

Αλληλεπίδραση των σωματιδίων με την ύλη

Μια εισαγωγή στην ανίχνευση
των σωματιδίων υψηλής ενέργειας

Α. ΛΙΟΛΙΟΣ
Μάθημα Πυρηνικής

Απώλεια ενέργειας των σωματιδίων

- Τα σωματίδια που προσπίπτουν σε κάποιο υλικό αλληλεπιδρούν μαζί του με διάφορους μηχανισμούς (διαφορετικής πιθανότητας ο καθένας) και χάνουν ενέργεια η οποία αποτίθεται στο υλικό.
- Δυνάμεις: Τα φορτισμένα σωματίδια και τα φωτόνια αλληλεπιδρούν (και) με ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, τα αδρόνια (και) με ισχυρές δυνάμεις, τα νετρίνα μόνο με ασθενείς δυνάμεις κ.λ.π.
- Μηχανισμοί: Για το κάθε ένα είδος αλληλεπίδρασης υπάρχουν περισσότεροι από ένας μηχανισμοί απώλειας ενέργειας.
Έτσι, για τα φορτισμένα σωματίδια οι κύριοι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, είναι:
 - μέσω ιονισμών και διεγέρσεων
 - μέσω ακτινοβολίας πέδησης (κυρίως για τα $e^\pm$, αλλά και τα $\mu^\pm$)
 - μέσω εκπομπής ακτινοβολίας Cerenkov.

Τύπος Bethe-Bloch

- **Η απώλεια της ενέργειας** ενός φορτισμένου σωματιδίου (πλὴν e και μ) **μέσω ιονισμῶν και διεγέρσεων**, ανά μονάδα διαδρομῆς του σωματιδίου, δίνεται από τον **τύπο Bethe – Bloch**:

$$-\left. \frac{dE}{dx} \right|_{ion} = N_A \frac{Z}{A} \frac{4\pi a^2 (\hbar c)^2}{m_e c^2} \frac{Z_i^2}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \delta \right)$$

όπου

E η κινητική ενέργεια του σωματιδίου,

$\beta = v/c$ η ταχύτητα του σωματιδίου,

$\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2} = E/m_0 c^2$ ο παράγων Lorentz του σωματιδίου,

$\alpha = 1/137$ η σταθερά της λεπτής υφής,

Z_i το φορτίο του σωματιδίου,

m_e η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου,

I η μέση ενέργεια ιονισμού (ίση με $\sim 10 \cdot Z$ eV, για τον αέρα $I = 34$ eV),

Z ο ατομικός του αριθμός του υλικού,

A η ατομική μάζα του υλικού (g/mole).

δ διορθωτικός όρος σχετικός με την πυκνότητα του υλικού.

Διερεύνηση του τύπου Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = K_1 Z_i^2 \left(\frac{1}{\beta^2} \ln(K_2 \gamma^2 \beta^2) - 1 - \frac{\delta}{\beta^2} \right)$$

Οι σταθερές K_1 και K_2 εξαρτώνται από το υλικό, ενώ το Z_i είναι το φορτίο του σωματιδίου. Η παρένθεση δίνει την εξάρτηση από την ταχύτητα (άρα ενέργεια) του σωματιδίου.

Στην περιοχή ενεργειών μέχρι μερικές φορές την ενέργεια ηρεμίας του σωματιδίου, τα σωματίδια χάνουν απότομα ενέργεια, γι' αυτό η περιοχή αυτή αποκαλείται περιοχή μεγάλου ιονισμού:

$$\text{για } E \approx 0 \text{ έως } m_0 c^2, \quad \frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2}$$

Η καμπύλη σχηματίζει ένα ευρύ ελάχιστο και μετά αρχίζει να ανεβαίνει αργά λόγω σχετικιστικών φαινομένων αλληλεπίδρασης με ηλεκτρόνια του υλικού σε όλο και μεγαλύτερη απόσταση. Αυτή η αργή αύξηση της απώλειας ενέργειας του σωματιδίου λέγεται "ρελατιβιστική άνοδος":

$$\text{για } E \gg m_0 c^2, \quad \frac{dE}{dx} \propto \ln \gamma$$

Στο ελάχιστο της καμπύλης, δηλαδή όταν:

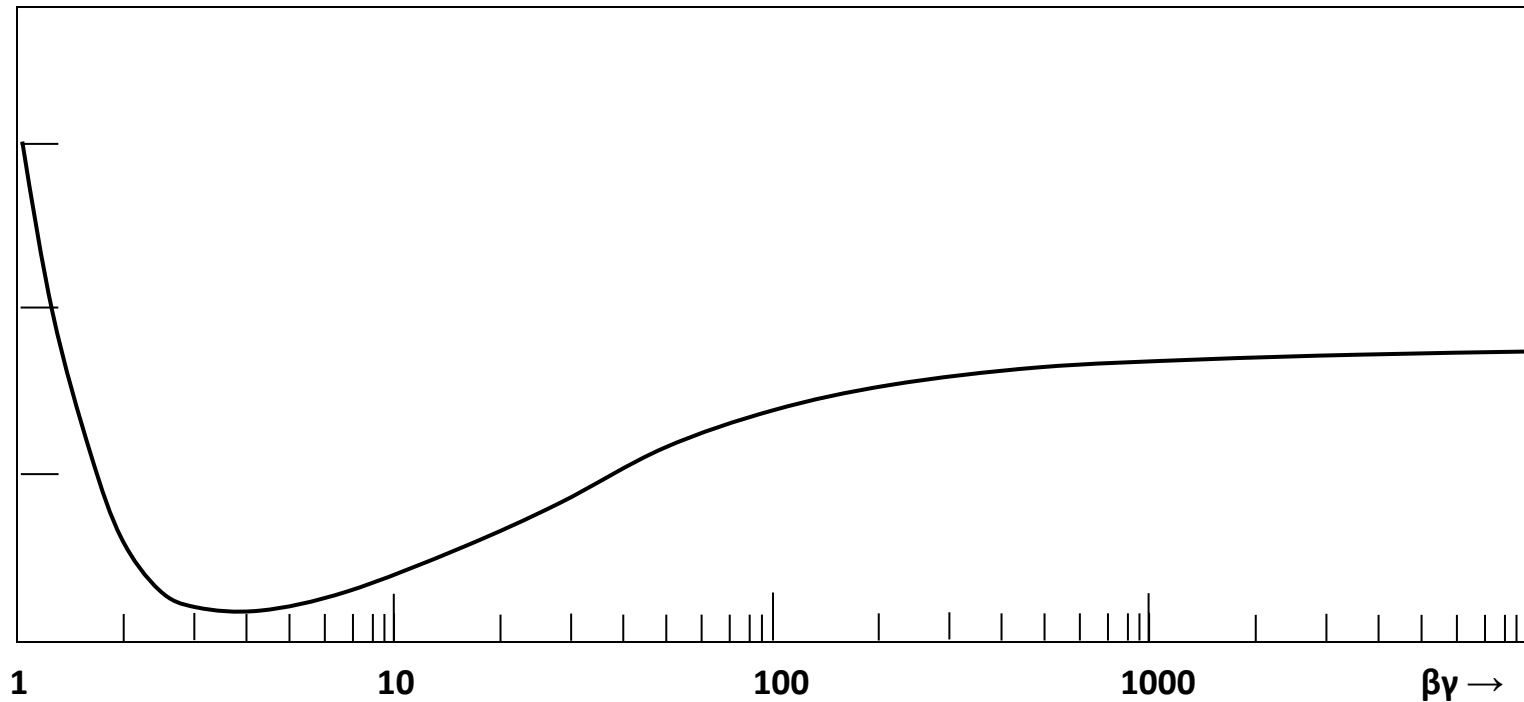
$$\beta\gamma \approx 3.5 - 4 \quad \text{ή} \quad \beta \approx 0.96 \quad \text{ή} \quad E_{\text{mip}} \approx 4m_0 c^2.$$

τα σωματίδια έχουν τον μικρότερο ρυθμό απώλειας ενέργειας και τα λέμε σωματίδια ελάχιστης ιονιστικής ικανότητας (minimum ionizing particles, mip's). Όλα τα είδη σωματιδίων με ίδιο φορτίο, στο ελάχιστο της ιονιστικής τους ικανότητας έχουν περίπου το ίδιο dE/dx το οποίο είναι:

$$(dE/dx)_{\text{mip}} = 1.5 \text{ με } 2 \text{ MeV ανά } g \cdot \text{cm}^{-2}$$

καμπύλη Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = K_1 Z_i^2 \left(\frac{1}{\beta^2} \ln(K_2 \gamma^2 \beta^2) - 1 - \frac{\delta}{\beta^2} \right)$$



Η απώλεια της ενέργειας dE/dx μέσω ιονισμών και διεγέρσεων (καμπύλη του τύπου Bethe – Bloch) σχηματικά (για πρωτόνια). Η ποσότητα $\beta\gamma$ ισούται με p/m_0c , δηλαδή είναι ίση με την ορμή του σωματιδίου σε μονάδες m_0c

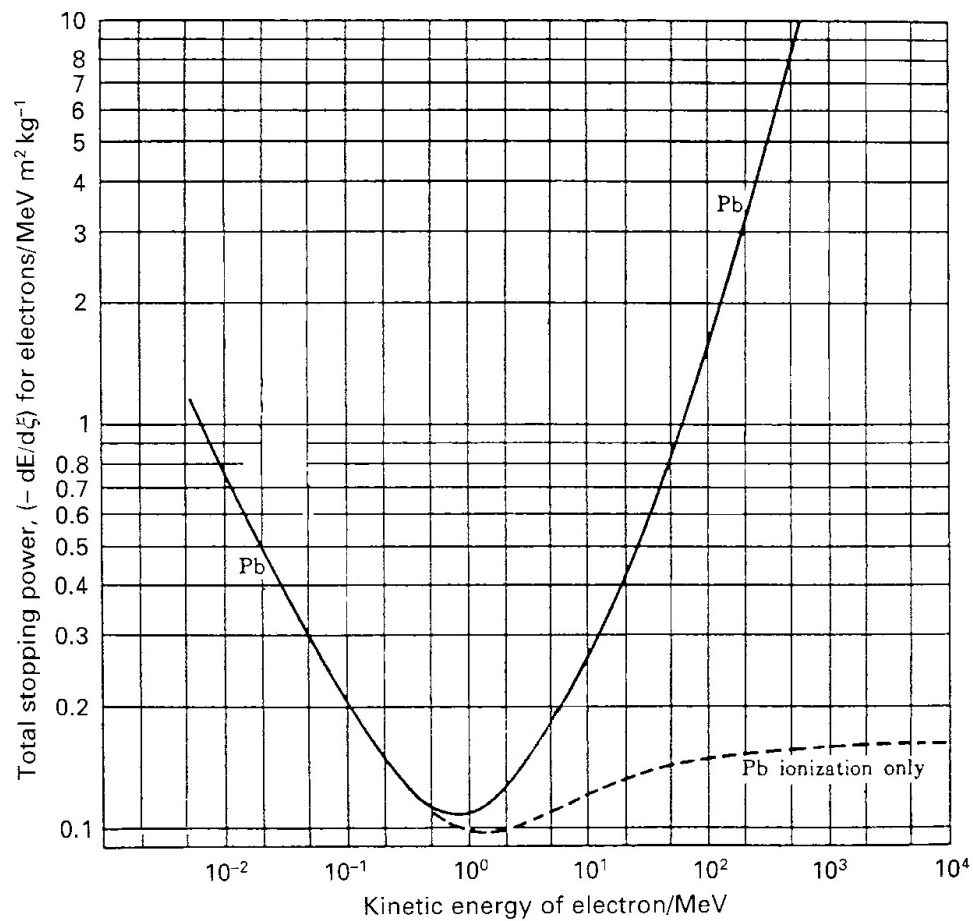
Απώλεια ενέργειας των ηλεκτρονίων και μιονίων

