινοβολίας και ισχύει μόνο για ακτινοβολία  $X$  και  $\gamma$ . Αντίθετα, η δόση αποτελεί χαρακτηριστικό του μέσου, και ισχύει για όλα τα είδη ακτινοβολίας. Ακόμη, η δόση είναι το αποτέλεσμα της έκθεσης, δηλαδή για να υπάρξει δόση, πρέπει απαραίτητα να υπάρχει και μέσο, κάτι που δεν ισχύει για την έκθεση.<sup>[1.1]</sup>

### **1.2.4 Ευθύγραμμη μετάδοση ενέργειας**

Ένας από τους τρόπους εναπόθεσης της ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων στο ακτινοβολούμενο υλικό, είναι η ευθύγραμμη ή γραμμική μετάδοση ενέργειας (LET, linear Transistor energy, L). Πρόκειται για τη μέση ενέργεια της ακτινοβολίας, που απελευθερώνεται κατά μήκος της διαδρομής της μέσα στο υλικό, ανά  $\mu\text{m}$ . Ισχύει, λοιπόν:

$$L = dE / ds \quad (\text{Σχέση 1.4})$$

αν υποθέσουμε ότι  $ds$  είναι το μήκος της διαδρομής, που διανύει η ακτινοβολία μέσα στο υλικό. Αντιπροσωπεύει, ουσιαστικά, την ανά μονάδα μήκους απώλεια ενέργειας, λόγω ιονισμού της ύλης, και εκφράζεται σύμφωνα με το σύστημα S.I., σε KeV /  $\mu\text{m}$ .

### 1.2.5 Ισοδύναμη Δόση

Ισοδύναμη δόση<sup>1.1)</sup>. ονομάζεται η απορροφούμενη δόση σε έναν ιστό ή όργανο T, σταθμισμένη για το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας R. Δίνεται από τη σχέση:

$$H_{T,R} = D_{T,R} * W_R \quad (\text{Σχέση 1.5})$$

όπου,  $D_{T,R}$ : η δόση που απορροφάται στον ιστό ή στο όργανο T από την ακτινοβολία R, και  $W_R$ : ο συντελεστής στάθμισης της ακτινοβολίας ή παράγοντας βαρύτητας (ή ποιότητας) της ακτινοβολίας, όπως ονομάζεται (βλέπε πίνακα I )

Το ειδικό όνομα της μονάδας ισοδύναμης δόσης στο S.I. είναι το Sievert (Sv). Αν και το Sv είναι συνώνυμο του J/kg, χρησιμοποιείται μόνο για να δηλώσει ισοδύναμη δόση. Στην πράξη, χρησιμοποιείται μερικές φορές η παλαιότερη ειδική μονάδα, το rem (roentgen equivalent man, ισοδύναμο του roentgen στον άνθρωπο). Ισχύουν, έτσι, τα εξής:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$\text{Ισοδύναμη δόση σε rem} = \text{δόση σε rad} * W_R$$

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} = 0,01 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}^{1.1)}$$

Ίση ισοδύναμη δόση από διαφορετικού είδους ακτινοβολίες παράγει το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα. Ισοδύναμη δόση ονομάζεται, λοιπόν, η δόση οποιασδήποτε ιοντίζουσας ακτινοβολίας, η οποία είναι βιολογικά «ισοδύναμη» με δόση 1 rad από ακτινοβολία X ή γ

### 1.2.6 Ενεργός δόση

Οι διάφοροι ανθρώπινοι ιστοί για δεδομένη ισοδύναμη δόση Ht ακτινοβολίας συμβάλλουν με διαφορετική βαρύτητα στον **συνολικό κίνδυνο** που διατρέχει από την ακτινοβόλησή τους η υγεία του ανθρώπου. Για παράδειγμα, η ακτινοβόληση του αιμοποιητικού ιστού, ενέχει μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία από ότι η ακτινοβόληση μείση ισοδύναμη δόση Ht του θυρεοειδούς και αυτή με τη σειρά της μεγαλύτερο κίνδυνο από ότι η ακτινοβόληση του δέρματος αντίστοιχα. Ακόμη και εμπειρικά διαισθανόμαστε ότι μια ακτινογραφία κοιλίας είναι πιο επιβλαβής για την υγεία του εξεταζομένου από ότι μια ακτινογραφία άκρας χείρας, έστω και αν ακτινοβοληθούν με την ίδια ισοδύναμη δόση. Για να ληφθεί υπόψη η **συνολική επιβάρυνση της υγείας** από την ακτινοβόληση ενός ή περισσοτέρων **οργάνων** ή **ιστών** χρησιμοποιείται η έννοια της **ενεργού δόσης**. Η **ενεργός δόση** (Eeff) είναι το άθροισμα των γινομένων της ισοδύναμης δόσης που έλαβε κάθε ιστός (T) επί έναν συντελεστή WT ο οποίος εξαρτάται από το είδος του ιστού (ΒΛΕΠΕ ΠΙΝΑΚΑ D).

$$E_{eff} = \sum_T H_T W_T \text{ ((Σχέση 1.6))}$$

ή πιο αναλυτικά:

$$E_{eff} = W_T W_{RD} \sum_T \sum_R \text{ ((Σχέση 1.7))}$$

Μονάδα ενεργού δόσης στο S.I. είναι το Sievert (Sv), ενώ παλαιότερη μονάδα της το rem. Ισχύει, δηλαδή, ότι και στην ισοδύναμη δόση. ((Σχέση 1.7))

**Πίνακας I :** Συντελεστές στάθμισης των εκτιθέμενου ιστού  $W_T$  για τον υπολογισμό της ενεργού δόσης  $E_{eff}$ .<sup>[1.4]</sup>

Μυελός των οστών, κόλον, πνεύμονες, στομάχι, μαστός, επινεφρίδια, εξωθωρακική περιοχή, χοληδόχος, καρδιά, νεφροί, λεμφικοί αδένες, μύες, επιθήλιο στόματος, πάγκρεας, προστάτης, λεπτό έντερο, σπλήνας, θύμος αδένας, μήτρα / τράχηλος	0,12
Γονάδες	0,08
Ουροδόχος κύστη, οισοφάγος, ήπαρ, θυρεοειδής	0,01
Επιφάνεια οστών, εγκέφαλος, σιελογόνοι αδένες, δέρμα	0,04

## Βιβλιογραφία 1ου Κεφαλαίου

### ΒΙΒΛΙΑ

[1.1] Glenn F , Knoll *Radiation detection and measurement* ,3<sup>rd</sup>ed, Wiley,New York(1999).

[1.2]. *Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry*, Khalil Arshak Olga Korostynska,ArtechHouse,Norwood((2006)

[1.3].*Radiation dosimetry : Instrumentation and methods* ,Shani, Gad. 2nd ed.CRC Press,(2001)

### ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

[1.4].[http://mpl.med.uoa.gr/wpcontent/uploads/2011/03/ekpaideutiko-yliko\\_seminaria.pdf](http://mpl.med.uoa.gr/wpcontent/uploads/2011/03/ekpaideutiko-yliko_seminaria.pdf)

**ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ, ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ, (2011)**

Συγγραφή: Ιατρική σχολή πανεπιστημίου Αθηνών, Ελληνική επιτροπή ατομικής ενέργειας

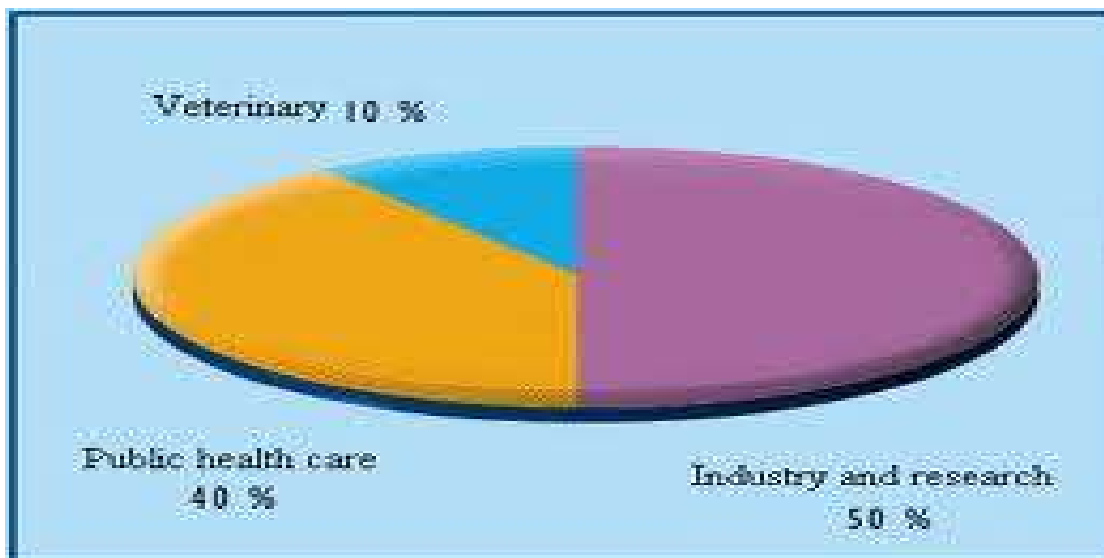
[1.5].[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ  
/ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ**



## Περιεχόμενα 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

## 2.1 Εφαρμογές ιοντίζουσας ακτινοβολίας



**ΕΙΚΟΝΑ 2. 1.** Χρήσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στις ΗΠΑ σε ποσοστά χρήσης<sup>[2.5]</sup>

Ο άνθρωπος ανακάλυψε τις τεχνητές πηγές παραγωγής ακτινοβολιών κατά τα τέλη του 19ου αιώνα<sup>[2.4]</sup>. Το 1895 κι ενώ ο Roentgen πειραματιζόταν με τους καθοδικούς σωλήνες κενού κατάφερε για πρώτη φορά χρησιμοποιώντας ακτίνες X να φωτογραφίσει το χέρι της συζύγου του <sup>[2.4]</sup> (βλέπε εικόνα 2.2): ανακάλυψη επαναστατική για τον τομέα της ιατρικής εφόσον ήταν πλέον δυνατό να δούμε μέσα στο ανθρώπινο σώμα χωρίς χειρουργική επέμβαση. Έκτοτε η συστηματική έρευνα οδήγησε στην εκτεταμένη χρήση τους. Η Ιοντίζουσα ακτινοβολία χρησιμοποιείται λοιπόν κυρίως στην ιατρική, στην βιομηχανία (ΒΛΕΠΕ ΕΙΚΟΝΑ 2.1) αλλά και σε πολλές χρήσιμες εφαρμογές, όπως στην γεωργία, στην αρχαιολογία (χρονολόγηση άνθρακα) και πολλές εφαρμογές.<sup>[2.4]</sup>

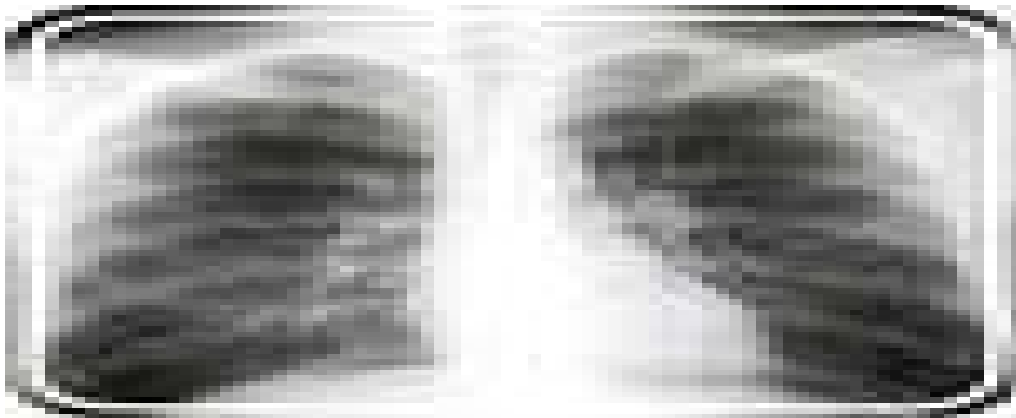


**Εικόνα 2.2** Η εικονιζόμενη ακτινογραφία ελήφθη στις 23 Ιανουαρίου 1896 και είναι μία από τις πρώτες. Απεικονίζει το χέρι της συζύγου του Ραίντγκεν<sup>[2,4]</sup>

### **2.1.1. Ιατρικές εφαρμογές**

Πολλοί γιατροί διαφόρων ειδικοτήτων χρησιμοποιούν ευρέως τις ιοντιζουσες Ακτινοβολίες για τη διάγνωση, την παρακολούθηση και τη θεραπεία από πολλές μεταβολικές διαδικασίες και ιατρικές παθήσεις, έχουν διασωθεί χιλιάδες ζωές μέσω της ανίχνευσης και θεραπείας καταστάσεων μέσω ιοντιζουσών ακτινοβολιών , που κυμαίνονται από υπερθυρεοειδισμό μέχρι και σε καρκίνο των οστών<sup>[2,2]</sup>.

Η πιο κοινή από αυτές τις ιατρικές διαδικασίες περιλαμβάνουν τη χρήση των ακτινών X - ένα είδος ακτινοβολίας που μπορεί να περάσει μέσα από το δέρμα μας. Όταν ακτινοσκοπούνται, τα οστά μας επειδή είναι πυκνότερα από το δέρμα μας, εκείνες οι σκιές μπορεί να ανιχνευθούν σε φωτογραφικό φιλμ(βλέπε εικόνα 2.2). Το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με την τοποθέτηση ενός μολυβιού πίσω από ένα κομμάτι χαρτί και κρατώντας το μολύβι και το χαρτί μπροστά από ένα φως. Η σκιά του μολυβιού αποκαλύπτεται επειδή το περισσότερο φως έχει αρκετή ενέργεια για να περάσει μέσα από το χαρτί, αλλά το μολύβι που έχει πυκνότερη υφή σταματά όλο το φως. Η διαφορά είναι ότι οι ακτίνες X είναι αόρατες, γι 'αυτό χρειαζόμαστε το φωτογραφικό φιλμ να τους "δει" για μας.



**Εικόνα 2.2** Ακτινογραφία θώρακα με χρήση ακτίνων Χ<sup>[2,2]</sup>.

Οι ακτίνες Χ και άλλες μορφές ακτινοβολίας έχουν επίσης μια ποικιλία θεραπευτικών χρήσεων. Όταν χρησιμοποιούνται με τον τρόπο αυτό, είναι πιο συχνά με σκοπό να σκοτώσουν καρκινικό ιστό, να μειωθεί το μέγεθος του όγκου, ή να μειωθεί ο πόνος. Τα μηχανήματα ακτίνων Χ, επίσης, έχουν συνδεθεί με τους υπολογιστές με μηχανήματα που ονομάζονται αξονικοί τομογράφοι (CAT) ή αξονικοί τομογράφοι (CT) σαρωτές (Βλέπε εικόνα 2. 3). Τα μέσα αυτά παρέχουν στους γιατρούς έγχρωμες εικόνες που δείχνουν τα σχήματα και τις λεπτομέρειες των εσωτερικών οργάνων. Αυτό βοηθά να εντοπίσουν τους όγκους, τις ανωμαλίες μεγέθους, ή άλλες μεταβολές της φυσιολογίας και λειτουργικά προβλήματα των οργάνων.



**Εικόνα 2.3** Αξονικός τομογράφος (CT) <sup>[2,3]</sup>

### 2.1.2 Βιομηχανικές εφαρμογές

Οι ιδιότητες της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν βιομηχανικώς είναι γνωστές εδώ και πολλές δεκαετίες. Ωστόσο, δεν ήταν εφαρμόσιμες μέχρι τη δεκαετία του 1950 και την ανάπτυξη των μεγάλης κλίμακας πηγών ακτινοβολίας, τόσο στα ραδιοϊσότοπα όσο και στις μηχανές. Από εκείνη τη στιγμή, η ανάπτυξη υπήρξε συνεχής και επεξεργασία ακτινοβολίας αποτελεί σήμερα ένα σημαντικό συστατικό των διαφόρων βιομηχανικών τομέων (π.χ., τα πολυμερή υλικά και στην βιομηχανία ιατρικών συσκευών). Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ιοντίζουσας ακτινοβολίας ως βιομηχανικού εργαλείου είναι η ικανότητα να επιτυγχάνει ακριβείς χημικές και βιολογικές επιδράσεις από τη παράδοση γνωστών δόσεων ακτινοβολίας. Η ακριβής δοσιμετρία ανέκαθεν αποτελούσε σημαντικό συστατικό της βιομηχανικής επεξεργασίας ακτινοβολίας. Υπάρχουν τρεις κύριες εφαρμογές για την βιομηχανική εφαρμογή ακτινοβολίας. η **αποστείρωση των ιατρικών συσκευών, η επεξεργασία των τροφίμων, και η τροποποίηση των πολυμερών**<sup>[2.2]</sup>.

### 2.1.3 Αποστείρωση Ιατρικών Συσκευών

Περίπου το **50%** [2.2] των ιατρικών συσκευών μιας χρήσης σήμερα αποστειρώνεται με ιοντίζουσα ακτινοβολία. Ο όγκος των ακτινοβολημένων προϊόντων έχει αυξηθεί κατά πολύ τα τελευταία χρόνια<sup>2.2]</sup>. Αυτό οφείλεται, εν μέρει, στις μεγαλύτερες απαιτήσεις της αγοράς για τις αποστειρωμένες ιατρικές συσκευές και, εν μέρει, λόγω περιβαλλοντικών ανησυχιών σχετικά με τη χρήση των τοξικών αερίων, όπως είναι το αιθυλένιο, για αποστείρωση. Ο όγκος των μίας χρήσης ιατρικών συσκευών που αποστειρώνονται ετησίως από την ιοντίζουσα ακτινοβολία εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 6 εκατομμύρια κυβικά μέτρα [2.2] Η πλειονότητα των συσκευών ακτινοβολείται με ακτίνες γάμμα από κοβάλτιο, αλλά και ένα σταθερά αυξανόμενο ποσοστό ακτινοβολείται με δέσμες ηλεκτρονίων με ενέργειες μέχρι 10 MeV.



**Εικόνα 2.4.** Παράδειγμα συσκευής μιας χρήσης(σύριγγες) που αποστειρώνεται με ιοντίζουσα ακτινοβολία<sup>[2,2]</sup>.

Ο έλεγχος αποστείρωσης με ακτινοβολία βασίζεται στην δοσιμετρία. Οι ελάχιστες δόσεις που απαιτούνται για την αποστείρωση των ιατρικών συσκευών είναι μεταξύ 10-30 kGy, αλλά η πραγματική δόση εξαρτάται από την ρυθμιστική απαίτηση και το επίπεδο της αρχικής μικροβιολογικής μόλυνσης. Μόλις η δόση αποστείρωσης για ένα συγκεκριμένο προϊόν έχει καθορισθεί, πρέπει να ακτινοβοληθεί με ακρίβεια για να αποφεύγονται οι επιβλαβείς επιδράσεις στα υλικά. Επίσης το κόστος ανεβαίνει όταν έχουμε μια ανεξέλεγκτα μεγάλη σε ενέργεια ακτινοβολήση. Όλα αυτά οδηγούν στην ανάγκη δοσιμέτρησης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

Στις ανεπτυγμένες χώρες, η αποστείρωση με ακτινοβολία της χρήσης πλαστικών ιατρικών μερών υπερβαίνει το 50% του συνόλου για τον εν λόγω εξοπλισμό, έναντι της παλαιότερης τεχνικής της χημικής επεξεργασίας με οξείδιο του αιθυλενίου<sup>[2,2]</sup>. Μια σημαντική κινητήρια δύναμη για τη μετατροπή σε αποστείρωση με ακτινοβολία είναι η εξάλειψη των τοξικών χημικών υπολειμμάτων από το προϊόν . Ένα ευρύ φάσμα των εμπορικών ιατρικών προϊόντων τώρα αποστειρώνεται χρησιμοποιώντας είτε ακτινοβολήση e-beam(ηλεκτρονίων) ή ακτινοβολία γάμμα, συμπεριλαμβανομένων συσκευών όπως **φιαλιδίων, σωλήνων, γάζες, σφουγγάρια, σύριγγες(Εικόνα 4), και φιάλες καλλιέργειας ιστών**<sup>[2,2]</sup>. Μια τυπική δόση για αποστείρωση με ακτινοβολία θα είναι της τάξεως των 2,5 kGy. Η δόση στην οποία οι ιδιότητες των υλικών είναι επηρεάζονται ποικίλλει τρομακτικά μεταξύ των διαφόρων τύπων πολυμερούς και εξαρτάται από τις συνθήκες ακτινοβολήσης.

### **2.1.4 Ακτινοβόληση Τροφίμων**

Η ακτινοβόληση τροφίμων είναι η επεξεργασία των τροφίμων από έναν ορισμένο τύπο της ενέργειας. η διαδικασία περιλαμβάνει έκθεση του τροφίμου, είτε συσκευασμένα ή χύμα, για να ελέγχονται προσεκτικά, ποσότητες ιοντίζουσας ακτινοβολίας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για την επίτευξη ορισμένων επιθυμητών στόχων<sup>(2,2)</sup>. Αυτό μπορεί να αποτρέψει τη διάσπαση των μικροοργανισμών, οι οποίοι προκαλούν στα τρόφιμα αλλοιώσεις, όπως βακτήρια και μύκητες, με την αλλαγή μοριακή τους δομή. Το Μπορεί επίσης να επιβραδύνει την ωρίμανση ή ωρίμανση ορισμένων φρούτων και λαχανικών από την τροποποίηση / μεταβολή των φυσιολογικών διαδικασιών των φυτικών ιστών.

Η ακτινοβόληση των τροφίμων είναι μία πολύτιμη μέθοδος για την επέκταση της ζωής στο ράφι και τη μείωση μόλυνσης από παθογόνους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία χρησιμοποιείται με επιτυχία σε πολλές χώρες για αρκετά χρόνια, αν και ο συνολικός όγκος των προϊόντων εξακολουθεί να είναι σχετικά περιορισμένος<sup>[2,2]</sup>. Όπως και η αποστείρωση με ακτινοβολία, η διαδικασία ακτινοβόλησης στα τρόφιμα απαιτεί ακρίβεια στην ρύθμιση. Η διαδικασία και οι απαιτήσεις τεκμηρίωσης για την ακτινοβόληση στα τρόφιμα είναι ουσιαστικά η ίδια όπως και για την αποστείρωση με ακτινοβολία, και οι ίδιοι τύποι των πηγών ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται. Το εύρος δόσεων, ωστόσο, είναι γενικά χαμηλότερο (0,1 έως 15 kGy). Ανάλογα με τη συγκεκριμένη διαδικασία ή προϊόν, οι απαιτήσεις για την ακρίβεια δοσιμετρικά μπορεί να είναι τόσο αυστηρές όσο και για αποστείρωση ακτινοβολίας.

Η Αγροτική Έρευνα Υπηρεσία (ARS)(UK)<sup>[2,2]</sup> προέβη σε αξιολόγηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με την αποτελεσματικότητα των θεραπειών ακτινοβολίας σε φρέσκα φρούτα και λαχανικά με στόχο να διαπιστωθεί κατά πόσον οι γενικές δοσολογίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν [20]. Ο Πίνακας I παραθέτει μερικά παραδείγματα των επιπέδων θεραπείας και την επιθυμητή επίδραση σε κάθε είδος τροφίμου.

<b>ΤΥΠΟΣ ΤΡΟΦΙΜΟΥ</b>	<b>ΔΟΣΗ</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>
Κρέας, πουλερικά, ψάρια, οστρακοειδή, ψητά αγαθά, προπαρασκευασμένες τροφές	20-70G	αποστείρωση, το ακτινοβολημένο προϊόν μπορεί να αποθηκευθεί σε θερμοκρασία δωματίου
Μπαχαρικά και άλλα καρυκεύματα	8-30G	Μειώνει τον αριθμό των μικροοργανισμών και καταστρέφει τα έντομα
Κρέας, πουλερικά, ψάρια	1-10G	Ενισχύει την προστασία έναντι των παθογόνων μικροοργανισμών (σαλμονέλες, e. coli)

Σιτηρά, φρούτα, λαχανικά	0,1-1G	Σκοτώνει τα έντομα και εμποδίζει την αναπαραγωγή τους
Μπανάνες, αβοκάντο, μάνγκο	0.25–0.35G	Καθυστέρηση ωρίμανσης
Χοιρινό	0,08-0,15G	αδρανοποιεί τρίχινες
Πατάτες, κρεμμύδια, σκόρδο	0,08-0,15G	Αναστέλλει βλάστηση

**ΠΙΝΑΚΑΣ Ι.** Παραδείγματα Επιπέδων Θεραπείας και οι Επιθυμητές Επιδράσεις στα Τρόφιμα [2.2]

### **2.1.5 Τροποποίηση των Πολυμερών**

Έχει περίπου 50 χρόνια από τότε που οι ερευνητές ξεκίνησαν για πρώτη φορά εκθέτοντας πολυμερή υλικά σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Οι τεχνολογίες ακτινοβολίας που εφαρμόζονται στην επεξεργασία πολυμερών περιλαμβάνουν ένα διαφορετικό σύνολο, με πολλούς διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας και πηγών που χρησιμοποιούνται, διάφορους τύπους και συνδυασμούς υλικών, και πολλοί διαφορετικοί στόχοι και άλλα χρήσιμα αποτελέσματα. Η επεξεργασία περιλαμβάνει ένα διαφορετικό σύνολο, με πολλούς διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας<sup>[2.2]</sup>

Η Διασύνδεση υλικών με ακτινοβολία, μια σχετικά ώριμη τεχνολογία, περιλαμβάνει πολλές εφαρμογές των προϊόντων με σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Η μόνωση των καλωδίων όπως και η θερμική συρρίκνωση σε προϊόντα όπως το περικάλυμμα τροφίμων και σωληνώσεις για ηλεκτρικές συνδέσεις είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες. Πιο πρόσφατα, μεγάλος όγκος βιομηχανικής Παραγωγής εστιάζεται στις της αυτόεπαναφερομενες ηλεκτρικές ασφάλειες με βάση τα πολυμερή. Η σκλήρυνση των επιστρώσεων και μελανιών είναι επίσης καθιερωμένη τεχνική και με σημαντικά οικονομικά οφέλη για τη βιομηχανία. Πολλές άλλες εφαρμογές υπάρχουν στην παράγωγη ελαστικών σωληνώσεων όπως και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η Ακτινοβολία σε πολυμερή για να τροποποιηθούν οι ιδιότητες των υλικών είναι η τεχνική με την μεγαλύτερη οικονομική αξία. Τα επιτευχθέντα αποτελέσματα είναι, αυξημένα σημεία τήξης για μόνωση καλωδίων και πολυμερισμός (πολυμερισμός) επικαλύψεων. Οι Δόσεις ακτινοβολίας ποικίλουν ανάλογα με την χρήση και μπορεί να είναι έως και 500KGy. Εφαρμόζοντας υψηλής ενεργείας Ακτινοβολία σε πολυμερή υλικά μπορούν αυτά να μετατραπούν από διηλεκτρικά υλικά σε αλλά με υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό δημιουργεί ευκαιρίες για τη χρήση της ακτινοβολίας στην παραγωγή εξειδικευμένων υλικών για ηλεκτρονικές εφαρμογές.<sup>(2.2)</sup>

Η Ηλεκτρική αγωγιμότητα των οργανικών υλικών μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια έκθεσης του δείγματος σε μια ροή ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία φορέων(ηλεκτρόνια, οπές), που επανασυνδέονται γρήγορα μόλις διακοπεί η



ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα, η αγωγιμότητα μειώνεται γρήγορα στην αρχική αξία. Σε σχετικά υψηλές απορροφημένη δόσεις, μόνιμες αλλαγές στην αγωγιμότητα ενός υλικού μπορούν να συμβούν.

