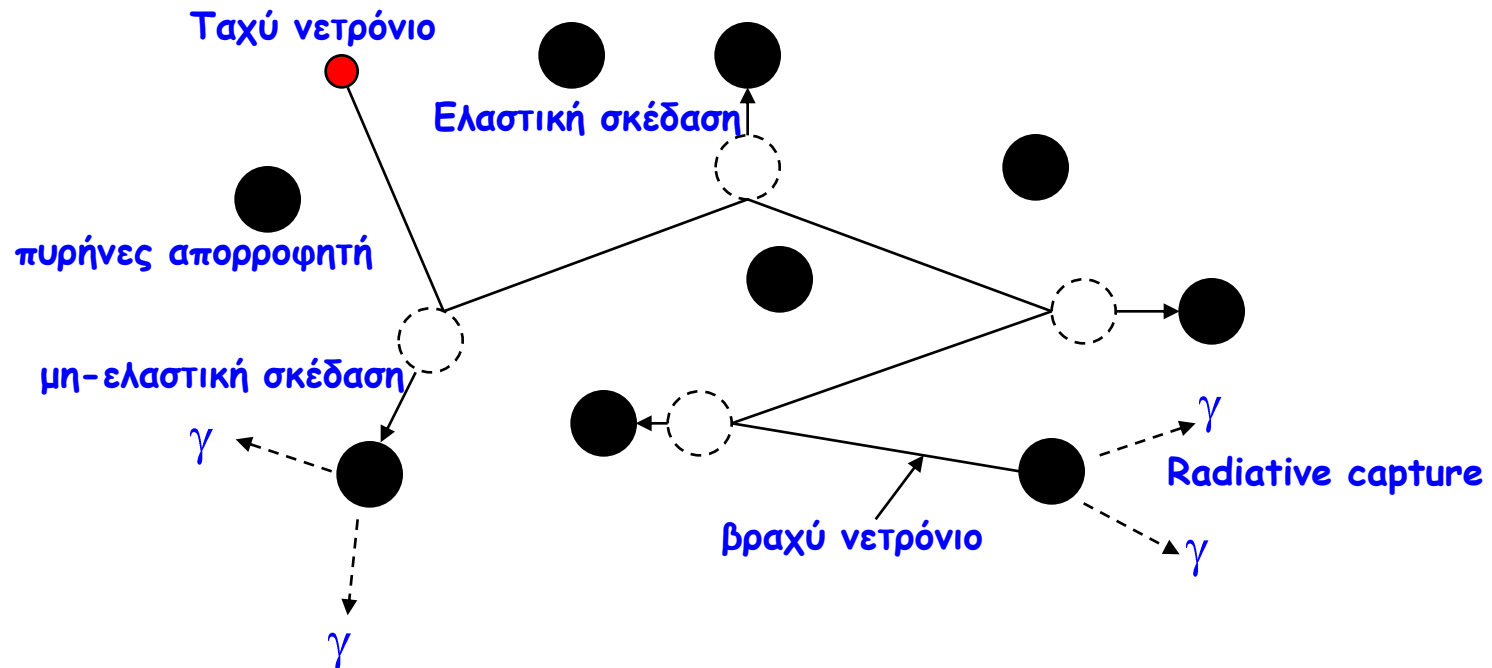


# Νετρόνια

- Τα νετρόνια ( $n$ ) είναι αφόρτιστα σωματίδια, απαιτείται πυρηνική αλλ/ση ώστε να μεταφερθεί ενέργεια στο υλικό (απορροφητή).
- Η πιθανότητα αλλ/σης (ενεργός διατομή,  $\sigma$ ) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τύπο των πυρήνων του υλικού και την ενέργεια των νετρονίων.
- Γενικώς, η ενεργός διατομή,  $\sigma$ , είναι πολύ μικρή και τα νετρόνια μπορούν να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις (αρκετά cm) χωρίς αλλ/ση μέσα στην ύλη.
- Πάντως τα νετρόνια μπορούν να:
  1. σκεδάζονται - μεταφέρουν ενέργεια στο σκεδαζόμενο (recoil nuclei) πυρήνα,
  2. να απορροφηθούν με τη βοήθεια διαφόρων πιθανών αντιδράσεων.

# Νετρόνια

- Ταχεία (μεγάλης ενέργειας) νετρόνια (fast neutrons):  
μπορούν να προκαλέσουν ελαστικές σκεδάσεις, μη-ελαστικές σκεδάσεις και απορρόφηση, όπου η σύντηξη (fusion) είναι η κύρια μορφή απορρόφησης.



# Σκέδαση Νετρονίων

- Ελαστική σκέδαση:

Ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας των νετρονίων μεταφέρεται στον πυρήνα, ειδικά στην περίπτωση που έχουμε υλικό από ελαφρύς πυρήνες (μικρό  $A$ ).

- Μη-ελαστική σκέδαση:

Ο σκεδαζόμενος πυρήνας διεγείρεται και μετέπειτα αποδιεγείρεται συνήθως με την ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων,  $\gamma$ .

Τα νετρόνια μετά από τη μη-ελαστική σκέδαση έχουν μικρότερη ενέργεια και συνήθως υπόκεινται μεγάλες αλλαγές στην κατεύθυνση τους.

# Απορρόφηση Νετρονίων (Capture)

- Σύντηξη των νετρονίων με τους πυρήνες του στόχου (απορροφητή).
- Ο παραγόμενος σύνθετος πυρήνας διεγείρεται σε μια ενέργεια που είναι περίπου ίση:  
~ αρχική Κινητική Ενέργεια νετρονίου + Binding Energy (BE~8 MeV).
- Αυτή η επιπρόσθετη ενέργεια του πυρήνα εμφανίζεται αργότερα ως προϊόντα αντίδρασης (ακτίνες γ, φορτισμένα σωματίδια και νετρόνια).
- Αν η πιθανότητα απορρόφησης  $\ll$  πιθανότητα σκέδασης, τότε τα νετρόνια υπόκεινται πολλαπλές σκεδάσεις με αποτέλεσμα σταδιακά να χάνουν την ενέργεια τους. Αυτή η διαδικασία «καθυστέρησης» (moderation) τα οδηγεί σε θερμική ισορροπία. Αυτά τα νετρόνια ονομάζονται **θερμικά νετρόνια**: Η ενέργεια των θερμικών νετρονίων σε κανονική θερμοκρασία (300 °K) είναι περίπου  $E \sim kT = 0.025 \text{ eV}$ .