- Τα ηλεκτρόνια και μίονια χάνουν ενέργεια **λόγω ιονισμών και διεγέρσεων**, όπως και τα βαριά φορτισμένα σωματίδια. Η σημαντική όμως διαφορά στην απώλεια ενέργειας των σχετικιστικών ηλεκτρονίων e και μ προέρχεται από έναν άλλο μηχανισμό, την **ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung)**, ο οποίος έρχεται επιπρόσθετα να αυξήσει κατά πολύ την απώλεια ενέργειάς τους.
- Η εκπομπή της ακτινοβολίας πέδησης οφείλεται στις επιταχύνσεις που δέχονται τα σχετικιστικά φορτισμένα σωματίδια κατά την αλληλεπίδρασή τους με το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο των πυρήνων (free-free transition). Είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μάζας ηρεμίας του σωματιδίου, γι' αυτό και αυτή η απώλεια ενέργειας είναι σημαντική μόνο για τα ηλεκτρόνια (που έχουν $m_0c^2 \approx 0.5 \text{ MeV}$) και τα πολύ ενεργειακά μίονια (που έχουν $m_0c^2 \approx 105 \text{ MeV}$). Η εξάρτηση από το υλικό είναι μέσω του Z^2 , άρα είναι σημαντικότερη για τα βαριά υλικά. Η απώλεια ενέργειας των e και μ με ακτινοβολία προκύπτει ότι είναι:

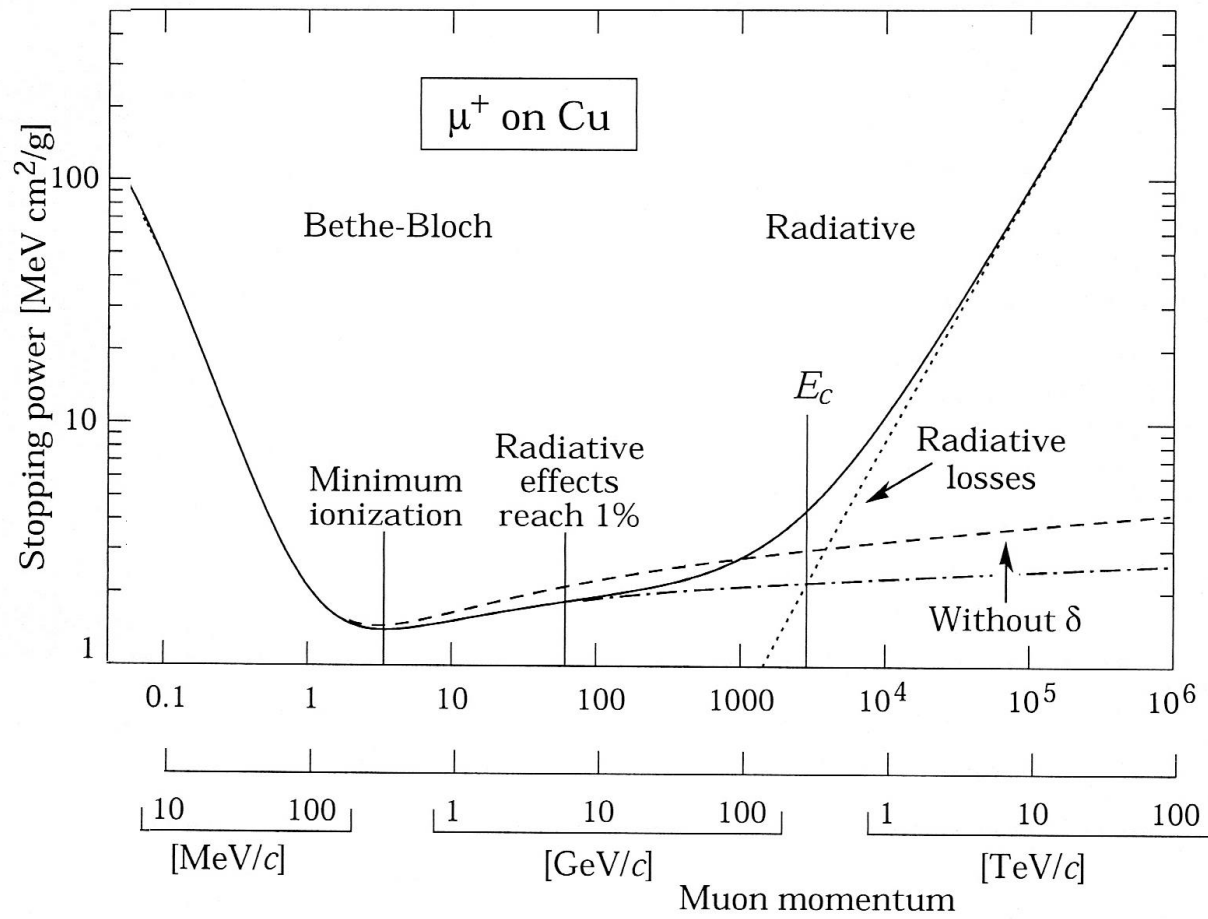
$$-\left.\frac{dE}{dx}\right|_{rad} = \left(4n \frac{Z^2 a^3 (\hbar c)^2}{m_e^2 c^4} \ln \frac{183}{Z^{1/3}}\right) E$$

$$-\frac{dE}{dx} \propto E$$

Απώλεια ενέργειας των ηλεκτρονίων



Απώλεια ενέργειας των μιονίων



Μήκος Ακτινοβολίας (radiation length)

$$-\frac{dE}{dx} \propto E \Rightarrow \frac{dE}{dx} = -B \cdot E \Rightarrow$$

$$E = E_0 \cdot e^{-Bx}$$

- Η τελευταία σχέση μας οδηγεί στο να ορίσουμε ένα χαρακτηριστικό μήκος X_0 για την απώλεια ενέργειας των ηλεκτρονίων, το **μήκος ακτινοβολίας**.

Αυτό είναι, εξ ορισμού:

$$X_0 = \frac{1}{B}$$

Άρα: $E = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}}$ και $-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$

- Η φυσική σημασία του μήκους ακτινοβολίας είναι ότι δίνει την απόσταση μέσα στην οποία το ηλεκτρόνιο χάνει με ακτινοβολία πέδησης τόση ενέργεια κατά μέσο όρο, ώστε να μένει με το $1/e$ της αρχικής. Δηλαδή, **μέσα σε ένα X_0 το ηλεκτρόνιο χάνει με ακτινοβολία πέδησης (φωτόνια) περίπου το 64% της ενέργειάς του.**

Πάχος υλικού σε g/cm² και μήκος ακτινοβολίας στα διάφορα υλικά

- Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός σωματιδίου με το υλικό μέσον στο οποίο κινείται είναι ανάλογη του μήκους ℓ της διαδρομής του και ανάλογη της πυκνότητας $\rho(\ell)$ του υλικού κατά μήκος της διαδρομής του, άρα είναι ανάλογη του γινομένου:

$$x = \ell \cdot \rho(\ell)$$

Το γινόμενο αυτό αντιπροσωπεύει το **πάχος x του υλικού** που το σωματίδιο διαπερνά και έχει διαστάσεις μάζας ανά μονάδα επιφάνειας: g/cm², kg/cm², kg/m²). Για παράδειγμα, το συνολικό πάχος του ατμοσφαιρικού αέρα που θα πρέπει να διασχίσουν τα σωματίδια που έρχονται κατακόρυφα από το διάστημα για να φτάσουν στο υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας είναι περίπου 1 kg/cm² (εφόσον 1 atm = 1 Bar = 1033 g/cm²).

- Σε πρώτη προσέγγιση, το **X_0 στα διάφορα υλικά** δίνεται από τον τύπο:

$$X_0 \cong 180 \cdot \frac{A}{Z^2} \quad (g \cdot cm^{-2})$$

όπου Z και A ο ατομικός και μαζικός αριθμός του υλικού, αντίστοιχα.

Π.χ. Για τον μόλυβδο ($Z = 82$, $A = 207$) ο τύπος δίνει:

$$X_0(\text{Pb}) = 5.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ (ή } 0.49 \text{ cm)}.$$

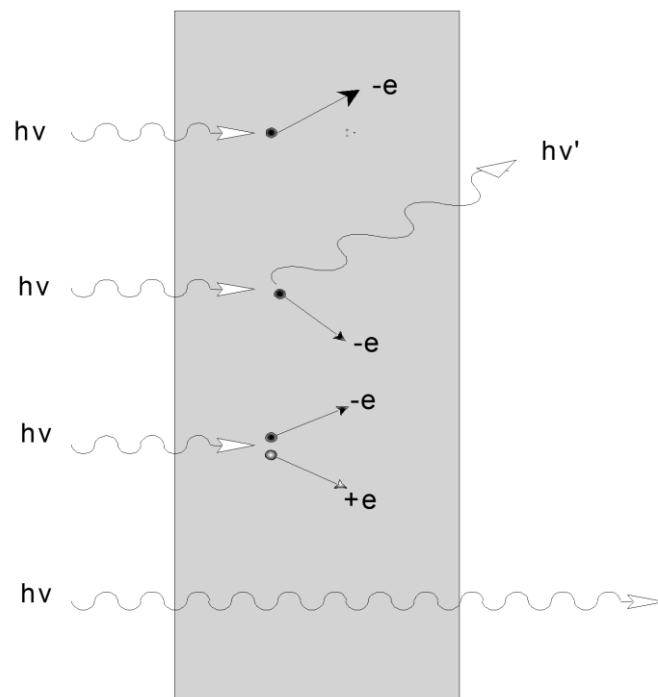
Οι ακριβείς τιμές είναι: $X_0(\text{Pb}) = 6.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (ή 0.56 cm).

- Για μοριακά υλικά το X_0 υπολογίζεται από το μέρο όρο των X_0 των ατόμων λαμβανομένων με το σχετικό συντελεστή βάρους.

$$\text{Στον αέρα (Κ.Σ.)} \quad X_0(\text{αέρα}) = 36.66 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ (ή } 304.2 \text{ m)}$$

$$\text{Στο νερό είναι} \quad X_0(\text{νερό}) = 36.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ (ή } 36.1 \text{ cm)}.$$

Αλληλεπίδραση των γάμμα με την ύλη



Οι 4 πιθανότερες περιπτώσεις έκβασης της πρόσπτωσης σε κάποιο υλικό, φωτονίων γ χαμηλής σχετικά ενέργειας:

- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με **Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με **Φαινόμενο Compton**
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με **Δίδυμη Γένεση** (αυτό μόνο αν $h\nu \geq 2m_0c^2$)
- Το φωτόνιο δεν αλληλεπιδρά καθόλου με το υλικό

Απορρόφηση των γάμμα

Για μία **δέσμη φωτονίων** που διέρχεται από κάποιο υλικό δεδομένου πάχους, μόνο ένα ποσοστό της θα αλληλεπιδράσει και θα απορροφηθεί, ενώ το υπόλοιπο θα διαπεράσει το υλικό. Για μονοενεργειακή δέσμη γάμμα, η μεταβολή στην έντασή της κατά την διέλευση από υλικό, ακολουθεί τον **εκθετικό νόμο απορρόφησης**:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu x}$$