### **2.1.6 Χρήση σε Πυρηνικές Εγκαταστάσεις**

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από πυρηνική σχάση - διάσπαση του ατόμου - είναι μία από τις μεγαλύτερες χρήσεις της ακτινοβολίας. Καθώς στον δυτικό κόσμο αυξάνονται οι χρήστες ηλεκτρικής ενέργειας, χρειαζόμαστε μια αξιόπιστη, άφθονη, καθαρή και προσιτή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, έχουμε χρησιμοποιήσει περίπου το ένα τρίτο των ενεργειακών μας πόρων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. <sup>[2.6]</sup>,

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί με πολλούς τρόπους - με τη χρήση γεννητριών που τροφοδοτείται από τον ήλιο, τον άνεμο, το νερό, ο άνθρακας, το πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ή πυρηνική σχάση. Στην Αμερική<sup>[2.5]</sup>, εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (μετά από εργοστάσια που καίνε άνθρακα) - που παράγουν περίπου το 21 τοις εκατό της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο σκοπός ενός πυρηνικού σταθμού είναι να βράσει το νερό για την παραγωγή ατμού για να τροφοδοτήσει μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας έχουν πολλές ομοιότητες με άλλα είδη εγκαταστάσεων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές. Με εξαίρεση αυτά που παράγουν ηλιακή, αιολική και υδροηλεκτρικά εργοστάσια, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων εκείνων που χρησιμοποιούν πυρηνική σχάση) βράζουμε το νερό για την παραγωγή ατμού για να γυρίζει ο έλικας-σαν λεπίδες μιας τουρμπίνας που μετατρέπει τον άξονα της γεννήτριας. Στο εσωτερικό της γεννήτριας, πηνία και μαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν για να δημιουργηθεί ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις, η ενέργεια που χρειάζεται για να βράσει το νερό σε ατμό παράγεται είτε από την καύση άνθρακα, πετρελαίου, ή φυσικού αερίου (ορυκτά καύσιμα) σε έναν φούρνο, ή από άτομα με διάσπαση του ουρανίου σε ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας. Τίποτα δεν καίγεται ή εκρήγνυται σε ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας. Αντίθετα, το καύσιμο από ουράνιο παράγει θερμότητα μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται σχάση.

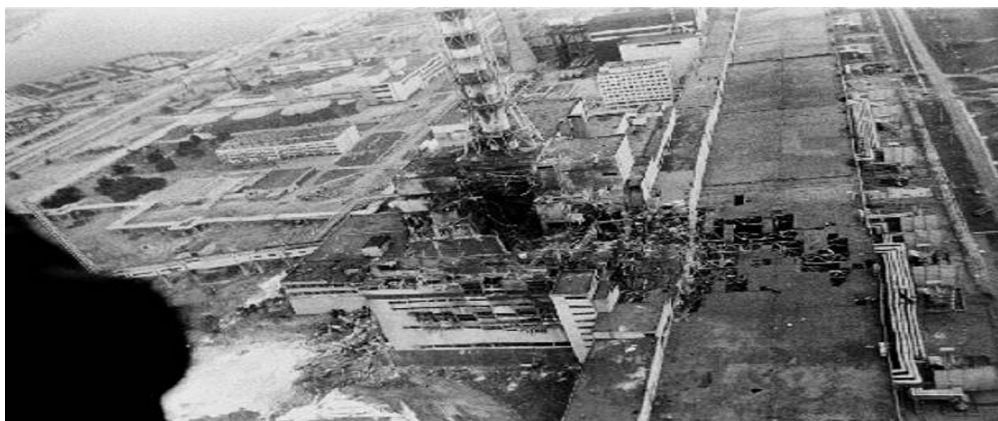
Οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτούνται από το ουράνιο, το οποίο εκπέμπει ραδιενεργές ουσίες. Οι περισσότερες από αυτές τις ουσίες είναι παγιδευμένες σε σφαιρίδια καυσίμου ουρανίου ή σε σφραγισμένες ράβδους μετάλλου καυσίμων. Ωστόσο, μικρές ποσότητες αυτών των ραδιενεργών ουσιών (κυρίως αέρια) μπορούν να αναμιχθούν με το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη του αντιδραστήρα. Οι ακαθαρσίες του νερού είναι επίσης ραδιενεργές καθώς περνούν μέσα από τον αντιδραστήρα. Το νερό που περνάει μέσα από ένα αντιδραστήρα υφίσταται επεξεργασία και διηθείται για την απομάκρυνση αυτών των ραδιενεργών ακαθαρσιών πριν επιστρέψει στο περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, ελάχιστες ποσότητες ραδιενεργών αερίων και υγρών τελικά

απελευθερώνονται στο περιβάλλον κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι, κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, τα εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας απελευθερώνουν συνήθως μόνο ένα μικρό κλάσμα της ακτινοβολίας που επιτρέπεται από τα καθιερωμένα όρια της NRC. Στην πραγματικότητα, ένα άτομο που ξοδεύει ένα πλήρες έτος στο όριο του χώρου πυρηνικού σταθμού θα λάβουν ένα επιπλέον έκθεση σε ακτινοβολία λιγότερο από το 1 τοις εκατό της ακτινοβολίας που λαμβάνει ο καθένας από φυσικές πηγές φόντο. Αυτή η πρόσθετη έκθεση, συνολικού ύψους περίπου 1 millirem, δεν έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί οποιαδήποτε ζημιά στα ανθρώπινα όντα. [2.6].

## **2.2 Βιολογικές επιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας**

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία, δηλαδή η περιοχή άνω των 300 GHz του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που περιλαμβάνει το ηλιακό(υπεριώδες)φάσμα τις ακτίνες X, γ κ.τ.λ. έχει μελετηθεί, επαρκώς από τους ερευνητές ως προς τις βιολογικές της, επιδράσεις. Όλοι οι ενεργοί πολίτες, σήμερα , πρέπει να είναι ενημερωμένοι , για την επικινδυνότητα, της ηλιοθεραπείας, των ακτινογραφιών και της ραδιενέργειας, γενικότερα, έχοντας υποστεί τις συνέπειες ιστορικών καταστροφών, οι οποίες ταλαιπώρησαν και συνεχίζουν να ταλαιπωρούν πολλές περιοχές του πλανήτη μας.(Χιροσίμα, Ναγκασάκι, Τσερνομπίλ(βλέπε εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5**(Το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ έλαβε χώρα στις 26 Απριλίου του 1986, στον αντιδραστήρα No. 4 (Εικόνα 2.5) του Πυρηνικού Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας του Τσερνομπίλ της Σοβιετικής Ένωσης. Τα επίπεδα ραδιενέργειας στις πλέον μολυσμένες περιοχές του εργοστασίου έχει υπολογιστεί ότι έφτασαν τα 5,6 Ραίντγκεν ανά δευτερόλεπτο (P/δ), τα οποία ισοδυναμούν με 20.000 Ραίντγκεν ανά ώρα (P/ω). Καθώς η θανάσιμη δόση είναι 500 Ραίντγκεν σε 5 ώρες. Μέσα σε τέσσερις μήνες, από τη ραδιενέργεια και από εγκαύματα λόγω της θερμότητας, πέθαναν 28 πυροσβέστες που έσπευσαν στο χώρο του ατυχήματος και διαπιστώθηκαν 19 επιπλέον θάνατοι ως το 2004. Επιπλέον,

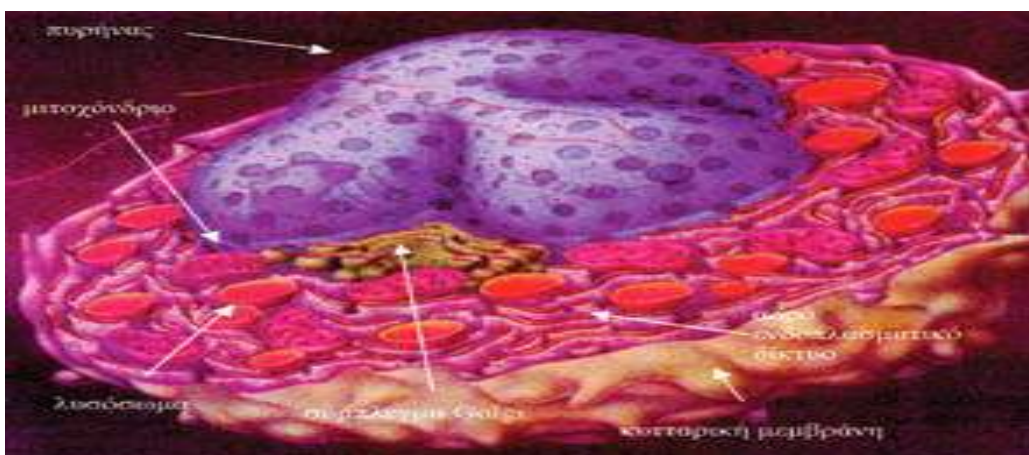
υπολογίζεται ότι επηρεάστηκε η υγεία εκατοντάδων χιλιάδων ανθρώπων εξαιτίας της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος με ραδιενέργεια. Οι ποσοστιαίες αυξήσεις των καρκίνων ήταν άνω του 15% στους πληθυσμούς που εκτέθηκαν, με χιλιάδες θανάτους από καρκίνο και λευχαιμία να συνδέονται με το ατύχημα.<sup>2,4</sup>

Από πειράματα στο εργαστήριο και από μελέτη των πυρηνικών βομβαρδισμών στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι έχει βρεθεί ότι ολόσωμη ακτινοβολήση με δόση 4 Gy είναι ικανή να επιφέρει το θάνατο στο 50% των εκτεθειμένων μέσα σε 60 ημέρες. Αν εξετάσουμε το θέμα από ενεργειακή άποψη θα δούμε ότι η θανατηφόρα δόση των 4 Gy αποδίδει λιγότερη ενέργεια στο σώμα από ότι μια κουταλιά ζάχαρη! Με λίγα λόγια, η ενέργεια που προσλαμβάνει ο οργανισμός δεν γίνεται καν αντιληπτή. Η επιβλαβής δράση των ιοντιζουσών ακτινοβολιών έγκειται στη βλάβη που επιφέρουν στο θεμελιώδες δομικό στοιχείο της ζωής, το κύτταρο.<sup>[2,3]</sup>

### **2.2.1 Κυτταρική δομή**

Το ανθρώπινο σώμα αποτελείται από διάφορων ειδών κύτταρα τα οποία έχουν συγκεκριμένες λειτουργικότητες. Τα κύτταρα κινούνται, μεγαλώνουν, αλληλεπιδρούν, αυτοπροστατεύονται, ρυθμίζουν διαδικασίες και αναπαράγονται. Η σωστή λειτουργία τους εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία ολόκληρου του σώματος.<sup>[2,3]</sup>

Το κύτταρο αποτελείται από οργανικά και ανόργανα συστατικά. Γενικά μέσα σε ένα κύτταρο βρίσκονται πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια, νουκλεϊνικά οξέα (DNA, RNA), ανόργανες ενώσεις, όπως οξέα και βάσεις. Η κυριότερη ανόργανη ένωση που περιέχεται στο κύτταρο είναι το νερό. Το 80-85% του βάρους μας είναι νερό. Στο Σχήμα 2.6 αποτυπώνεται η τυπική δομή ενός κυττάρου και τα κυριότερα συστατικά του.

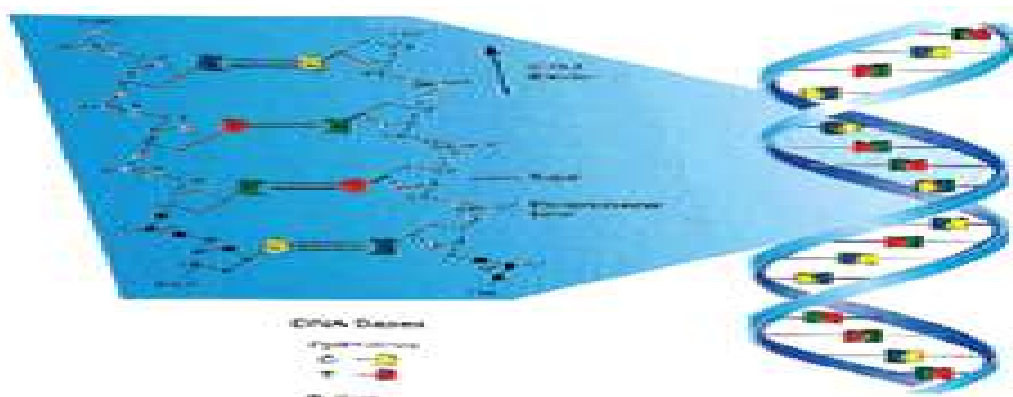


### ***Εικόνα2.6.Δομή και κύρια συστατικά του κυττάρου***

Στον πυρήνα του κυττάρου βρίσκεται το DNA και μεγάλα ποσά RNA.

Ο πυρήνας ελέγχει την κυτταρική διαίρεση, τον πολλαπλασιασμό και τις βιοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο κύτταρο. Ειδικότερα, το DNA είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά της γενετικής πληροφορίας και καθοδηγεί τη διαδικασία παραγωγής πρωτεϊνών<sup>[2.3]</sup>.

Αναμφισβήτητα είναι το κέντρο πληροφοριών και το βασικότερο συστατικό του κυττάρου. Στο μικροσκόπιο το DNA φαίνεται σαν μια περιστρεφόμενη σκάλα ή σαν διπλή έλικα. Κάθε πλευρά της σκάλας(ευθεία αλυσίδα) αποτελείται από συνδυασμούς 4 βάσεων: αδενίνη(A), κακοσύνη (C), γούνινη (G) και θυμίνη (T). Τα «σκαλιά» είναι οι δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ γειτονικών (απέναντι) βάσεων<sup>[2.3]</sup>.

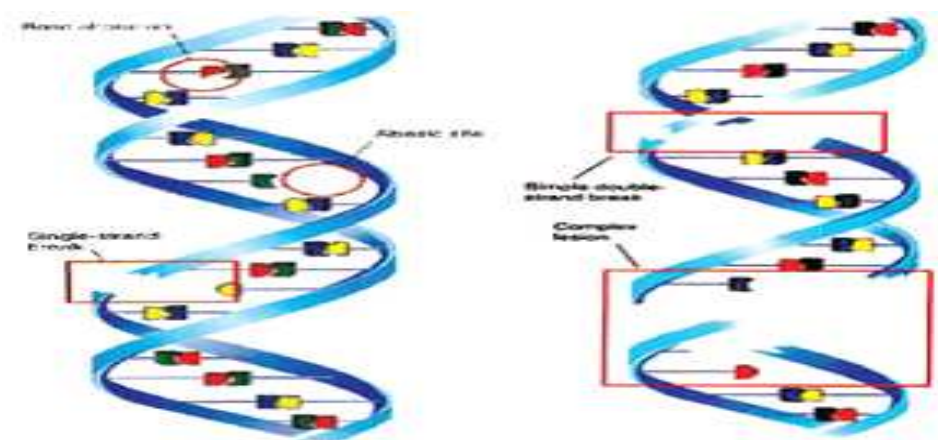


***Σχήμα 2.7: Η δομή του DNA θυμίζει περιστρεφόμενη σκάλα ή διπλή έλικα***

### **2.2.2 Επίδραση της ακτινοβολίας στο κύτταρο**

Οι πλέον σημαντικές βλάβες που μπορεί να επιφέρει η ιοντίζουσα ακτινοβολία αφορούν στον πυρήνα του κυττάρου. Υπάρχουν δυο τρόποι δράσης της ακτινοβολίας σε αυτόν. Ο άμεσος και ο έμμεσος. Ο **άμεσος τρόπος** είναι η απευθείας δράση της ακτινοβολίας στο μόριο του DNA ή σε άλλα μεγαλομόρια (πρωτεΐνες, ένζυμα, RNA). Για παράδειγμα, αν το ιόν που θα σχηματιστεί από τη δράση της ακτινοβολίας προσβάλει μια πρωτεΐνη τότε είναι πιθανό να σπάσει τους δεσμούς που την συγκροτούν ή να αλλάξει το σχήμα της καθιστώντας τη μη-λειτουργική. Αν χτυπηθεί κάποιο ένζυμο τότε θα επηρεαστεί η βιοχημική αντίδραση στην οποία συμμετέχει

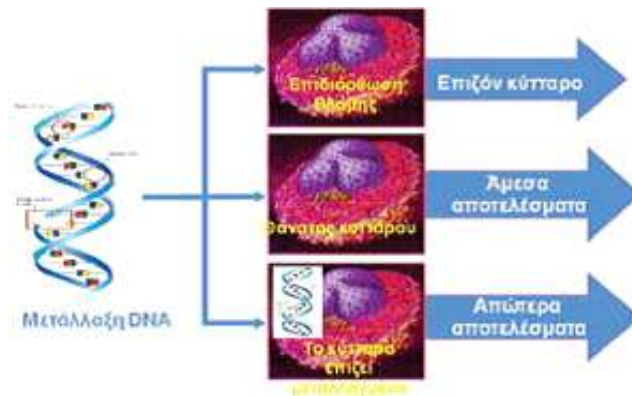
(π.χ. σύνθεση πρωτεϊνών) και το αποτέλεσμα θα είναι η ελλειμματική παραγωγή κάποιου σημαντικού για το κύτταρο συστατικού. Ο **έμμεσος τρόπος** είναι η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με μόρια του νερού και η εν συνεχεία εξέλιξη μιας διαδικασίας που περιγράφεται στη συνέχεια. Μέσω των ιοντισμών που προκαλούνται από την ακτινοβολία σχηματίζονται ελεύθερες ρίζες στο ενδοκυτταρικό περιβάλλον οι οποίες είναι πολύ δραστικές. Οι ελεύθερες ρίζες είναι προϊόντα της ραδιόλυσης του νερού το οποίο βρίσκεται άφθονο εντός του κυττάρου. Οι ρίζες αυτές προσβάλλουν το DNA και του προκαλούν θραύσεις τόσοστην ευθεία αλυσίδα όσο και στα «σκαλοπάτια». Στην Εικόνα 8 δίνονται παραδείγματα θραύσεων του DNA. Θραύσεις στην αλυσίδα του DNA προκαλούνται και από τα άμεσα «χτυπήματα» της ακτινοβολίας.<sup>[2,3]</sup>



**Εικόνα 2.8:** (α) Απλό και (β) διπλό σπάσιμο της έλικας του DNA από τη δράση ελεύθερων ριζών.

Τα απλά σπασίματα της έλικας του DNA είναι εφικτό να διορθωθούν από τους διορθωτικούς μηχανισμούς που διαθέτει το κύτταρο. Τα διπλά σπασίματα είναι πολύ δύσκολο να διορθωθούν και οδηγούν σε μετάλλαξη ή θάνατο του κυττάρου. Συνεπώς υπάρχουν 3 περιπτώσεις που ακολουθούν την ακτινοβόληση του κυττάρου και δίνονται στο Σχήμα 2.9 Αν σημαντικός αριθμός κυττάρων θανατωθεί τότε έχουμε την εμφάνιση άμεσων αποτελεσμάτων. Δηλαδή σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το είδος των κυττάρων θα εμφανιστούν οι συνέπειες του κυτταρικού θανάτου. Για παράδειγμα, μπορεί να εμφανιστεί δερματική πληγή από τη θανάτωση δερματικών κυττάρων ή αιμορραγία από τη θανάτωση κυττάρων του εντέρου. Στην περίπτωση που το κύτταρο επιζήσει αλλά είναι μεταλλαγμένο τότε πρέπει να μιλήσουμε για την πιθανότητα εμφάνισης στοχαστικών (απώτερων) αποτελεσμάτων. Απώτερα αποτελέσματα είναι η εμφάνιση καρκίνου ή η μετάδοση της αλλοιωμένης κληρονομικής πληροφορίας στους απογόνους (αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση που ακτινοβολήθηκαν και μεταλλάχθηκαν γενετικά κύτταρα του

ανθρώπου δηλαδή τα ωάρια ή τα σπερματοζωάρια)<sup>[2.3]</sup>.



**Σχήμα 2.9.** Η μετάλλαξη του DNA που προήλθε από τη δράση της ακτινοβολίας οδηγεί σε 3 πιθανές περιπτώσεις.

### 2.2.3 Καθορισμένα αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα αυτά **προέρχονται** από τη **θανάτωση** των κυττάρων και εμφανίζονται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα μετά την ακτινοβολήση. Από μελέτες έχει βρεθεί ότι τα καθορισμένα αποτελέσματα συμβαίνουν μετά την υπέρβαση μιας συγκεκριμένης τιμής δόσης η οποία ονομάζεται **κατώφλι** (Σχήμα 9). Αν η δόση που έλαβε ένας ιστός ή όργανο είναι **μικρότερη** από τη **δόση κατωφλίου** για την εμφάνιση ενός άμεσου αποτελέσματος τότε η **πιθανότητα** εμφάνισης της βλάβης είναι **μηδενική**. Αν όμως η δόση **υπερβεί** το **κατώφλι** η βλάβη θα εμφανιστεί, και με την αύξηση της δόσης θα αυξηθεί η **σοβαρότητα της βλάβης**.<sup>[2.3]</sup>



**Σχήμα 2.10** Τα καθορισμένα αποτελέσματα εμφανίζονται μόνο αν η δόση υπερβεί μια τιμή που ονομάζεται κατώφλι. Η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης αυξάνεται ραγδαία

μετά την υπέρβαση αυτής της τιμής.

Στον **Πίνακα II** παρουσιάζονται η δόση κατωφλίου και το χρονικό διάστημα στο οποίο κάνουν την εμφάνιση τους κάποια καθορισμένα αποτελέσματα

Σύνδρομο αιμοποιητικού συστήματος	Λεμφοπενία, αιμορραγία, αναιμία	2 Gy	24 ώρες
Σύνδρομο γαστρεντερικού συστήματος	Ναυτία, εμετός, διάρροια, έλκη, εντερική αιμορραγία	7 Gy	3-10 ημέρες
Σύνδρομο κεντρικού νευρικού συστήματος	Εγκεφαλικό οίδημα, μείωση του ενδοαγγειακού όγκου αίματος	50 Gy	Θάνατος σε 1-4 ημέρες

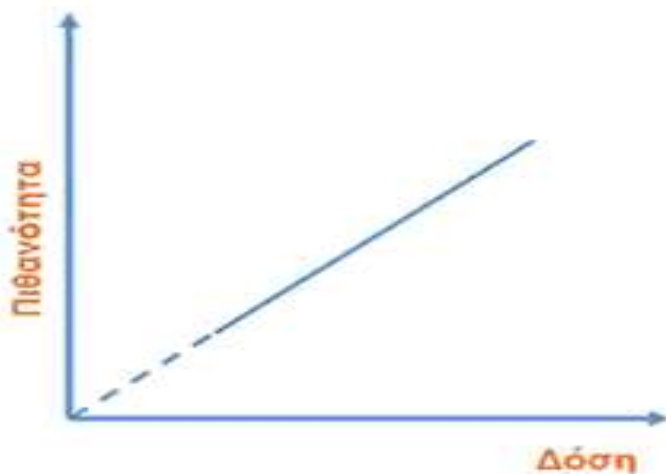
Όπως φαίνεται στον Πίνακα II, οι δόσεις κατωφλίου είναι πάρα πολύ μεγάλες. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι η δόση από μια τυπική ακτινογραφία θώρακος είναι 0,0005

Gy, ενώ από μια ολόσωμη αξονική τομογραφία 0,015Gy. Δηλαδή οι **δόσεις** από κοινές **διαγνωστικές εξετάσεις** είναι τουλάχιστον **1000 φορές μικρότερες** από τις δόσεις κατωφλίου. Υψηλές τιμές δόσης οι οποίες προσεγγίζουν ή ξεπερνούν τις δόσεις κατωφλίου εμφανίζονται μόνο σε σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα, σε απροσεξία κατά τον χειρισμό πολύ ισχυρών ραδιενεργών πηγών και στην ακτινοθεραπεία. Στην ακτινοθεραπεία γίνεται προσεκτικός σχεδιασμός των δόσεων, έτσι ώστε να θανατωθούν τα καρκινικά κύτταρα φροντίζοντας ταυτόχρονα την προστασία των παρακείμενων υγιών κυττάρων.<sup>[2.3]</sup>

#### **2.2.4 Στοχαστικά αποτελέσματα (απώτερα)**

Σε αντίθεση με τα καθορισμένα αποτελέσματα, τα **στοχαστικά** δεν παρουσιάζουν **κατώφλι** εμφάνισης και η πιθανότητα εμφάνισης τους ξεκινά από πολύ μικρές δόσεις. Τα **στοχαστικά** αποτελέσματα προέρχονται από **μεταλλάξεις** των κυττάρων οι οποίες προκαλούν βλάβες που **εμφανίζονται** μετά από **αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα** (20-30 χρόνια) στο άτομο ή στους απογόνους του ή δεν εμφανίζονται καθόλου. Στα στοχαστικά αποτελέσματα μιλάμε αποκλειστικά για **πιθανότητα εμφάνισης**. Στην κατηγορία των στοχαστικών αποτελεσμάτων περιλαμβάνεται η ανάπτυξη καρκίνου, λευχαιμίας και μετάδοσης γενετικών ανωμαλιών στους απογόνους. Αυτές οι βλάβες είναι πιθανό να προκληθούν και από άλλους παράγοντες άσχετους με τις ακτινοβολίες όπως το περιβάλλον, η διατροφή, ο τρόπος ζωής και η κληρονομικότητα. Η δόση από ακτινοβολία στην ουσία **αυξάνει την πιθανότητα** που ήδη υπάρχει να εμφανιστεί η βλάβη.<sup>[2.3]</sup>





**Σχήμα 2.11:** Τα στοχαστικά αποτελέσματα δεν έχουν κατώφλι εμφάνισης και η πιθανότητα εκδήλωσης τους ξεκινά από τη μηδενική δόση

Στον **Πίνακα III** καταγράφονται διάφορα στοχαστικά αποτελέσματα και αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης τους από την ακτινοβολία.

Θανατηφόρος καρκίνος	20-30 χρόνια	5% ανά Sv	25%
Μη θανατηφόρος καρκίνος	20-30 χρόνια	1% ανά Sv	
Λευχαιμία	8-10 χρόνια	0,5% ανά Sv	0,015%
Γενετικά αποτελέσματα	Επόμενες γενεές	1,3% ανά Sv	3-6%

**Πίνακας III:** Στοχαστικά αποτελέσματα και αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης. Σαν «φυσιολογική» πιθανότητα εννοείται η πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης για λόγους άσχετους με την ακτινοβολία.

Ας χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα για να καταλάβουμε τα στοιχεία του Πίνακα

Π. Η πιθανότητα εμφάνισης θανατηφόρου καρκίνου κατά τη διάρκεια ζωής του ανθρώπου είναι 25%. Αν κάποιος υποβληθεί σε εξέταση ολόσωμης αξονικής τομογραφίας η δόση που δέχεται είναι 0,015 Sv. Η δόση αυτή αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου στα επόμενα 20 έτη κατά **0,075%** (= 5% ανά Sv x 0,015 Sv). Παρατηρούμε ότι η αύξηση της πιθανότητας είναι σχεδόν αμελητέα σε σχέση με την ίδια την πιθανότητα (25%).

### **2.2.6 Συμπεράσματα**

Ας συνοψίσουμε τα κυριότερα συμπεράσματα που σχετίζονται με τις βλάβες από τις ακτινοβολίες.

- Τα **καθορισμένα** αποτελέσματα εκδηλώνονται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα και προκαλούνται μόνο όταν η δόση ξεπεράσει μια δόση κατώφλιου που είναι συνήθως υψηλή (ατυχήματα, πυρηνική έκρηξη κλπ).
- Τα **στοχαστικά** (απώτερα) αποτελέσματα εμφανίζονται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα (χρόνια). Δεν χαρακτηρίζονται από κατώφλι δόσης και κάθε δόση που απορροφάται αυξάνει κατά τι την ήδη υπάρχουσα πιθανότητα εμφάνισής τους.

Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι από απόψεως βιολογικών αποτελεσμάτων, η **δόση** ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη **αθροιστικά**. Δηλαδή κάθε δόση που λαμβάνουμε προστίθεται στις προηγούμενες.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

### **BIBΛΙΑ**

[2.1] Glenn F , Knoll *Radiation detection and measurement* ,3<sup>rd</sup>ed, Wiley,New York(1999).

[2.2] *Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry*, Khalil Arshak Olga Korostynska,ArtechHouse,Norwood((2006)

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

[2.3] [http://mpl.med.uoa.gr/wp-content/uploads/2011/03/ekpaideutiko-yliko\\_seminaria.pdf](http://mpl.med.uoa.gr/wp-content/uploads/2011/03/ekpaideutiko-yliko_seminaria.pdf)

**ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΤΩΝ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ, ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ, (2011)**

Συγγραφή: Ιατρική σχολή πανεπιστημίου Αθηνών, Ελληνική επιτροπή ατομικής ενέργειας

[2.5] [.www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[2.6] <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html> (united states nuclear regulatory commission)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΕΡΙΟΥ**

### **3.1 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ/ΕΙΔΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ**

Πριν μιλήσουμε για τους διάφορους τύπους ανιχνευτών οι οποίοι είναι και η βασική μελέτη της εργασίας μας, ας δούμε μερικά βασικά πράγματα για τους ανιχνευτές ακτινοβολίας.