# Αλληλεπιδράσεις Νετρονίων

- **Ελαστική σκέδαση** με πυρήνες απορροφητή (στόχου)  $A(n,n)A$ : βασικός μηχανισμός απώλειας ενέργειας νετρονίων τάξης **1 MeV**.
- **Μη-ελαστική σκέδαση** πυρήνες απορροφητή (στόχου)  $A(n,n')A^*$ ,  $A(n,2n')B$ , κλπ: βασικός μηχανισμός απώλειας ενέργειας νετρονίων **> 1 MeV**.

- **Radiative neutron capture**  $X(n,\gamma)X$ :

$$n + {}^A_Z X \rightarrow \gamma + {}^{A+1}_Z X, \quad \sigma_n^{\text{capt}} \propto \frac{1}{v}, \quad v = \text{ταχύτητα νετρονίου}$$

- **Πυρηνικές αντιδράσεις**:  $(n,p)$ ,  $(n,n')$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,d)$ ,  $(n,n'p)$ , κλπ. όπου έχουμε σύλληψη νετρονίου και εκπομπή φορτισμένου σωματιδίου: **eV <  $E_n$  < keV**.
- **Πυρηνική σχάση (Fission)**: θερμικές ενέργειες.  
 $n + (Z,A) \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + n + n + \dots$
- **Παραγωγή αδρονικού πίδακα**: υψηλές ενέργειες  **$E_n > 100 \text{ MeV}$** .

# Κατηγορίες Νετρονίων

- Υψηλής ενέργειας:  $E_n > 100 \text{ MeV}$ .
- Ταχέα νετρόνια:  $100 \text{ keV} < E_n < 100 \text{ MeV}$
- Επιθερμικά νετρόνια:  $0.1 \text{ eV} < E_n < 100 \text{ keV}$
- Θερμικά νετρόνια:  $E_n \sim kT \sim 1/40 \text{ eV}$
- Ψυχρά ή Υπερ-ψυχρα:  $E_n \sim \text{meV}$  ή  $\mu\text{eV}$

Η ολική πιθανότητα αλληλεπίδρασης νετρονίων είναι:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{capt}} + \dots$$

πολλαπλασιάζουμε με την πυκνότητα των ατόμων  $\rightarrow$  μέσο μήκος ελεύθερης διαδρομής (mean free path length):

$$N = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

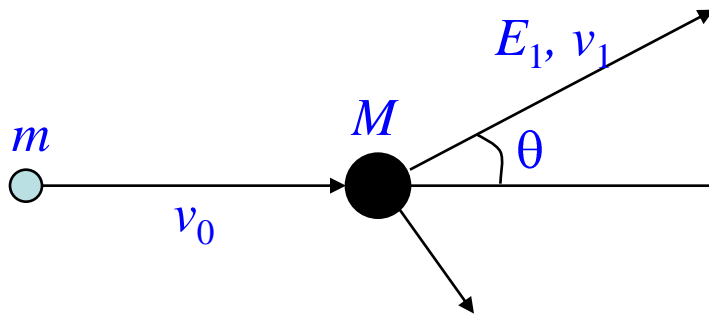
$$\frac{1}{\lambda} = N \sigma_{\text{tot}} = \frac{N_A \rho}{A} \sigma_{\text{tot}}$$

Εξασθένηση νετρονίων σε πάχος  $x$

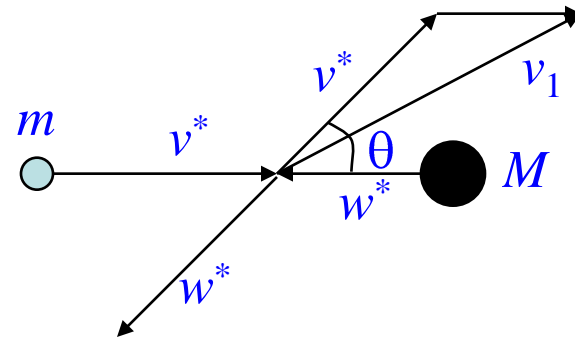
$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x \exp(-x/\lambda) dx}{\int_0^{\infty} \exp(-x/\lambda) dx}$$

# Νετρόνια

- Καθυστέρηση ταχέων νετρονίων  $\rightarrow$  **moderation**, πολύ σημαντική διαδικασία για την πυρηνική φυσική και τεχνολογία. Νετρόνιο εισέρχεται στην ύλη και σκεδάζεται όπισθεν (**μη-ελαστική**) πρόσθια (**ελαστική**) χάνοντας ενέργεια μέχρι την θερμική ισορροπία με τα γειτονικά άτομα, οπότε συλλαμβάνεται από κάποιο πυρήνα.



σύστημα εργαστηρίου



σύστημα κέντρου μάζας (CM)

$$m v_0 = (m + M) V_{cm} \quad \text{διατήρηση ορμής}$$

$$v^* = v_0 - V_{cm} = M v_0 / (m + M)$$

$$M/m = A \quad !!$$

# Νετρόνια

- Θεώρημα των συνημίτονων των  $v^*$ ,  $v_1$  και  $V_{cm}$  θα έχουμε:

$$v_1^2 = (v^*)^2 + (V_{cm})^2 + 2 v^* V_{cm} \cos \theta$$

$$v_1^2(\max) = (v^* + V_{cm})^2 = v_0^2 \quad (\theta = 0)$$

$$v_1^2(\min) = (v^* - V_{cm})^2 = (M - m)^2 v_0^2 / (M + m)^2 = \alpha v_0^2 \quad (\theta = 180^\circ)$$