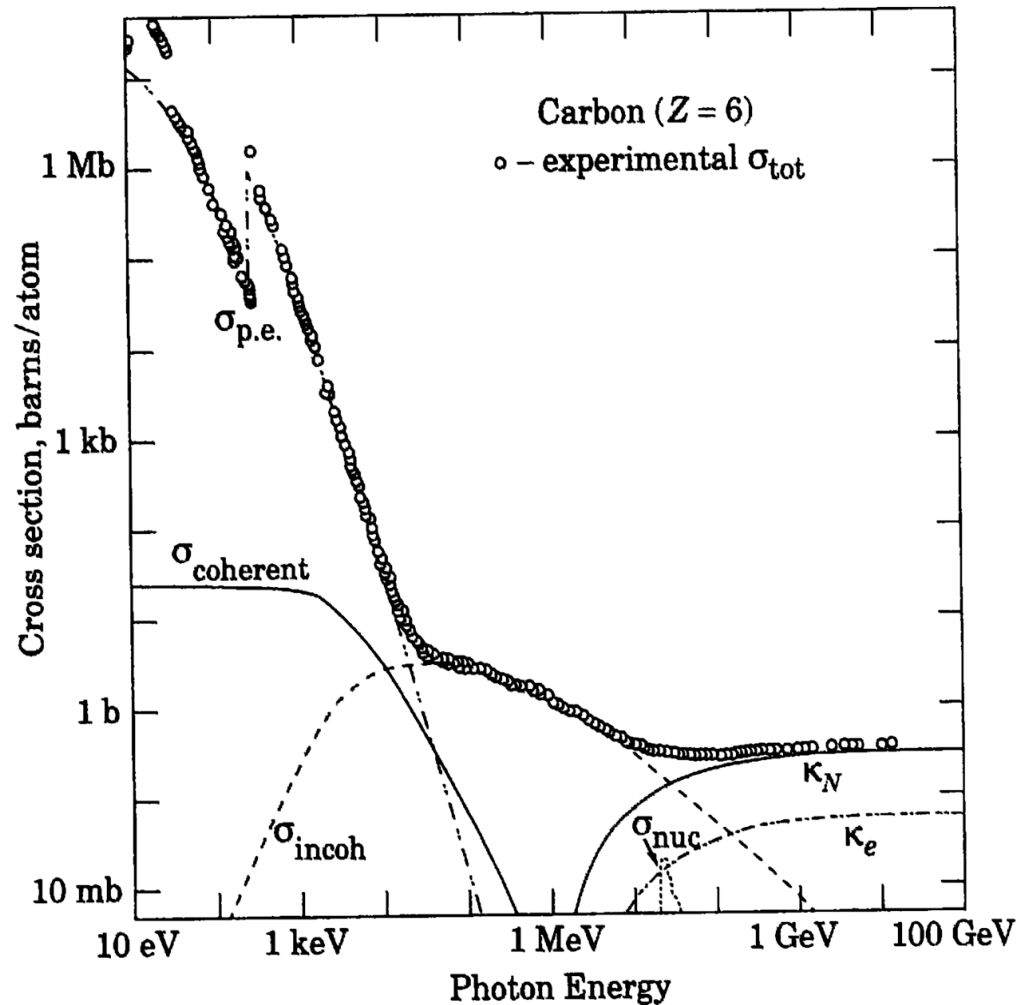
όπου I_0 η ένταση της δέσμης πριν το υλικό (αριθμός φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και μονάδα εμβαδού), $I(x)$ η ένταση της δέσμης μετά το υλικό πάχους x , και μ ο **συντελεστής απορρόφησης** του υλικού. Ο συντελεστής αυτός είναι μέτρο της πιθανότητας να αλληλεπιδράσει το φωτόνιο με το υλικό.

Μια ποσότητα άμεσα σχετιζόμενη με τον συντελεστή απορρόφησης είναι η **μέση ελεύθερη διαδρομή** των φωτονίων λ . Αυτή ορίζεται ως η μέση απόσταση που διανύουν τα φωτόνια μέσα στον απορροφητή χωρίς να αλληλεπιδράσουν με αυτόν. Το λ εύκολα προκύπτει ότι είναι ίσο με το αντίστροφο του γραμμικού συντελεστή απορρόφησης :

$$\lambda = 1/\mu$$

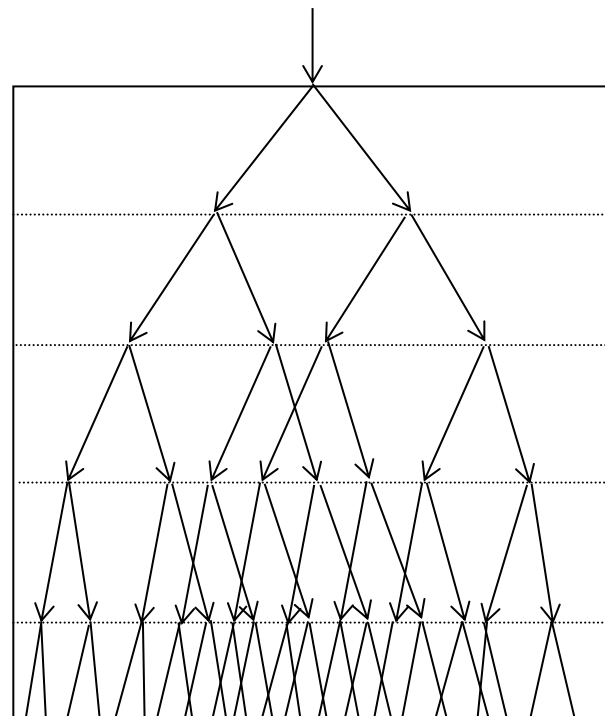
Ενεργός διατομή απορρόφησης των γάμμα σε σχέση με την ενέργειά τους

Τα φωτόνια, στις χαμηλές ενέργειες (κάτω από ~ 1 MeV), αλληλεπιδρούν με **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** και **σκέδαση Compton**. Για όλη την περιοχή ενεργειών πάνω από λίγα MeV, αλληλεπιδρούν με **δίδυμη γένεση**.

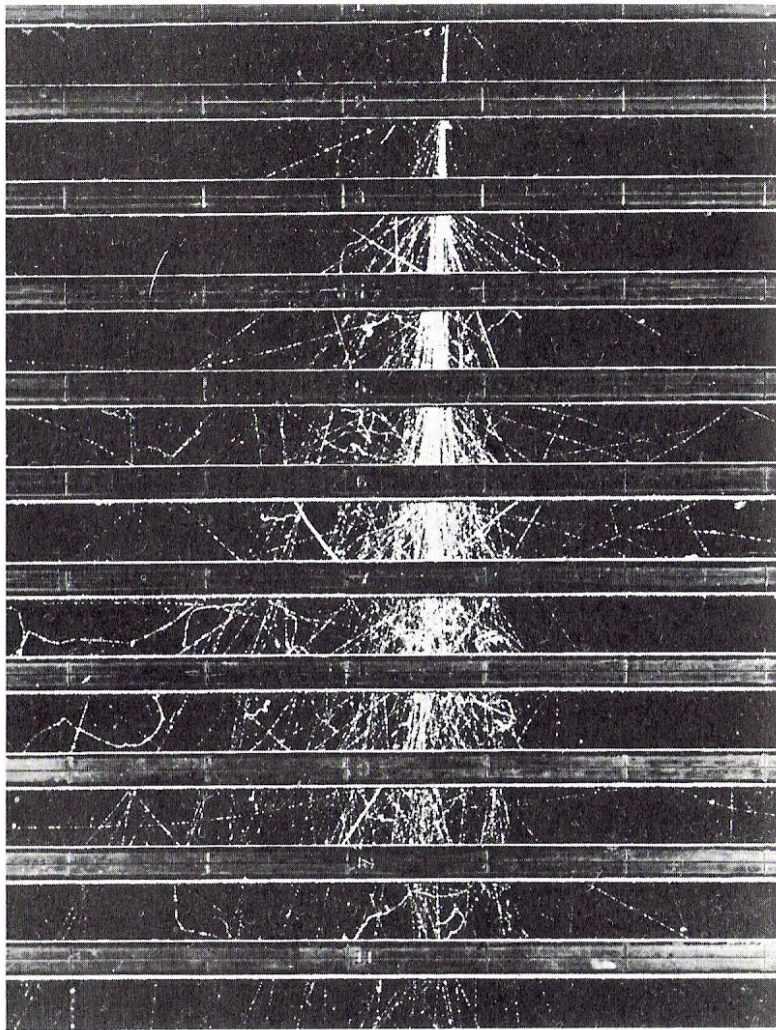


Ηλεκτρομαγνητικός καταιγισμός

- Ένα φωτόνιο ή ηλεκτρόνιο υψηλής ενέργειας $E_0 \gg E_{\text{crit}}$ που προσπίπτει σε κάποιο υλικό, προκαλεί ένα καταιγισμό από δευτερογενή ηλεκτρόνια και φωτόνια μέσω ακτινοβολίας πέδησης και δίδυμης γένεσης.
- Σε απλοποιημένη εκδοχή ο ΗΜ καταιγισμός που δημιουργεί σωματίδιο γ υψηλής ενέργειας E_0 έχει ως εξής: το αρχικό γ παράγει ένα e^+ και ένα e^- , τα οποία, εφόσον έχουν υψηλή ενέργεια, παράγουν με πέδηση νέα γ . Αυτά και πάλι με δίδυμη γένεση παράγουν νέα e^+ και e^- και έτσι η παραγωγή νέων σωματιδίων γ , e^+ και e^- , συνεχίζεται δημιουργώντας αυτό που αποκαλείται **ηλεκτρομαγνητικός καταιγισμός**.
- Ο πολλαπλασιασμός των σωματιδίων σταματά όταν η ενέργειά τους πέσει κάτω από την κρίσιμη ενέργεια E_{crit} .
- Μπορούμε να θεωρήσουμε την απόσταση του ενός X_0 ως το μήκος μέσα στο οποίο γίνεται η παραγωγή μιας γενιάς ηλεκτρονίων από φωτόνια ή μιας γενιάς φωτονίων από ηλεκτρόνια. Στον ηλεκτρομαγνητικό καταιγισμό λοιπόν το μήκος ακτινοβολίας X_0 μπορεί να θεωρηθεί ως το μήκος γενιάς.



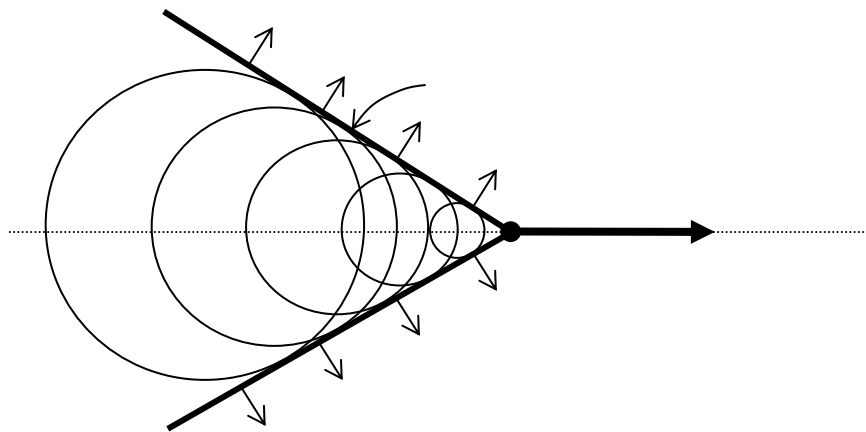
Ηλεκτρομαγνητικός καταιγισμός



ΗΜ καταιγισμός που αναπτύχθηκε από ένα αρχικό φωτόνιο γ ή ηλεκτρόνιο υψηλής ενέργειας, μέσα σε ειδική διάταξη στο MIT. Η διάταξη, αποτελούμενη από μια σειρά μεταλλικών πλακών μέσα σε θάλαμο φουσσαλίδων, παράγει τον καταιγισμό, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη φωτογράφιση των τροχιών των σωματιδίων καθώς αυτά κινούνται στα διάκενα μεταξύ των πλακών.