#### **3.1.1 Ανιχνευτές Ακτινοβολίας**

##### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι πολλαπλές βιολογικές επιδράσεις πάνω στον ανθρώπινο οργανισμό αλλά και η ανάγκη για να ελέγξουμε την ιοντίζουσα ακτινοβολία ,για να εξυπηρετήσουμε διάφορους σκοπούς (βλέπε 2.1 εφαρμογές ιοντίζουσας ακτινοβολίας)μας οδήγησε στην χρήση ανιχνευτών που θα μετρήσουν την δόση που εκπέμπεται. Το ανθρώπινο σώμα δεν μπορεί να αισθανθεί την ιοντίζουσα ακτινοβολία, αλλά οι επιδράσεις ιονισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το χαρακτηρισμό της ακτινοβολίας. Αυτό κάνουν οι ανιχνευτές εντοπίζουν τις επιδράσεις της ακτινοβολίας και την μετράνε ώστε να είναι αξιοποιήσιμη για διάφορες εφαρμογές και να διατηρείται σε ασφαλή επίπεδα για την υγεία.

##### **ΓΕΝΙΚΑ**

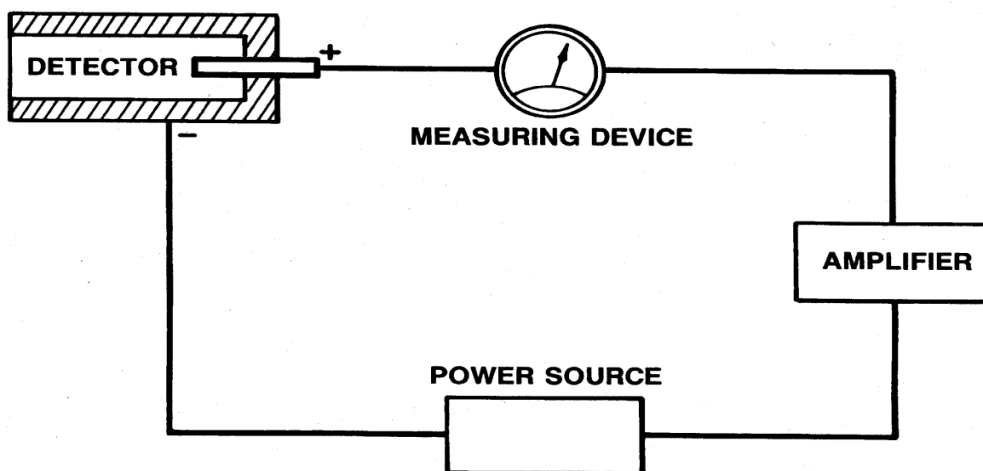
Τα σωματίδια της ραδιενεργού ακτινοβολίας (νετρόνια, πρωτόνια, άλφα, βήτα, γάμα κλπ) ανιχνεύονται από τον ιοντισμό που προκαλούν, άμεσα ή έμμεσα, στην ύλη ή ακόμα από τη διέγερση που προκαλούν στα ηλεκτρόνια κρυσταλλικών υλικών (ανιχνευτές στερεάς κατάστασης). Τα φορτισμένα σωματίδια είναι άμεσοι ιοντιστές της ύλης, ενώ τα νετρόνια και τα φωτόνια προκαλούν ιοντισμό έμμεσα. Η διαδικασία ανίχνευσης των φωτονίων μπορεί να παρασταθεί από το σχήμα:

$\gamma \rightarrow$  αλληλεπίδραση με ύλη  $\rightarrow$  Ηλεκτρόνια  $\rightarrow$  ιοντισμός  $\rightarrow$  ανίχνευση

### ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ

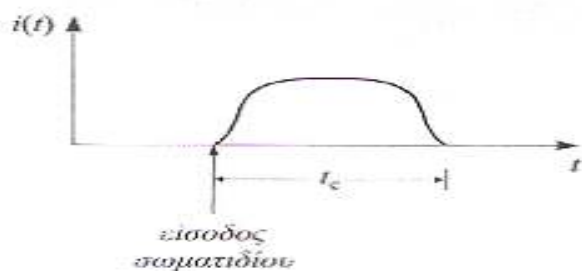
Τα όργανα για την ανίχνευση ακτινοβολίας αποτελούνται από τρία βασικά μέρη:

- Ο ανιχνευτής
- Ένα τροφοδοτικό / ενίσχυση του συστήματος
- Μια συσκευή μέτρησης / μέτρο



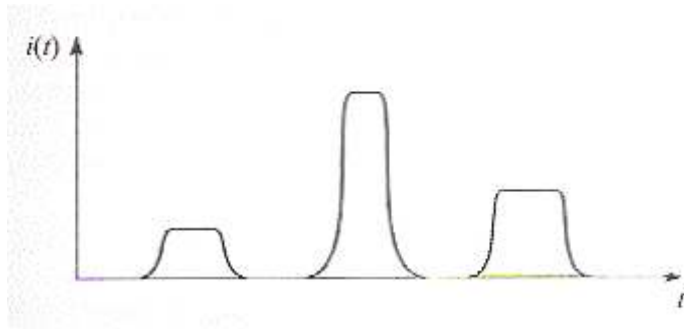
**Σχήμα3.1. Βασικός ανιχνευτής** αποτελείμενος από έναν ανιχνευτή από την έξοδο του οποίου έχουμε έναν ενισχυτή ο οποίος ενισχύει το σήμα ώστε η μετρητική συσκευή να λάβει ένα μετρήσιμο σήμα και να εμφανίσει ορατά αποτελέσματα. Το σύστημα τροφοδοτείται από μια πηγή ισχύος.

Ο ιοντισμός του υλικού του ανιχνευτή συνεπάγεται την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων, η συλλογή των οποίων, με εφαρμογή κατάλληλων ηλεκτρικών πεδίων συνιστά το βασικό σήμα ανίχνευσης του σωματιδίου που προκάλεσε, άμεσα ή έμμεσα, τον ιοντισμό. Ας φανταστούμε την αλληλεπίδραση ενός μόνο σωματιδίου με το υλικό του ανιχνευτή. Το ηλεκτρικό ρεύμα  $i(t)$  που θα συλλεχθεί από τον ανιχνευτή, ως συνάρτηση του χρόνου  $t$ , θα είναι παλμός, όπως π.χ. αυτός του σχήματος 3.2



**Σχήμα 3.2:** Ο παλμός ρεύματος  $i(t)$  μετά την αλληλεπίδραση σωματιδίου με το υλικό του ανιχνευτή( Ο χρόνος  $t_c$ , που χρειάζεται για τη συλλογή του φορτίου, είναι από μερικά ms στους θαλάμους ιοντισμού ως μερικά ns στους ανιχνευτές διόδων ημιαγωγών. [3.3])

Ας υποθέσουμε τώρα ότι σωματίδια εισέρχονται στον ανιχνευτή το ένα μετά το άλλο με τέτοιο ρυθμό ώστε οι αντίστοιχοι παλμοί ρεύματος να είναι διακριτοί, όπως στο **σχήμα 3.3** δηλαδή να μην υπάρχει επικάλυψη παλμών.



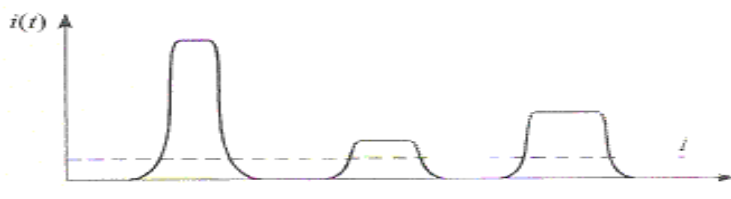
**Σχήμα 3.3:** Διαδοχικοί παλμοί από τις διαδοχικές αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή.

Οι μορφές των παλμών στα σχήματα αυτά είναι ιδεατές: η μορφή των παλμών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού κυκλώματος με το οποίο συνδέεται ο ανιχνευτής. Μπορούμε όμως να χρησιμοποιήσουμε το σχήμα 3.2 για να διακρίνουμε τους δύο τρόπους λειτουργίας ανιχνευτών.

### 3.1.2 Μέθοδοι λειτουργίας

**α) Ρεύματος ή μέσης τιμής,** όπου το κύκλωμα το συνδεδεμένο με τον ανιχνευτή είναι τέτοιο ώστε να μετρά τη μέση τιμή  $I(i)$  του ρεύματος που συλλέγεται από τον ανιχνευτή σε χρονικό διάστημα  $T$ . [3.2]

(σχέση 3.1)



**Σχήμα 3.4** Λειτουργία μέσης τιμής  $I(t)$

**β) διάκρισης παλμών,** όπου η έξοδος από τη διάταξη ανιχνευτή - ηλεκτρονικών είναι σειρά διακριτών παλμών. Με αυτό τον τρόπο λειτουργίας διατηρείται η πληροφορία για το ύψος των παλμών (άρα καταρχήν και για την ενέργεια των σωματιδίων που προκάλεσαν τον παλμό) καθώς

και για τον χρονισμό και τον αριθμό των παλμών (άρα και για το ρυθμό αλληλεπίδρασης σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή). [3.2]

### 3.1.2 Τυπικά μεγέθη Ανιχνευτή

#### ι)Αποτελεσματικότηταανίχνευσης

Ορίζεται ως η ικανότητα του ανιχνευτή να εντοπίζει την εισερχόμενη ακτινοβολία,η αποτελεσματικότητα σε ένα παλμικό σύστημα είναι η πιθανότητα την οποία έχει ένα σωματίδιο η ένα φωτόνιο που εκπέμπεται να ανιχνευθεί<sup>[3.2]</sup> Χωρίζονται σε δύο ειδών την απόλυτη και την εσωτερική. Η απόλυτη ορίζεται ως εξής

Απόλυτη Αποτελεσματικότητα

και εξαρτάται όχι μόνο από τις ιδιότητες του ανιχνευτή αλλά και από την γεωμετρία του ανιχνευτή (δηλαδή την απόσταση από την πηγή στον ανιχνευτή)

Εσωτερική(Intrinsic efficiency)αποτελεσματικότητα

**E<sub>int</sub>=[σχεση3.3]**

Η Απόλυτη Αποτελεσματικότητα (E<sub>abs</sub>)εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, εν προκειμένω από την ε<sub>int</sub>, αλλά και από τη γεωμετρία της διάταξης της μέτρησης, διότι στις περισσότερες διατάξεις μέτρησης ένα ποσοστό μόνο των εκπεμπόμενων από την πηγή σωματιδίων προσπίπτει στον ανιχνευτή. Π.χ. έστω ότι σημειακή πηγή (βλεπε σχημα 3.5) σε απόσταση  $d$  από ανιχνευτή επιφάνειας  $A-nR^2$  εκπέμπει ισοτροπικά  $S$  σωματίδια ανά μονάδα χρόνου. Αφού η πηγή είναι ισοτροπική, σε απόσταση  $d$  αφικνούνται  $S/4\pi d^2$  σωματίδια ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Κατά συνέπεια στην επιφάνεια  $A$  προσπίπτουν  $AS/4\pi d^2$  σωματίδια ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή ποσοστό των εκπεμπόμενων σωματιδίων ίσο με  $\frac{A}{4\pi d^2} = [\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta 3.4]^{[3.2]}$





**Σχήμα 3,5:** Ποσοστό μόνο των σωματιδίων που εκπέμπει ισοτροπικά η πηγή προσπίπτει στην επιφάνεια του ανιχνευτή.

### Ενεργειακή διακριτική ικανότητα (resolution)

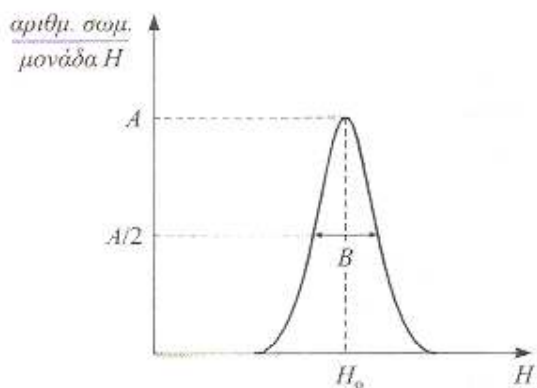
ii) Ενεργειακή **διακριτική ικανότητα (resolution)**: θεωρούμε μετρητικό σύστημα το οποίο μετρά και καταγράφει τον αριθμό των παλμών  $N(H)$  του ανιχνευτή με ύψη παλμών στο διάστημα από  $H$  μέχρι  $H+\Delta H$ . Το ύψος  $H$  κάθε παλμού είναι ανάλογο της ενέργειας  $E$  που εναπόθεσε το αντίστοιχο σωματίδιο στον ανιχνευτή, οπότε με κατάλληλη βαθμονόμηση συνάγεται ο αριθμός  $N(E)$  σωματιδίων που εναπόθεσαν στον ανιχνευτή ενέργεια στο διάστημα από  $E$  ως  $E+AE$ . Για  $\Delta H$  και  $AE$  αρκετά μικρά μπορούμε να συναγάγουμε τις συναρτήσεις  $S(H)$  και  $S(E)$ :

$$S(H) = dN(H)/dH$$

$$S(E) = dN(E)/dE \text{ (σχεση 3.5)}$$

Το  $S(H)$  ονομάζεται **φάσμα** ύψους παλμών και το  $S(E)$  ενεργειακό **φάσμα** ή απλά φάσμα. Τα φάσματα δίνουν την κατανομή ενέργειας που εναπόθεσαν τα σωματίδια στον ανιχνευτή. Έτσι ο αριθμός παλμών που εναπόθεσαν ενέργεια στο διάστημα από  $E1$  ως  $E2$  είναι:

αριθμός παλμών ενέργειας από  $E1$  έως  $E2$



Η μέτρηση του φάσματος σωματιδίων

ονομάζεται **φασματική ανάλυση** ή **φασματομετρία**. Η μορφή ενός φάσματος δεν εξαρτάται μόνον από την κατανομή ενέργειας, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή,

**Σχήμα 3.6** Φάσμα  $S(H)$  από μονοενεργειακά σωματίδια ενέργειας  $E_0$ , στην οποία θα καταγράφοντο όλοι οι παλμοί με το ίδιο ύψος  $H_0$  που αντιστοιχεί στην ενέργεια  $E_0$ . Στην πράξη καταγράφονται παλμοί με κατανομή ύψους  $H$ , όπως ενδεικτικά παριστάνεται στο σχήμα.

Η ενέργεια των μονοενεργειακών σωματιδίων προσδιορίζεται από την κορυφή του μετρούμενου φάσματος, η οποία ονομάζεται κορυφή πλήρους ενέργειας (ful lenergy peak). Η κατανομή αυτή του  $H$  οφείλεται κυρίως σε στατιστική διακύμανση του μετρούμενου ύψους παλμών  $H$  από παλμό σε παλμό, ακόμα και όταν στον ανιχνευτή εναποτίθεται η ίδια ενέργεια  $E_0$  από όλα τα σωματίδια. Αυτή η διακύμανση οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο το οποίο παράγεται από την εναπόθεση της ενέργειας του σωματιδίου φέρεται από ένα διακριτό αριθμό φορέων φορτίου και ο αριθμός των φορέων φορτίου που συλλέγονται έχει τυχαίες διακυμάνσεις από γεγονός σε γεγονός. Η **ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution)  $R$**  ανιχνευτή ορίζεται ως (σχήμα 3.6):

**ενεργειακή διακριτική ικανότητα  $R =$  [σχέση 3.7]**

Στον ορισμό αυτό ενυπάρχει η υπόθεση ότι οποιοδήποτε υπόβαθρο είναι αμελητέο ή έχει αφαιρεθεί. Όσο πιο μικρή είναι η  $R$ , τόσο πιο μικρό θα είναι το εύρος της κατανομής και κατά συνέπεια τόσο πιο μεγάλη η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει ενέργειες  $E_1$  και  $E_2$  σωματιδίων με μικρή διαφορά  $E_1 - E_2$ . Η  $R$  είναι αδιάστατος αριθμός και ενδεικτικά αναφέρεται ότι στους δίοδους ημιαγωγούς ανιχνευτές φασματομετρίας σωματιδίων- $\alpha$  είναι της τάξης του 1%, ενώ στους σπινθηριστές ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται για φασματομέτρα ακτινών-  $\gamma$  είναι 5%ως 10%.<sup>[3.3]</sup> Στην αγγλική ορολογία το εύρος  $B$  του σχήματος 3.4

ονομάζεται Full Width Half Maximum και συντομογραφία *FWHM*. Στην πράξη το *FWHM* αναφέρεται σε μονάδες ενέργειας, π.χ. μεγάλοι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου έχουν *FWHM* περίπου 1 keV για φωτόνια ενέργειας 122 keV και περίπου 2 keV για φωτόνια ενέργειας 1330keV. Από το παράδειγμα φαίνεται το γεγονός ότι το *FWHM* και η διακριτική ικανότητα *R* εξαρτώνται από την ενέργεια των σωματιδίων. Ας υποθέσουμε ότι σε ανιχνευτή εισέρχονται σωματίδια με ενέργειες  $E - 1$  keV και  $E + 1$  keV και ότι στην ενέργεια  $E$  το *FWHM* του ανιχνευτή είναι 5 keV. Τότε θα προκύψει μία μόνο κορυφή και ο ανιχνευτής δεν θα μπορέσει να διακρίνει τις δύο διαφορετικές ενέργειες. Αντίθετα, αν το *FWHM* είναι 1 keV, θα προκύψουν δύο κορυφές και η παρουσία των σωματιδίων διαφορετικής ενέργειας θα διαπιστωθεί. **Σαν γενικός κατά προσέγγιση κανόνας ισχύει ότι δύο ενέργειες είναι δυνατόν να διακριθούν, αν η διαφορά τους είναι μικρότερη από το  $FWHM$** <sup>[3.3]</sup>.

Άλλες αιτίες στατιστικής διακύμανσης του μετρούμενου  $H$  είναι διολίσθηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας (π.χ. της τάσης) του ανιχνευτή κατά τη διάρκεια της μέτρησης και στοχαστικές διακυμάνσεις στο σύστημα ανιχνευτή-ηλεκτρονικών. Ανυποθέσουμε ότι στατιστική διακύμανση οφείλεται μόνο στη διακύμανση του αριθμού των φορέων φορτίου και ότι η καμπύλη είναι Γκαουσιανή, αποδεικνύεται ότι:

### **σχέση 3.8/**

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των φορέων φορτίου που παράγονται ανά σωματίδιο. Η καλή (μικρή) διακριτική ικανότητα των ημιαγωγών ανιχνευτών είναι αποτέλεσμα του πολύ μεγάλου αριθμού φορέων φορτίου που παράγονται σ' αυτούς ανά μονάδα εναποτιθέμενης ενέργειας.

### **ΝΕΚΡΟΣ ΧΡΟΝΟΣ**

**iii) Νεκρός χρόνος (deadtime):** έστω ότι σωματίδιο εισέρχεται στον ανιχνευτή και αλληλεπιδρά με το υλικό του. Προκειμένου να καταγραφεί το επόμενο σωματίδιο που εισέρχεται στον ανιχνευτή και αλληλεπιδρά με το υλικό του, θα πρέπει τα δύο γεγονότα να απέχουν χρονικά τουλάχιστον κατά κάποιον ελάχιστο χρόνο. Διαφορετικά θα υπάρχει επικάλυψη των δύο παλμών, οι παλμοί δεν θα είναι διακριτοί ως δύο διαφορετικοί και θα καταγραφεί ένας αντί δύο παλμών. Ο ελάχιστος αυτός χρόνος ονομάζεται νεκρός χρόνος<sup>[3.1]</sup>, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και από την ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος ανίχνευσης (του απαριθμητή). Ο νεκρός χρόνος μετράται πειραματικά. Σε περιπτώσεις μεγάλου ρυθμού παλμών το σφάλμα από τις απώλειες καταγραφής παλμών μπορεί να είναι σημαντικό και πρέπει να γίνεται σχετική διόρθωση της μέτρησης.<sup>[3.1]</sup>

### 3.1.4 ΤΥΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ

*Οι Ανιχνευτές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τύπο των πληροφοριών που παράγουν*

- Σε Ανιχνευτές, όπως οι Geiger-Geiger (GM) ανιχνευτές, που αναφέρουν τον αριθμό των αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν στον ανιχνευτή ονομάζονται **μετρητές**
- Σε ανιχνευτές που αποφέρουν πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπως οι ανιχνευτές σπινθηρισμού(scintillationcounters), που ονομάζονται **φασματόμετρα**.
- Σε ανιχνευτές που δείχνουν το καθαρό ποσό της ενέργειας που κατατίθεται στον ανιχνευτή με πολλαπλές αλληλεπιδράσεις ονομάζονται **δοσίμετρα**.

Υπάρχει και άλλος ένας **τρόπος κατηγοριοποίησης** των ανιχνευτών ακτινοβολίας, **βάσει του στοιχείου** το οποίο περιέχει ο ανιχνευτής, και αυτόν θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία,

Έχουμε λοιπόν 3 τύπων ανιχνευτές:

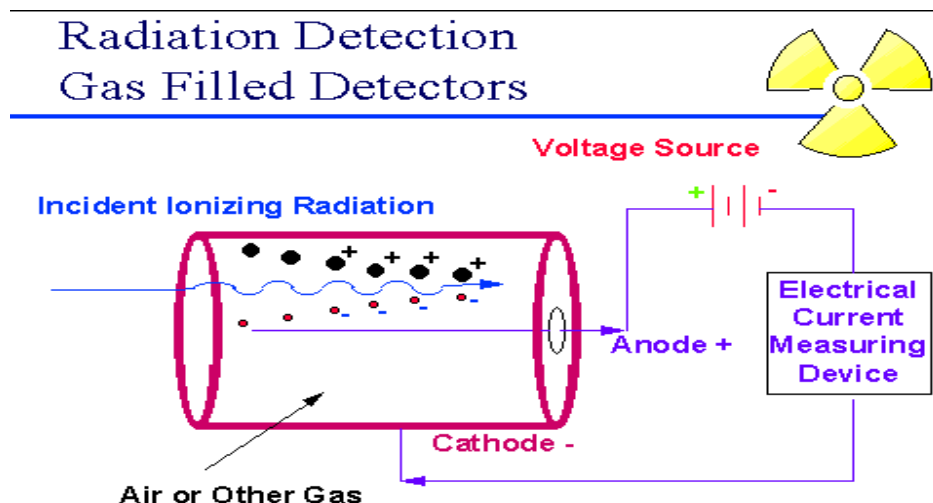
- Ανιχνευτές αερίου που αποτελούνται από μια ποσότητα αερίου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (**gasfilled-detectors**)
- Σε ανιχνευτές σπινθηρισμού(**scintillationcounters**), στους οποίους η αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας παράγει υπεριώδη ακτινοβολία και / ή ορατό φως
- Ανιχνευτές ημιαγωγών(**semiconductordetectors**) που αποτελείται από καθαρούς κρυστάλλους του πυριτίου, γερμανίου, ή άλλα υλικά στα οποία έχουν ίχνη των ατόμων πρόσμιξης έχουν προστεθεί έτσι ώστε να δρουν ως δίοδοι.<sup>[3.1]</sup>

### 3.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΕΡΙΟΥ

Πρόκειται για συσκευές που αποτελούνται από δύο πλάκες ή ηλεκτρόδια άλλου σχήματος, μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται υψηλή τάση. Το ένα είναι θετικό και ονομάζεται άνοδος, ενώ το δεύτερο αρνητικό και ονομάζεται κάθοδος. Ανάμεσα τους υπάρχει αέριο (ήλιο(He), νέο(N), αργό(Ar), υδρογόνο(H), κρυπτό(Cr)) ή απλώς, ατμοσφαιρικός αέρας.

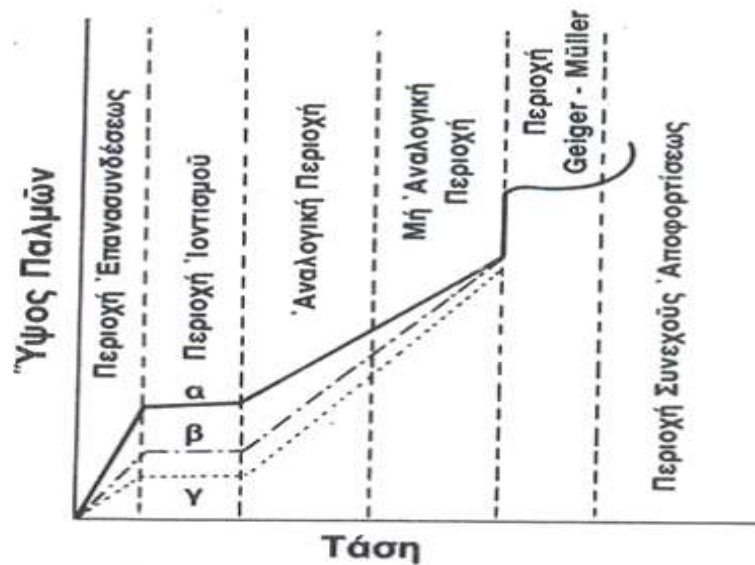
Η έκθεση του αερίου σε ιοντίζουσα ακτινοβολία οδηγεί στη δημιουργία ιόντων, τα οποία συλλέγονται από τις αντίθετα φορτισμένες πλάκες(Βλέπε εικόνα 1), με αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος, του οποίου η ένταση μετράται. Πιο συγκεκριμένα, οι ανιχνευτές αερίου, συνήθως, λειτουργούν παλμικά, δηλαδή κάθε σωματίο ή φωτόνιο που διαπερνά το αέριο, δίνει ένα παλμό, το ύψος του οποίου εξαρτάται από την ενέργειά του. Έτσι, έχουμε τη

δυνατότητα να γνωρίζουμε το πλήθος και την ενέργεια των φορτίων ή των φωτονίων<sup>[3.1]</sup>.