όπου  $\alpha = (M - m)^2 / (M + m)^2$

- Ενέργειες σκέδασης είναι:

$$E_1(\max) = \frac{1}{2} m v_0^2 = E_0$$

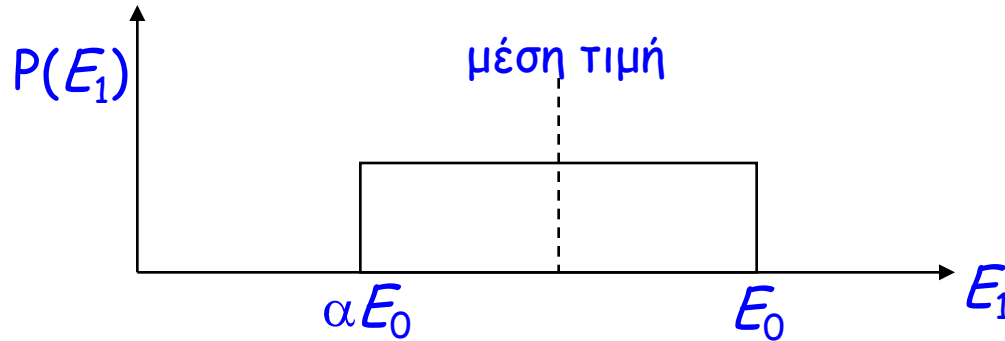
$$E_1(\min) = \alpha E_0 \quad [=0 \text{ for } M = m] \text{ (σκέδαση με πρωτόνιο, και επομένως}$$

έχουμε καθυστέρηση νετρονίων πιο αποδοτική με πρωτόνια ή ελαφρούς πυρήνες, για παράδειγμα: Νερό, παραφίνη, κ.λ.π.)



# Νετρόνια

Κατανομή ενεργειών για διάφορες σκεδάσεις νετρονίων:



$$\text{Μέση τιμή: } \overline{E_1} = \frac{1}{2} (1 + \alpha) E_0 \Rightarrow \overline{E_1} = \frac{1}{2} E_0 \quad \text{for } M = m$$

- Επόμενες  $n$  σκεδάσεις:  $\overline{E}_n = E_0 \times \left( \frac{\overline{E}_1}{E_0} \right)^n$
- Εκθετική μείωση της ενέργειας  $E_n$  vs  $n \Rightarrow$  γραμμική σε λογαριθμική κλίμακα
- Κατανομή Condon-Breit για  $n$  σκεδάσεις:  $\frac{dP(E_n)}{dE} = \frac{1}{E_0 (n-1)!} \left( \ln \frac{E_0}{E} \right)^{n-1}$

# Νετρόνια

- Καλύτερα να υπολογίσουμε τη μέση μείωση του λογαρίθμου (ενέργειας) σε μια σκέδαση  $\rightarrow$  *logarithmic energy decrement*

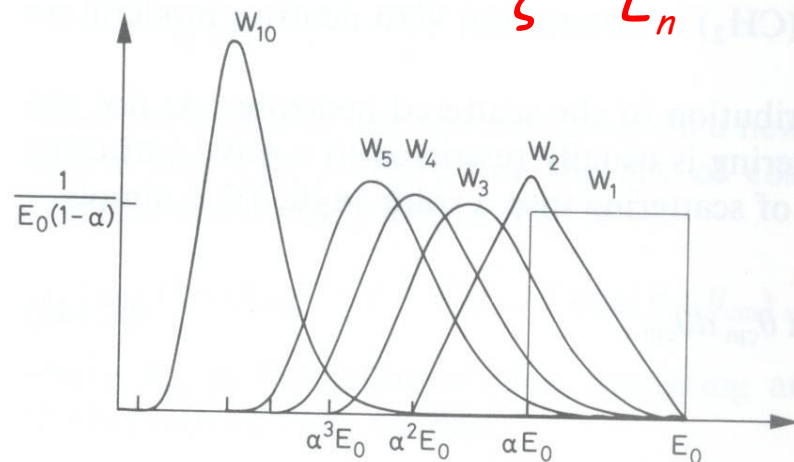
$$\xi = \overline{\ln(E_0 / E_1)} = 1 + \frac{M - m^2}{2Mm} \ln\left(\frac{M - m}{M + m}\right)$$

Για σκέδαση από πρωτόνια  $M=m \rightarrow \xi=1$

Μετά από  $n$  σκεδάσεις

$$\overline{\ln E_n} = \ln E_0 - n\xi \Rightarrow n = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_0}{E_n}$$

για  $M=A \ll 6 \rightarrow \xi = \frac{2}{A} - \frac{4}{3A^2}$



Για σκέδαση από πρωτόνια νετρόνια αρχικής ενέργειας  $E=2 \text{ MeV}$  θερμοποιούνται ( $E=0.025 \text{ eV}$ ) μετά από 18 σκεδάσεις

# Ανίχνευση Νετρονίων

- Έμμεσες τεχνικές ανίχνευσης: το νετρόνιο αλληλεπιδρά ώστε να παράγει φορτισμένα σωματίδια



# Θωράκιση Νετρονίων

- **Θερμοποίηση νετρονίων:**  
Υλικά πλούσια σε πρωτόνια H (Νερό, παραφίνη-polythene)
- **Θωράκιση θερμικών νετρονίων:**  
Μπετόν (Concrete)  
Φύλλα Καδμίου (Cadmium sheet) (μεγάλη απορρόφηση στις χαμηλές ενέργειες)

# Νετρίνο

- Όπως τα φωτόνια τα νετρόνια έτσι και τα νετρίνο ανιχνεύονται έμμεσα - μόνο δια μέσου των αλληλεπιδράσεων τους.
- Εξαρτάται από τη γεύση του νετρίνο θεωρούμε τις παρακάτω διαδικασίες:

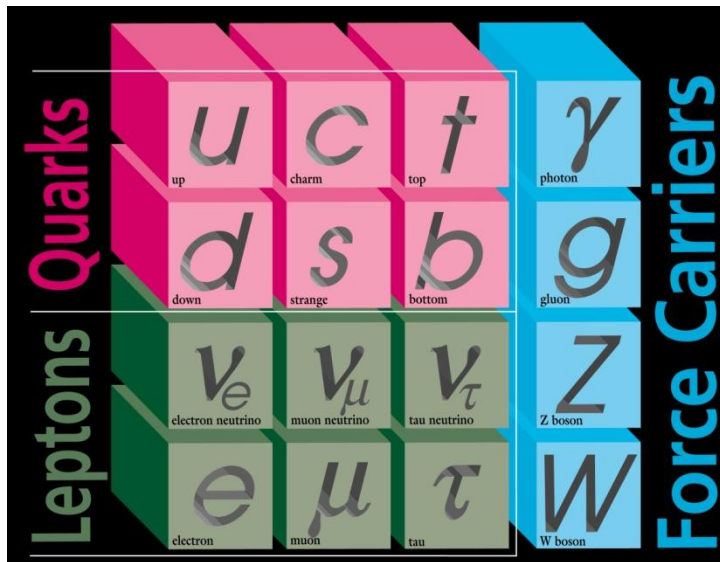


- Η ενεργός διατομή της αλλ/σης  $\nu_e$  στη περιοχή ενέργειας MeV υπολογίζεται ως:

$$\sigma(\text{IN}) = \frac{4}{\pi} 10^{-10} \left( \frac{\hbar p}{m_p c} \right)^2 = 1.6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 \text{ για } 0.5 \text{ MeV}$$