Ακτινοβολία Cherenkov

- Ακτινοβολία Cherenkov εκπέμπεται όταν φορτισμένο σωματίδιο διέλθει μέσα από διηλεκτρικό μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσον.
- Ο κώνος της ακτινοβολίας δημιουργείται από την εποικοδομητική συμβολή των επιμέρους φωτεινών κυμάτων και αποτελεί ισοφασική επιφάνεια.



- Συνθήκη εκπομπής ακτινοβολίας Cherenkov:

$$v \geq v_{\phi} \Rightarrow \frac{v}{c} \geq \frac{v_{\phi}}{c} \Rightarrow \beta \geq \frac{1}{n}$$

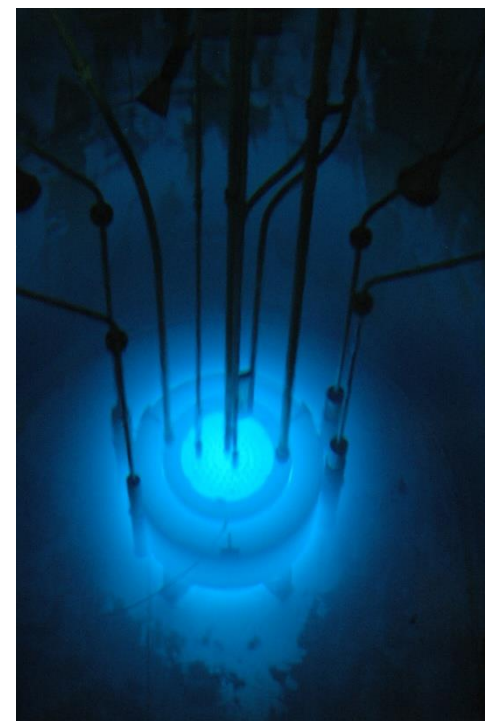
π.χ.

για το νερό: $n = 1,33$

άρα: $\beta_{\min} = 0,7519$

για τον αέρα: $n = 1,000283$

άρα: $\beta_{\min} = 0,9997$

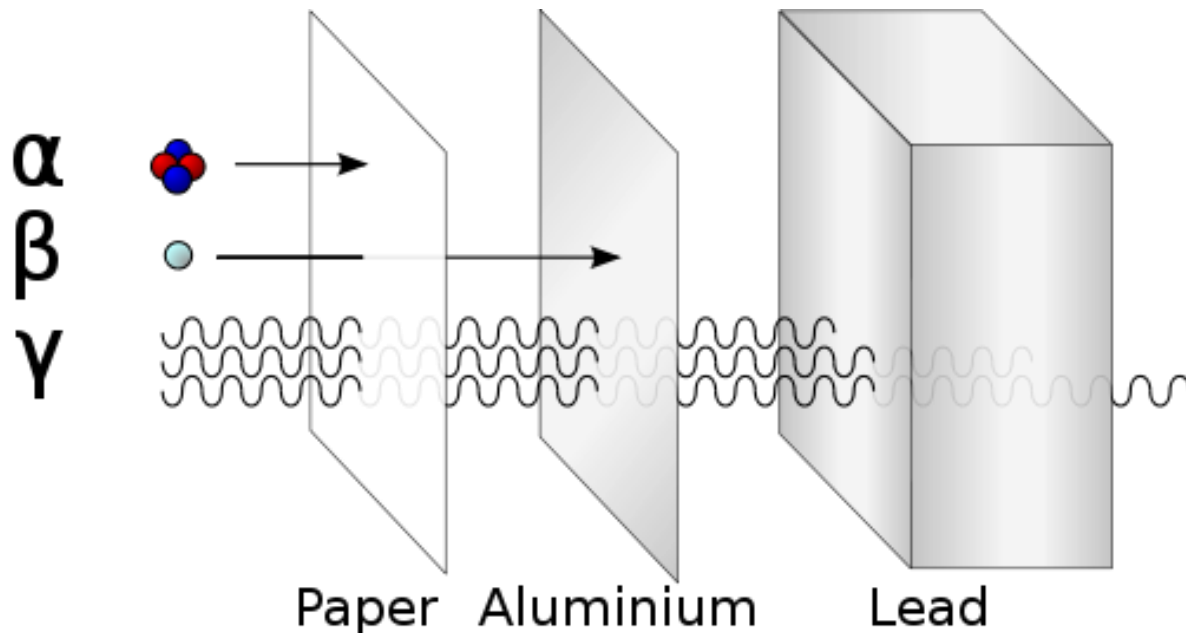


Οι δύο τύποι ανιχνευτών ραδιενεργού ακτινοβολίας
στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής ΑΠΘ

- Απαριθμητές Geiger-Müller
- Απαριθμητές σπινθηρισμών

Η ραδιενεργός ακτινοβολία απορροφάται από την ύλη ιονίζοντάς την (γι' αυτό λέγεται “ιονιστική ακτινοβολία”).

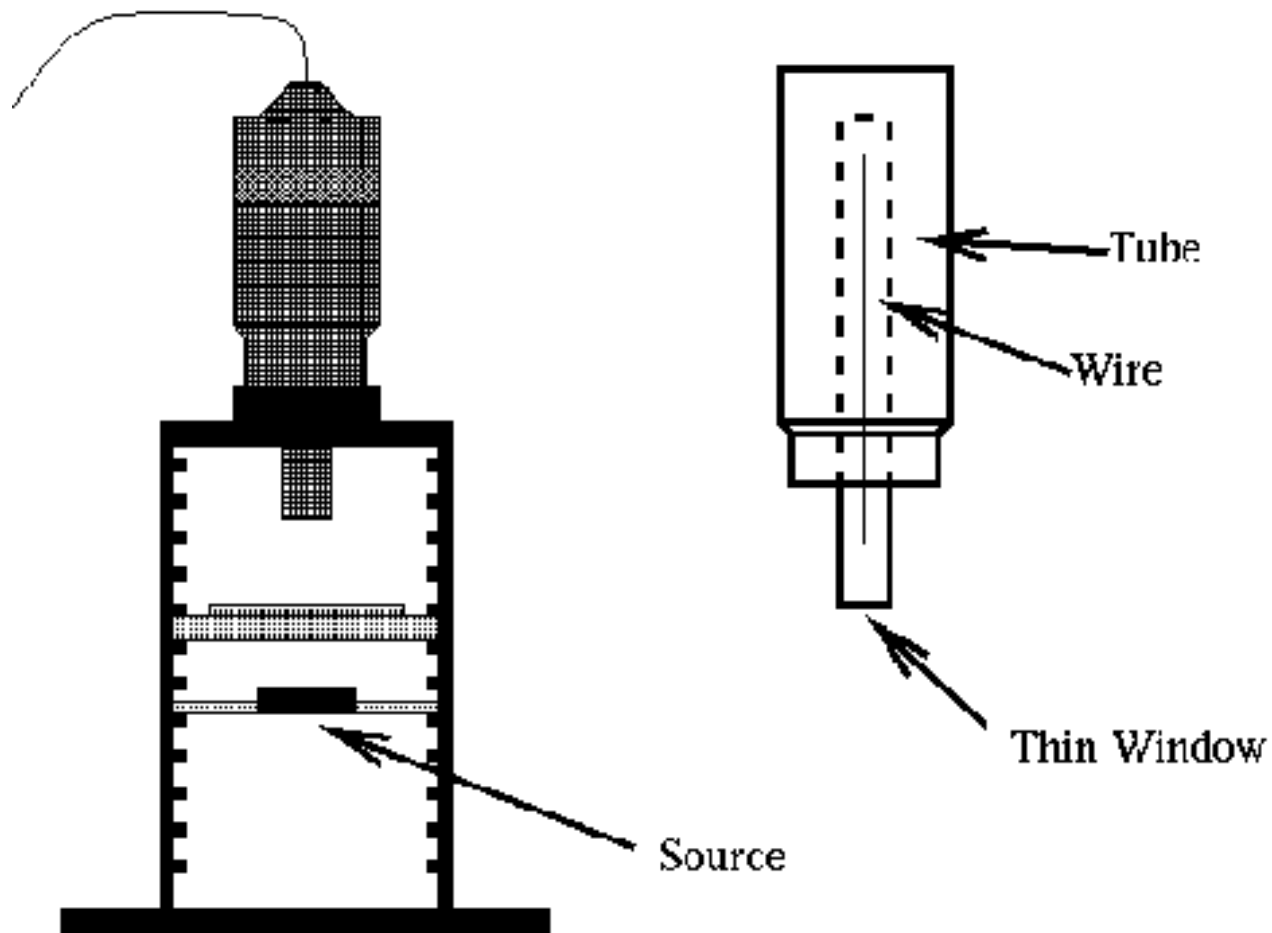
Η ανίχνευση και η καταμέτρηση της ραδιενεργού ακτινοβολίας στηρίζεται σε αυτήν την ιδιότητά της, δηλαδή με άλλα λόγια, στο να **αποθέτει ενέργεια στα υλικά** στα οποία προσπίπτει.



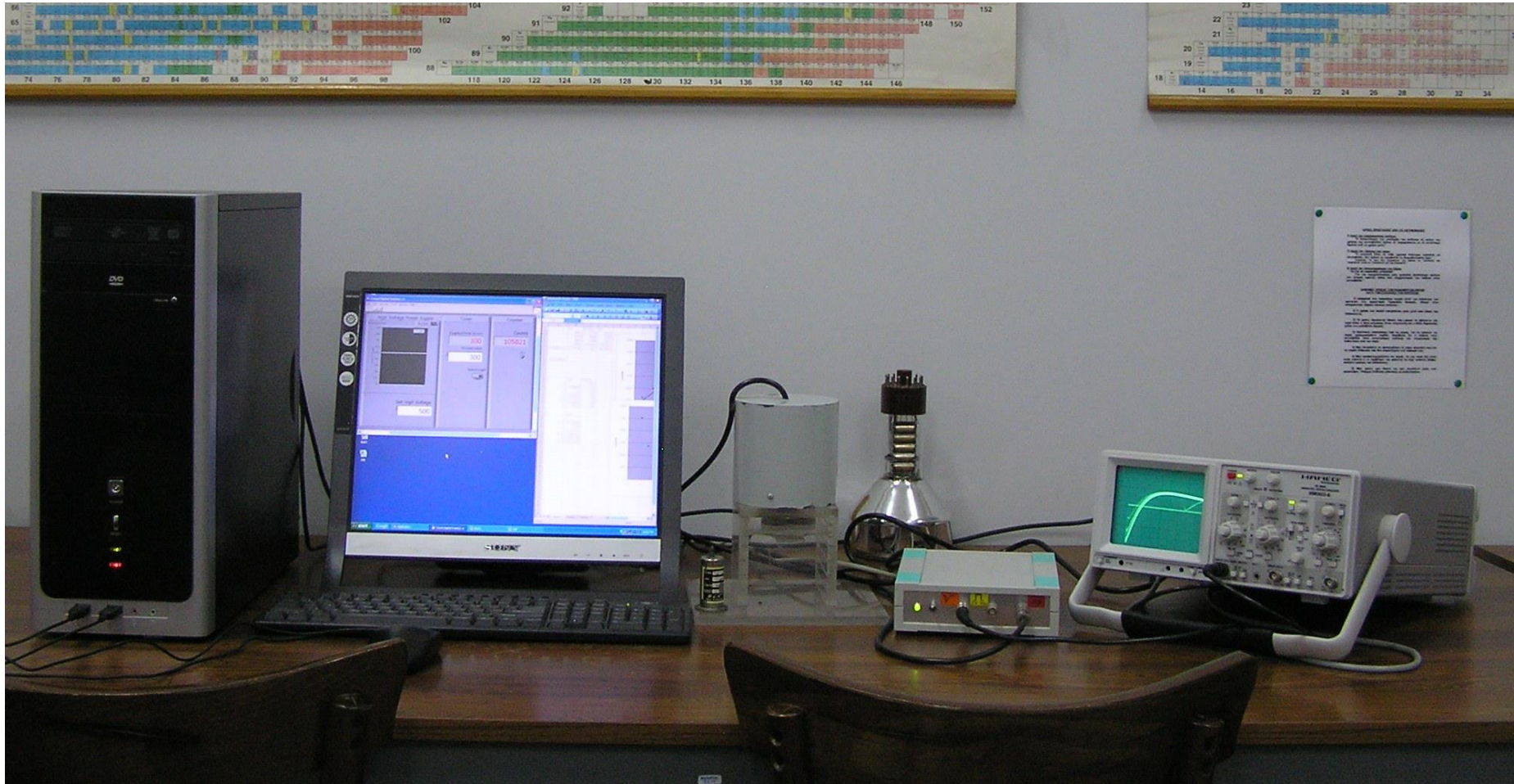
Απαριθμητής Geiger-Müller (φορητός)



