

Ραδιενέργεια

1896: Becquerel, ακτινοβολία αλάτων Ουρανίου

Pierre και Marie Curie: Απομόνωσαν 110mg Ραδίου από 1000 κιλά Ουρανίου (το Ράδιο είναι προϊόν διασπάσεων του Ουρανίου)

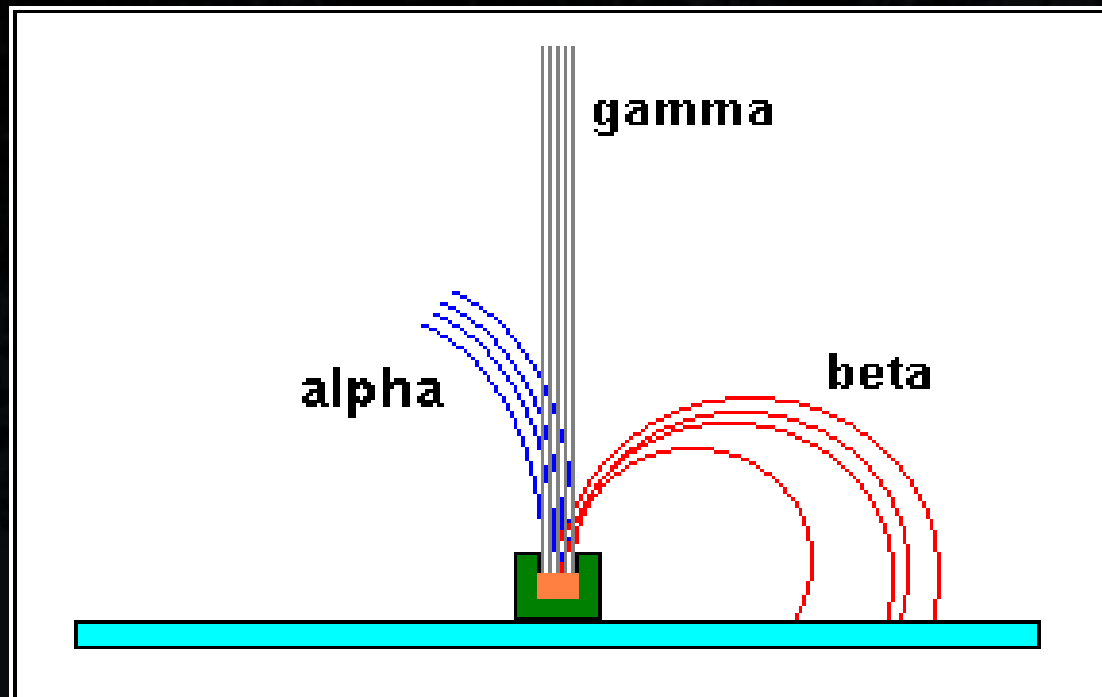
Rutherford: Τρία είδη ακτινοβολίας : α , β , γ

α : θετικά φορτισμένες, απορροφώνται εύκολα από την ύλη, είναι πυρήνες ηλίου (βρέθηκαν άτομα ηλίου σε σωλήνα όπου εκπεμπόταν η ακτινοβολία)

β : αρνητικά φορτισμένη ακτινοβολία, επιβεβαιώθηκε τελικά ότι είναι ηλεκτρόνια. Σαν β^+ χαρακτηρίζεται η εκπομπή των αντισωματιδίων τους (ποζιτρόνια).