# Μια υπενθύμιση

Τα στοιχειώση σωματίδια σήμερα:



$3 \times 6 = 18$  quarks

+ 6 λεπτόνια

= 24 φερμιόνια (συστατικά της ύλης)

+ 24 αντισωματίδια

**48 στοιχειώδη σωματίδια**

consistent with point-like dimensions within the resolving power of present instrumentation ( $\sim 10^{-16}$  cm)



12 διαδότες δυνάμειν ( $\gamma$ ,  $W^{\pm}$ ,  $Z$ , 8 gluons)

+ το σωματίδιο the Higgs spin 0 (ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΑΝΑΚΑΛΥΦΘΕΙ ΑΚΟΜΗ!!!)  
υπεύθυνο για τη δημιουργία των μαζών όλων των σωματιδίων

# ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Ανιχνευτής  
Ακτινοβολίας

Μετατροπή Ενέργειας  
της Ακτινοβολίας



Σε  
Ηλεκτρική  
Ενέργεια

Αλληλεπίδραση Ακτινοβολίας με την Ύλη

Φορτισμένα Σωματίδια

Ιοντίζουν ή Διεγείρουν

ΑΜΕΣΑ

Ουδέτερα Σωματίδια

Δημιουργούν με την ύλη Φορτισμένα  
Σωματίδια (πυρηνικές αντιδράσεις)

ΕΜΜΕΣΑ

Ακτίνες γ-Χ

Ιοντίζουν ή Διεγείρουν την ύλη

ΑΜΕΣΑ

- Ποσότητα ακτινοβολίας
- Ενέργεια Ακτινοβολίας
- Χρόνος Διέλευσης Ακτινοβολίας
- Σημείο Πρόσκρουσης
- Είδος Ακτινοβολίας

πληροφορίες από ανιχνευτή

# ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

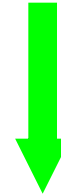
## Ταξινόμηση Ανιχνευτών

### ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΙΣΜΟΥ



- Αερίου  
(Gas chambers)
- Στερεάς Κατάστασης  
(Solid State Detectors)
- Φωτογραφικά Γαλακτώματα  
(Emulsion Chambers)

### ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ



- Σπινθηριστές  
(Scintillator Counters)
- Θερμοφωταύγεια  
(Thermoluminescence Detectors)



# Χαρακτηριστικά Ανιχνευτών

- Ευαισθησία (Sensitivity)
- Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα (Energy Resolution)
- Χωρική Διακριτική Ικανότητα (Spatial Resolution)
- Ανιχνευτή Ικανότητα (Detector Efficiency)
- Γεωμετρική Αποδοχή (Solid Angle or Acceptance)
- Χρόνος Απόκρισης (Response Time)
- Ανενεργός Χρόνος (Dead Time)

# Ευαισθησία Ανιχνευτή

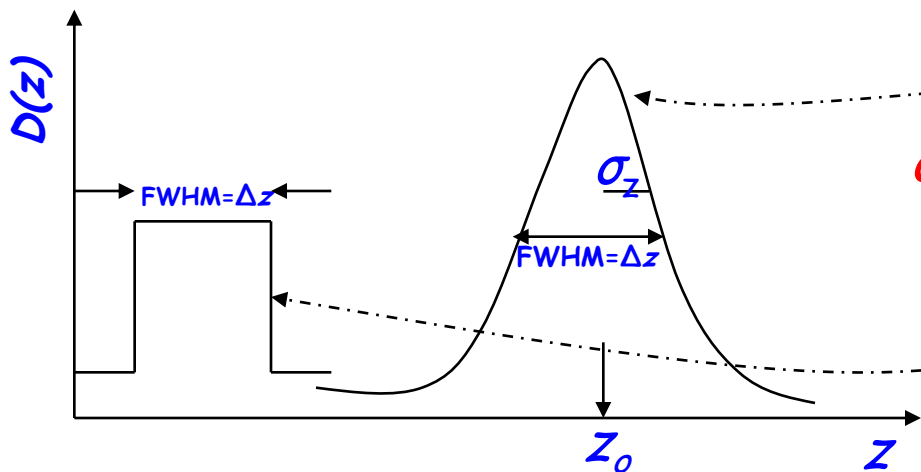
- Η ικανότητα του ανιχνευτή να δημιουργήσει **χρήσιμο σήμα** για μια συγκεκριμένη ακτινοβολία. → Συνάρτηση των **στοιχείων** του ανιχνευτή
  - **όγκος,**
  - **ενδογενής θόρυβος,**
  - **προστατευτικό «παράθυρο»,**
  - **ενεργός διατομή του υλικού, κλπ.**
- Ενεργός διατομή & μάζα του ανιχνευτή → **πιθανότητα** η προσπίπτουσα ακτινοβολία να απορροφηθεί μερικώς ή ολικώς.
- Ενδογενής θόρυβος → ανεξάρτητος από την πρόσπτωση ακτινοβολίας, καθορίζει δε το **μικρότερο ποσό ιοντισμού** που πρέπει να προκληθεί για να έχουμε χρήσιμο σήμα.
- Πάχος προστατευτικού «παραθύρου» (ενέργειας) αποκλείει την ανίχνευση ακτινοβολιών με πολύ χαμηλή ενέργεια λόγω απορρόφησης.