Εικόνα 3.7. Σχηματική αναπαράσταση ενός ανιχνευτή αερίου.<sup>[3.5]</sup>

Χαρακτηριστικό των ανιχνευτών αερίου αποτελεί η **καμπύλη**<sup>[3.2]</sup> τους, η οποία παρουσιάζει το ύψος του παραγόμενου από την ακτινοβολία παλμού, σε συνάρτηση με την τάση που εμφανίζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Τυχόν μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανόδου – καθόδου συνεπάγεται με μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου εντός του αερίου. Ο αριθμός των ιόντων, που συλλέγεται από τα ηλεκτρόδια, συναρτήσε της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται μεταξύ αυτών, δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, στο οποίο διακρίνονται οι εξής περιοχές:



**Εικόνα 3.8.** Διάγραμμα της σχέσης ύψους παλμού και τάσης για ακτινοβολίες  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  σε ανιχνευτές αερίων<sup>[3.2]</sup>

- **Περιοχή επανασύνδεσης**

Στην συγκεκριμένη περιοχή, η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μικρή, με αποτέλεσμα τα αντίθετα φορτισμένα ιόντα να επανασυνδέονται μεταξύ τους, πριν φτάσουν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, και χωρίς, επομένως, να δημιουργούν παλμό. Όμως, με προοδευτική αύξηση της τάσης, ορισμένα ιόντα φτάνουν στα ηλεκτρόδια και δημιουργείται παλμός, με προοδευτικά αυξανόμενο ύψος.<sup>[3.2]</sup>

- **Περιοχή κορεσμού ή ιοντισμού**

Στην περιοχή αυτή, όλα τα σχηματιζόμενα ιόντα συλλέγονται από τα δύο ηλεκτρόδια. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλη σταθερότητα, αφού για αξιόλογες μεταβολές της τάσεως, το ύψος του παλμού παραμένει σταθερό. Το μόνο που αλλάζει, είναι ο χρόνος συλλογής των φορτίων στα ηλεκτρόδια.<sup>[3.2]</sup>

- **Αναλογική περιοχή**

Στην αναλογική περιοχή, η τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι αρκετά μεγάλη,

με αποτέλεσμα τα ήδη υπάρχοντα ηλεκτρόνια να αποκτούν μεγάλη κινητική ενέργεια και να προκαλούν περαιτέρω ιοντισμούς, κατά την πρόσκρουσή τους σε άτομα του αερίου. Αυτοί οι δευτερογενείς και τριτογενείς ιοντισμοί προκαλούν ενίσχυση των ιοντισμών του αερίου, ενώ το ύψος του παραγόμενου παλμού αυξάνεται με αύξηση της τάσης<sup>[3.2]</sup>

- **Μη αναλογική περιοχή**

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από αστάθεια, καθώς με επιπλέον αύξηση της τάσης, εξαφανίζεται σταδιακά η αναλογία του ύψους του παλμού με τον αριθμό των πρωτογενών φορτίων, δηλαδή, εκείνων που ελευθερώθηκαν αρχικά ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης αερίου – ακτινοβολίας. Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη περιοχή δε χρησιμοποιείται σε μετρήσεις.<sup>[3.2]</sup>

- **Περιοχή Geiger - Meiler**

Στην περιοχή Geiger, δηλαδή σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές τάσης, το ύψος του παλμού δεν έχει καμία συσχέτιση με το πλήθος των φορτίων, που παράγεται κατά το αρχικό συμβάν. Κι αυτό γιατί, την αρχική αλληλεπίδραση ακολουθεί μια ‘καταγίδα’ ή ‘χιονοστιβάδα’ ιοντισμών σε ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή, γεγονός που οδηγεί την ενίσχυση του παλμού σε κορεσμό. Η περιοχή, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από το μέγιστο ύψος του παλμού, από σταθερότητα σε μικρές μεταβολές της τάσεως, από μεγάλη ευαισθησία και από αδυναμία διάκρισης του είδους της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας. <sup>[3.2]</sup>

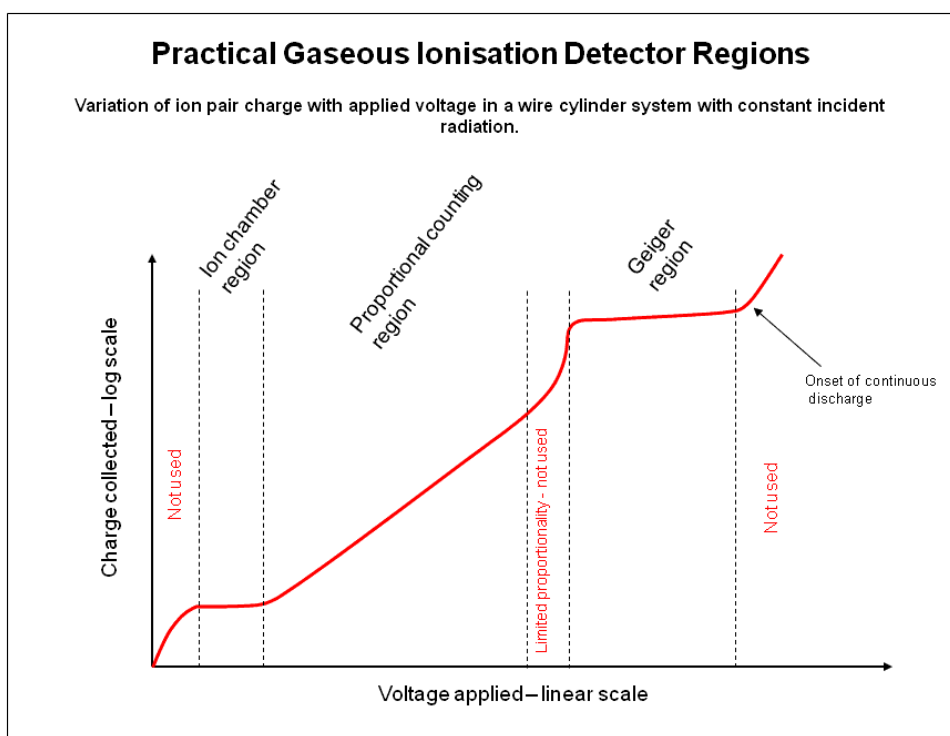
- **Περιοχή αποφόρτισης ή διαρκούς εκκένωσης**

Στην περιοχή αυτή, που ισχύουν μεγαλύτερες τιμές τάσης, παρατηρείται το φαινόμενο της διαρκούς εκκένωσης, εφόσον τα θετικά ιόντα αλληλεπιδρούν με το τοίχωμα της καθόδου, παράγοντας υπερϊώδη ακτινοβολία και ιοντισμό του τοιχώματος της καθόδου, πράγμα που είναι δυνατό να οδηγήσει στην καταστροφή του οργάνου. Είναι, λοιπόν, ευνόητο ότι η περιοχή δε χρησιμοποιείται σε μετρήσεις.

Υπάρχουν 3 τύποι με ανιχνευτές αέριου που χρησιμοποιούνται περισσότερο<sup>[3.1]</sup>

- **θάλαμοι ιονισμού(ionization chambers)**
- **Geiger-Mueller (G-M) μετρητές**
- **Αναλογικοί μετρητές(proportional counters)**

Ο Τύπος καθορίζεται κυρίως από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων<sup>[3.1]</sup>



**Εικόνα 3.9** Οι ανιχνευτές αερίου και οι περιοχές που λειτουργούν. Το διάγραμμα έχει δυο άξονες στον άξονα  $X$  έχουμε την τάση που εφαρμόζεται συναρτήσει του ρεύματος που συλλέγεται στην έξοδο μετρημένο σε λογαριθμική κλίμακα<sup>[3.3]</sup>.

### 3.2.1 Θάλαμοι ιοντισμού (Ionization Chambers)

Ο θάλαμος ιοντισμού είναι ο απλούστερος απ' όλους τους ανιχνευτές αερίου, και χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση και τη μέτρηση ορισμένων τύπων ιοντίζουσας ακτινοβολίας όπως Ακτίνες- $X$ , ακτίνες γάμμα και  $\beta$ -σωματίδια. Συμβατικά, ο όρος "θάλαμος ιοντισμού" χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να περιγράψει αυτούς τους ανιχνευτές που συγκεντρώνουν όλα τα φορτία που δημιουργούνται από απευθείας ιονισμό εντός του αερίου μέσω της εφαρμογής ενός ηλεκτρικού πεδίου, χρησιμοποιεί μόνο τα διακριτά φορτία που δημιουργούνται από κάθε αλληλεπίδραση μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και του αερίου, και δεν περιλαμβάνει τους μηχανισμούς πολλαπλασιασμού του αερίου που χρησιμοποιούνται άλλα μέσα ακτινοβολίας, όπως τον Geiger-μετρητή ή τον αναλογικό μετρητή.<sup>[3.1]</sup>

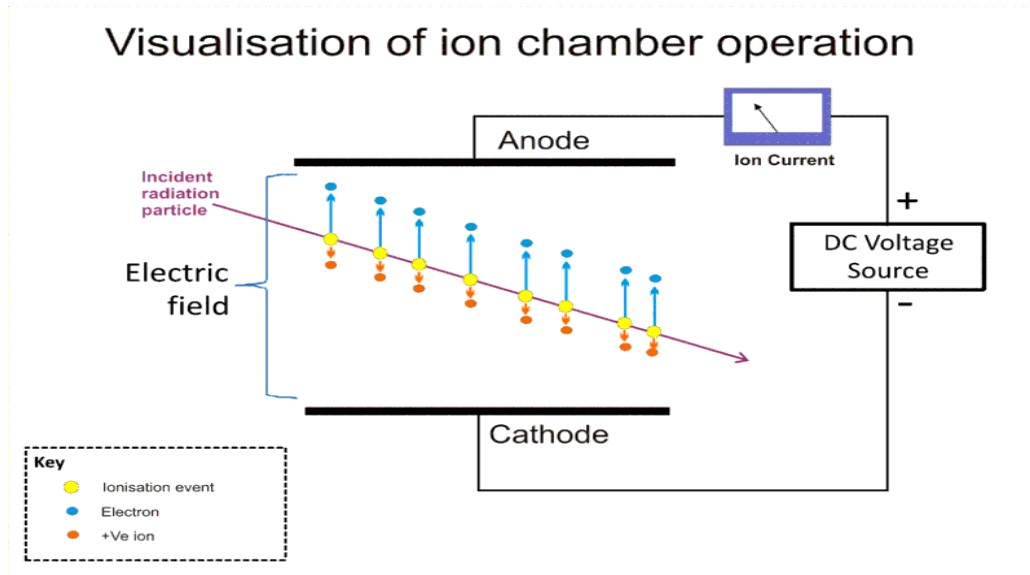




**ΕΙΚΟΝΑ 3.10** Παράδειγμα μετρητή ιοντίζουσας ακτινοβολίας με χρήση θαλάμου ιοντισμού. (Εταιρεία: FLUKEBIOMEDICAL, MODEL: 451B)<sup>(3,6)</sup>.

### Αρχή λειτουργίας

Ένας θάλαμος ιοντισμού μετρά το φορτίο από τον αριθμό των ζευγών ιόντων που δημιουργούνται μέσα σε ένα αέριο που προκαλείται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Αποτελείται από ένα θάλαμο αέριου με δύο ηλεκτρόδια Γνωστά ως άνοδος και κάθοδος. Τα ηλεκτρόδια μπορούν να είναι στη μορφή των παράλληλων πλακών (Παράλληλες Chambers Ιοντισμού Πλάκα: PPIC)<sup>(3.1)</sup>, ή ενός κυλίνδρου με μία διάταξη που βρίσκεται ομοαξονικά με εσωτερικό σύρμα ανόδου. Μία **τάση** εφαρμόζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων, για να δημιουργήσει ένα ηλεκτρικό πεδίο στο αέριο του θαλάμου. Όταν το αέριο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ιονισμένο από ιοντίζουσα ακτινοβολία, ζεύγη δημιουργούνται και τα προκύπτοντα θετικά ιόντα και ηλεκτρόνια κινούνται και διασπώνται προς τα ηλεκτρόδια της αντίθετης πολικότητας υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό παράγει ένα ρεύμα ιοντισμού το οποίο μετρείται από ένα κύκλωμα ηλεκτρόμετρου. Το ηλεκτρόμετρο πρέπει να είναι ικανό να μετρά το πολύ μικρό ρεύμα εξόδου το οποίο είναι στην περιοχή των femtoamperes έως picoamperes, ανάλογα με το σχεδιασμό του θαλάμου, τη δόση ακτινοβολίας και την εφαρμοζόμενη τάση<sup>[3.1]</sup>



**Εικόνα 3.11** Σχηματικό διάγραμμα του θαλάμου ιόντων, που δείχνει την μετατόπιση των ιόντων. Τα ηλεκτρόνια παρασύρονται συνήθως 1000 φορές γρηγορότερα από τα θετικά ιόντα λόγω της πολύ μικρότερης μάζας τους

Κάθε ζεύγος ιόντων που δημιουργείται προσθέτει αφαιρεί ένα μικρό ηλεκτρικό φορτίο προς ή από ένα ηλεκτρόδιο, έτσι ώστε το συσσωρευμένο φορτίο είναι ανάλογο με τον αριθμό των ζευγών ιόντων που δημιουργείται, και συνεπώς ανάλογο με την δόση ακτινοβολίας. Αυτή η συνεχής παραγωγή φορτίου παράγει ένα ρεύμα ιονισμού, το οποίο είναι ένα μέτρο της συνολικής δόσης ιοντίζουσας εισέρχεται στο θάλαμο. Ωστόσο, ο θάλαμος ιονισμού δεν μπορεί να κάνει διάκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας (βήτα ή γάμμα) και δεν μπορεί να παράγει ένα φάσμα ενέργειας της ακτινοβολίας.<sup>[3.6]</sup>

Το ηλεκτρικό πεδίο επιτρέπει επίσης στη συσκευή να λειτουργήσει συνεχώς με μάζεμα ηλεκτρονίων, το οποίο εμποδίζει το αέριο του γεμίσματος από κορεσμό, όπου περισσότερο ιόντα δεν θα μπορούσαν να συλλεχθούν, και παρεμποδίζοντας τον ανασυνδυασμό των ζευγών ιόντων, οι οποίες θα μείωναν το ρεύμα ιόντων. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας αναφέρεται ως "τρέχουσα" κατάσταση λειτουργίας, που σημαίνει ότι το σήμα εξόδου είναι ένα συνεχές ρεύμα, και όχι μία παλμική έξοδος, όπως στις περιπτώσεις του Geiger-Muller ανιχνευτή του αναλογικού μετρητή.<sup>[3.6]</sup>

## Εφαρμογές θαλάμου ιοντισμού

### Πυρηνική βιομηχανία

Οι θάλαμοι ιοντισμού χρησιμοποιούνται ευρέως στην πυρηνική βιομηχανία, καθώς παρέχουν μία έξοδο που είναι ανάλογη με τη δόση ακτινοβολίας και βρίσκουν ευρεία χρήση σε καταστάσεις όπου ένα σταθερό υψηλό ποσοστό δόσης μετράται και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας από τους συνηθισμένους Geiger-Muller σωλήνες, οι οποίοι πάσχουν την από κατάρρευση του αέριου και γενικά περιορίζεται σε μια ζωή περίπου 1011 χρόνουςμέτρησης. [3.1] Επιπλέον, ο GeigerMuller σωλήνας δεν μπορεί να λειτουργήσει για πάνω από περίπου 104 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, λόγω των επιδράσεων των νεκρών χρόνων του χρόνου, ενώ δεν υπάρχει παρόμοιος περιορισμός για τον θάλαμο ιοντισμού.[3.1]

#### 3.2.1 GeigerMuller ανιχνευτής



**Εικόνα 3.12** Ανιχνευτής Geiger αποτελούμενος από δύο κομμάτια μια μετρητική διάταξη και έναν σωλήνα Geiger ο οποίος δέχεται στην είσοδο του τα προς μέτρηση σωματίδια

Οι μετρητές GeigerMuller είναι συσκευές που μετρούν την ιοντίζουσα ακτινοβολία (κυρίως ακτινοβολία  $\alpha$  και ακτινοβολία  $\beta$ , αν και αρκετά μοντέλα πλέον εντοπίζουν και ακτίνες  $\gamma$ ). Ο αισθητήρας είναι ένας σωλήνας GeigerMuller, που περιέχει κάποιο αδρανές αέριο (συνήθως ήλιο, νέο ή αργό με προσθήκη αλογόνου) το οποίο άγει τον ηλεκτρισμό όταν

ένα μόριο ή ένα φωτόνιο ακτινοβολίας κάνει το αέριο αγωγίμο. Η σωλήνα ενισχύει την αγωγιμότητα καθώς συμβάλει στην εμφάνιση του φαινομένου της χιονοστιβάδας και παράγει έναν παλμό ρεύματος η ένταση του οποίου καθορίζει και την ένταση της ακτινοβολίας. Παλιότερα η ένδειξη για τον εντοπισμό της ακτινοβολίας ήταν αναλογική ( με βελόνα και μία λάμπα της οποίας η ένταση είχε εξάρτηση με την ένταση του παλμού ή με ηχητικά σήματα των οποίων ο ρυθμός και η ένταση ήταν ανάλογη με την ένταση της ακτινοβολίας), ενώ πλέον οι ενδείξεις είναι ψηφιακές και αποτυπώνονται στην οθόνη της συσκευής.<sup>[3.2]</sup>

Ορισμένοι μετρητές Geiger Muller χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ακτινών  $\gamma$ , αν και η ευαισθησία τους μπορεί να μην είναι πολύ καλή για υψηλής ενέργειας ακτίνες  $\gamma$  σε σχέση με άλλες συσκευές μέτρησης, γιατί η αντιδραστικότητα του αερίου είναι συνήθως μικρή και επιτρέπει στο μεγαλύτερο μέρος των ακτινών  $\gamma$  με υψηλή ενέργεια να περνάει χωρίς να μπορεί να εντοπιστεί. Αν και υπάρχουν και μετρητές μεγαλύτερης ακρίβειας από τους GeigerMuller, αυτοί εξακολουθούν να είναι οι πιο διαδεδομένοι και οι περισσότερο χρησιμοποιούμενοι γενικής χρήσης μετρητές  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  ακτινοβολίας λόγω του μικρού τους κόστους και της μεγάλης αξιοπιστίας τους<sup>[3.4]</sup>.

Ο **Hans Geiger** παρουσίασε μια συσκευή το **1908** (που αργότερα θα ονομαζόταν προς τιμήν του μετρητής **Geiger Muller**) σε συνεργασία με τον **Ernest Rutherford**. Αυτός ο μετρητής μπορούσε να ανιχνεύσει μόνο ακτίνες  $\alpha$ . Το 1928 ο Geiger σε συνεργασία με έναν μαθητή του, τον **Walter Muller**) βελτίωσαν το μετρητή έτσι ώστε να μπορεί να εντοπίζει όλα τα είδη της ακτινοβολίας. Η σημερινή εκδοχή του μετρητή στην πραγματικότητα είναι ένας μετρητής αλογόνου που ανακαλύφθηκε το 1947 από τον SidbeyLiebson και ο λόγος που επικράτησε της παλαιάς μορφής του μετρητή είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του.

### Αρχή λειτουργίας

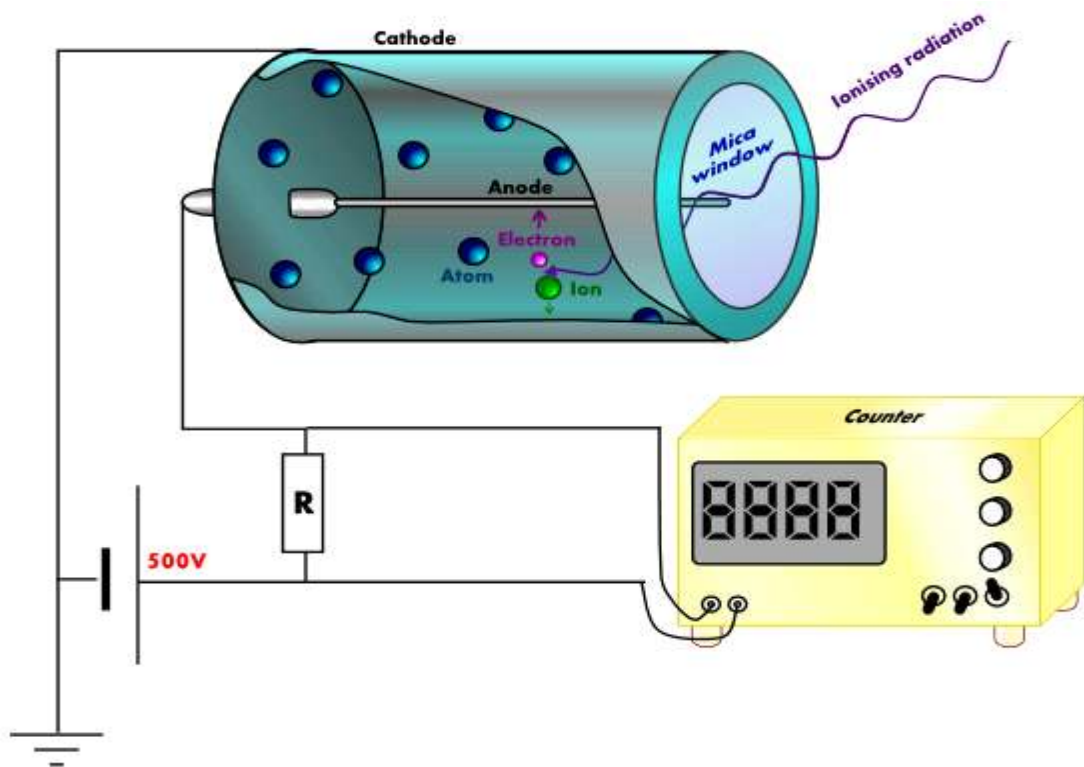
Ο ανιχνευτής Geiger- Muller αποτελείται από δύο μέρη, έναν σωλήνα Geigermeiler και ένα μέρος που βρίσκονται ηλεκτρονικές διατάξεις για επεξεργασία και εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Το στοιχείο που ανιχνεύει την ακτινοβολία εσωτερικά του σωλήνα αποτελείται συνήθως από αέρια όπως ήλιο(He),νέο(N),Αργο(Arg). Αυτά τα αέρια όταν έχουμε πτώση ακτινοβολίας η φωτονίων μέσα στον σωλήνα παράγουν ηλεκτρικό φορτίο. Ο σωλήνας Geigerέχει την ιδιότητα να ενισχύει τον κάθε ιοντισμό (μέσω του φαινομένου της χιονοστιβάδας) ώστε να παράγει ένα εύκολα μετρήσιμο μέγεθος φορτίου στην έξοδο του. Αυτό το φορτίο περνάει στα ηλεκτρονικά μέρη που κάνουν την επεξεργασία του σήματος που λαμβάνεται. Η μορφή του σήματος μπορεί να είναι είτε αναλογική είτε ψηφιακή.

### Σωλήνας GEIGER-MULLER

Ο σωλήνας Geiger Muller ( στη συνέχεια θα αναφέρεται σαν *σωλήνας GM*) είναι ο αισθητήρας που διαθέτει ο μετρητής GM. Ο σωλήνας GM είναι γεμάτος με ένα χαμηλής

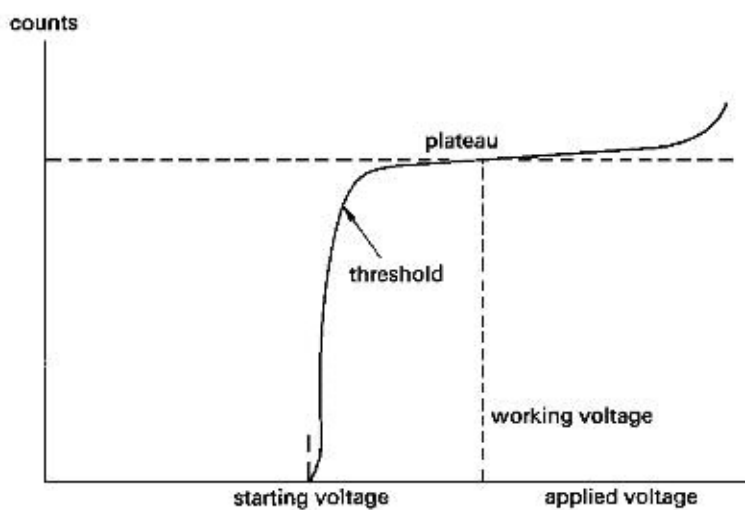
πίεσεως (~0,1 atm) αδρανές αέριο (συνήθως ήλιο, νέο ή αργό), σε κάποιες περιπτώσεις σε ένα απομονωμένο μείγμα, και περιέχει αέριο αλογόνο και ηλεκτρόδια, μεταξύ των οποίων υπάρχει τάση εκατοντάδων Volt χωρίς όμως να παρατηρείται ροή ρεύματος. Τα τοιχώματα του σωλήνα είναι είτε μεταλλικά, είτε υπενδεδυμένα με γραφίτη έτσι ώστε να διαμορφώνουν την κάθοδο, ενώ η άνοδος είναι ένα καλώδιο που περνάει από το κέντρο του σωλήνα.<sup>[3,6]</sup>

Όταν διέρχεται από το σωλήνα ιοντίζουσα ακτινοβολία, κάποια μόρια του αερίου ιονίζονται, δημιουργώντας θετικά φορτισμένα ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί από τα ηλεκτρόδια του σωλήνα επιταχύνει τα ιόντα προς την κάθοδο και τα ανιόντα προς την άνοδο. Τα ζεύγη ιόντων ηλεκτρονίων αποκτούν αρκετή ενέργεια έτσι ώστε να ιονίσουν και άλλα άτομα αερίου κατά τη μετακίνησή τους, δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο της χιονοστιβάδας. Αυτό οδηγεί σε ένα μικρό, έντονο παλμό ρεύματος ο οποίος διέρχεται από τα ηλεκτρόδια και παράγει ρεύμα το οποίο και μετράται. Η συνηθισμένη μορφή του σωλήνα είναι ένας. Αυτός ο τύπος ονομάζεται έτσι καθώς ο σωλήνας έχει ένα παράθυρο στο ένα άκρο του από το οποίο η ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί εύκολα να περάσει. Στο άλλο άκρο του υπάρχουν συνήθως οι ηλεκτρικές επαφές του. Υπάρχουν δύο είδη σωλήνων: αυτοί που στο παράθυρο έχουν γυαλί και αυτοί που στο παράθυρο έχουν μίκα. Οι σωλήνες που έχουν γυαλί στο παράθυρο δεν μπορούν να εντοπίσουν τις ακτίνες α καθώς αυτές δεν μπορούν να διαπεράσουν το γυαλί, αλλά είναι σαφώς φθηνότεροι και χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ακτινών β και ακτινών X. Οι σωλήνες με παράθυρο από μίκα μπορούν να εντοπίσουν ακτινοβολία α αλλά είναι πολύ εύθραυστοι. Οι περισσότεροι GM μετρητές εντοπίζουν ακτίνες γ και ακτίνες β με ενέργεια μεγαλύτερη των 2,5 MeV.<sup>[3,5]</sup>



**Εικόνα 3.13** Αρχή λειτουργίας ανιχνευτή, “Έχουμε τον σωλήνα Geiger ο οποίος εντοπίζει την ακτινοβολία και μέσω της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τα αέρια του σωλήνα παράγεται φορτίο το οποίο οδηγείται σε έναν μετρητή ο οποίος υπολογίζει τον αριθμό των αλληλεπιδράσεων και εμφανίζει τα αποτελέσματα στην οθόνη. Ο μετρητής τροφοδοτείται από μια πηγή υψηλής τάσης.

Η τυπική καμπύλη μέτρησης ενός σωλήνα GM παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα



**Εικόνα 3.14** Το κατώτατο όριο (*threshold*) δείχνει την ελάχιστη τάση (ελάχιστο ύψος παλμού) που μπορεί να μετρήσει ο σωλήνας. Η μικρή θετική κλίση του οριζοντίου τμήματος της καμπύλης οφείλεται στο ότι κατά την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης, η ευαισθησία του μετρητή αυξάνεται ελαφρώς. Η τάση λειτουργίας του μετρητή επιλέγεται σαν τη μέση τιμή του οριζοντίου τμήματος της καμπύλης έτσι ώστε ο ρυθμός μέτρησης να παραμένει περίπου σταθερός ακόμα και αν η τιμή της τάσης ποικίλει ελαφρώς<sup>[3.1]</sup>

### Μειονεκτήματα

Υπάρχουν δύο κύριοι περιορισμοί στον μετρητή Geiger. Επειδή ο παλμός εξόδου στον ανιχνευτή Geiger-Muller έχει πάντα το ίδιο μέγεθος, ανεξάρτητα από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ο σωλήνας δεν μπορεί να διακρίνει μεταξύ των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας. Ένας περαιτέρω περιορισμός είναι η ανικανότητα να μετρήσει υψηλά ποσοστά ακτινοβολίας λόγω του "νεκρού χρόνου" του σωλήνα. Αυτή είναι μια λιγότερο ευαίσθητη περίοδος μετά από κάθε ιονισμό του αερίου κατά τη διάρκεια της οποίας κάθε επιπρόσθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν θα μπορεί να μετρηθεί, έτσι ο ρυθμός μέτρησης είναι χαμηλότερος από τον πραγματικό. Τυπικά ο νεκρός χρόνος θα μειώσει τα αναφερόμενα ποσοστά μέτρησης σε 104 έως 105 κρούσεις ανά δευτερόλεπτο ανάλογα με τη χαρακτηριστική του σωλήνα που χρησιμοποιείται. Ενώ μερικοί μετρητές διαθέτουν κύκλωμα που μπορεί να αντισταθμίσει αυτό το μειονεκτημα, για να γίνουν ακριβείς μετρήσεις υψηλών ποσοστών ακτινοβολίας προτιμάται ο θάλαμος ιοντισμού (*ionization chambers*).<sup>[3.1]</sup>

## Εφαρμογές

Οι εφαρμογές για τον Geigerμετρητή εξαρτώνται αποκλειστικά από το σχεδιασμό του σωλήνα.

## Εντοπισμός σωματιδίων

Η πρώτη χρήση του μετρητή Geiger ήταν για τον εντοπισμό των ΑΒ σωματιδίων και το όργανο χρησιμοποιείται για τον ίδιο σκοπό ακόμα και σήμερα. Ο ανιχνευτής Geiger χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα ως όργανο κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους τούτης στιβαρότητας τους και την υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις κυρίως σε ακτινοβολίες β υψηλής ενέργειας. Ωστόσο για τον διαχωρισμό των ακτινοβολιών μεταξύ ΑΒ δεν χρησιμοποιείται ο Geigerμετρητής αλλά άλλου είδους μετρητές τύπου σπινθηρισμού (scintillation counters) και αναλογικοί (proportional) που έχουν μεγαλύτερο εύρος εντοπισμού.<sup>[3.1]</sup>



**Εικόνα 3.15** Αναλογικός μετρητής Geiger-Mueller για εντοπισμό  $\alpha, \beta, \gamma$  ακτινοβολίας είναι τύπου *pancake* προσωπικό δοσίμετρο και το αναλογικό του μέρος υποστηρίζει μετρήσεις όλων των τυπων της ακτινοβολίας



- Ανίχνευση νετρονίων

Ο G-M μετρητής μπορεί να ανιχνεύσει νετρόνια, με την χρήση αερίων στον σωλήνα όπως ηλίου( He) και με χρήση ενός πλαστικού ρυθμιστή να επιβραδύνει τα νετρόνια οπότε έχουμε ακτινοβολία α στον ανιχνευτή και έτσι με αυτό τον τρόπο μπορεί να μετρηθούν τα νετρόνια.