Απαριθμητής Geiger-Müller (εργαστηρίου)

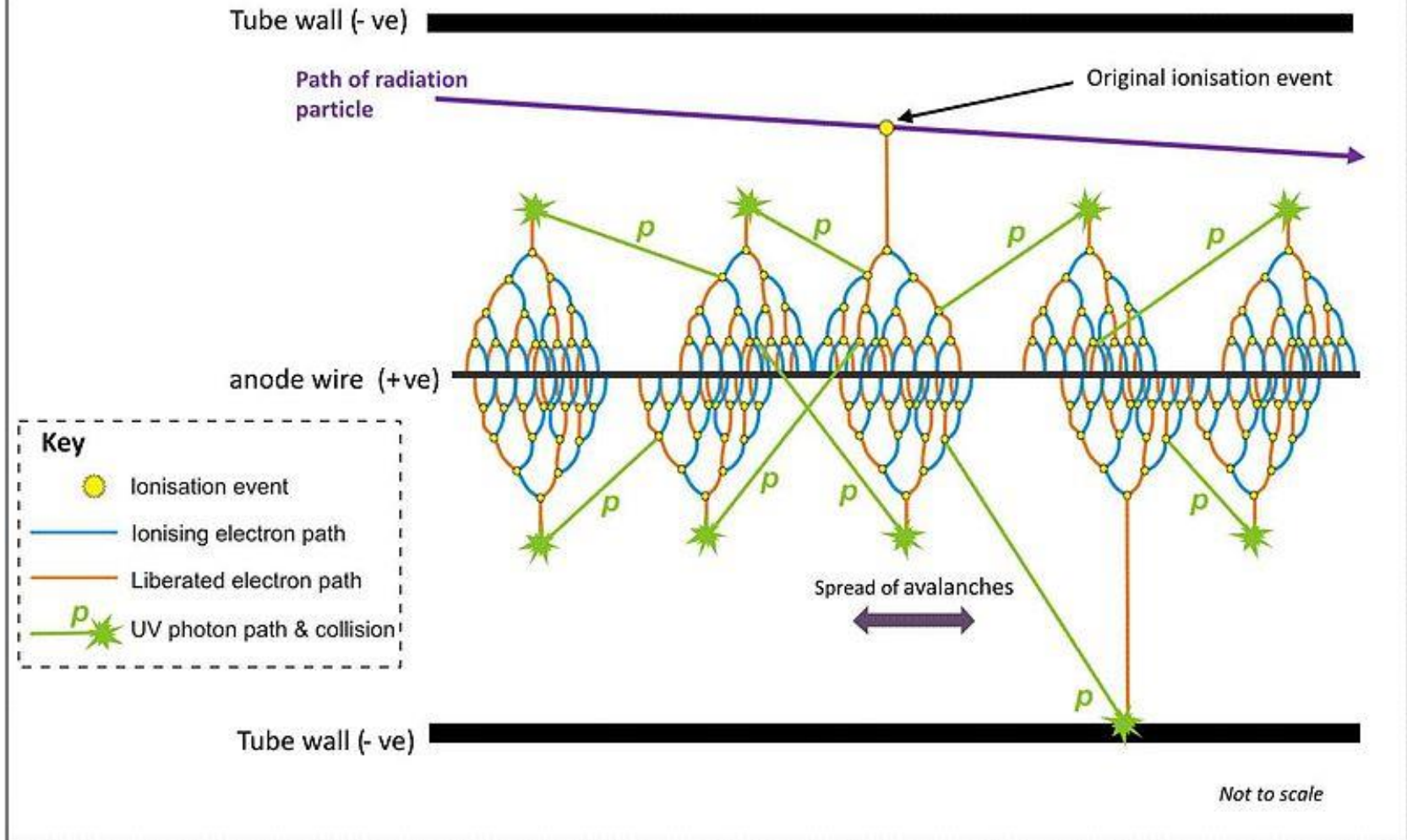


Σύστημα απαριθμητή Geiger-Müller (ΑΠΘ)



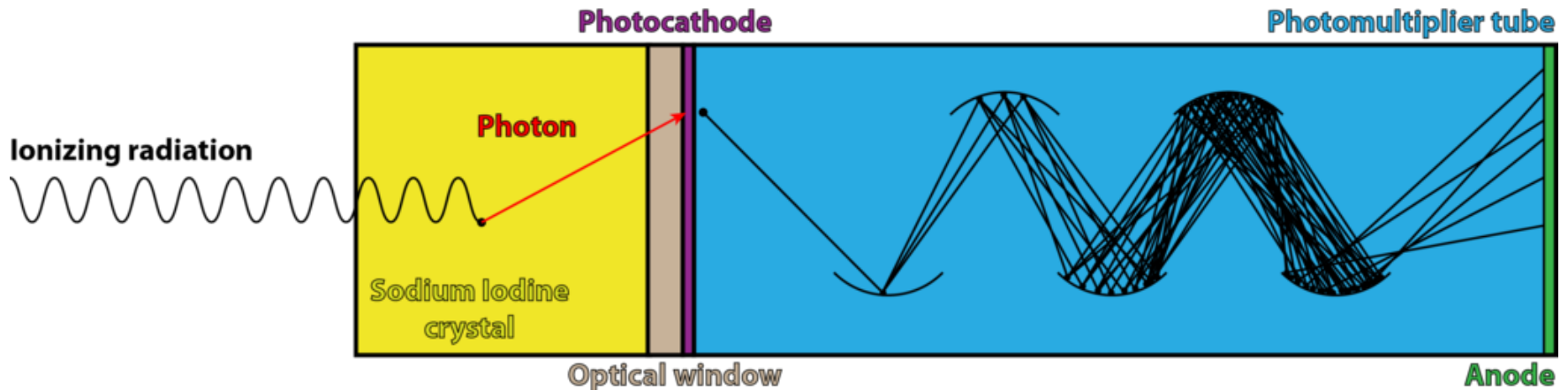
Απαριθμητής Geiger-Müller (αρχή λειτουργίας)

Spread of avalanches in a Geiger-Müller tube



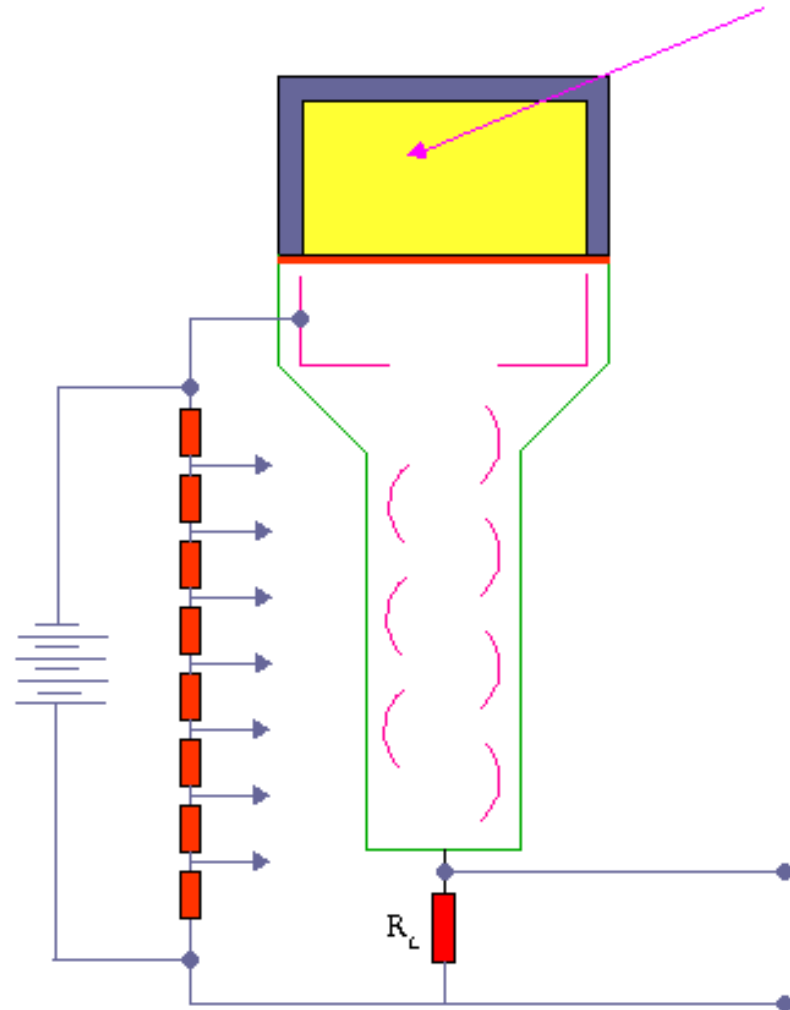
Απαριθμητές σπινθηρισμών

Σπινθηριστής (scintillator) με φωτοπολλαπλασιαστή (photomultiplier- PM).
Συμπαγές σύστημα για την ανίχνευση ακτινοβολίας γάμμα.