# Διακριτική Ικανότητα

- **Διακριτική ικανότητα (resolution):** χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ανιχνευτή στη μέτρηση μιας ποσότητας  $Z$ . Έστω  $z$  είναι η απόκριση του ανιχνευτή, τότε η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή ορίζεται ως η τυπική απόκλιση  $\sigma_z$  ή το πλάτος στο μισό του μέγιστου ύψους κορυφής (**Full Width Half Maximum, FWHM**)  $\Delta z$  της κατανομής  $D(z)$  στη μέτρηση της ποσότητας  $z$  μια μονοχρωματική κατανομή εισόδου  $\delta(Z - \langle Z \rangle)$ .

- Η μέση τιμή της μετρούμενης ποσότητας είναι:  $\langle z \rangle = \int z D(z) dz$

- Η απόκλιση από τη μέση τιμή είναι:  $\sigma_z^2 = \langle z - \langle z \rangle^2 \rangle = \int z - \langle z \rangle^2 D(z) dz$
- τυπική απόκλιση  $\sigma_z$  είναι η τετραγωνική ρίζα της απόκλισης



$$\text{Αν } D(z) = A e^{-(z-z_0)^2 / 2\sigma_z^2}, \quad z_0 = \langle z \rangle$$

$$\sigma_z = \sqrt{\langle z - z_0^2 \rangle} = \frac{\text{FWHM}}{2\sqrt{2\ln 2}} = \frac{\text{FWHM}}{2.36}$$

Αν  $D(z)$  είναι σταθερή κατανομή:

$$\sigma_z = \sqrt{\langle z - \sigma_z^2 \rangle} = \frac{\Delta z}{\sqrt{12}}$$

# Διακριτική Ικανότητα

- **σχετική διακριτική ικανότητα (relative resolution)** όταν μετράμε μια ποσότητα  $Z$ . Έστω  $z$  είναι η απόκριση του ανιχνευτή, τότε η σχετική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή ορίζεται ως ο **λόγος** μεταξύ της **τυπικής απόκλισης  $\sigma_z$**  και της **μέσης μετρούμενης τιμής  $\langle z \rangle$** :

$$\delta Z = \frac{\sigma_z}{\langle z \rangle}$$

- Αν η μόνη πηγή της διακύμανσης (fluctuations) της απόκρισης του ανιχνευτή είναι η στατιστική διακύμανση του αριθμού  $N$  των φορτισμένων σωματιδίων που καταγράφονται για παράδειγμα από τον ανιχνευτή και αν ακολουθεί Poisson κατανομή τότε για  $N > 20$  η απόκριση θα ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή και η σχετική διακριτική ικανότητα θα είναι:

$$\delta Z = \frac{\sigma_z}{\langle z \rangle} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

# Διακριτική Ικανότητα

- Αν δεν ισχύει η υπόθεση του Poisson, τότε έχουμε το φαινόμενο Fano

$$F = \left( \frac{\text{μετρούμενη Διακριτική Ικανότητα}}{\text{Διακριτική Ικανότητα αν είχαμε Poisson στατιστική}} \right)^2$$

Για ανιχνευτές στερεάς κατάστασης  $F \sim 0.06$ ,  
Για ανιχνευτές φθορισμού  $F \sim 1$   
Για ανιχνευτές αερίου  $F \sim 0.17$

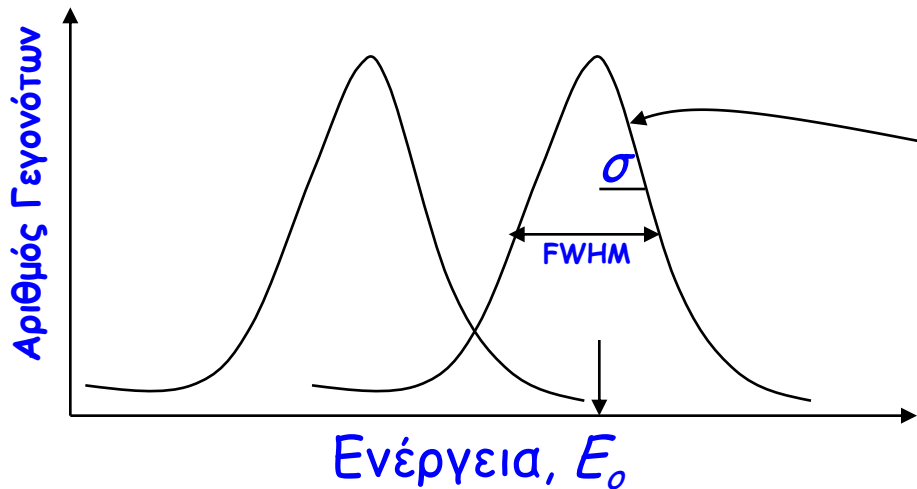
- Η σχέση μεταξύ της μετρούμενης μέσης τιμής  $\langle z \rangle$  και της τιμής  $Z$  της αρχικής ποσότητας των εισερχομένων σωματιδίων στον ανιχνευτή θα πρέπει να καθορισθεί με τη διαδικασία του **βαθμονόμησης (calibration)** του ανιχνευτή σε μια μονοχρωματική δέσμη σωματιδίων. Η βαθμονόμηση θα μας δώσει μια σχέση της μορφής:

$$\langle z \rangle = cZ$$

- $c \rightarrow$  σταθερό "γραμμική"
- $c \rightarrow$  μεταβάλλεται με το  $Z$  "μη γραμμική"

# Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα

- Η ικανότητα του ανιχνευτή να διαχωρίζει μεταξύ των ενεργειών δυο ακτινοβολιών. Μέτρο της διακριτικής ικανότητας → το πλάτος  $\sigma$  στο σημείο καμψής της γκαουσιανής