### Προσωπικά Δοσίμετρα

Όταν αναφερόμαστε σε μετρητές G-Μείναι ο πιο πολύς κόσμος θεωρεί ότι χρησιμοποιούνται ως προσωπικά δοσίμετρα και μόνο, Όπως είδαμε ο ανιχνευτής μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια διαφόρων τύπων ακτινοβολίας έχοντας μετρητικές διατάξεις και ηλεκτρονικά μέρη που ξεπερνάνε τον απλό χαρακτηρισμό τους ως φορητά δοσίμετρα. Παρόλα αυτά η χρήση τους παραμένει υψηλή σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχουν δυο σχεδιασμοί ένας είναι όταν το ηλεκτρονικό μέρος περιλαμβάνεται στην συσκευασία μαζί με τον ανιχνευτή και ο άλλος τρόπος είναι όταν έχουμε τον ανιχνευτή ξεχωριστά από το ηλεκτρονικό μέρος και ενώνονται με ένα μικρό καλώδιο μεταξύ τους.<sup>[3.1]</sup>



Εικόνα 3.16 Ανιχνευτής G-M σε χρήση για την μέτρηση β ακτινοβολίας από ραδιενεργό υλικό.

### ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ



#### **RADEX RD1503+(2015 model)(3.7).**

Ενας σύγχρονος ανιχνευτής GEIGER-Muller για απλή καθημερινή αλλά και επαγγελματική χρήση. Ανιχνεύει β αλλά και X ακτινοβολίες. Έχει κύκλο μετρησης κάθε 20 sec και όταν εντοπίζει μια ύπαρξη ακτινοβολίας(0.1 – 99.0  $\mu\text{Sv/h}$ ) μέσω ειδοποίησης (ηχητική ή δόνηση)

ειδοποιεί τον χρήστη. Είναι απλό στην χρήση, Και κοστίζει 230€<sup>[3,9]</sup>

### **3.2.3 ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ(Proportionalcounter)**

Λειτουργούν στην αναλογική περιοχή και είναι πιο ευαίσθητοι από τους θαλάμους ιοντισμού. Χρησιμοποιούνται στην φασματοσκοπία ακτίνων X και μαλακών ακτίνων γ, όπως και για την ανίχνευση ακτινοβολίας α και β. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι πρέπει να έχουν αέρια με συγκεκριμένες ιδιότητες. Χρησιμοποιούνται σε ιατρικά εργαστήρια και σε ερευνητικά εργαστήρια.<sup>[3,9]</sup>

#### **Αναλογικοί μετρητές ακτίνων X**

Οι αναλογικοί μετρητές ακτίνων X συμπληρώνονται με ένα ευγενές αέριο το οποίο μπορεί να απορροφάει τις ακτίνες X. Όταν ένα φωτόνιο απορροφηθεί από το άτομο του αερίου η εξαγόμενη ενέργεια απελευθερώνεται μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η ενέργεια του φωτοηλεκτρονίου είναι **άμεσα ανάλογη** της ενέργειας του φωτονίου της ακτίνας X.



**Εικόνα 3.17 Αναλογικός μετρητής φάσματος ακτίνων X από την εταιρεία [Centronic](#) (3.8).**

### **3.2.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα ανιχνευτών αερίου.**

**Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι κάθε ανιχνευτής αερίου χρησιμοποιείται για διαφορετικό σκοπό επίσης ο καθένας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του**

Ο **Ανιχνευτής θαλάμου ιοντισμού** είναι ένας απλός ακριβής μεγάλου εύρους ανιχνευτής που η ευαισθησία του εξαρτάται από το μέγεθος του θαλάμου επίσης δεν υποφέρει από νεκρούς χρόνους. Το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτεί πολύ υψηλές τάσεις τροφοδοσίας.

Ο **απαριθμητής G-Μείναι** είναι ένας φτηνός μετρητής, που δεν απαιτεί ενίσχυση του σήματος εξόδου για να μπορεί να μετρηθεί, το μειονέκτημα του είναι η μικρή διάρκεια ζωής.

Ο **Αναλογικός απαριθμητής** έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να διακρίνει το υψηλό και το χαμηλό LET(βλέπε κεφάλαιο 1), και έχει καλύτερη ευαισθησία από τον ανιχνευτή θαλάμου ιοντισμού.<sup>[3.2]</sup>

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3<sup>ου</sup>Κεφαλαίου**

**[3.1] Glenn F , Knoll *Radiation detection and measurement* ,3<sup>rd</sup>ed, Wiley,New York(1999).**

**[3.2]. Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry, Khalil Arshak Olga Korostynska,ArtechHouse,Norwood((2006)**

**[3.3]. Radiation dosimetry : Instrumentation and methods ,Shani, Gad. 2nd ed.CRC Press,(2001**

## **ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ**

**[3.4]www.wilkipedia.org**

**[3.5] <http://www.nrc.gov> (united states nuclear regulatory**

commission)

[3.6] [WWW.LUDLUM.COM](http://WWW.LUDLUM.COM)

[3.7] [WWW.CENTRONIC.COM](http://WWW.CENTRONIC.COM)

[3.8] [www.ebay.com](http://www.ebay.com)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

**ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ**

## Περιεχόμενα 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

<b><u>4.1 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</u></b> .....	<b>69</b>
<b><u>4.2 Ανιχνευτές Ημιαγωγών</u></b> .....	<b>71</b>
<b><u>4.1.1 Αργη Λειτουργίας</u></b> .....	<b>71</b>
<b><u>4.2.2 Είδη Ανιχνευτών Ημιαγωγών</u></b> .....	<b>77</b>
<b><u>4.2.3 Χρήσεις –πλεονεκτήματα Ανιχνευτών ημιαγωγών</u></b> .....	<b>85</b>

## **4.1 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

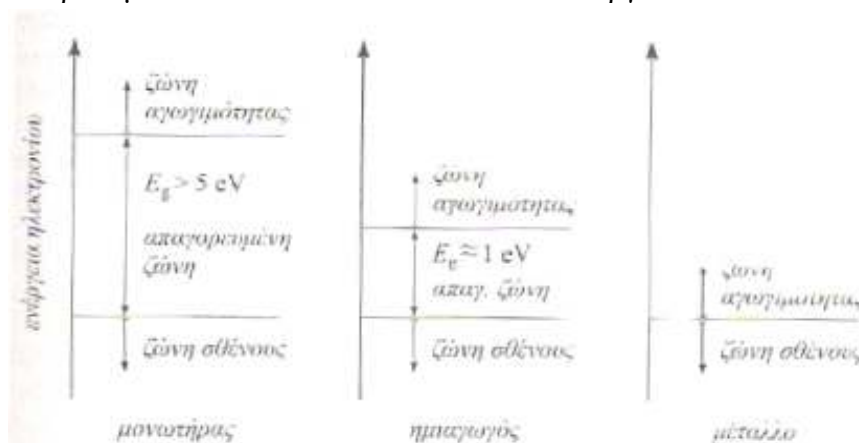
### **Στέρεα κατάσταση της ύλης**

Στα ελεύθερα άτομα, όπου οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι μεγάλες, όπως π.χ. στην αέρια κατάσταση της ύλης, τα ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν ενέργειες σε καλά διακριτές στάθμες. Στους κρυστάλλους τα άτομα βρίσκονται στο χώρο σε θέσεις συγκεκριμένες και οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι της τάξης του Angstrom ( $1\text{\AA}^{[4.1]}$ ), οπότε εξαιτίας των αμοιβαίων αλληλεπιδράσεων των ατόμων κάθε ενεργειακή στάθμη διευρύνεται, με αποτέλεσμα, αντί της διακριτής επιτρεπτής ενεργειακής στάθμης, να υπάρχει επιτρεπτή ενεργειακή ζώνη του ηλεκτρονίου. Γενικά υπάρχουν επικαλύψεις των ενεργειακών ζωνών και η ενέργεια οποιουδήποτε ηλεκτρονίου καθαρού υλικού, δηλαδή υλικού χωρίς προσμίξεις, περιορίζεται σε αυτές τις ζώνες. Υπάρχουν στερεά όπου οι επιτρεπόμενες ενεργειακές ζώνες διαχωρίζονται από μη-επιτρεπόμενες ενεργειακές ζώνες. Τα ηλεκτρόνια των καθαρών υλικών δεν μπορούν να έχουν ενέργειες εντός των μη-

επιτρεπόμενων

ενεργειακών

ζωνών.



α.

**Σχήμα .4.1:** ζώνες σθένους και αγωγιμότητας σε μονωτήρες, ημιαγωγούς και μέταλλα όπου  $E_g$  είναι το εύρος της απαγορευμένης ζώνης<sup>[4.1]</sup>

### Ημιαγωγοί, μέταλλα και μονωτήρες

Η ζώνη σθένους αντιστοιχεί στις ενέργειες των ηλεκτρονίων σθένους. Αυτά είναι δεσμευμένα στις συγκεκριμένες θέσεις της κρυσταλλικής δομής. Η ζώνη αγωγιμότητας αντιστοιχεί στις ενέργειες των ηλεκτρονίων που είναι ελεύθερα να διακινηθούν διά της κρυσταλλικής δομής, εφόσον εφαρμοσθεί στο υλικό ηλεκτρικό πεδίο. Στους μονωτήρες και τους ημιαγωγούς οι ζώνες σθένους και αγωγιμότητας διαχωρίζονται από την απαγορευμένη ζώνη, η οποία για μεν τους μονωτήρες έχει εύρος  $E_g$  συνήθως μεγαλύτερο από 5 eV, ενώ στους ημιαγωγούς το  $E_g$  είναι πολύ μικρότερο, της τάξης του 1 eV. Στους μονωτήρες και τους ημιαγωγούς ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι ακριβώς επαρκής για να συμπληρωθούν όλες οι διαθέσιμες θέσεις στη ζώνη σθένους. Έτσι στη θερμοκρασία του απολύτου μηδενός η ζώνη σθένους είναι απολύτως γεμάτη και η ζώνη αγωγιμότητας απολύτως κενή. Ως εκ τούτου μονωτήρες και ημιαγωγοί έχουν στην κατάσταση αυτή μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στα μέταλλα η ζώνη σθένους δεν είναι απολύτως γεμάτη και τα ηλεκτρόνια μπορούν ελεύθερα να μετακινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια σθένους μοιράζονται ένα μέρος της θερμικής κίνησης των ατόμων του κρυστάλλου. Είναι έτσι δυνατόν κάποια ηλεκτρόνια σθένους να αποκτήσουν ικανή θερμική ενέργεια μεγαλύτερη από το εύρος  $E_g$  της απαγορευμένης ζώνης και να βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν το ηλεκτρόνιο να απομακρυνθεί από τη συγκεκριμένη θέση στην κρυσταλλική δομή και να είναι διαθέσιμο για διακίνηση στον κρύσταλλο. Απομακρυνόμενο από τη συγκεκριμένη θέση αφήνει



στη θέση αυτή κενό ενός ηλεκτρονίου, το οποίο ονομάζεται οπή. Υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου το ηλεκτρόνιο αυτό κινείται και η οπή, αντιπροσωπεύοντας θετικό ηλεκτρικό φορτίο, κινείται στην αντίθετη του ηλεκτρονίου κατεύθυνση, υπό την έννοια ότι ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικό της οπής συμπληρώνει την αρχική οπή αφήνοντας οπή στη θέση του κ.ο.κ.<sup>[4.1]</sup> Το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής στους ημιαγωγούς είναι περίπου ανάλογο του ζεύγους ιόντων στα αέρια. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών συμβάλουν έτσι στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Η ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα θερμικού σχηματισμού ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής δίνεται από τη σχέση:

#### **(Σχέση 4.1)**

*όπου  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του κρυστάλλου,  $k$  η σταθερά του Boltzmann και  $C$  σταθερά αναλογίας χαρακτηριστική του υλικού.*

Στους μονωτήρες, όπου το εύρος  $E_g$  είναι μεγάλο, η πιθανότητα σχηματισμού ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής από θερμική διέγερση είναι μικρή. Αντίθετα, στους ημιαγωγούς, όπου το εύρος  $E_g$  είναι μικρό, η θερμική διέγερση μπορεί να προκαλέσει αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.<sup>[4.1]</sup>

### **4.2 Ανιχνευτές Ημιαγωγών**

Ένας ανιχνευτής ημιαγωγών είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί έναν ημιαγωγό (συνήθως πυρίτιο ή γερμάνιο) για την ανίχνευση διερχόμενων φορτισμένων σωματιδίων ή την απορρόφηση των φωτονίων<sup>[4.3]</sup>. Στον τομέα της φυσικής των σωματιδίων, οι ανιχνευτές είναι συνήθως γνωστοί ως ανιχνευτές πυριτίου. Όταν οι ευαίσθητες δομές τους βασίζονται σε μία δίοδο, καλούνται ανιχνευτές φωτός ημιαγωγών. Όταν περιέχουν πολλές διόδους με διαφορετικές λειτουργίες, χρησιμοποιείται ο πιο γενικός όρος ανιχνευτής ημιαγωγών. Οι ανιχνευτές ημιαγωγών έχουν βρει ευρεία εφαρμογή κατά τις τελευταίες δεκαετίες, ιδίως για την ακτινοβολία γάμμα και τη φασματοσκοπία ακτινών  $X$  αλλά και ως ανιχνευτές σωματιδίων.<sup>[4.3]</sup>



**Εικόνα 4.2** Ανιχνευτής Ge υψηλής καθαρότητας (πηγη :Wikipedia)

### ***Ιστορική Ανάδρομη***

Αρχικά , οι ανιχνευτές ημιαγωγών θεωρήθηκαν ως Θάλαμοι ιοντισμού στερεάς κατάστασης .Οι Μετρητές αγωγιμότητας(εξαιρετικά μονωτικοί κρύσταλλοι διαμαντιών ) ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση και, ενδεχομένως, την φασματοσκοπία της ιοντίζουσας ακτινοβολίας . ωστόσο, Αυτού του είδους οι κρύσταλλοι γρήγορα απορρίφθηκαν λόγω του χαρακτηριστικού της κακής συλλογής φορτίου Χαρακτηριστικό που προκύπτει από τα κέντρα βαθιά παγίδευσης στην ζώνη χάσματος τους .Με την ιδιαίτερα επιτυχή του ανάπτυξη του πυριτίου ( Si) και του γερμανίου ( Ge ) ως καθαρά κρύσταλλα για τις τεχνολογίες των ηλεκτρονικών , η ιδέα για μέτρηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας από καθαρά κρύσταλλα διαμαντιών εγκαταλείφθηκε<sup>[4.3]</sup> .

Το Πυρίτιο και το γερμάνιο ως ανιχνευτές ιοντίζουσας ακτινοβολίας αναπτύχθηκαν από τον σχηματισμό ανορθωτικών επαφών(διοδοι,τρανζιστορ)με αυτά τα υλικά . Η χρήση των ανιχνευτών διόδου πυριτίου για την δοσιμετρία υψηλής ενέργειας φωτονίων και δέσμες ηλεκτρονίων , κυρίως στο πεδίο της θεραπείας με ακτινοβολία , άρχισε από τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Ένας ανιχνευτής ημιαγωγών ήταν μια μεγάλη διόδος πυριτίου ή γερμανίου διόδου τύπουP-I ή P-I-N που λειτουργούν σε ανάστροφη πόλωση.

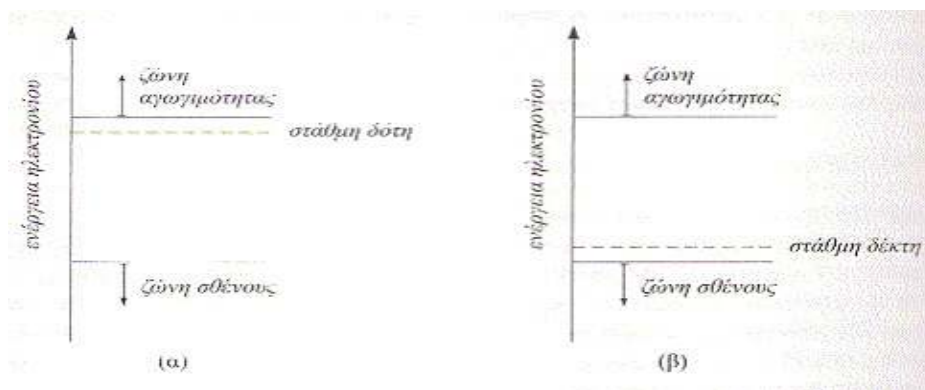
### **4.1.1 Αρχη Λειτουργίας**

Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές κατασκευάζονται συνήθως από πυρίτιο (Si) ή γερμάνιο (Ge). Οι απολύτως καθαροί ημιαγωγοί, αυτοί δηλαδή χωρίς την παραμικρή πρόσμιξη, ονομάζονται **ενδογενείς (intrinsic) ημιαγωγοί**. Σε αυτούς όλα τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας προκύπτουν από θερμική διέγερση, εφόσον δεν έχουν παραχθεί από αλληλεπίδραση με ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Εφόσον κάθε ηλεκτρόνιο που διεγείρεται στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει πίσω του μία θετική οπή, έπεται ότι στους ενδογενείς ημιαγωγούς η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι ίση με τη πυκνότητα των οπών. Οι πυκνότητες αυτές σε θερμοκρασία δωματίου είναι  $2,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  στο γερμάνιο και  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  στο πυρίτιο. Στην ηλεκτρική αγωγιμότητα συμβάλλουν τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές. Είναι αδύνατον να παρασκευασθούν ενδογενείς ημιαγωγοί. Τα πραγματικά υλικά περιέχουν πάντα πολύ μικρές ποσότητες προσμίξεων, που καθορίζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών. Τα ουδέτερα άτομα του Ge και του Si έχουν 4 ηλεκτρόνια σθένους και στη συνήθη κρυσταλλική δομή κάθε άτομο, π.χ. Ge, διαμορφώνει δεσμούς με τα 4 Πλησιέστερα προς αυτό άτομα Ge.

Τότε σε κάποιες θέσεις της κρυσταλλικής δομής θα υπάρχουν άτομα του πεντασθενούς P, αντί ατόμων του τετρασθενούς Ge. Από τα 5 ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, τα 4 σχηματίζουν δεσμό με ηλεκτρόνια σθένους 4 γειτονικών ατόμων Ge και θα περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου του P το οποίο θα είναι ασθενώς συνδεδεμένο με τη θέση της κρυσταλλικής δομής που βρίσκεται το άτομο του P. Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν επιτρεπόμενη ενέργεια πολύ κοντά στη στάθμη αγωγιμότητας (σχήμα 4,3) και με πολύ μικρή ενέργεια μπορούν να διεγερθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Προσμίξεις αυτού του είδους ονομάζονται **προσμίξεις - δότες**, διότι συνεισφέρουν εύκολα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, δεδομένου ότι η ενεργειακή απόσταση της στάθμης του ηλεκτρονίου του δότη από τη ζώνη αγωγιμότητας είναι αρκετά μικρή (σχήμα 4.3.α), ώστε μεγάλο ποσοστό των δοτών να δώσουν με θερμική διέγερση ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Κάθε τέτοιο ηλεκτρόνιο αφήνει πίσω του στη θέση του ατόμου-πρόσμιξης θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό το φορτίο ευρισκόμενο στο άτομο-πρόσμιξη που συνιστά μέρος της κρυσταλλικής δομής είναι μη-μετακινήσιμο, δεν μπορεί να μετατοπιστεί υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, δεδομένου ότι οι 4 δεσμοί των ηλεκτρονίων του ατόμου- πρόσμιξης με τα 4 γειτονικά άτομα είναι πλήρεις και δεν χωράει εκεί και άλλο ηλεκτρόνιο. Κατά συνέπεια τα θετικά ηλεκτρικά φορτία στις θέσεις των ατόμων πρόσμιξης δεν συνιστούν οπές, είναι δεσμευμένα στην κρυσταλλική δομή και δεν μπορούν να διακινηθούν, δεν συνεισφέρουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου<sup>[4.1]</sup>. Ο κρύσταλλος παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερος, αφού κάθε ηλεκτρόνιο που μεταβαίνει (στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει ένα άτομο με ίσο και αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Δεδομένου ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η πυκνότητα των προσμίξεων και κατά συνέπεια η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας που συνεισφέρουν είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα ηλεκτρονίων αγωγιμότητας που διατίθενται από το ενδογενές υλικό<sup>[4.1]</sup>, έπεται ότι:

α) ο αριθμός των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας καθορίζεται πλήρως από τη συμβολή των δοτών και

β) η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα των οπών, δεδομένου ότι οπές αφήνουν μόνο τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του ενδογενούς υλικού και αυτά των δοτών.

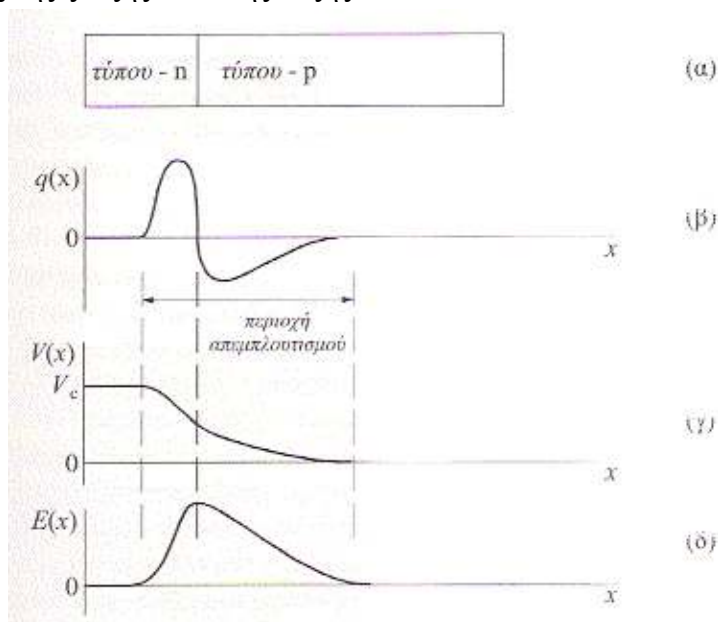


**Εικόνα 4.3** Ενερειακές στάθμες (α) δότη και (β) δέκτη.

δυνάμενα να διακινηθούν, θετικά ηλεκτρικά φορτία στις θέσεις των ιοντισμένων δοτών. Ενώ προηγουμένως αυτά τα θετικά φορτία εξισορροπούσαν από τα αρνητικά φορτία των αντιστοιχών ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, μετά την έξοδο των τελευταίων από τον κρύσταλλο τύπου-n δημιουργείται στον κρύσταλλο τύπου-n, αριστερά της επιφάνειας ζεύξης, στατικό, μη μετακινήσιμο θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στον κρύσταλλο τύπου-p συνδυάζονται γρήγορα με οπές, συλλαμβάνονται από κάποιες από τις κενές θέσεις σθένους στον κρύσταλλο τύπου-p. Παρόμοια, στην επιφάνεια ζεύξης υπάρχει κλίση  $dp/dx$  της πυκνότητας  $p$  των οπών, τώρα από τα δεξιά προς τα αριστερά, δεδομένου ότι οπές υπάρχουν πρακτικά μόνο στον κρύσταλλο τύπου-p. Κατά συνέπεια θα υπάρχει διάχυση οπών από τον κρύσταλλο τύπου-p προς τον κρύσταλλο τύπου-n. Κάθε οπή που φεύγει έξω από τον κρύσταλλο τύπου-p αφήνει πίσω της μία θέση δέκτη που έχει συλλάβει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο και κατά συνέπεια συνιστά ένα δεσμευμένο, δηλαδή μη μετακινήσιμο, αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Έτσι ο συνδυασμός διάχυσης ηλεκτρονίων και οπών αναπτύσσει θετικό φορτίο χώρου στην πλευρά-n αριστερά της επιφάνειας της ζεύξης και αρνητικό φορτίο χώρου στην πλευρά-p δεξιά της επιφάνειας της ζεύξης. Αυτά τα φορτία χώρου αντιτίθενται στην περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων και οπών και τελικά αποκαθίσταται ισορροπία, ευσταθής κατάσταση φορτίου  $q(x)$  στο χώρο, περίπου της μορφής του σχήματος 4.2.β. ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Υπάρχει δηλαδή στην επιφάνεια αυτή μεγάλη κλίση  $dn/dx$ , από τα αριστερά προς τα δεξιά, της πυκνότητας  $n$  των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Κατά συνέπεια θα υπάρξει διάχυση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από τον κρύσταλλο τύπου-n προς τον

κρύσταλλο τύπου-p. [4.1]

Η περιοχή στην οποία υπάρχουν αυτά τα φορτία χώρου ονομάζεται **περιοχή απεμπλουτισμού (depletion region)**[4.1], διότι σε αυτήν οι πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών είναι εξαιρετικά μικρές. Το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται από τα φορτία χώρου της περιοχής απεμπλουτισμού ωθεί οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας που εμφανίζεται εκεί προς τον κρύσταλλο τύπου-n και οποιαδήποτε οπή προς τον κρύσταλλο τύπου-p, Έτσι στην περιοχή απεμπλουτισμού εξαφανίζονται, πρακτικά δεν υπάρχουν, φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Τα μόνα φορτία που υπάρχουν στην περιοχή απεμπλουτισμού είναι τα αμετακίνητα φορτία χώρου. Δεδομένου ότι αυτά δεν συμβάλλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, η περιοχή απεμπλουτισμού έχει μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε σχέση με τις γειτονικές της περιοχές. Το δυναμικό  $V(x)$  και η ένταση  $E(x)$  του ηλεκτρικού πεδίου είναι περίπου της μορφής των σχημάτων 4.5.γ και 4.5.δ αντίστοιχα. Το δυναμικό  $V_c$  της επαφής της ζεύξης είναι της τάξης του 1 Volt.