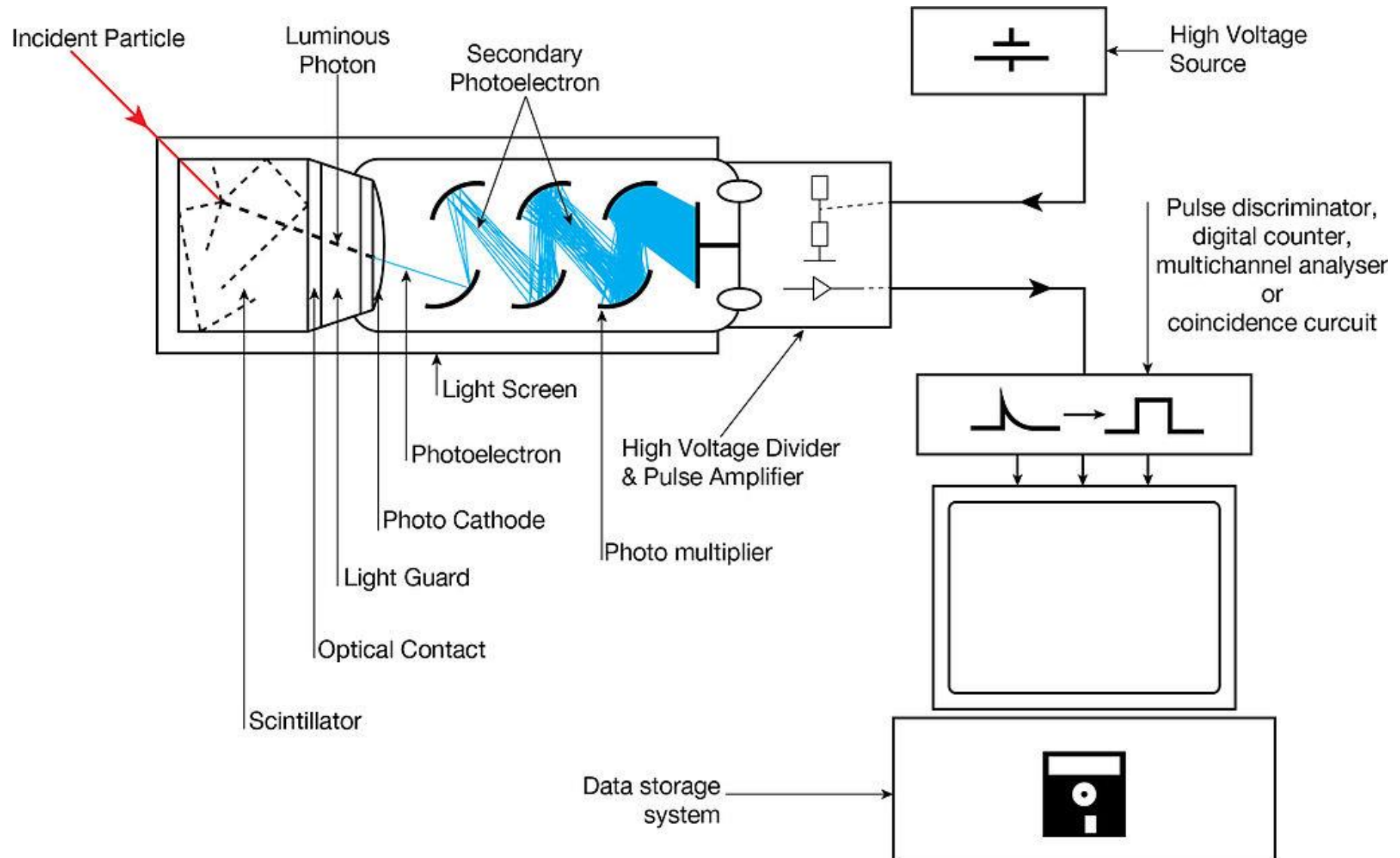


Απαριθμητές σπινθηρισμών

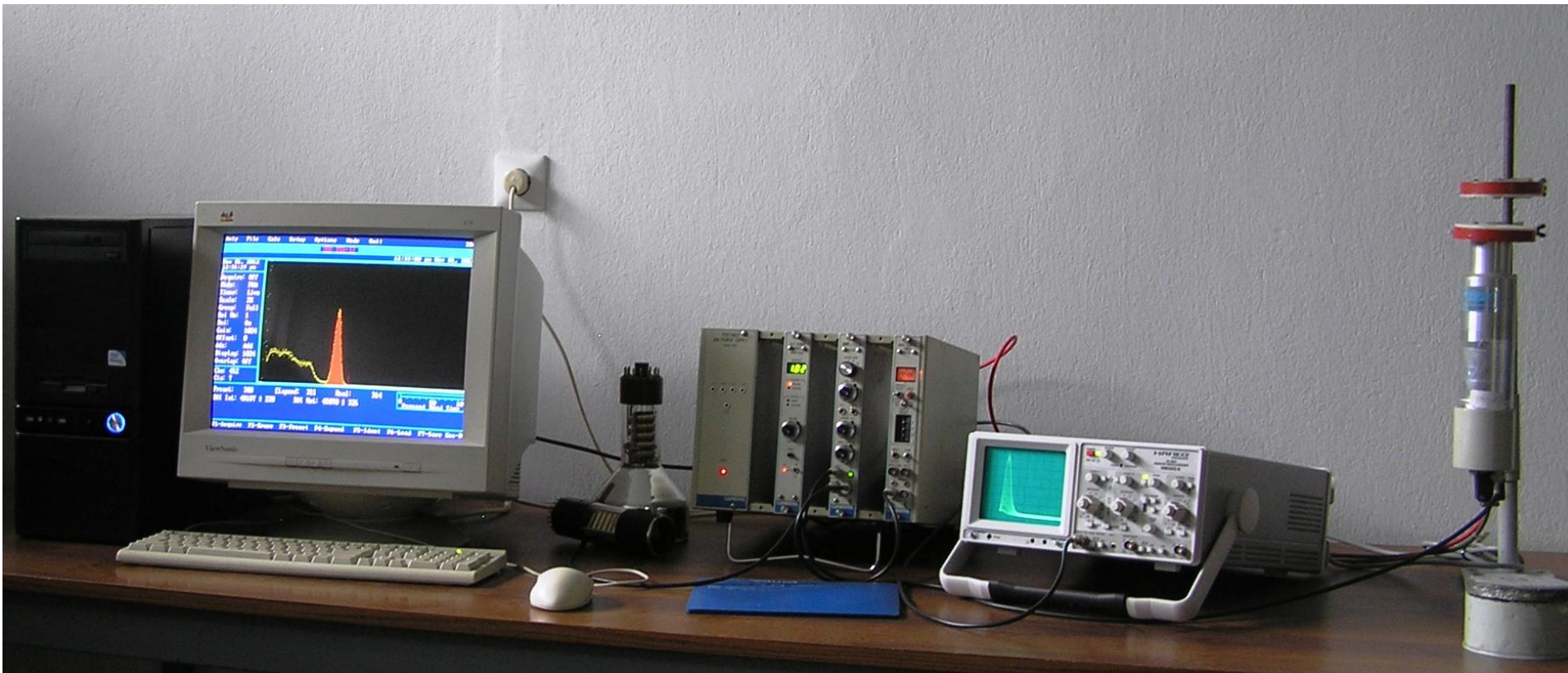
Αναπαράσταση της
παραγωγής σήματος
(ηλεκτρικού παλμού) σε
σύστημα σπινθηριστή
(scintillator) –
φωτοπολλαπλασιαστή
(photomultiplier- PM)



Σύστημα απαριθμητή σπινθηρισμών

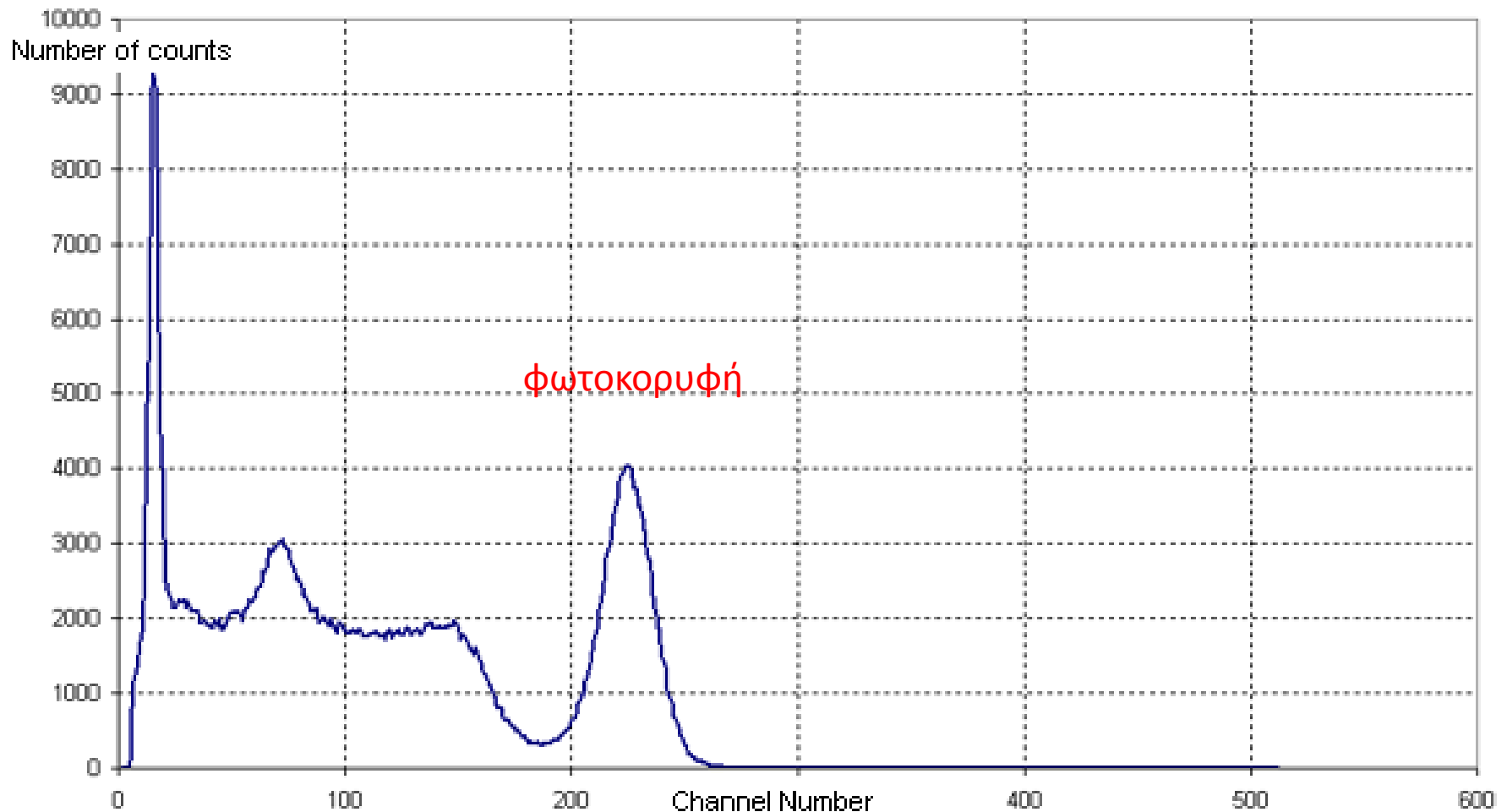


Σύστημα φασματοσκοπίας γάμμα με απαριθμητή σπινθηρισμών



Φάσμα απαριθμητή σπινθηρισμών

Φάσμα μονοενεργειακής πηγής ακτινοβολίας γάμμα που έχει ληφθεί με σύστημα φασματοσκοπίας γάμμα εφοδιασμένο με σπινθηριστή NaI(Tl)



Ραδιενεργές σειρές

Αρχέγονοι και εξαιρετικά μακρόβιοι βαρείς ραδιενεργοί πυρήνες (**U** και **Th**) που υπάρχουν στο περιβάλλον μας, διασπώνται παράγοντας **σειρές θυγατρικών πυρήνων**.

Επίσης, υπάρχουν και άλλοι αρχέγονοι και εξαιρετικά μακρόβιοι, όμως όχι τόσο βαρείς, ραδιενεργοί πυρήνες που δεν παράγουν σειρά θυγατρικών πυρήνων, π.χ. το ^{40}K .