$$\frac{dN}{dE} = Ae^{-(E-E_0)^2/2\sigma^2}$$

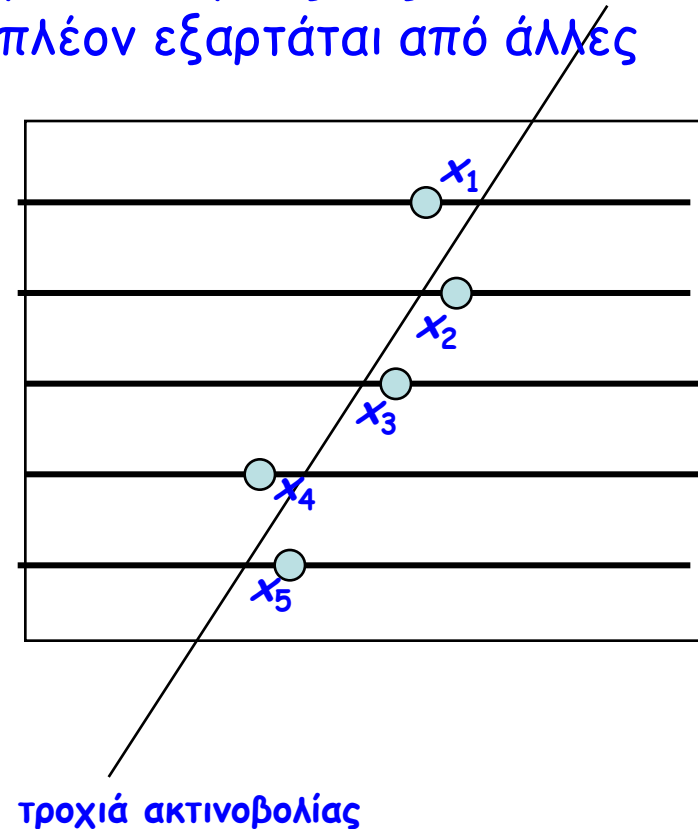
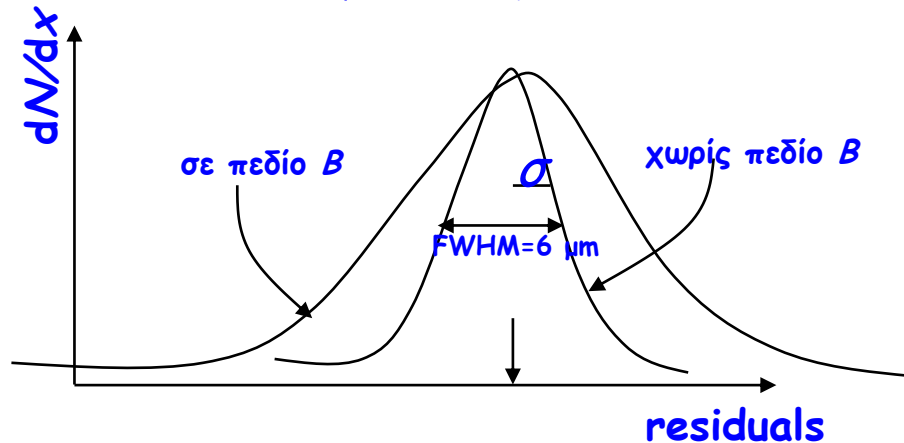
$$\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}} = \frac{FWHM}{2.36}$$

$$\delta E = \frac{\sigma}{E_0}$$

σχετική διακριτική ικανότητα για ενέργεια  $E_0$

# Χωρική Διακριτική Ικανότητα

- Η ικανότητα του ανιχνευτή να διαχωρίζει τη θέση μεταξύ των ιχνών που αφήνουν δυο ακτινοβολίες που ανιχνεύονται ταυτόχρονα από τον ίδιο ανιχνευτή.
- Μέτρο της ΧΔΙ είναι η τυπική απόκλιση  $\sigma$  ή το FWHM της κατανομής των διαφορών των ιχνών της ακτινοβολίας από την τροχιά που προσδιορίζεται από αυτά (**residuals**). Είναι συνάρτηση κυρίως της κατάτμησης (**granularity**) του ανιχνευτή και επιπλέον εξαρτάται από άλλες παραμέτρους (ενδογενείς ή εξωγενείς).
- Πχ: Ανιχνευτής μικροταινιών Si (ανιχνευτής στερεάς κατάστασης) η ΧΔΙ επιδεινώνεται παρουσία μαγνητικού πεδίου.



# Ανιχνευτική Ικανότητα (Απόδοση) Ανιχνευτή

- Η πιθανότητα καταγραφής ενός παλμού από τον ανιχνευτή όταν ένα σωματίδιο εκπέμπεται σε μια στοιχειώδη αντίδραση λέγεται **Ανιχνευτική Ικανότητα ή Απόδοση** του ανιχνευτή. Επίσης το ποσοστό ανίχνευσης της προσπίπτουσας (ή εκπεμπόμενης) ακτινοβολίας στη μονάδα του χρόνου.

- Απόλυτη ή Ολική Ανιχνευτική ικανότητα  
(**Absolute or Total Detection Efficiency**),  $\epsilon_{TOT}$

- Ενδογενή Ανιχνευτική ικανότητα  
(**Intrinsic Detection Efficiency**),  $\epsilon_{int}$

- Γεωμετρική Ανιχνευτική ικανότητα  
(**Geometrical/Acceptance**),  $\epsilon_{geom}$

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{int} \cdot \epsilon_{geom}$$

Συνάρτηση της ακτινοβολίας της ενέργειας  
και του υλικού του ανιχνευτή

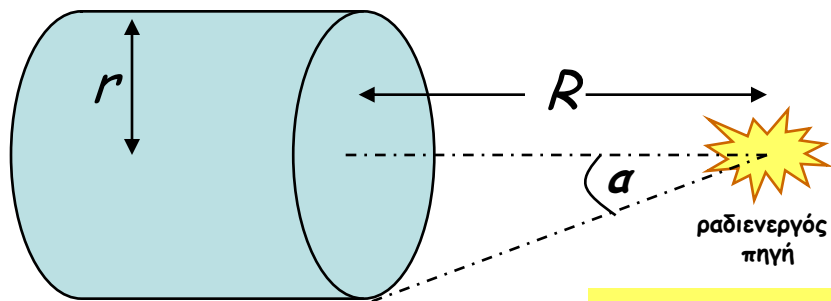
$$\epsilon_{int} = \frac{\# \text{ ακτινοβολιών που ανιχνεύονται}}{\# \text{ ακτινοβολιών που εισέρχονται}}$$

$$\epsilon_{tot} = \frac{\# \text{ ακτινοβολιών που ανιχνεύονται}}{\# \text{ ακτινοβολιών που εκπέμπονται από πηγή}}$$