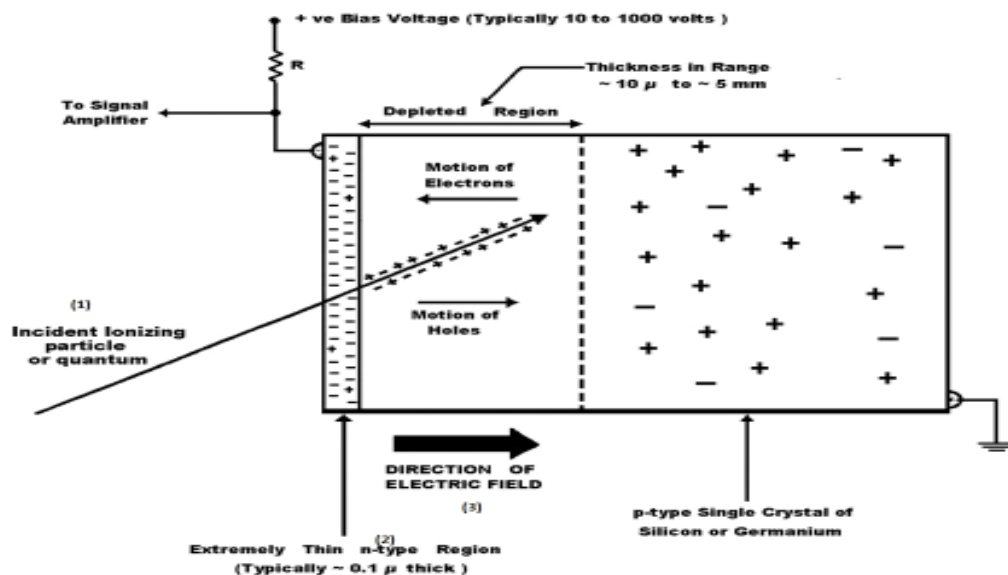


Εικόνα 4.4 (α)ζεύξη n-p (β)δεσμευμένα ηλεκτρικά φορτία  $q(x)$  (γ)ηλεκτρικό δυναμικό  $V(x)$  και (δ)ένταση του ηλ. πεδίου

Εφόσον ιοντίζουν σωματίδιο αλληλεπιδράσει με το υλικό εντός της απεμπλουτισμένης περιοχής, θα παραχθούν ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών, τα οποία θα ωθηθούν από το ηλεκτρικό πεδίο έξω από την απεμπλουτισμένης περιοχή, οπότε η κίνησή τους συνιστά ηλεκτρικό σήμα. Α εγγενές δυναμικό  $V_c = 1 \text{ Volt}$  είναι ανεπαρκές για να προκληθεί γρήγορη κίνηση των φορτίων, οπότε φορτία μπορούν εύκολα να χαθούν με επανασύνδεση

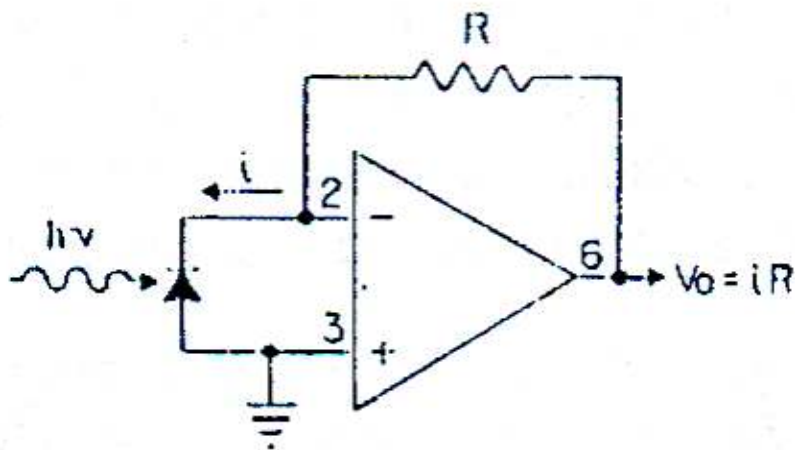
ηλεκτρονίων και οπών, με αποτέλεσμα το συλλεγόμενο ηλεκτρικό φορτίο από την αλληλεπίδραση του ιοντίζοντος σωματιδίου να μην επαρκεί για τη διάκρισή του από το υπόβαθρο, που π.χ. μπορεί να προέρχεται από θερμική διέγερση. Ως εκ τούτου εφαρμόζεται στη ζεύξη αυτό που ονομάζεται **αντίστροφη πόλωση (reverse bias)**, με την έννοια ότι το p-άκρο της ζεύξης καθίσταται αρνητικό σε σχέση με το n-άκρο, η δε εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες ως μερικές χιλιάδες Volt. Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων - οπών από αλληλεπίδραση ιοντίζοντος σωματιδίου έξω από τηναπεμπλουτισμένη περιοχή δεν θα δώσει σήμα, διότι (σχήμα 4.4.δ) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εκεί είναι μηδενική και τα ηλεκτρόνια-οπές θα επανασυνδεθούν, Είναι λοιπόν προφανές ότι είναι επιθυμητή η αύξηση του όγκου της απεμπλουτισμένης περιοχής. [4.1]

Πολλοί ανιχνευτές λειτουργούν με τάσεις αντίστροφης πόλωσης τόσο μεγάλες, ώστε η περιοχή απεμπλουτισμού εκτείνεται σε ολόκληρο τον όγκο του κρυστάλλου, οπότε ο ανιχνευτής ονομάζεται πλήρως απεμπλουτισμένος, Βεβαίως αν η τάση αυτή υπερβεί κάποια τιμή, δημιουργείται κατάρρευση της διόδου και διέλευση μεγάλων ρευμάτων, συχνά με καταστροφικά για τον ανιχνευτή αποτελέσματα.



*Εικόνα 4.5 Σχηματική Αναπαράσταση της λειτουργίας ενός Ανιχνευτή Ημιαγωγού.*

Έχουμε μια ακτινοβολία η οποία εισέρχεται στον ανιχνευτή(1)η ακτινοβολία παράγει ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές που κινούνται αντίθετα στην εμπλουτισμένη περιέχουμε την επίδραση του ηλ.πεδίου έχουμε κίνηση ηλεκτρονίων προς την βαθμίδα μέτρησης οπού με ένα ενισχυτή μπορούμε να πάρουμε μετρήσιμο σήμα στην έξοδο<sup>[4.2]</sup>.



**Εικόνα 4.6**Κύκλωμα μέτρησης (Η τάση  $V_o$  είναι ανάλογη του  $I$ , άρα του ρυθμού δόσης)

#### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

##### **Μέση ενέργεια ανά ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών (w-value)**

Η θεμελιώδης πληροφορία που σχετίζεται με την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός ημιαγωγού ανιχνευτή και ακτινοβολίας περιέχεται στα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται. Ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών διέπεται από το μέσο όρο της ενέργειας που δαπανάται από τα φορτισμένα σωματίδια ώστε να παράγουν ένα ενιαίο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Η ποσότητα αυτή είναι πολύ μεγαλύτερο από το διάκενο ζώνης (bandgap), όπως δείχνεται στον πίνακα 4.1 (1)

	Bandgap		Energy per electron-hole
	300K	0K	300K 77K
Si	1.11	1.16	3.62 3.76
Ge	0.66		2.96

Πίνακας 4.1 Τιμές μέσης ενέργειας για διάφορους τύπους Ημιαγωγών

Είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από την ενέργεια όσο και τον τύπο της ακτινοβολίας, γεγονός που απλοποιεί την εκτίμηση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών, εάν η ενέργεια που διατίθεται από την ακτινοβολία είναι διαθέσιμη. Η ενέργεια ανά ζεύγος είναι ~3eV, το οποίο είναι μικρότερο από τις αντίστοιχες τιμές (W-τιμές) των ανιχνευτών αερίου κατά έναν παράγοντα 1/10.

Τα επίπεδα εμπλουτισμού (doping) σε ημιαγωγούς p- ή n- τύπου είναι συνήθως χαμηλά και η ακτινοβολία αλληλεπίδρασης με αυτά τα στοιχεία πρόσμιξης μπορεί να αγνοηθεί. Ως εκ τούτου, ημιαγωγοί p-τύπου ή n-τύπου πυριτίου ίσου πάχους θα έχουν την ίδια αλληλεπίδραση με την ακτινοβολία που προσπίπτει.

#### **Παράγοντας FANO**

Πέραν του μέσου αριθμού, η διακύμανση του αριθμού των φορέων φορτίου είναι επίσης σημαντική για την ανάλυση της ενέργειας. Δεν είναι ασύνηθες το γεγονός η πραγματική διακύμανση να αποκλίνει σημαντικά από την τιμή που αναμένεται εάν ο σχηματισμός των φορέων φορτίου διέπεται από την κατανομή Poisson. Ο συντελεστής Fano (4.2) ορίζεται ως

$$F = \text{παρατηρούμενη διακύμανση} / \text{απόκλιση από το μοντέλο Poisson (σχεση 4.2)}$$

### **4.2.2 Είδη Ανιχνευτών Ημιαγωγών**

#### **Ανιχνευτές διόδου Πυριτίου**

##### **Πυρίτιο (Silicon)**

Το πυρίτιο είναι χημικό στοιχείο, αμέταλλο. Στη φύση συναντάται με μορφή ενώσεων. Απομονώθηκε για πρώτη φορά από τον Μπερζέλιους το 1823 ως άμορφο. Το 1854 ο Σάιντ Κλέρ Ντεβίλ πέτυχε την παρασκευή του κρυσταλλικού πυριτίου, το

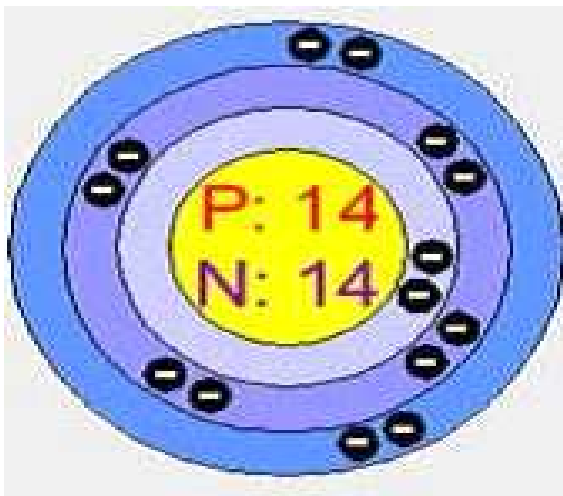


όποιον βρίσκεται στη φύση ενωμένο πάντα με το οξυγόνο (διοξείδιο) με την άμμο της θάλασσας και τον χαλαζία. Μετά το οξυγόνο, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο υλικό στη Γή. Το κρυσταλλικό πυρίτιο εμφανίζεται με μορφή κανονικών οκτάεδρων, είναι γκρι και παρουσιάζει μεταλλική λάμψη. Το πυρίτιο, όπως και το γερμάνιο, είναι ημιαγωγό υλικό, αλλά όταν του αυξήσουμε την θερμοκρασία αυξάνεται και η αγωγιμότητά του. Ο πίνακας δείχνει, ότι το πυρίτιο είναι τετρασθενές με ατομικό αριθμό 14. Τα ηλεκτρόνια του ατόμου του πυριτίου βρίσκονται κατανεμημένα ως εξής:

K: 2

L: 8

M: 4



**Εικόνα 4.7:** Δομή Πυριτίου (Si)

Ορισμένα προβλήματα εξευγενισμού δεν επέτρεψαν τη χρήση του πυριτίου τις πρώτες μέρες των ημιαγωγών. Αφού λύθηκαν αυτά τα προβλήματα, τα πλεονεκτήματα του πυριτίου το έκαναν αμέσως τον ημιαγωγό επιλογής. Χωρίς το πυρίτιο, τα μοντέρνα ηλεκτρονικά, οι επικοινωνίες και οι υπολογιστές δεν θα υπήρχαν.

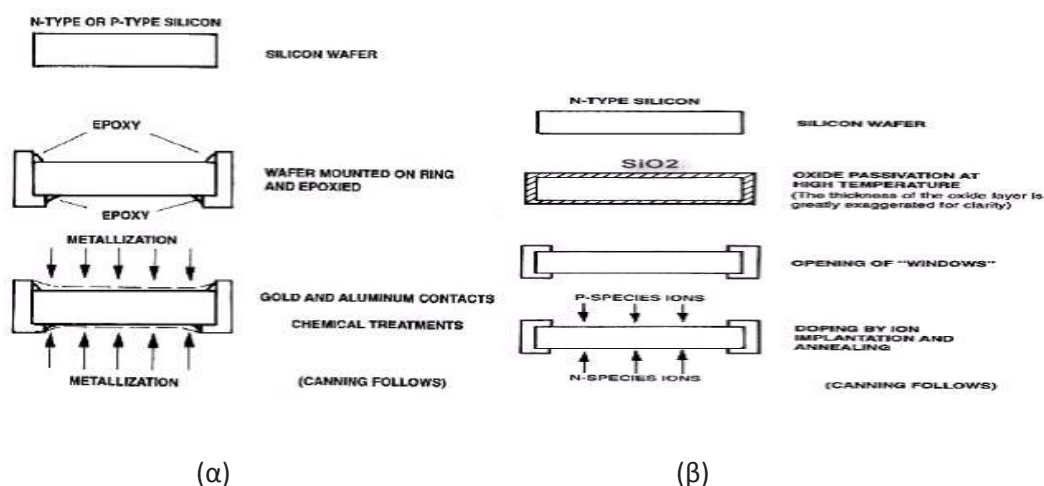
### ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Οι περισσότεροι ανιχνευτές πυριτίου λειτουργούν, κατ' αρχήν, από τον εμπλουτισμό μιας στενής (συνήθως γύρω στα 100  $\mu\text{m}$ ) λωρίδας πυριτίου για να τους μετατρέψει σε διόδους, οι οποίες στη συνέχεια πολώνονται αντίστροφα. Όταν τα φορτισμένα σωματίδια περνούν μέσα από αυτές τις λωρίδες, προκαλούν μικρά ρεύματα ιονισμού που μπορεί να

ανιχνευθούν και να μετρηθούν. Παρατάσσοντας χιλιάδες από αυτούς τους ανιχνευτές γύρω από ένα σημείο σύγκρουσης σε έναν επιταχυντή σωματιδίων μπορεί να δοθεί μια ακριβή εικόνα του για τα μονοπάτια που ακολουθούν τα λαμβανόμενα σωματίδια<sup>[4.3]</sup>.

Υπάρχουν δύο γνωστές μέθοδοι για την κατασκευή ανιχνευτών διόδου πυριτίου: εμφύτευση ιόντων και τεχνολογίες επιφανειακής φραγής. Οι δύο διαδικασίες είναι συμπληρωματικές ότι κάθε τεχνική είναι καλύτερη για την κατασκευή ορισμένων τύπων ανιχνευτών. Το ΣΧ. 4.4 δείχνει απλοποιημένες αναπαραστάσεις των δύο διαδικασιών παραγωγής. Δεδομένου ότι η κύρια εφαρμογή του ανιχνευτή διόδου πυριτίου είναι η φασματοσκοπία σωματιδίων, ελαχιστοποιώντας το νεκρό στρώμαπάχους είναι η πιο σημαντική παράμετρος <sup>[4.3]</sup>

Στον τύπο φράγματος επιφάνειας, οι λεπτές μεταλλικές στρώσεις εξατμίζονται ως εμφυτεύματα σχετικά με την επιφάνεια του ημιαγωγού Si μετά από χημική χάραξη, ενώ τα ιόντα ακαθαρσία εμφυτεύονται από έναν επιταχυντή στην εμφύτευση ιόντων. Η επιφάνεια αδρανοποιείται με οξείδιο SiO<sub>2</sub> που κρατάει το ρεύμα διαρροής πολύ χαμηλότερο από ό, τι στους ανιχνευτές φραγμού επιφάνειας. Ο Σχηματισμός του p- τύπου στρώματος με εμφύτευση ιόντων δίνει επίσης μια πολύ λεπτή (μέχρι ~ 34 nm) και ομοιόμορφο νεκρό στρώμα <sup>[4.5]</sup>. Λόγω της σχετικά μικρής ζώνης χάσματος του Si, οι ανιχνευτές διόδου πυριτίου μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασία δωματίου(25<sup>ο</sup>).



**Σχήμα 4.8** Απλοποιημένα διαγράμματα του φράγματος επιφάνειας (α) και των διαδικασιών εμφύτευσης ιόντων (β)

Οι Ανιχνευτές πυριτίου έχουν πολύ υψηλότερη ανάλυση στον εντοπισμό

φορτισμένων σωματίδια από τις παλαιότερες τεχνολογίες, όπως οι θάλαμοι νέφωσης (cloudchambers) ή θαλάμους σύρματος(wire chambers). Το μειονέκτημα είναι ότι οι ανιχνευτές πυριτίου είναι πολύ πιο ακριβοί από ό,τι αυτές τις παλαιότερες τεχνολογίες και απαιτούν εξελιγμένο τρόπο ψύξης για τη μείωση των ρευμάτων διαρροής (πηγή θορύβου). Μπορούν επίσης να υποστούν υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου από την χρήση της ακτινοβολίας

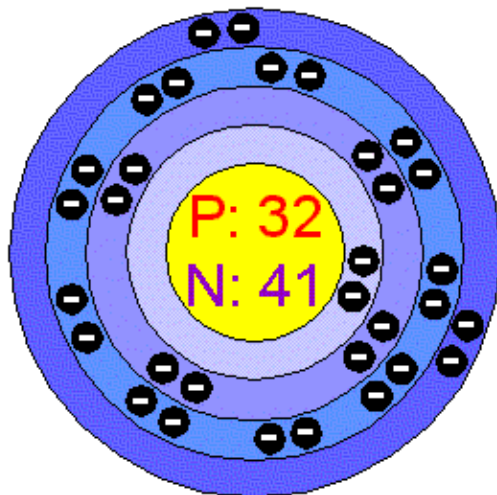
## **Ανιχνευτής γερμανίου**

### **ΓΕΡΜΑΝΙΟ(Ge)**

Το γερμάνιο είναι χημικό στοιχείο. Ανακαλύφθηκε από τον Wickler το 1886 Στη Γερμανία. Αρχικά, για την παραγωγή του Γερμανίου χρησιμοποιούταν ένα Ορυκτό συγγενές του αργύρου. Αργότερα, ανακαλύφθηκε στη Νότια Αμερική άλλο ορυκτό, συγγενές του αργύρου, που το ονόμασαν γερμανική. Ο γερμανίτης περιέχει 6% γερμάνιο.<sup>[4.1]</sup>

Το καθαρό γερμάνιο είναι υλικό σκληρό, εύθραυστο και έχει αγωγιμότητα 10 φορές μικρότερη της αγωγιμότητας του χαλκού. Το άτομο του γερμανίου, όπως φαίνεται στον πίνακα των χημικών στοιχείων, περιέχει 32 ηλεκτρόνια, τα οποία κατανέμονται στις στιβάδες: K: 2 L: 8 M:18 N:4

Στην εξωτερική στιβάδα έχει 4 ηλεκτρόνια, τα οποία καθορίζουν το σθένος του στοιχείου. Εξαιτίας των 4 ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας, το γερμάνιο λέγεται τετρασθενές, όπως και το πυρίτιο, ο μόλυβδος, ο κασσίτερος και ο άνθρακας. Από τα τετρασθενή στοιχεία, ο μόλυβδος και ο κασσίτερος είναι αγωγοί, γιατί τα ηλεκτρόνια σθένους τους βρίσκονται μακριά του πυρήνα και ελευθερώνονται ακόμη και με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, Αντιθέτως ο άνθρακας είναι μονωτικό, γιατί τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πιο κοντά του πυρήνα και γι' αυτό, έλκονται δυνατά και δεν γίνεται να κινηθούν ελεύθερα



**Εικόνα 4.9:** Δομή Γερμανίου (Ge)

Το γερμάνιο και το πυρίτιο δεν συγκρατούν τα ηλεκτρόνια σθένους ούτε πολύ Ισχυρά ούτε πολύ χαλαρά, γι' αυτό είναι και οι καλύτεροι ημιαγωγοί στην φύση. Για να χρησιμοποιηθεί το γερμάνιο στην κατασκευή των τρανζίστορ πρέπει να καθαριστεί απ' όλες τις ξένες ουσίες. Η περιεκτικότητα σε ξένα άτομα δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερη τού 1 ατόμου ανά 1 τρισεκατομμύριο άτομα γερμανίου. Το γερμάνιο παρουσιάζεται σε ορισμένες θερμοκρασίες, σαν στερεόκρυσταλλικό σώμα. (Κρύσταλλος είναι το σώμα, του οποίου τα άτομα σχηματίζουν κατά ομάδες κανονικά γεωμετρικά σχήματα και αποτελούν ένα δίκτυο σε όλη την έκταση της ύλης του στοιχείου. Το δίκτυο αυτό λέγεται κρυσταλλικό πλέγμα).

Το γερμάνιο στις συνηθισμένες θερμοκρασίες θεωρείται ως ημιαγωγός. Αλλάσε θερμοκρασίες πάνω από 100°C, ή αγωγιμότητα αυτού αυξάνει ,το κρυσταλλικόπλέγμα (χημικοί δεσμοί ) καταστρέφεται και το γερμάνιο μετατρέπεται, σε καλό αγωγό.

Γι' αυτό το λόγο η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να καταστρέψει ένα Transistor. Τα στοιχεία έχουν την τάση να συμπληρώσουν την εξωτερική στιβάδα με 8ηλεκτρόνια. Κάθε άτομο γερμανίου παίρνει από κάθε διπλανό του άτομο ένα ηλεκτρόνιο και σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς Όταν όλα τα άτομα του γερμανίου σχηματίσουν δεσμούς τότε δημιουργείται το κρυσταλλικό του πλέγμα. Ο τρόπος που τακτοποιούνται τα άτομα του κρυστάλλου του γερμανίου είναι οι θετικοί πυρήνες βρίσκονται στο κέντρο και τα ηλεκτρόνια ενωμένα σε ζεύγη σχηματίζουν τους δεσμούς

Οι ανιχνευτές γερμανίου χρησιμοποιούνται κυρίως για τη φασματοσκοπία ακτινοβολίας γ στην πυρηνική φυσική . Ενώ οι ανιχνευτές πυριτίου δεν μπορούν να είναι παχύτεροι από μερικά χιλιοστά , το γερμάνιο μπορεί να έχει ένα , ευαίσθητο πάχος εκατοστών , και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως ένα σύνολο απορρόφησης για ακτίνες γ μέχρι μερικά MeV . Ανιχνευτές κατασκευασμένοι από τέτοιο υπερκαθαρό γερμάνιο

ονομάζονταν ενδογενείς (intrinsic) ανιχνευτές γερμανίου ή ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HighPurityGermanium, HPGe). Τέτοιοι ανιχνευτές είναι διαθέσιμοι από τις αρχές της δεκαετίας του '80 και είναι πλέον οι μοναδικοί που χρησιμοποιούνται για φασματομετρία υψηλής διακριτικής ικανότητας ακτινοβολιών με μεγάλη εμβέλεια, όπως η ακτινοβολία  $\gamma$ . Λειτουργούν ως πλήρως απεμπλουτισμένοι ανιχνευτές, με τυπικές τάσεις 3 ως 5 kV. Εξαιτίας του μικρού εύρους της απαγορευμένης ζώνης ( $E_g = 0,7\text{eV}$ ) είναι αδύνατη η λειτουργία του ανιχνευτή σε θερμοκρασία δωματίου, διότι το ρεύμα που προκύπτει από θερμική διέγερση είναι μεγάλο, με αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου σήματος προς θόρυβο. Ως εκ τούτου λειτουργούν στη θερμοκρασία [4.3].

Όταν οι ανιχνευτές γερμανίου αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά, ήταν διαθέσιμοι μόνο πολύ μικροί κρύσταλλοι. Η χαμηλή απόδοση ήταν το αποτέλεσμα και η αποτελεσματικότητα του ανιχνευτή γερμανίου εξακολουθεί να αναφέρεται συχνά σε σχετικούς όρους, σε ένα "πρότυπο" 3 "x 3" NaI (Tl) ανιχνευτή σπινθηρισμών. Οι τεχνικές ανάπτυξης κρυστάλλων έχουν βελτιωθεί από τότε, επιτρέποντας στους ανιχνευτές που πρέπει να κατασκευάζονται κατά τρόπο ώστε να είναι ίσοι ή μεγαλύτεροι από ό, τι συνήθως οι διαθέσιμοι κρύσταλλοι NaI, αν και οι ανιχνευτές αυτοί κοστίζουν πάνω από € 100.000. υγρού αζώτου (77 °K), με χρήση μονωμένου δοχείου υγρού αζώτου και κατάλληλη διάταξη ψύξης του κρυστάλλου,

Μεγάλοι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου έχουν τιμές FWHM από 0,8 ως 1,2 keV για φωτόνια 122 keV και 1,7 ως 2,3 keV για φωτόνια 1333 keV. Στο σχήμα 2.2.6 συγκρίνονται οι διακριτικές ικανότητες ανιχνευτών NaI(Tl) και HPGe. Η πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα του HPGe φαίνεται π.χ. από το γεγονός ότι τις δύο "αιχμηρές" κορυφές που διακρίνει ο HPGe στις ενέργειες 1086 keV και 1112 keV ο NaI(Tl) δεν τις διακρίνει, τις "βλέπει" ως μία ευρεία κορυφή [4.3].

Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των ανιχνευτών υπερκαθαρού γερμανίου, που συνέβαλε αποφασιστικά στην επικράτησή τους στην  $\gamma$  - φασματομετρία υψηλής διακριτικής ικανότητας, αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να αφεθούν μεταξύ χρήσεων να θερμανθούν μέχρι θερμοκρασίας δωματίου χωρίς να υποστούν βλάβη. (4.2)

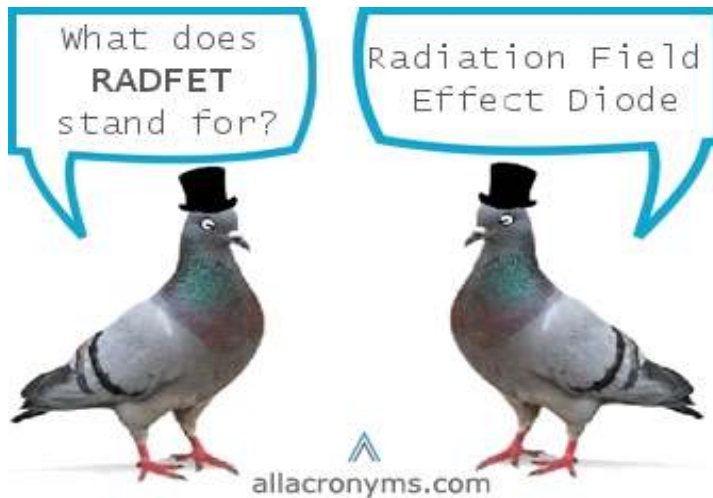
Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές γερμανίου-λιθίου (Ge(Li)) έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τους ανιχνευτές HPGe, αλλά ένα σοβαρό μειονέκτημα: ο κρύσταλλος πρέπει να διατηρείται συνεχώς σε χαμηλή θερμοκρασία (77 °K). Διαφορετικά, αν θερμανθεί σε θερμοκρασία δωματίου, συμβαίνει καταστροφική ανακατανομή του λιθίου. Αυτός είναι ο λόγος που έχουν πλέον εγκαταλειφθεί.

## Ανιχνευτές διαμαντιού(diamonddosimeters)

Τα Διαμάντια αλλάζουν την αντίστασή τους κατά την έκθεση σε ακτινοβολία. Κατά την εφαρμογή μιας τάσης πόλωσης, το προκύπτον ρεύμα είναι ανάλογο προς το ρυθμό δόσης ακτινοβολίας. Τα εμπορικά διαθέσιμα δοσίμετρα διαμαντιού έχουν σχεδιαστεί για να μετρηθεί η σχετική δόση που διανέμεται σε υψηλής ενέργειας φωτόνια και δέσμες ηλεκτρονίων. Το δοσίμετρο στηρίζεται σε ένα φυσικό διαμάντι κρύσταλλου σφραγισμένο σε περίβλημα πολυστερίνης με μια επαφή που πολώνεται μέσω λεπτών χρυσών επαφών

Τα διαμάντια έχουν ένα μικρό όγκο, της τάξης των λίγων mm<sup>3</sup>, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση των κατανομών δόσης με μια εξαιρετική χωρική διακριτική ικανότητα. Οι ανιχνευτές Διαμαντιού ανιχνευτές έχουν πολλές ομοιότητες με ανιχνευτές πυριτίου, αλλά αναμένεται να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδίως σε υψηλής σκληρότητας ακτινοβολία και σε πολύ χαμηλά ρεύματα ολίσθησης. Επί του παρόντος, είναι πολύ πιο ακριβό και πιο δύσκολο στην κατασκευή.