The Uranium-235 Decay Series ($4n + 3$)

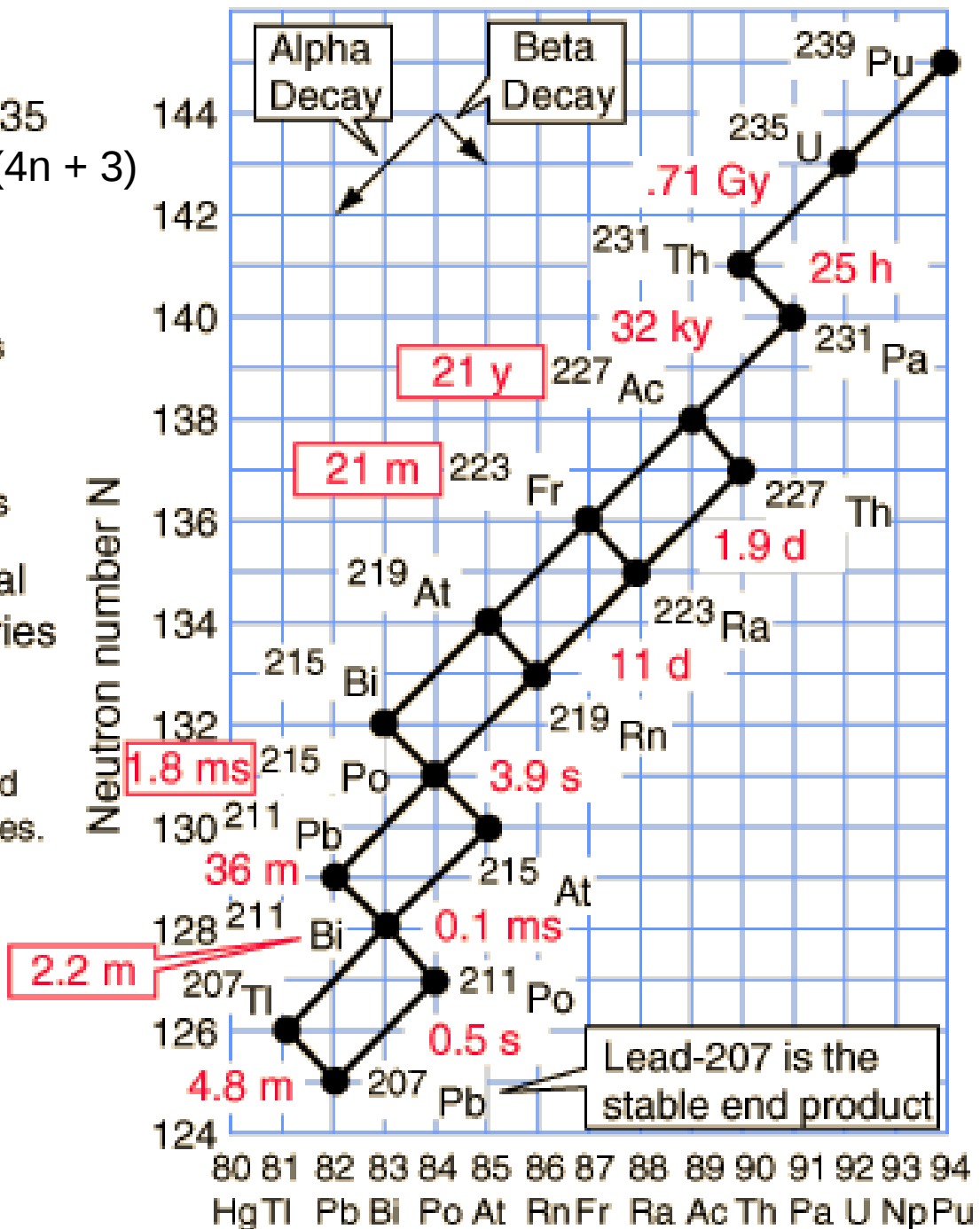
- ☒ ^{235}U Series
- ☐ ^{232}Th Series
- ☐ ^{238}U Series
- ☐ ^{237}Np Series

The four natural radioactive series

This series is traditionally called the Actinium series.

7 α particles
4 β particles

Boxed values for half-life are for multiple decay paths



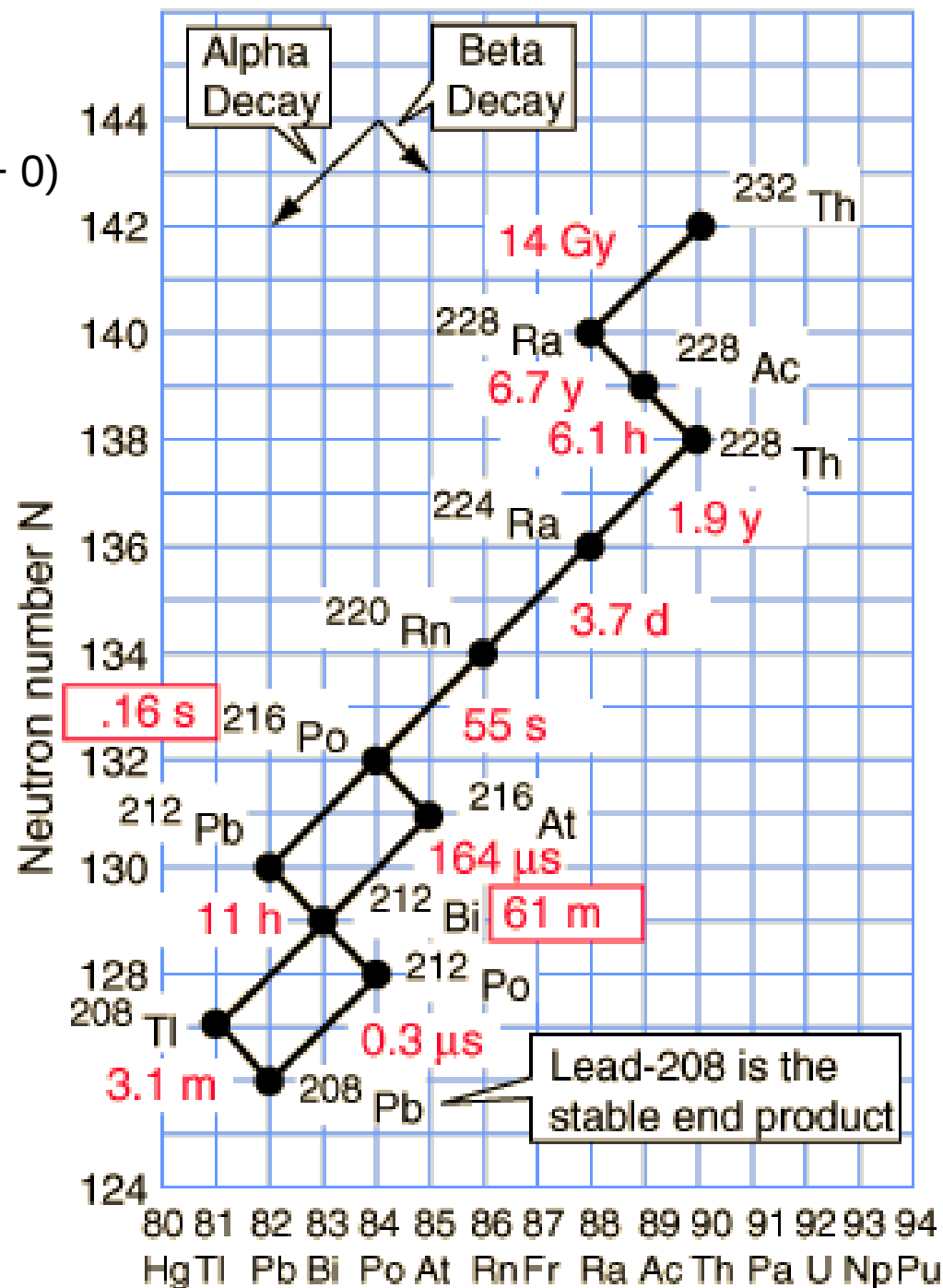
The Thorium-232 Decay Series ($4n + 0$)

- ☐ ^{235}U Series
- ☒ ^{232}Th Series
- ☐ ^{238}U Series
- ☐ ^{237}Np Series

The four natural
radioactive series

6 α particles
4 β^- particles

Boxed values
for half-life are
for multiple
decay paths

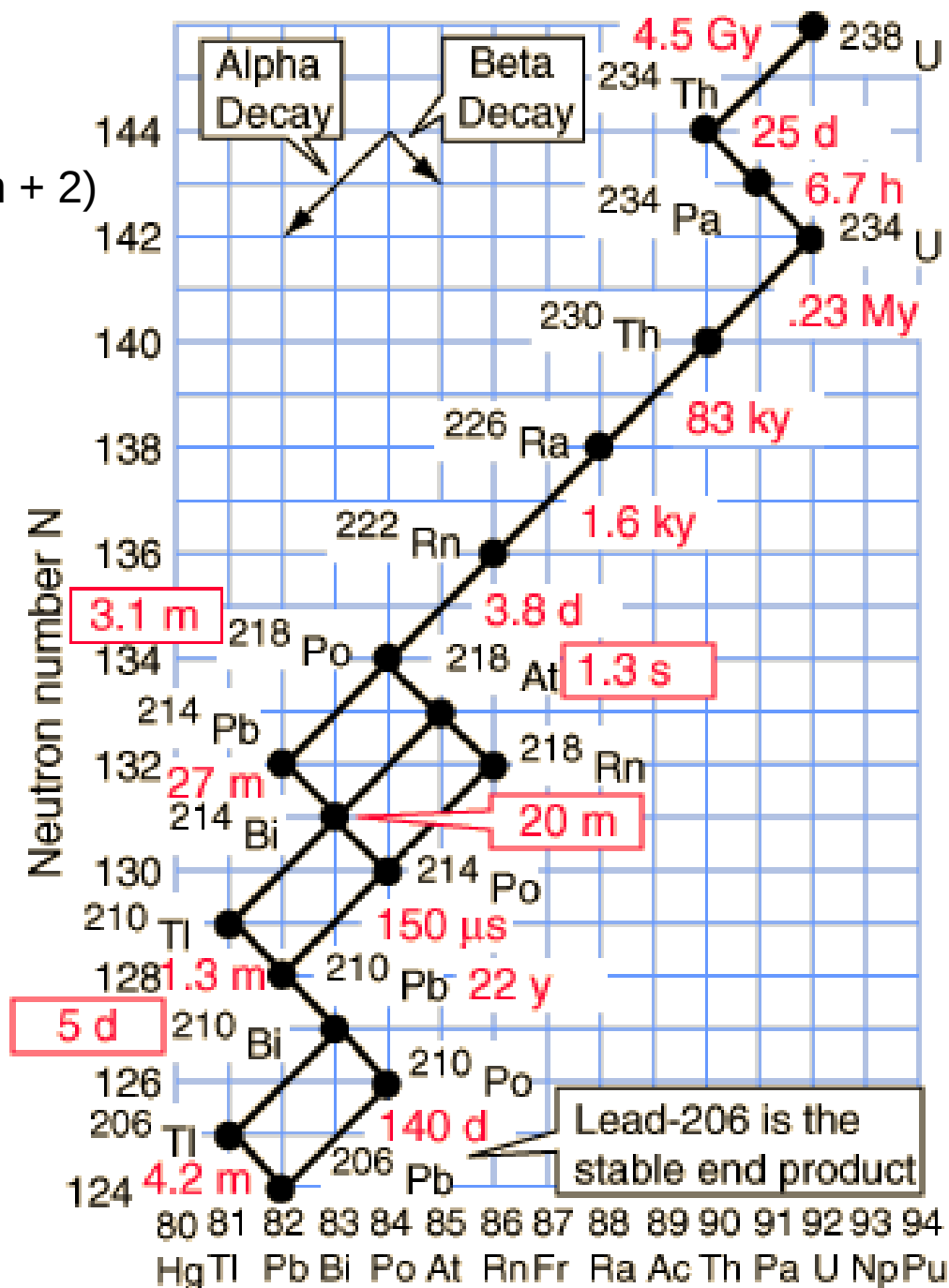


The Uranium-238 Decay Series (4n + 2)

- ☐ ²³⁵U Series
- ☐ ²³²Th Series
- ☒ ²³⁸U Series
- ☐ ²³⁷Np Series

The four natural
radioactive series

8 α particles
6 β particles



Boxed values
for half-life are
for multiple
decay paths

The Neptunium-237 Decay Series

- ☐ ^{235}U Series
- ☐ ^{232}Th Series
- ☐ ^{238}U Series
- ☒ ^{237}Np Series

The four natural radioactive series

The members of this series are not presently found in nature because the half-life of the longest lived isotope in the series is short compared to the age of the earth.