# Γεωμετρική Ανιχνευτική Ικανότητα

- Το ποσοστό της εκπεμπόμενης / προσπίπτουσας ακτινοβολίας μιας ραδιενεργού πηγής, που μπορεί να γίνει δεκτό από τον ανιχνευτή. Η γεωμετρική ανιχνευτική ικανότητα μπορεί να υπολογιστεί από τη γεωμετρία του ανιχνευτή με τη βοήθεια της στερεάς γωνίας  $\Omega$  που αντιστοιχεί στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή:



$$\Omega = \int_D \sin \theta d\theta d\varphi$$

και θα έχει την έκφραση:  $\epsilon_{\text{geom/accept}} = \frac{\Omega}{4\pi}$

$$\Omega = \int_D \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$$

$$\Omega = 2\pi \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{r^2 + R^2}} \right)$$

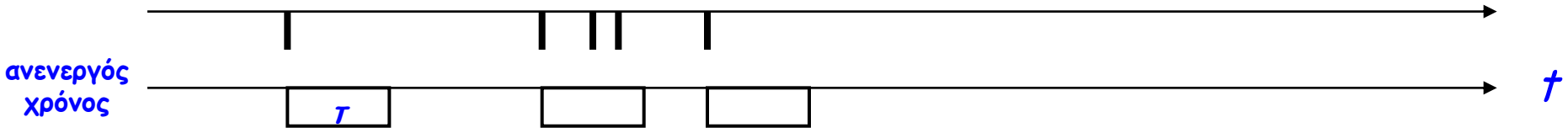
- Πχ Η επιφάνεια του ανιχνευτή είναι κύκλος ακτίνας  $r$  που βρίσκεται μπρος από μια ραδιενεργό πηγή σε απόσταση  $R$

Για  $r \ll R \rightarrow \epsilon_{\text{geom/accept}} = \frac{\pi r^2}{R^2}$

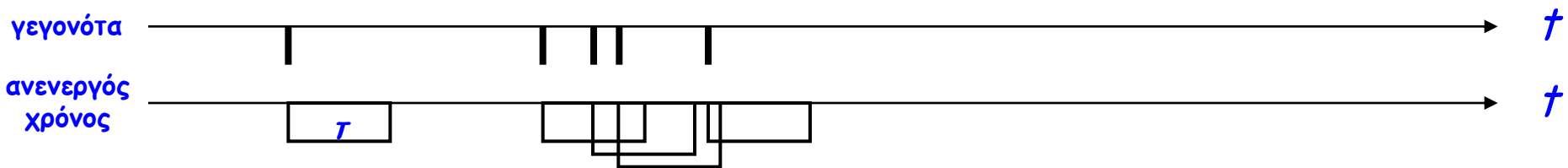
# Ανενεργός Χρόνος (deadtime)

- Η ενδογενής ικανότητα του ανιχνευτή μπορεί να επιδεινωθεί αν ο ανιχνευτής δεν είναι ικανός να επεξεργαστεί ένα γεγονός διότι είναι απασχολημένος με το ένα προηγούμενο γεγονός. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει στις περιπτώσεις που ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων είναι πολύ μεγάλος και ονομάζεται «**ανενεργός χρόνος**» (**deadtime**). Ο ανενεργός χρόνος σχετίζεται με την ικανότητα ανίχνευσης. Υπάρχουν δυο τρόποι μελέτης του ανενεργού χρόνου ενός ανιχνευτή

## Non-Paralyzable deadtime model



## Paralyzable deadtime model



# Non-Paralyzable deadtime model

- $R$  = αληθινός ρυθμός ακτινοβολίας,  $R'$  = ρυθμός καταμετρούμενων γεγονότων,  $\tau$  = ανενεργός χρόνος για ένα γεγονός, τότε το ποσοστό ολικού ανενεργού χρόνου είναι  $R'\tau$  και ο ρυθμός των αληθινών ακτινοβολιών που χάνονται είναι  $RR'\tau$  που επίσης ισούται με  $R-R'$ , επομένως

$$RR'\tau = R - R' \Rightarrow R = \frac{R'}{1 - R'\tau}$$

- Για χαμηλούς ρυθμούς καταγραφής,  $R' \ll 1/\tau$ , γεγονότων

$$R \approx R'(1 + R'\tau)$$

Πχ: Ας υποθέσουμε  $\tau=200$   $\mu\text{s}$  και  $R=30000$  counts/min, τότε ο αληθινός ρυθμός ακτινοβολίας θα είναι:

$$R = \frac{R'}{1 - R'\tau} = \frac{30000/60}{1 - 30000/60 \cdot 200 \times 10^{-6}} = 555.5 \text{ counts/s}$$

Και επομένως ο ανενεργός χρόνος είναι υπεύθυνος για τα χάνσιμο των:

$$\frac{R - R'}{R} = \frac{555 - 500}{555} = 10\% \text{ των counts}$$

# Paralyzable deadtime model

- $R$  = αληθινός ρυθμός ακτινοβολίας,  $R'$  = ρυθμός καταμετρούμενων γεγονότων,  $\tau$  = ανενεργός χρόνος για ένα γεγονός. Θα καταγράφονται γεγονότα τα οποία καταφτάνουν σε χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα από  $\tau$ . Γνωρίζουμε ότι η κατανομή χρονικών διαστημάτων για ένα ρυθμό  $R$  είναι:

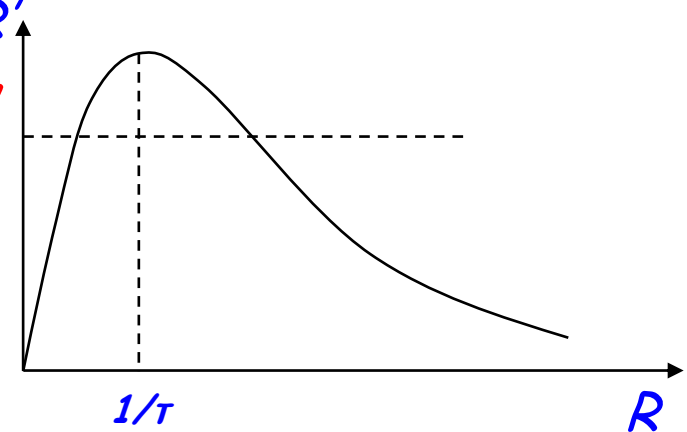
$$P(t) = \frac{1}{R} e^{-Rt}$$

- Η πιθανότητα να λάβουμε ένα χρονικό διάστημα  $t > \tau$  θα είναι

$$P(t > \tau) = \frac{1}{R} \int_{\tau}^{+\infty} e^{-Rt} dt = e^{-R\tau} R'$$

και επομένως ο ρυθμός με τον οποίο αυτό συμβαίνει θα είναι:

$$R' = R e^{-R\tau}$$



Για χαμηλούς ρυθμούς καταγραφής γεγονότων,  $R \ll 1/\tau$ , θα ισχύει:

$$R' \approx R(1 - R\tau)$$

# Μέτρηση Νεκρού Χρόνου

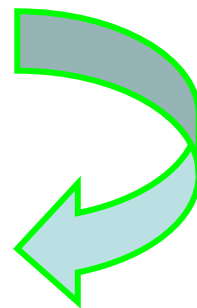
- Η κλασική μέθοδος της μέτρησης του ανενεργού χρόνου είναι η μέθοδος των «δυο-πηγών». Κατά τη μέτρηση, καταμετρούνται οι ρυθμοί  $R_1$  της πηγής-1,  $R_2$  της πηγής-2 και  $R_{12}$  των πηγών-1 & 2 ταυτόχρονα και ας υποθέσουμε ότι υπάρχει και ένας ρυθμός υποβάθρου  $R_b$ . Θα ισχύει η εξίσωση για τους αντίστοιχους αληθινούς ρυθμούς  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{12}$ , και  $R_b$ :

$$R_1 - R_b + R_2 - R_b = R_{12} - R_b \quad \leftarrow \text{Καθαροί αληθινοί ρυθμοί}$$

$$\Rightarrow R_1 + R_2 = R_{12} + R_b$$

$$R_1 = \frac{R_1'}{1 - R_1' T}, \quad R_2 = \frac{R_2'}{1 - R_2' T}, \quad R_{12} = \frac{R_{12}'}{1 - R_{12}' T}, \quad R_b = \frac{R_b'}{1 - R_b' T}$$

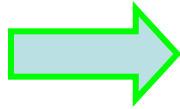
$$\text{για } R_b' T \ll 1 \quad \frac{R_b'}{1 - R_b' T} = R_b'$$



# Μέτρηση Νεκρού Χρόνου

$$R_1' R_2' R_{12}' - R_1' R_2' R_b' - R_1' R_{12}' R_b' - R_2' R_{12}' R_b' \tau^2 \\ - 2 R_1' R_2' - R_{12}' R_b' \tau + R_1' + R_2' - R_{12}' - R_b' = 0$$

Αγνοώντας το  
υπόβαθρο

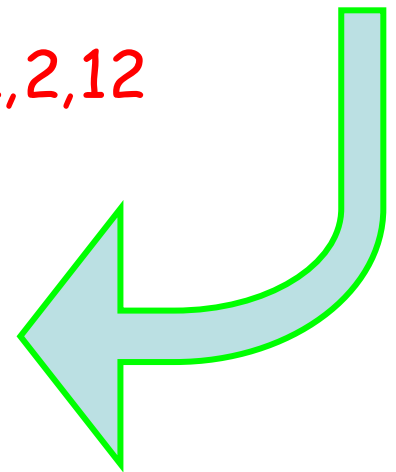


$$R_1' R_2' R_{12}' \tau^2 - 2 R_1' R_2' \tau + R_1' + R_2' - R_{12}' = 0 \\ \Rightarrow \tau = \frac{R_1' R_2' - R_1' R_2' R_{12}' - R_1' R_{12}' - R_2'}{R_1' R_2' R_{12}'}$$

Για ρυθμούς  $\rightarrow$

$$\frac{1}{1 - R_i'} \approx 1 + R_i' \tau, \quad \forall i = 1, 2, 12$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{R_1' + R_2' - R_{12}' - R_b'}{R_{12}'^2 - R_1'^2 - R_2'^2}$$



# ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

**Χρόνος Απόκρισης:**

είναι ο χρόνος που απαιτείται να αποδώσει ο ανιχνευτής το ηλεκτρικό σήμα μετά την άφιξη της ακτινοβολίας.

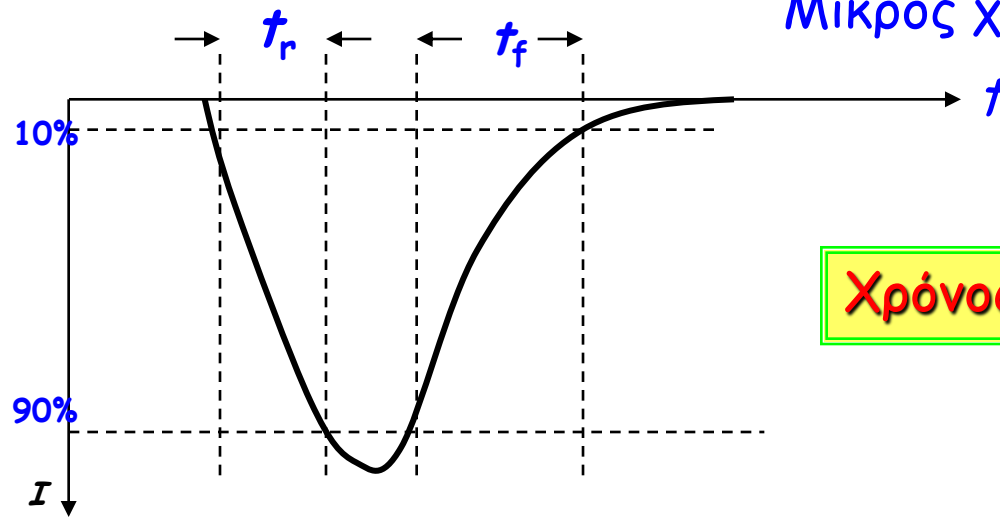
**Χρόνος συλλογής φορτίου (charge collection time):**

έχει να κάνει με ανιχνευτές ημιαγωγών.

**Χρόνος Ανόδου  $t_r$  (rise time):**

του παλμού που λαμβάνεται στην έξοδο του ανιχνευτή εξαρτάται από το χρόνο απόκρισης, την ολική αντίσταση και την ολική χωρητικότητα του ανιχνευτή.

Μικρός χρόνος Ανόδου => καλός χρονισμός ανιχνευτικού συστήματος.



**Χρόνος Πτώσης (Καθόδου)  $t_f$  (fall time)**