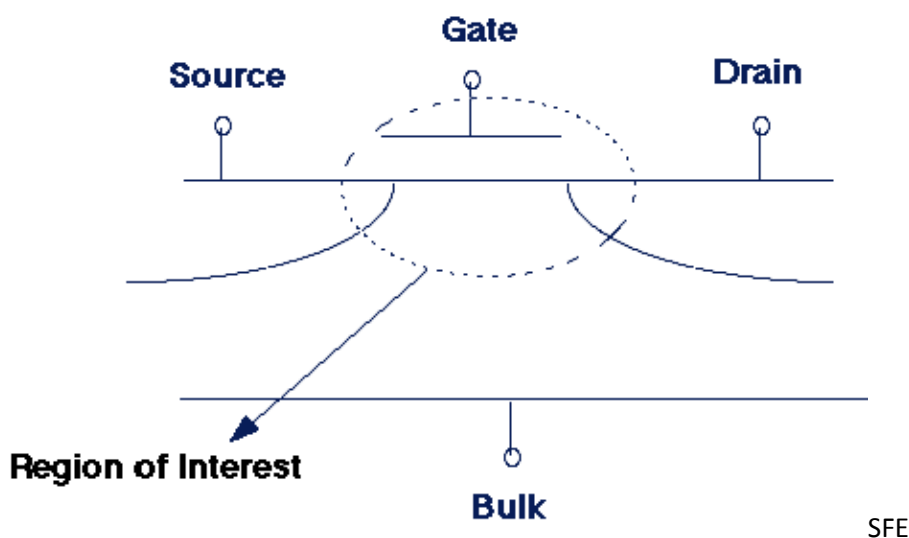
## Ανιχνευτές MOSFET(RADFET)



**Εικόνα 4.10** Ορισμός του ακρωνυμίου RADFET

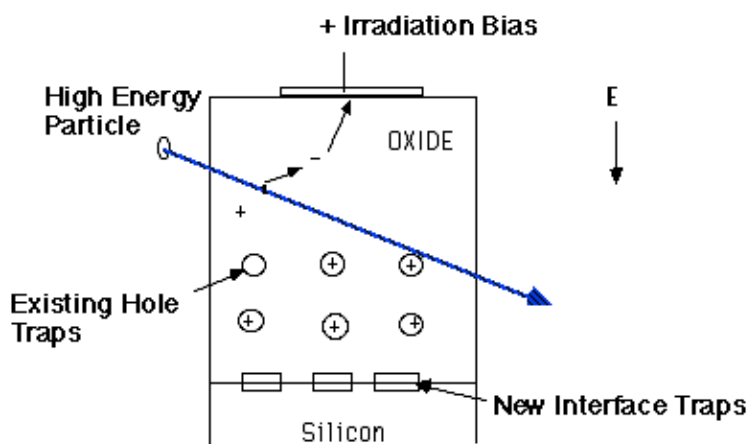
Η βασική αρχή της δοσιμετρίας με MOSFET (ή αλλιώς RADFET) είναι ότι η ιοντίζουσα ακτινοβολία προσδίδει ενέργεια σε ύλη και έχοντας γνώση αυτής της ενέργειας παρέχει πληροφορίες της απορροφούμενης δόσης. Η γνώση του ρυθμού απορρόφησης της ενέργειας αυτής δίνει

πληροφορίες σχετικά με το ρυθμό δόσης. Αυτή είναι η βασική αρχή του RADFET. Τα RADFETS είναι συνήθως MOSFETs p-τύπου και μία εγκάρσια τομή ενός τυπικού p-τύπου MOSFET φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Η περιοχή του ενδιαφέροντος για το δοσίμετρο είναι η περιοχή πύλης. Η αρχή του MOSFET είναι τέτοια ώστε όταν η τάση πύλης είναι κάτω από μια ορισμένη τιμή συσκευή είναι εκτός λειτουργίας και πάνω από αυτή την τιμή (κατώφλι) η συσκευή είναι ενεργοποιημένη, αυτή είναι αυτή η τάση κατωφλίου που χρησιμοποιείται ως δοσιμετρικά παράμετρος του RADFET.



**Εικόνα 4.11** Εγκάρσια Τομή ενός MOSFET

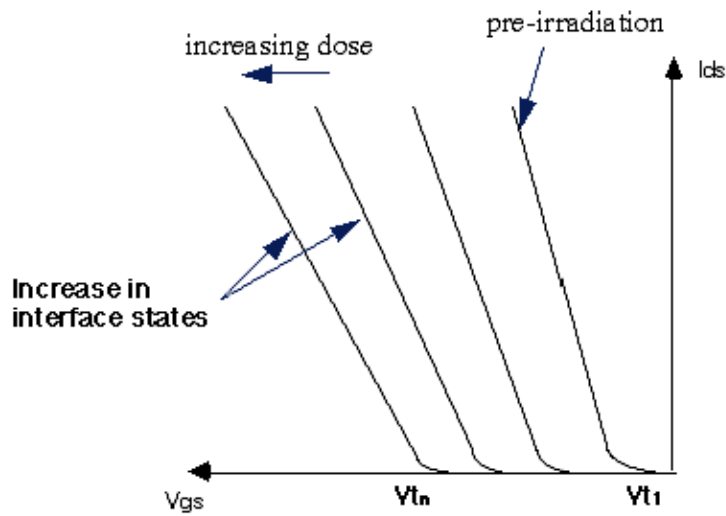
Όταν το RADFET εκτίθεται σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, ηλεκτρόνια και σπές δημιουργούνται στην συσκευή. Οι φορείς που δημιουργούνται σε σημαντικό βαθμό είναι εκείνες στο οξειδίο πύλης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Ένας ορισμένος αριθμός των παραγόμενων φορέων ανα συνδέονται αμέσως μετά την παραγωγή. Ωστόσο, εκείνες που δεν ανασυνδέονται, μετατοπίζονται κάτω από το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο είναι παρόν στο οξειδίο. Εάν μια θετική πόλωση εφαρμοστεί στην πύλη, στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια θα μεταβούν στο ηλεκτρόδιο πύλης πολύ γρήγορα και θα αφήσουν το οξειδίο.



**Σχήμα 4.12** Περιγραφή λειτουργίας ενός RADFET

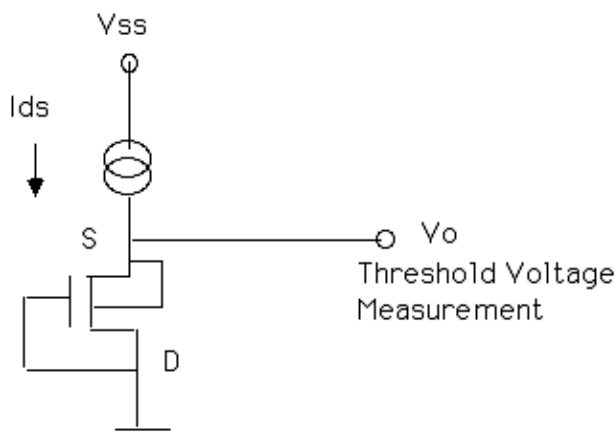
Οι οπές κινούνται πιο αργά προς το υπόστρωμα πυριτίου. Λόγω της φύσης του  $\text{SiO}_2$ , υπάρχουν παγίδες οπών ως αναπόσπαστο μέρος του οξειδίου, αυτές οι παγίδες οπών υπάρχουν στο οξείδιο του πυριτίου από την κατασκευή του. Η πυκνότητα των παγίδων οπής είναι επίσης μεγαλύτερες κοντά στην επαφή  $\text{Si/SiO}_2$ . Όπως οι οπές κινούνται προς το πυρίτιο ένας μεγάλος αριθμός των οπών παγιδεύονται και αυτό προκαλεί το θετικό φορτίο εντός του οξειδίου. Το θετικό φορτίο στο  $\text{Si/SiO}_2$  διεπαφής αυξάνεται επίσης ως συνάρτηση της δόσης. Ως θετικό φορτίο στο χύμα και διασύνδεση των αυξήσεων οξειδίου, η συσκευή γίνεται πιο δύσκολο να ενεργοποιηθεί, δηλαδή της απόλυτης τάσης κατωφλίου γίνεται μεγαλύτερο, όπως δείχνεται στο Σχήμα 4.13. Είναι αυτή η αλλαγή στο κατώφλι λόγω θετικού φορτίο τάσης που επιτρέπει την απορροφούμενη δόση που πρέπει να μετρηθεί.





**Εικόνα 4.13.** Μεταβολή Μεταφορά ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ενός RADFETως αποτέλεσμα της ακτινοβολίας

Το τυπικό κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για να μετρήσει την αλλαγή στην τάση κατωφλίου ως συνάρτηση της δόσης φαίνεται στην εικόνα 4.14. Σε αυτό το κύκλωμα η συσκευή ωθείται σε κορεσμό με ένα ρεύμα τυπικά  $10\mu\text{A}$  και ρέει μέσω του RADFET. Η τάση,  $V_o$  είναι η τάση κατωφλίου συν ένα μικρό ποσοστό το οποίο εξαρτάται από το ρεύμα πόλωσης. Η ευκολία της χρήσης αυτού του κυκλώματος είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο το δοσίμετρο χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές.



**Σχήμα 4.14** Τυπικό κύκλωμα Μέτρησης Ακτινοβολίας με RADFET

**Εφαρμογές Δοσίμετρου:**

ΟΙ Τυπικές εφαρμογές για PMOS RADFETs είναι:

Εφαρμογή εύρος δόσης (κατά προσέγγιση)

Διαστημόπλοια 10 rad σε 0,5 Mrad

Ιατρικές 1 rad έως 50 krad

Προσωπικό δόσιμετρά 1 Milli-rad έως 1 krad

### Ανιχνευτής CZT

Οι ανιχνευτές Τελλουριούχου καδμίου (CdTe) και ψευδαργύρου Τελλουριούχου καδμίου (CZT) έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε φασματοσκοπία ακτίνων-X και φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα. Η υψηλή πυκνότητα αυτών των υλικών σημαίνουν ότι μπορούν να εντοπίσουν αποτελεσματικά ακτίνες X και ακτίνες γάμμα με ενέργειες μεγαλύτερες από 20keV που παραδοσιακά αισθητήρες που βασίζονται στο πυρίτιο δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσουν. Το μεγάλο ενεργειακό χάσμα αυτών των υλικών σημαίνουν επίσης ότι έχουν υψηλή αντίσταση και είναι σε θέση να λειτουργούν σε, ή κοντά σε θερμοκρασία δωματίου (~ 295K) σε αντίθεση με αισθητήρες γερμανίου. Αυτά τα υλικά ανίχνευσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή αισθητήρων με διαφορετικές δομές ηλεκτροδίων για απεικόνιση και φασματοσκοπία υψηλής ανάλυσης.

### 4.2.3 Χρήσεις –πλεονεκτήματα Ανιχνευτών ημιαγωγών

Οι ημιαγώγιμοι ανιχνευτές έχουν το βασικό πλεονέκτημα της δημιουργίας πολύ μεγαλύτερου αριθμού φορέων ανά δεδομένο προσπίπτοντα παλμό ακτινοβολίας, σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο τύπο ανιχνευτή ακτινοβολιών. Για το λόγο αυτό. Οι ημιαγώγιμοι ανιχνευτές ακτινοβολίας είναι πολύ διαδεδομένοι σε εφαρμογές φασματοσκοπιών. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι οι υψηλότερες τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας που έχουν επιτευχθεί έως σήμερα, έχουν επιτευχθεί από ημιαγώγιμους ανιχνευτές ακτινοβολίας.

Η χρησιμοποίηση ημιαγωγών σε διατάξεις ανιχνευτών ιονίζουσας ακτινοβολίας εμφανίζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Οι ανιχνευτές χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος και παράγονται μαζικά σε σχήματα που είναι εύχρηστα.
- Χαρακτηρίζονται από μικρό χρόνο έγερσης των παλμών εξόδου (τυπικά msec).
- Εμφανίζουν Γραμμική απόκριση σε ένα ευρύ ενεργειακό φάσμα.
- Χαρακτηρίζονται από πολύ καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα.
- .

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών επέτρεψε τη χρησιμοποίησή τους για την ανίχνευση πολλών ειδών πυρηνικών ακτινοβολιών, δηλαδή ακτινοβολιών που

εκπέμπονται από τυπικές ραδιενεργές πηγές (φορτισμένα σιρίτια, φωτόνια ακτινών-γ και ακτινών-X). Τα μειονεκτήματά τους αντιστοίχως είναι το υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης<sup>[4.1]</sup>

### **Εμπορικό παραδείγμα**



**Εικόνα 4.15. RADOS RAD-60 Personal Alarm Dosimeter**

Το RADOSRAD -60 προσωπικό δοσίμετρο (βλέπε εικόνα 4.16) από την εταιρεία S.E international (<http://www.seintl.com>) δοσίμετρο είναι ένα ακριβές και αξιόπιστο όργανο που εξασφαλίζει την προσωπική ασφάλεια του χρήστη. Χρησιμοποιεί μια εμπλουτισμένη δίοδο πυριτίου (SI) για εντοπισμό γ και X ακτινοβολίας στο ενεργειακό εύρος από 60 KeV έως 2MeV σε εύρος δόσεων από 5μSv/h-3Sv/h. Το όργανο μπορεί να καταγράψει την δόση που λαμβάνει κάθε χρήστης και να δημιουργήσει το ιστορικό του σε μεγάλη χρονική βάση. Η σχεδίαση του περιλαμβάνει εσωτερική μνήμη για καταγραφή των δόσεων και λειτουργεί ακόμα και όταν δεν τροφοδοτείται. Είναι εύκολα προγραμματισμένο από τον χρήστη και λειτουργεί με μια απλή αλκαλική μπαταρία (AAA).<sup>[4.4]</sup>

(<http://www.seintl.com/english/rados.htm>) (Τιμή περίπου 300\$)

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

### **ΒΙΒΛΙΑ**

**[4.1] Semiconductor Radiation Detectors Gerhard Lutz Springer Berlin Heidelberg. New York, (2nd printing of the 1st ed. 1999)**

**[4.2] Glenn F , Knoll *Radiation detection and measurement* ,3<sup>rd</sup>ed, Wiley, New York(1999).**

**Διαδίκτυα κέςπηγές**

**[4.3] Wilkkipedia.com**

**[4.4] Ludlum.com**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

**ΑΛΛΑ ΕΙΔΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ**



## Περιεχόμενα 5<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

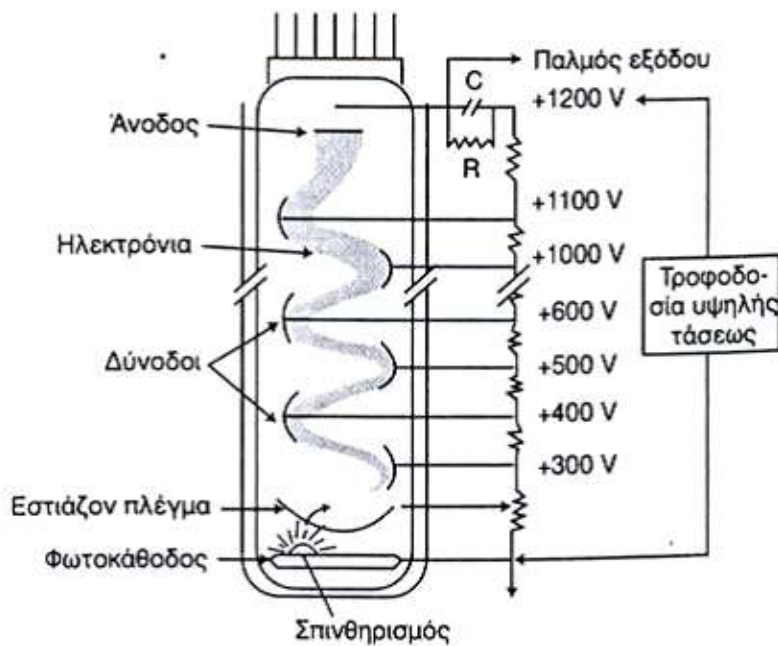
<u>5.1 Ανιχνευτές Σπινθηρισμού (Scintillation counters)</u> .....	90
<u>Αρχή λειτουργίας</u> .....	91
<u>Εφαρμογές-Παραδείγματα</u> .....	92
<u>5.2 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ</u> .....	92
<u>Αρχή Λειτουργίας</u> .....	94
<u>Περιγραφή του Δοσιμέτρου</u> .....	95
<u>Εφαρμογές</u> .....	96
<u>5.3 TLD'S( Thermolumincentdetectors)</u> .....	97
<u>Θεωρία Φωταύγειας</u> .....	97
<u>Αρχή λειτουργίας</u> .....	98
<u>Εφαρμογές-Εμπορικά παραδείγματα</u> .....	99
<u>5.4 Δοσίμετρο Ινών Χαλαζία( quartz fiber dosimeter )</u> .....	99
<u>Αρχή λειτουργίας</u> .....	100
<u>Εφαρμογές-Εμπορικά Παραδείγματα</u> .....	101

## Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα πιο σημαντικά από τα υπόλοιπα είδη ανιχνευτών, εκτός από τους ανιχνευτές αερίου και τους στερεούς ανιχνευτές έχουμε και τους ανιχνευτές σπινθηρισμού(5.1) αλλά και μια σημαντική κατηγορία τους ανιχνευτές θερμοφωταύγειας.(5.3)

### 5.1 Ανιχνευτές Σπινθηρισμού (Scintillation counters)

Ένας μετρητής σπινθηρισμού συνδυάζει ένα σωλήνα φωτοπολλαπλασιαστή (PMT) (βλέπε εικόνα 5.1) με ένα σπινθηρίζον υλικό. Η αρχή λειτουργίας αυτών των ανιχνευτών βασίζεται στην ικανότητα ορισμένων υλικών να μετατρέπουν την πυρηνική ακτινοβολία σε φως. Τα υλικά, που ενέχουν αυτήν την ιδιότητα, είναι ορισμένα ανόργανα κρυσταλλικά (όπως το NaI με προσμίξεις (που αποτελούν τους ενεργοποιητές των κρυστάλλων) θαλίου (Tl), το ZnS(Ag), το Li(Eu), το Li(Sn), το A(Tl) ), ορισμένα οργανικά υλικά (όπως το ανθρακένιο), μερικά αέρια (π.χ. το ξένο) και ορισμένα πλαστικά. Οι προαναφερθείσες ουσίες αποκαλούνται σπινθηριστές ή φώσφοροι, παρά το γεγονός της έλλειψης κρυσταλλικής υφής, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ή ακόμη και του γεγονότος ότι δεν είναι στερεές. Ο πλέον κοινός σπινθηριστής είναι το NaI(Tl). <sup>[5.1]</sup>.

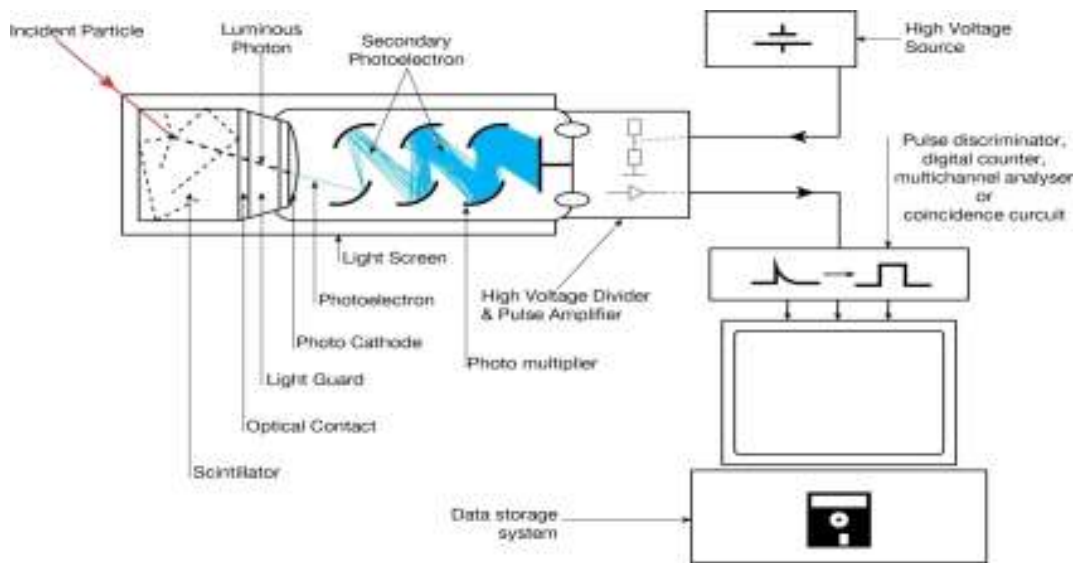


Εικόνα 5.1 Φωτοπολλαπλασιαστής

### Αρχή λειτουργίας

Όταν οι ακτίνες  $\gamma$  αλληλεπιδρούν με το υλικό του σπινθηριστή, ιονισμένα άτομα μεταβαίνουν προς μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας και εκπέμπουν φώς[5.1]. Σε έναν καθαρό ανόργανο σπινθηριστή κρυστάλλου, η επιστροφή του ατόμου σε χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις με την εκπομπή ενός φωτονίου είναι μια αναποτελεσματική διαδικασία. Επιπλέον, τα εκπεμπόμενα φωτόνια είναι συνήθως πολύ υψηλής ενέργειας και δεν μπορούν να προσεγγίσουν τις περιοχές που τα μήκη κύματος του φωτοπολλαπλασιαστή είναι ευαίσθητες. Μικρές ποσότητες εμπλουτισμού (που ονομάζονται ενεργοποιητές) προστίθενται σε όλα τους σπινθηριστές για να ενισχύσουν την εκπομπή ορατών φωτονίων. Οι αυτοδιεγέρσεις των κρυστάλλων που οδηγούνται μέσω των υλικών εμπλουτισμού δίνουν την ώθηση στα φωτόνια ώστε να ενεργοποιήσουν τον φωτοπολλαπλασιαστή. Μια σημαντική συνέπεια της φωταύγειας μέσω εμπλουτισμένων ενεργοποιητών είναι ότι ο σπινθηρίζων κρύσταλλος είναι διάφανος και δεν επηρεάζει την εκπομπή φωτονίων. Ένα κοινό παράδειγμα που συναντάται σε ανίχνευση ακτίνων  $\gamma$  είναι ο εμπλουτισμός του NaI (Tl) με θάλλιο.





**Εικόνα 5.2** Χαρακτηριστική Εικόνα ενός Ανιχνευτή σπινθηρισμού έχουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία (incident particle), που εισέρχεται στον ανιχνευτή αλληλεπιδρά με το υλικό σπινθηρισμού και έπειτα μπαίνει στον φωτοπολλαπλασιαστή (photomultiplier). Στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή έχουμε έναν ενισχυτή (high voltage divider & pulse amplifier) που ενισχύει το σήμα. Το ενισχυμένο σήμα μπαίνει στην τελική βαθμίδα που είναι είτε ένας διευκρινιστής σήματος (pulse discriminator) είτε ψηφιακός μετρητής (digital counter), είτε πολυκαναλός αναλυτής (multichannel analyser) είτε κάποιο άλλο τυχαίο κύκλωμα. Το σήμα εξόδου πάει σε ένα τερματικό σταθμό που έχει την δυνατότητα αποθήκευσης (Data storage system) και επεξεργασίας των δεδομένων.<sup>[5.1]</sup>

## Εφαρμογές-Παραδείγματα



**Εικόνα 5.2 Εμπορικός ανιχνευτής σπινθηρισμούPM1703GN της εταιρείας Polimaster(5.1).**

ΟΡM1703GN παράγεται από την εταιρεία Polimaster (<http://www.polimaster.com>) είναι η πρώτη συσκευή τηλεϊδιοποίησης μοναδική γάμμα / νετρονίων στον κόσμο της νέας γενιάς, ικανή να ανιχνεύει τις μικρότερες ποσότητες ραδιενεργών και πυρηνικών υλικών. Χρησιμοποιεί δύο ανεξάρτητους ανιχνευτές για την ανίχνευση γάμμα και νετρονίων ακτινοβολίας χωριστά :Έναν ( To ) σπινθηριστή με φωτοδίοδο για την ανίχνευση γάμμα ακτινοβολίας και Li6I ( Eu ) μια φωτοδίοδο για την ακτινοβολία νετρονίων . το φάσμα της ενέργειας του PM1703GN είναι 0,033 έως 3,0 MeV για ακτίνες γάμμα και 0.025 eV - 14 MeV για τα νετρόνια (εκτιμωμενο κοστος 500\$).<sup>[5.5]</sup>.

## **5.2 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ(filmbadgedosimetry)**



**Εικόνα 5.3 Ατομικό δοσίμετρο ταινίας [5.1].**

Η φωτογραφική δοσιμετρία ή το δοσίμετρο ταινίας φιλμ είναι ένα προσωπικό δοσίμετρο που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της αθροιστικής δόσης ακτινοβολίας που οφείλεται στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Ο ανιχνευτής αποτελείται από δύο μέρη: Φωτογραφικό φιλμ ή οδοντιατρικό φιλμ ακτινών-X, και ένα συγκρατητήρα(holder). Το σήμα ταινίας χρησιμοποιείται για να μετρήσει και να καταγράψει την έκθεση σε ακτινοβολία από ακτίνες γάμμα, ακτίνες και σωματιδίων βήτα. Δεν χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ακτινοβολίας νετρονίων. Η συσκευή αυτή αναπτύχθηκε από τον Ernest O. Wollan, ενώ εργάζονται για το Σχέδιο Μανχάταν και το φωτογραφικό φιλμ είχε χρησιμοποιηθεί ως ένα ακατέργαστο μέσο για την μέτρηση της έκθεσης πριν από αυτό.

Η φωτογραφική δοσιμετρία είναι μια μέθοδος, που βρίσκει εφαρμογή τόσο στην ιατρική φυσική όσο στην δοσιμέτρηση προσωπικού σε εργαστήρια ιοντίζουσών ακτινοβολιών, χάρις τη δυνατότητα ανίχνευσης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, μέσω της χρήσης ενός υλικού, του φωτογραφικού γαλακτώματος (ή φιλμ), που αποτελεί και το βασικό φωτοευαίσθητο τμήμα των δοσιμέτρων αυτής της κατηγορίας.

Το συνηθισμένο σύγχρονο φωτογραφικό δοσίμετρο αποτελείται από τα εξής μέρη:

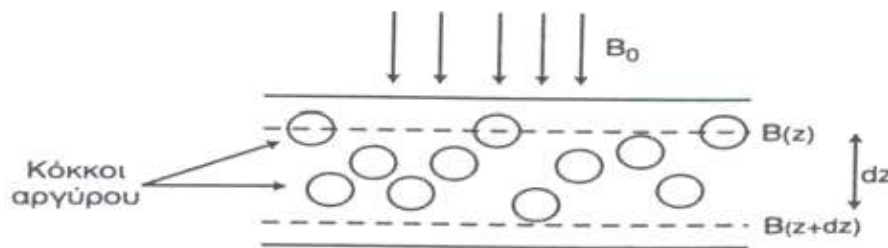
- **τη βάση**, που είναι το κεντρικό και πιο παχύ στρώμα από ανθεκτικό υλικό (συνήθως, οξική κυτταρίνη), διαφανές στο ορατό φως, εύκαμπτο και με την ιδιότητα να αλλάζει σχήμα, λόγω χρόνου ή υγρασίας
- **το στρώμα συγκόλλησης** μεταξύ της βάσης και των φωτογραφικών γαλακτωμάτων
- **τα στρώματα φωτογραφικού γαλακτώματος**, που τοποθετούνται εκατέρωθεν

της βάσης και αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα ζελατίνης ή συνθετικού πολυμερούς, μέσα στο οποίο υπάρχουν μικροσκοπικοί φωτοευαίσθητοι κόκκοι αλογονούχου αργύρου, με ελάχιστο ποσοστό άλλων προσμίξεων (95% AgBr – 5% AgI ή AgCl)

- το προστατευτικό στρώμα ζελατίνης, που καλύπτει εκατέρωθεν το φιλμ

### Αρχή Λειτουργίας

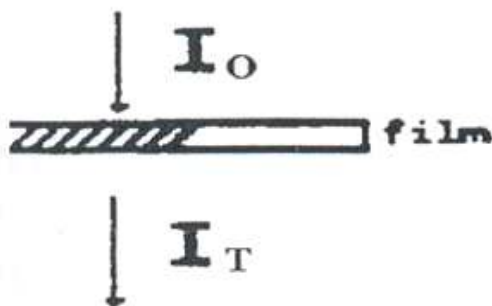
Η αρχή λειτουργίας του φωτογραφικού δοσίμετρου βασίζεται στο γεγονός της πρόκλησης αμαύρωσης στο φωτογραφικό γαλάκτωμα, όταν αυτό εκτίθεται στο ορατό φως ή σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, και η οποία είναι ανάλογη της απορροφούμενης δόσης. Αύξηση της δόσης συνεπάγεται με αύξηση της αμαύρωσης, η οποία, πρέπει στο σημείο αυτό να πούμε ότι, εξαρτάται απ' την ενέργεια και τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. [5.1]



**Εικόνα 5.4** Απορρόφηση οπτικής ακτινοβολίας σε φιλμ

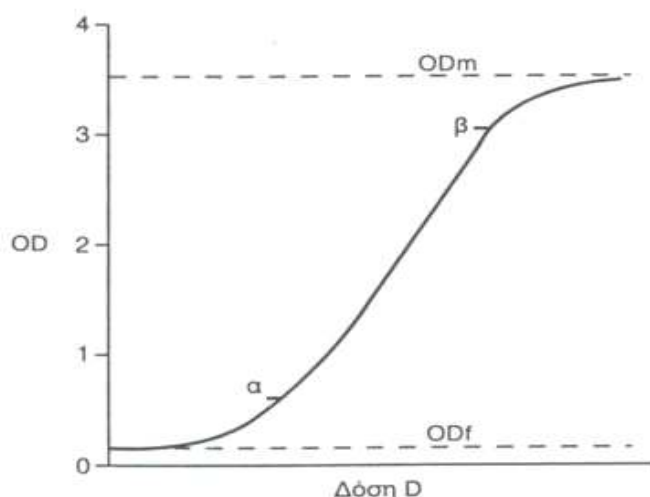
Η αμαύρωση ενός φιλμ σ' ένα σημείο του χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος, που ονομάζεται 'οπτική πυκνότητα' OD, και ορίζεται ως ο λογάριθμος του λόγου της εντάσεως του ορατού φωτός, που διέρχεται απ' το εν λόγω σημείο, όταν προσπίπτει κάθετα στο φιλμ. Δηλαδή(5.1).

$$OD = \log (I_0 / I), \text{ όπου}$$



Σημαντική είναι και η χαρακτηριστική καμπύλη του φωτογραφικού δοσίμετρου. (Εικόνα

5.5) Πρόκειται για μια γραφική παράσταση, που παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της αμαύρωσης του φιλμ και του λογαρίθμου της έκθεσης, και μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για την πλέον χρήσιμη περιοχή οπτικών πυκνοτήτων, που αντιστοιχεί σ' ένα γραμμικό κομμάτι αυτής. Το εύρος και η κλίση (μέση αντίθεση  $\gamma$ ) του γραμμικού τμήματος καθορίζουν, επίσης, τα όρια εκθέσεων μεταξύ των οποίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φιλμ, όπως και την ευαισθησία αυτού σε μικρές αλλαγές.