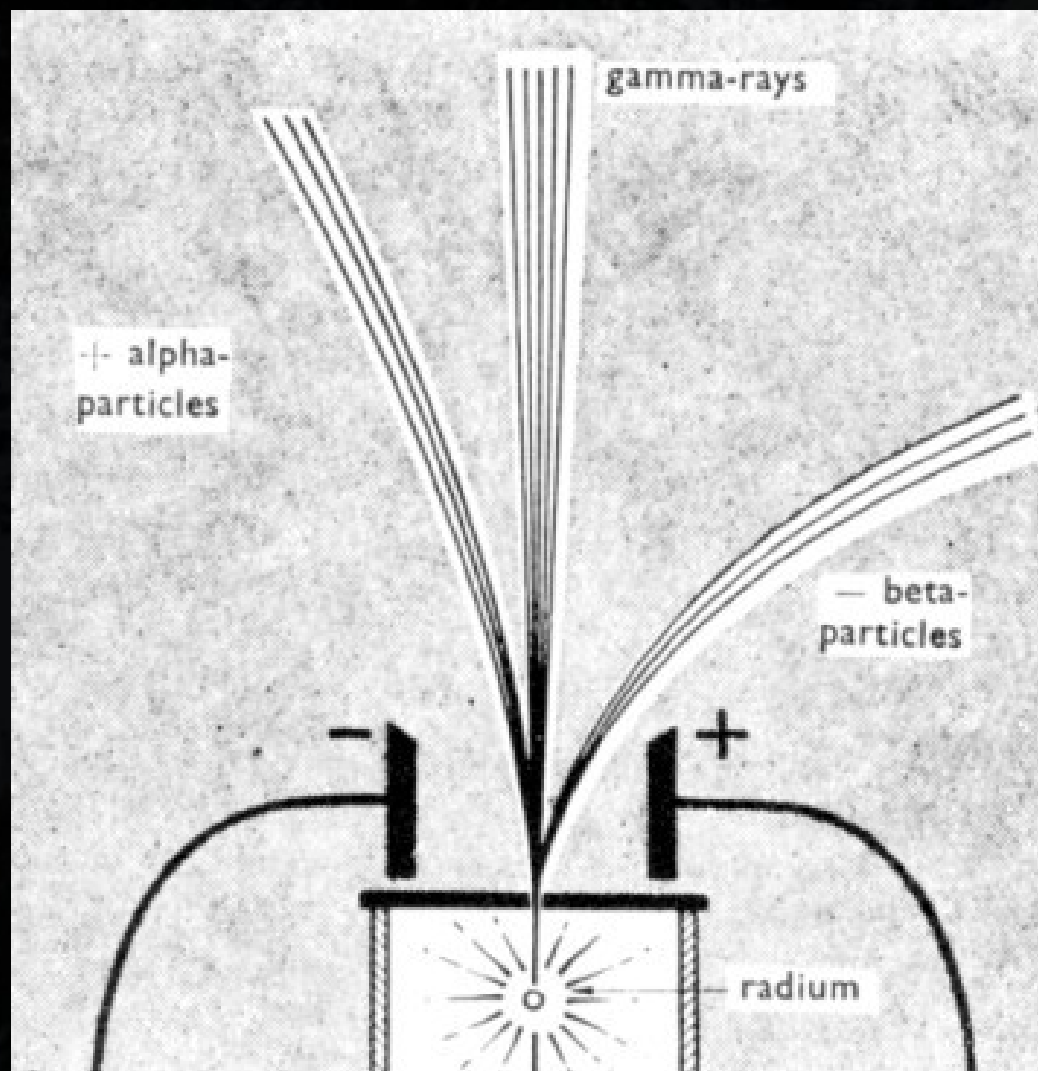
γ : ουδέτερη ακτινοβολία, λίαν διεισδυτική

Ακτινοβολίες α , β , γ

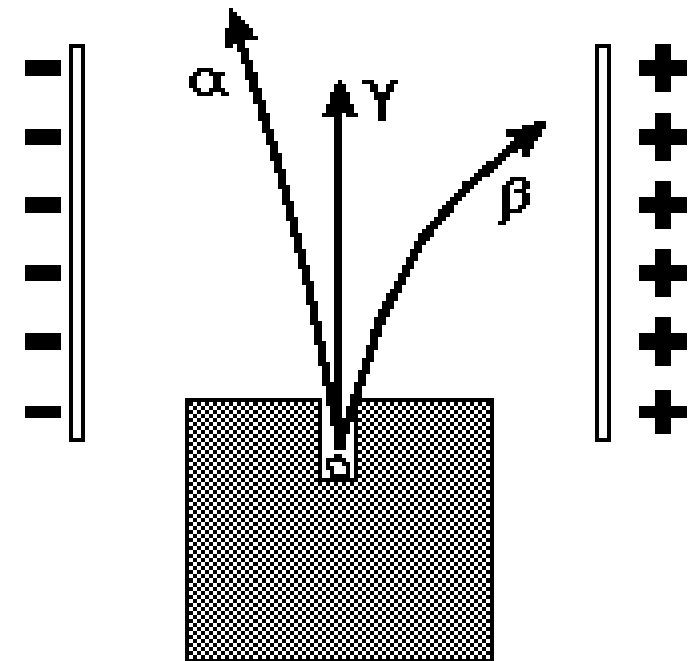
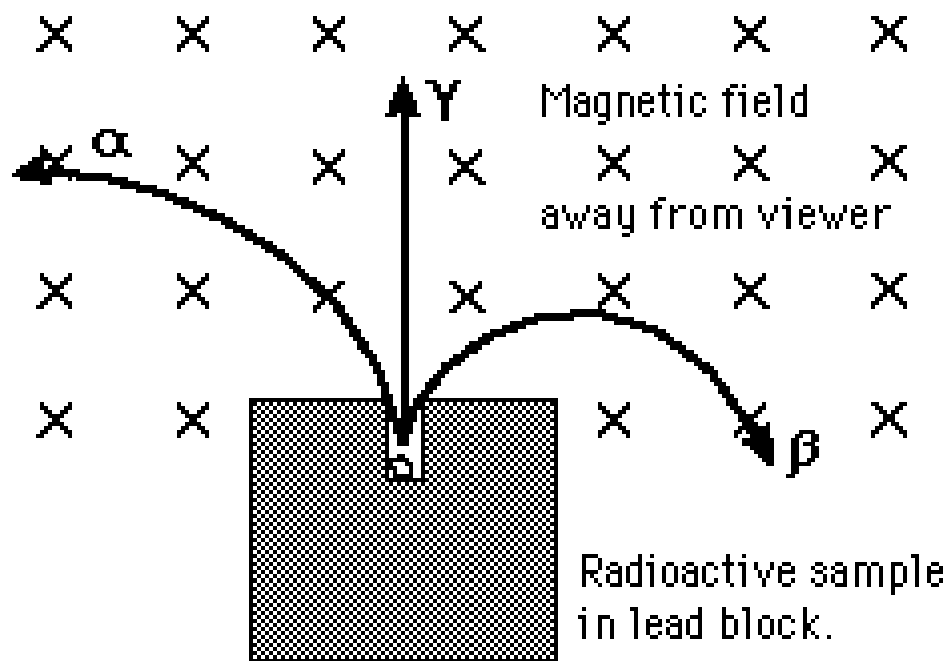