7 α particles
4 β^- particles

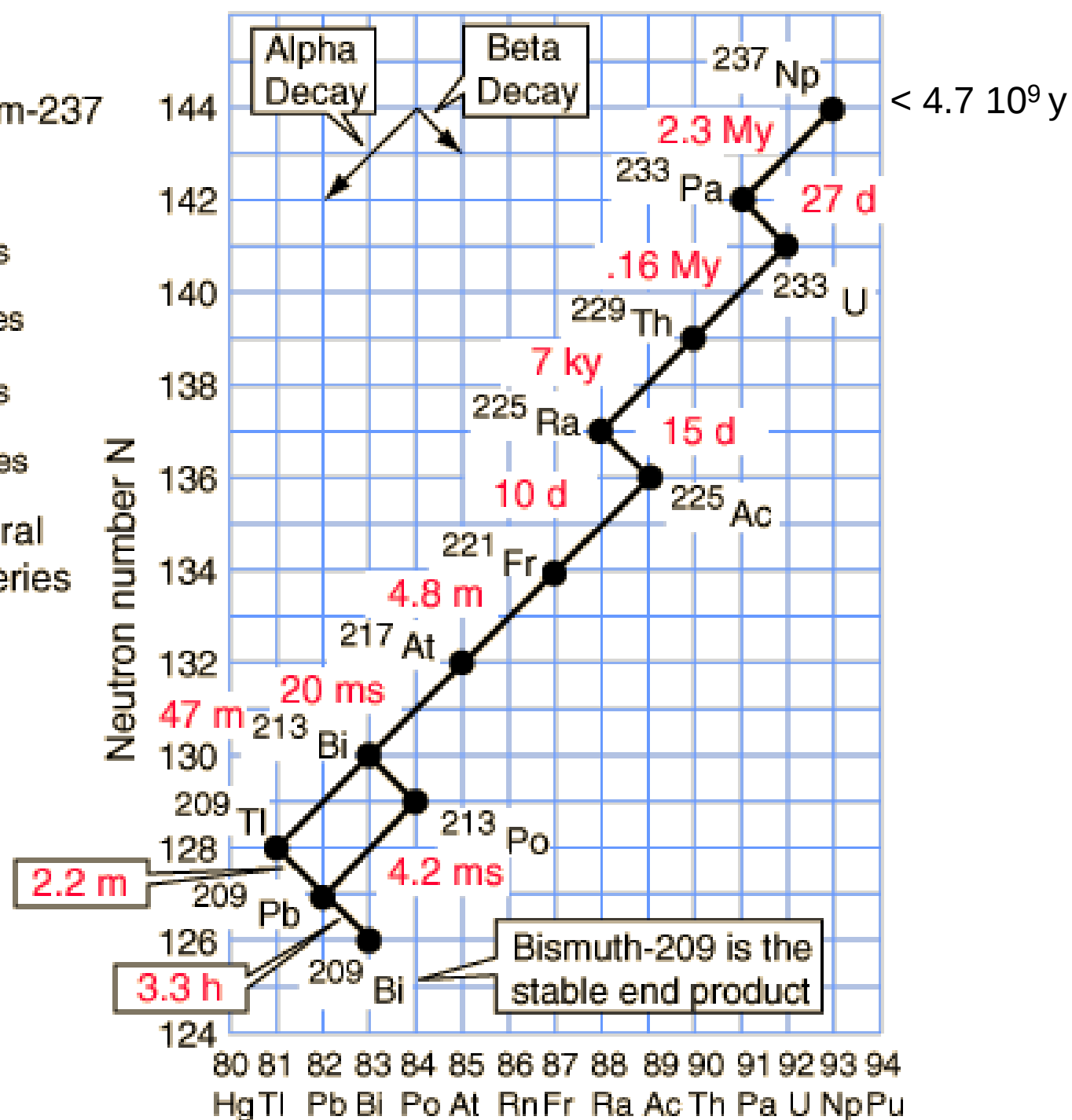
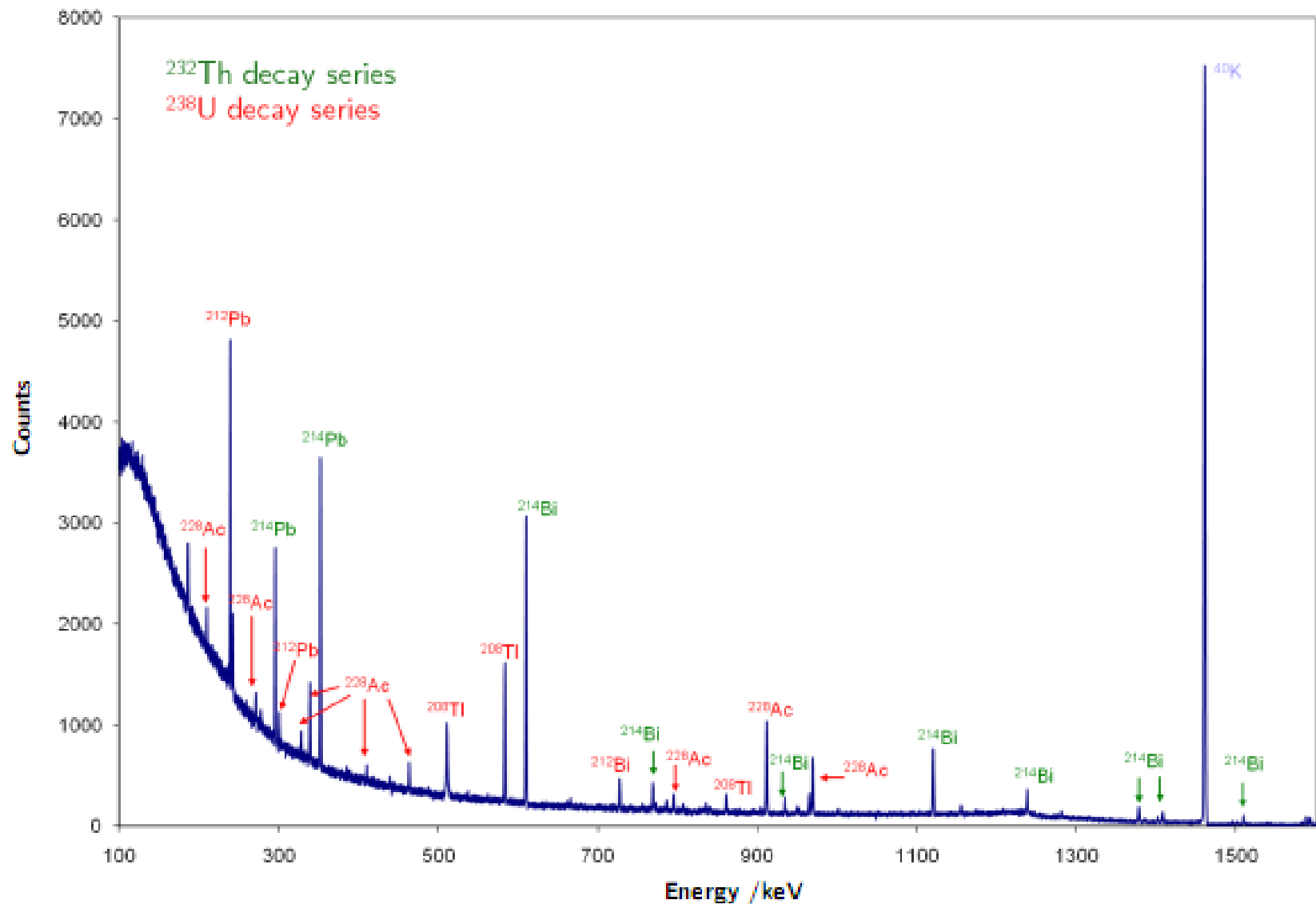


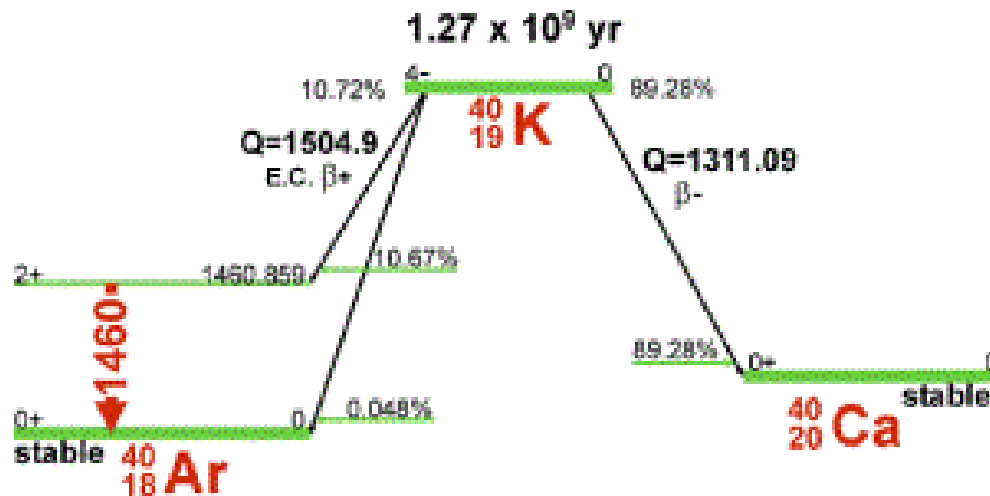
Figure 1.1: Background Gamma Ray Spectrum



Το ^{40}K ($Z=19$, $N=21$)

Το ^{40}K , μαζί με τα δύο σταθερά ισότοπα ^{39}K και ^{41}K , αποτελούν τα τρία φυσικά ισότοπα του καλίου (σε ποσοστό 93.3%, 0.012%, 6.7% για τα ^{39}K , ^{40}K και ^{41}K αντίστοιχα).

Ο μέσος χρόνος ζωής του ^{40}K είναι 1.25 Gy και διασπάται σύμφωνα με το σχήμα:



Υπολογίζεται ότι στο ανθρώπινο σώμα (70 kg) υπάρχουν περίπου 40 g καλίου-40, τα οποία αντιστοιχούν σε ενεργότητα περί τα 12 kBq. (^{205}C σε ενεργότητα είναι ο C14). Μία μπανάνα περιέχει 0.5 g καλίου-40 που αντιστοιχεί σε ενεργότητα περί τα 15 Bq.

Κοσμικές ακτίνες



- **Ενέργεια**
από MeV μέχρι ZeV = 10^{21} eV
(για σύγκριση: σημερινοί
επιταχυντές ~ 10 TeV = 10^{13} eV)
- **Είδος**
Κυρίως πρωτόνια (85 %), αλλά και He (και άλλοι πυρήνες μέχρι Fe).
Επίσης γάμμα, νετρίνα.
- **Προέλευση** αυτών που φτάνουν στη γη
Ήλιος, από keV (ηλιακός άνεμος, CMEs) μέχρι GeV (εκλάμψεις)
Γαλαξίας, μέχρι PeV ($=10^{15}$ eV) από SNR
Εξωγαλαξιακές πηγές, άνω των 10^{15} eV (από AGN, GRB, ? ?)
Υπερσυμμετρικά σωματίδια, σε σενάρια top-down (αντί bottom-up)

Το φάσμα των κοσμικών ακτίνων

Η **ροή** (αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου) ακολουθεί εκθετικό νόμο:

$$\Phi(E) \sim E^{-3}$$

(δηλαδή για κάθε δεκαπλασιασμό της ενέργειας, η ροή γίνεται 1000 φορές μικρότερη).

Μικρή μεταβολή του εκθέτη στο **“γόνατο”** και στον **“αστράγαλο”**.

Η περιοχή κάτω των 10 GeV διαμορφώνεται έντονα (ίσως και κατά μία τάξη μεγέθους) από την **ηλιακή δραστηριότητα**.