**Εικόνα 5,5.** Χαρακτηριστική εικόνα της καμπύλης εικόνας του φωτογραφικού δοσιμέτρου στον  $\alpha$

Όταν το φωτογραφικό γαλάκτωμα αμαυρώνεται, συμβαίνουν οι εξής διεργασίες:

μια φυσικοχημική διεργασία, που οδηγεί στη δημιουργία μιας εμφανίσιμης λανθάνουσας εικόνας, μια χημική διεργασία, κατά την οποία, με διαδικασίες εμφάνισης, στερέωσης, πλύσης και στεγνώματος, η λανθάνουσα εικόνα μετατρέπεται σε ορατή.

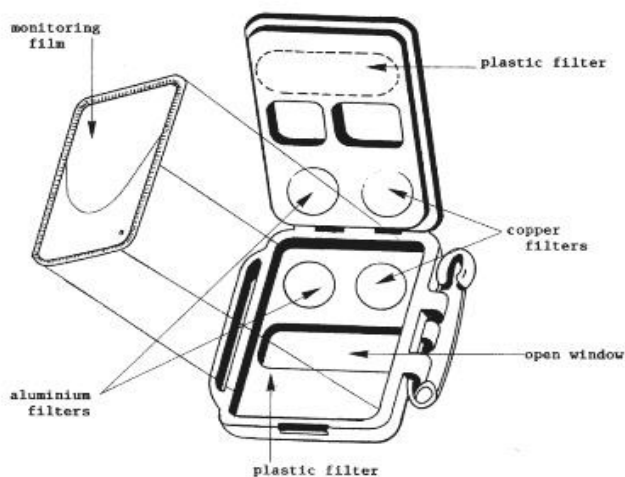
### **Περιγραφή του Δοσιμέτρου**

Ο κάτοχος της ταινίας περιέχει συνήθως μια σειρά από φίλτρα που εξασθενούν την ακτινοβολία, έτσι ώστε διάφοροι τύποι ακτινοβολίας μπορούν να διαφοροποιηθούν από τη δράση τους όταν η ταινία έχει αναπτυχθεί.

Για να παρακολουθεί τις ακτίνες γάμμα ή ακτίνες X, τα φίλτρα μπορεί να είναι από μέταλλο, η συνήθως από αλουμίνιο ή χαλκό. Για την παρακολούθηση της εκπομπής βήτα σωματιδίων, τα φίλτρα χρησιμοποιούν διάφορες πυκνότητες των πλαστικών. Η χρήση

πολλών διαφορετικών πυκνοτήτων επιτρέπει μια εκτίμηση της ενέργειας / μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τα φίλτρα τοποθετούνται συνήθως τόσο στο εμπρός και πίσω του κατόχου ,για να διασφαλιστεί η λειτουργία ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό . Επιπροσθέτως , τα φίλτρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα ( τυπικά 5 mm ή περισσότερο ) για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε λοξές γωνίες προκαλώντας έκθεση του φιλμ σε ένα παρακείμενο φίλτρο



**Εικόνα 5.6** Περιγραφή της θήκης ενός δοσιμετρου ταινίας με τα διαφορα φιλτρά

. Το δοσίμετρο συνήθως φοριέται στο εξωτερικό των ειδών ένδυσης(βλέπε Εικόνα5.7), γύρω από το στήθος ή τον κορμό . Αυτή η θέση παρακολουθεί την έκθεση των πιο ζωτικών οργάνων και αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του σώματος.



**Εικόνα 5.7 .Τοποθέτηση δοσιμέτρων ταινίας στο στήθος η σε μορφή δαχτυλιδιού στο χέρι του χρήστη.**

### **Εφαρμογές**

Η φωτογραφική δοσιμετρία είναι μια μέθοδος, που βρίσκει εφαρμογή τόσο στην ιατρική φυσική όσο στην δοσιμέτρηση προσωπικού σε εργαστήρια ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Η φωτογραφική δοσιμετρία έχει αρκετά πλεονεκτήματα (π.χ. τη δυνατότητα διάκρισης της ενέργειας με τη χρήση φίλτρων, τη διατήρηση της εικόνας, κτλ.), αλλά και μειονεκτήματα (αργή απάντηση, εξάρτηση από κλιματολογικές συνθήκες, εξασθένηση της λαμπάνουσας εικόνας με το πέρασμα του χρόνου – man-, συνολική ομιχλώδη των φιλμ –film-)..

Το δοσίμετρο ταινίας δεν χρησιμοποιείται ευρέως , είναι σε μεγάλο βαθμό αντικαταστημένο από άλλα είδη ανιχνευτών όπως τα δοσίμετρα θερμοφωταύγειας Dosimeter ( TLD) και το προσωπικό ηλεκτρονικό δοσίμετρο ( EPD)<sup>(5.1)</sup> .

### **5.3 TLD'S(Thermoluminescentdetectors)**

Μια σημαντική κατηγορία ανιχνευτών είναι και οι ανιχνευτές θερμοφωταυγειας

## Θεωρία Φωταύγειας

Φωταύγεια ονομάζεται η εκπομπή ορατής ακτινοβολίας από ένα σώμα, η οποία προκαλείται με οποιαδήποτε αιτία, εκτός αυτής της θέρμανσης έως πυράκτωσής του. Τα φωταυγάζοντα ή φωτογενή υλικά, όπως ονομάζονται, χαρακτηρίζονται από την ικανότητα να απορροφούν ένα συγκεκριμένο τύπο ενέργειας, ν' αποθηκεύουν μέρος αυτής για κάποιο χρονικό διάστημα, και στην συνέχεια να το επανεκπέμπουν σε μορφή οπτικής ακτινοβολίας. Ένα φαινόμενο φωταύγειας μπορεί να χαρακτηριστεί ως φθορισμός ή φωσφορισμός, πράγμα που εξαρτάται όχι από τον τρόπο διέγερσης, αλλά από την χρονική κλίμακα που μεσολαβεί έως ότου πραγματοποιηθεί η εκπομπή της οπτικής ακτινοβολίας.

Φωτογενής διέγερση συμβαίνει, όταν ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο απορροφά ενέργεια και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση  $\Theta$  σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, τη διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση  $\Delta$ . Αν το ηλεκτρόνιο επιστρέψει αμέσως στη βασική του κατάσταση, είτε απευθείας είτε μέσω μιας επιτρεπτής ενδιάμεσης κατάστασης  $E$ , με ταυτόχρονη εκπομπή οπτικής ακτινοβολίας, η διαδικασία ονομάζεται Φθορισμός.

Ωστόσο, κάποιες φορές η επιστροφή του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση και άρα η εκπομπή οπτικής ακτινοβολίας επιβραδύνεται, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη μιας ενεργειακής κατάστασης (μετασταθής ενεργειακή κατάσταση  $M$ ) στην απαγορευμένη ενεργειακή περιοχή, η οποία αποτελεί ενεργειακή παγίδα για τα ηλεκτρόνια, αφού δεν επιτρέπεται η απευθείας μετάβασή τους από την κατάσταση  $M$  στη κατάσταση  $\Theta$ . Απαιτείται, λοιπόν, στο σημείο αυτό προσφορά ενέργειας, προκειμένου το ηλεκτρόνιο να μεταβεί αρχικά στην κατάσταση  $\Delta$ , δηλαδή να αυτοπαγιδευθεί, και από κει να επιστρέψει στην κατάσταση  $\Theta$ , εκπέμποντας παράλληλα το ενεργειακό του πλεόνασμα υπό μορφή οπτικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια που απαιτείται για την αποπαγίδευση του ηλεκτρονίου, προμηθεύεται με τη μορφή οπτικής ακτινοβολίας (αυτοδιέγερση) ή θερμότητας (θερμική διέγερση). Η όλη διαδικασία καλείται Φωσφορισμός.

Η πιθανότητα διαφυγής  $p$  ενός ηλεκτρονίου από τη μετασταθερή κατάσταση  $M$  σε μια διεγερμένη κατάσταση  $\Delta$ , ανά μονάδα χρόνου, περιγράφεται από την εξίσωση(5.1) Boltzmann:

### (Σχέση 5.1)

*.Εξίσωση Boltzmann*

$s$ : η σταθερά για μια ειδική μετασταθή κατάσταση, με διαστάσεις συχνότητας

$\Delta E$ : η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των καταστάσεων  $M$  και  $\Delta$ , γνωστή και ως ενεργειακό βάθος της παγίδας

$T$ : η θερμοκρασία του υλικού σε  $^{\circ}K$

$K$ : η σταθερά του Boltzmann



Όπως φαίνεται από την εξίσωση Boltzmann, αν αυξηθεί η θερμοκρασία του φωταυγάζοντος υλικού, αυξάνεται και η πιθανότητα διαφυγής του ηλεκτρονίου από την ενεργειακή παγίδα. Έτσι, επιταχύνεται η διαδικασία του φωσφορισμού, καθώς η αποπαγίδευση των ηλεκτρονίων γίνεται πλέον μαζικά και με μεγαλύτερη ευκολία.

Ο επιταχυνόμενος φωσφορισμός, που προκαλείται από θέρμανση ενός φωτογενούς υλικού, ονομάζεται θερμοφωταύγεια (TL). [5.2]

### Αρχή λειτουργίας

Οι δύο πιο κοινοί τύποι των TLD είναι το φθοριούχο ασβέστιο και το φθοριούχο λίθιο, με μία ή περισσότερες προσμίξεις για την παραγωγή παγίδα που κρατάνε τα ενεργητικά ηλεκτρόνια. Το πρώτο (LiF) χρησιμοποιείται για την καταγραφή της έκθεσης γάμμα, το τελευταίο για το γάμμα και νετρονίων  $\beta$ . Καθώς η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με το κρύσταλλο που προκαλεί τα ηλεκτρόνια στα άτομα του κρυστάλλου για να μεταβούν σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις, όπου μένουν παγιδευμένα λόγω προσμίξεων που έχουν προστεθεί (συνήθως μαγγανίου και μαγνησίου) στο κρύσταλλο, μέχρι να θερμανθεί. Η θέρμανση του κρυστάλλου προκαλεί τα ηλεκτρόνια να πέσουν πίσω στην αρχική κατάσταση τους, απελευθερώνοντας ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με την ενεργειακή διαφορά μεταξύ του κράτους παγίδα και την κατάσταση του εδάφους. Τα ηλεκτρόνια μπορούν επίσης να πέσει πίσω στην κατάσταση του εδάφους μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτή η επίδραση καλείται ξεθώριασμα και εξαρτάται από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και από εγγενείς ιδιότητες του υλικού TLD. Ως αποτέλεσμα, το κάθε υλικό έχει ένα περιορισμένο χρόνο ζωής μετά τον οποίον δεν μπορούν πλέον να ληφθούν δοσιμετρικές πληροφορίες. Αυτό ποικίλλει από μερικές εβδομάδες σε φθοριούχο ασβέστιο έως και δύο χρόνια.

### Εφαρμογές-Εμπορικά παραδείγματα

Η πιο κοινή εφαρμογή των TLD είναι η δοσιμετρία ακτινών γάμμα και X. Ωστόσο, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δοσιμετρία νετρονίων και για τη δοσιμετρία των βαρέων ιόντων.

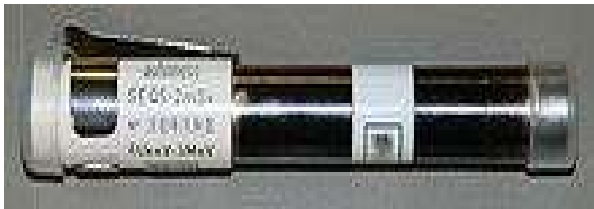
Χαρακτηριστικό εμπορικό παράδειγμα είναι το Panasonic **UD-802A** Dosimeter



**Εικόνα 5.8** Μερικά είδη της σειράς UD-800 από την εταιρεία PANASONIC

Το Panasonic Badge TLD είναι ένα μικρό, εξαιρετικά αξιόπιστο δοσίμετρο σχεδιασμένο για ανώτερη ακρίβεια, εύκολο χειρισμό, την καθαριότητα και την αντοχή σε μηχανική καταπόνηση. (5.4).

#### **5.4 Δοσίμετρο Ινών Χαλαζία(quartzfiberdosimeter)**



**Εικόνα 5.9**Ατομικό Δοσίμετρο Ινών Χαλαζία

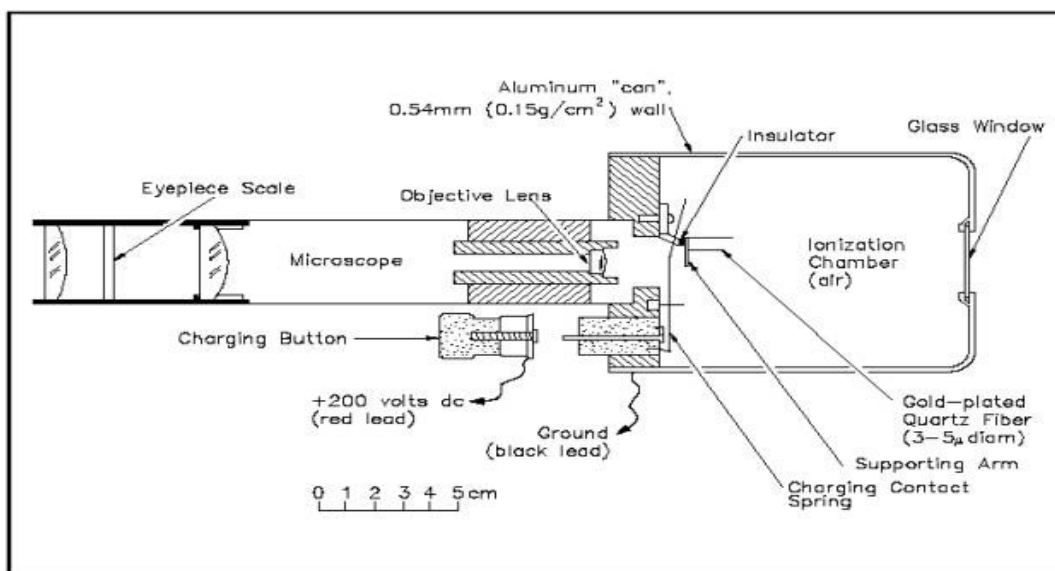
Ένα δοσίμετρο ινών χαλαζία , μερικές φορές ονομάζεται δοσίμετρο τσέπης ( SIPD ) ή δοσίμετρο τσέπη ανάγνωση ( SRPD ) , είναι ένα είδος ατομικού δοσίμετρου ακτινοβολίας , - όπως ένα στυλό –είναι μια συσκευή που μετρά την αθροιστική δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας που λαμβάνεται στον οργανισμό.(Εκτιμωμενο κοστος:300\$)

#### **Αρχή λειτουργίας**

Το δοσίμετρο χαλαζία ινών Αποτελείται από ένα σφραγισμένο κύλινδρο γεμάτο αέριο που ονομάζεται θάλαμος ιονισμού(5.1). . Μέσα σε αυτό είναι μία λωρίδα από μεταλλικό

ηλεκτρόδιο που είναι συνδεδεμένη με ένα τερματικό στο άκρο της πέννας για την επαναφόρτιση . Το άλλο άκρο του ηλεκτροδίου έχει μια λεπτή επίχρυση ίνα χαλαζία που επισυνάπτεται σε αυτήν , η οποία σε κατάσταση ηρεμίας βρίσκεται παράλληλα προς το ηλεκτρόδιο . Τα άκρα του θαλάμου είναι διαφανή και το μικροσκόπιο εστιάζεται στην ίνα . Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης , ο φορτιστής εφαρμόζει μια υψηλή τάση DC , συνήθως γύρω στα 150-200 βολτ με το πάτημα του μπουτόν ,έχουμε φόρτιση του ηλεκτροστατικού φορτίου . Η ίνα χαλαζία, που έχει το ίδιο φορτίο , απωθείται από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου , λόγω της δύναμης Coulomb και κάμπτεται μακριά από το ηλεκτρόδιο . Μετά τη φόρτιση , το φορτίο παραμένει στο ηλεκτρόδιο , επειδή είναι μονωμένο .

Όταν ένα σωματίδιο της ιοντίζουσας ακτινοβολίας περνά διαμέσου του θαλάμου , συγκρούεται με τα μόρια του αέρα, χτυπώντας ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα τη δημιουργία θετικών και αρνητικών φορτισμένων άτομα ( ιόντα ) στον αέρα . Τα ιόντα αντίθετου φορτίου έλκονται προς το ηλεκτρόδιο και να εξουδετερώσει μερικά από το φορτίο αυτό . Η μειωμένη επιβάρυνση επί του ηλεκτροδίου μειώνει τη δύναμη επί της ίνας , με αποτέλεσμα να κινηθεί πίσω προς το ηλεκτρόδιο . Η θέση της ίνας μπορεί να διαβαστεί μέσω του μικροσκοπίου . Πίσω από την ίνα είναι μια κλίμακα βαθμονομημένη σε μονάδες της ακτινοβολίας, με το σημείο μηδέν στη θέση της ίνας όταν είναι πλήρως φορτισμένη.



**Εικόνα 5.10** Σχηματική αναπαράσταση ενός ανιχνευτή ινών χαλαζία<sup>(5.1)</sup>.

Δεδομένου ότι κάθε σωματίδιο της ακτινοβολίας επιτρέπει ένα ορισμένο ποσό της επιβάρυνσης για να διαρρεύσει εκτός του ηλεκτροδίου , η θέση της ίνας ανά πάσα στιγμή αντιπροσωπεύει την αθροιστική ακτινοβολία που έχει περάσει διαμέσου του θαλάμου από την τελευταία επαναφόρτιση<sup>[5.1]</sup>. Επαναφόρτιση επαναφέρει την κατηγορία ότι είχε χαθεί και επιστρέφει την ίνα στην αρχική αποκλίνουσα θέση του .Ο φορτιστής είναι ένα μικρό κουτί , συνήθως τροφοδοτείται από μια μπαταρία . Περιέχει ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που βήματακάμέχρι την ίζει της μπαταρίας στην υψηλή τάση που απαιτείται για τη φόρτιση . Το κουτί έχει ένα εξάρτημα που απαιτεί να πιέσετε το ένα άκρο του δοσίμετρο επί του ηλεκτροδίου φόρτισης. Μερικοί φορτιστές περιλαμβάνουν ένα φως για να φωτίσει το ηλεκτρόδιο μέτρησης , έτσι ώστε η μέτρηση ,η καταγραφή και η επαναφόρτιση μπορεί να συμβεί με μια κίνηση ρουτίνας.

Σε μονάδες με μεγαλύτερο εύρος γίνεται με την προσθήκη ενός πυκνωτή που συνδέεται μεταξύ του ηλεκτροδίου και την υπόθεση . Ο πυκνωτής αποθηκεύει μια μεγαλύτερη ποσότητα του φορτίου στη συσκευή για μια δεδομένη τάση στο ηλεκτρόδιο . Δεδομένου ότι κάθε σωματίδιο της ακτινοβολίας επιτρέπει ένα σταθερό ποσό της επιβάρυνσης για να ξεφύγουν , ένας μεγαλύτερος αριθμός των σωματιδίων της ακτινοβολίας είναι απαραίτητος για να μετακινηθεί η ίνα ένα συγκεκριμένο ποσό .

### **Εφαρμογές-Εμπορικά Παραδείγματα**



**Εικόνα 5.11** Δοσίμετρο τύπου στυλό από την εταιρεία LUDLUM μοντέλο Model AT-138. Το μοντέλο της LUDLUM είναι ένα στιβαρό όργανο, το οποίο μετρά συσσωρευμένες ποσότητες γάμμα και ακτινών X μέχρι τα 200mR. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν την προσωπική και περιβαλλοντική παρακολούθηση. Η λειτουργία χαμηλής ενέργειας έχει εφαρμογές στα νοσοκομεία, συμπεριλαμβανομένων ακτινοσκόπηση, φορητή ακτινογραφία, και αγγειογραφία. Αυτή το όργανο μεγέθους τσέπης(1.5x12.4cm) είναι ελαφρύ (25gβάρος)και έχει μια εύχρηστη θήκη κλιπ που κουμπώνεται εύκολα στην τσέπη του χρήστη. Έχει εύρος από 0-200 mR για

ακτίνες  $\gamma$  και  $X$  και λειτουργεί με ένα ηλεκτρόμετρο ινών το οποίο βρίσκεται στην εσωτερική θέση του σωλήνα(Εκτιμώμενο κόστος:300\$)<sup>(5.5)</sup>.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

### **ΒΙΒΛΙΑ**

**[5.1] Glenn F ,Knoll *Radiation detection and measurement* ,3<sup>rd</sup>ed,Wiley,New York(1999).**

**[5.2] *Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry*, Khalil Arshak Olga Korostynska**

**Διαδικτυακές πηγές**

**[5.3] Wikipedia.com**

**[5.4] Panasonic.com**

**[5.5] Ludlum.com**

**[5.6] ebay.uk**

## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ**

### **Αναγκαιότητα της Δοσιμέτρησης**

Η Επαγγελματική έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να συμβεί σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών σε ιατρικά ιδρύματα, εκπαιδευτικά και ερευνητικά ιδρύματα. Η Επαρκής μέτρηση της ακτινοβολίας είναι απαραίτητη για την ασφαλή και αποδεκτή χρήση των ακτινοβολιών, για τα ραδιενεργά υλικά, και την πυρηνική ενέργεια. Επιπρόσθετο ενδιαφέρον για την περιοχή των ιοντιζουσών ακτινοβολιών και των ανιχνευτών υπάρχει σημαντικά λόγω όλων των πτυχών που σχετίζονται με την ασφάλεια. Λαμβάνοντας υπόψη τα πολυάριθμα πυρηνικά ατυχήματα και τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει θέματα όπως την , μεταφορά και αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων, της τρομοκρατίας, καθώς και η δυνατότητα να ελεγχθούν τα πυρηνικά όπλα που χρησιμοποιούνται σε έναν πόλεμο, η παγκόσμια κοινότητα θα πρέπει να ενθαρρύνεται να χρησιμοποιεί τα προσωπικά ηλεκτρονικά δοσίμετρα, συσκευές που μπορούν να παράσχουν ένδειξη συναγερμού σε πραγματικό χρόνο, εάν το ασφαλές όριο της εξωτερικής δόσης υπερβαίνεται.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα, Η δοσιμετρία ακτινοβολίας ήταν αναγκαία μόνο για τους ειδικούς των πυρηνικών, τις στρατιωτικές δυνάμεις, καθώς και το ιατρικό προσωπικό. Η ακτινοβολία αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς και, δυστυχώς, επηρεάζει αρκετά συχνά άμαχο πληθυσμό , οι απλοί εργαζόμενοι και οι κάτοικοι. Η χρήση των προσωπικών ανιχνευτών ακτινοβολίας σε πραγματικό χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική για την πρώτη αντίδραση (να προειδοποιήσει για την ραδιενεργη απειλη)Για τα τελωνεία και τις περιπολίες στα σύνορα για τους αξιωματικούς της ασφάλειας σε τράπεζες, για τα κρατικά εργαστήρια, όπως θα μπορούσαν να είναι χρήσιμα στις ιατρικές και ερευνητικές εγκαταστάσεις όπως και για την αστυνομία και τις πυροσβεστικές υπηρεσίες

### **Η επιλογή του ανιχνευτή**

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου ανιχνευτή ακτινοβολίας εξαρτάται από το ενεργειακό εύρος ενδιαφέροντός, τις απαιτήσεις της εφαρμογής την καταλληλότητα όπως και

από το κόστος. Λόγω του μεγάλου αριθμού των διαφορετικών εφαρμογών, υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων ακτινοβολίας. Φτιαγμένα από διαφορετικά υλικά, γεωμετρικής διάταξης. Η Ανίχνευση της ακτινοβολίας βασίζεται στο γεγονός ότι οι ηλεκτρικές, οπτικές και δομικές ιδιότητες των υλικών υφίστανται αλλαγές υπό την επίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Η επίδραση της ακτινοβολήσεως ενός ηλεκτρονικού υλικού και η επακόλουθη υποβάθμιση σε απόδοση των συσκευών γίνεται από ένα τέτοιο υλικό μπορεί να ακολουθήσει διάφορες διαδρομές.

Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τύπο και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τον τύπο του υλικού, ιδιαίτερη συμβολή τους στην λειτουργία της συσκευής, και οι φυσικές αρχές στις οποίες βασίζεται η λειτουργία της συσκευής .

Όποτε συμπερασματικά η βαθιά κατανόηση των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών υπό την επίδραση της ακτινοβολίας έκθεση είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική σχεδίαση των συσκευών δοσιμετρίας.

### **Κόστος των Οργάνων Δοσιμέτρησης**

Ένας σημαντικότερος παράγοντας είναι και το κόστος αγοράς και συντήρησης για τα όργανα ανιχνευσής, πολλές φορές είναι γεγονός ότι η συντήρηση είναι πιο κοστοβόρα απ τιμή αγοράς αφού τα αναλώσιμα είδη σε ορισμένου είδους ανιχνευτές είναι πιο ακριβά ακόμα και από το κόστος κτήσης. Γενικά πάντως επειδή πρόκειται για συσκευές μεγάλης ακρίβειας και συνήθως υψηλής τεχνολογίας το κόστος είναι ιδιαίτερα αυξημένο παρακάτω διατίθενται κάποιες ενδεικτικές τιμές(2) για διαφορα είδη ανιχνευτών που προαναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας

#### **Δοσίμετρα Τσέπης-145\$**

#### **Ηλεκτρονικά Δοσίμετρα-600\$**

#### **Ανιχνευτές G-M- 1500\$**

#### **Ατομικάδοσίμετρα τύπου ταινίας-150\$(Κόστος Ανταλλακτικών για ταινίες 69\$)**

### **Μελλοντικές Τάσεις**

Το μέλλον της δοσιμετρίας κινείται σε δύο παράλληλες κατευθύνσεις που εξαρτώνται από την εφαρμογή(Π.χ., υψηλής ακρίβειας και κόστους δοσιμετρία για την πυρηνική ενέργεια, την ιατρική, και τους διαστημικούς σκοπούς) και των εναλλακτικών ευρέως φάσματος εφαρμογές και σε πραγματικό χρόνο δοσιμετρία και με χαμηλό κόστος τόσο χαμηλή που να είναι κατάλληλη για ατομική δοσιμετρία.

Η πρόοδος που σημειώθηκε στον τομέα της δοσιμετρίας κατέστη δυνατή λόγω των επιτευγμάτων σε τομείς όπως η βιομηχανία ημιαγωγών, και της επεξεργασίας υλικών και των νέων τεχνολογιών παραγωγής που έχουν προκύψει πρόσφατα. Αυτό επέτρεψε σημαντική σμίκρυνση των συσκευών και την



ασύρματη η απομακρυσμένη λειτουργία τους, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ζωτικής σημασίας. Μόνο η στενή συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, ερευνητών, μηχανικών, γιατρών, θα διευκολύνει την ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων για την προώθηση του σχεδιασμού των προηγμένων αισθητήρων υψηλής ακρίβειας.

## **Βιβλιογραφία Επιλόγου από ακριβή μετάφραση**

- **Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry, Khalil Arshak & Olga Korostynska, Artechhouse, Norwood (2006)**

Αναφορές τιμών από Διαδίκτυο

- [www.geodatasys.com](http://www.geodatasys.com)
- **Ludlum.com**
- **ebay.uk**