Alpha, beta and gamma radiation can be separated by using magnetic field. Alpha and beta particles have contrary charges - they undergo deflection in opposite directions gamma rays don't transfer any charge - they don't undergo deflection.

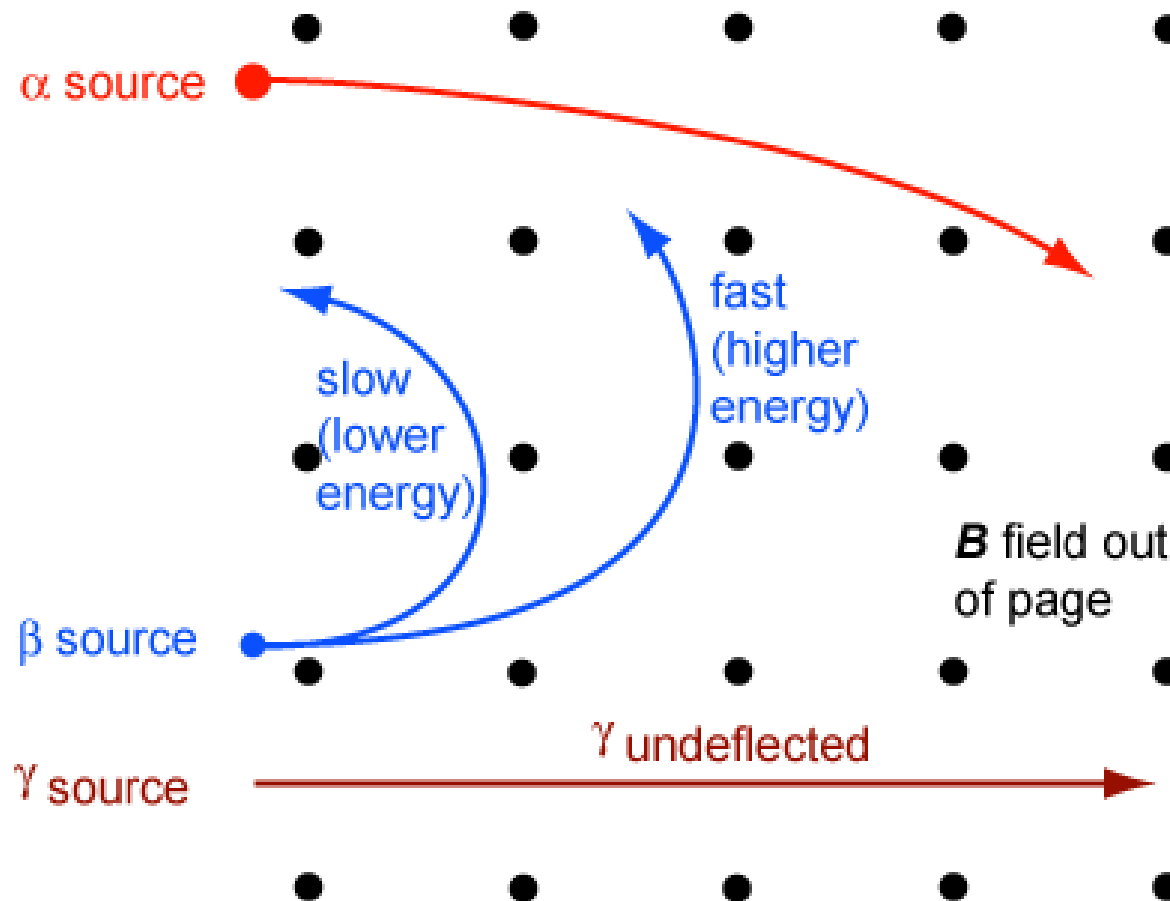
Ακτινοβολίες α , β , γ



Ακτινοβολίες σε μαγνητικό πεδίο

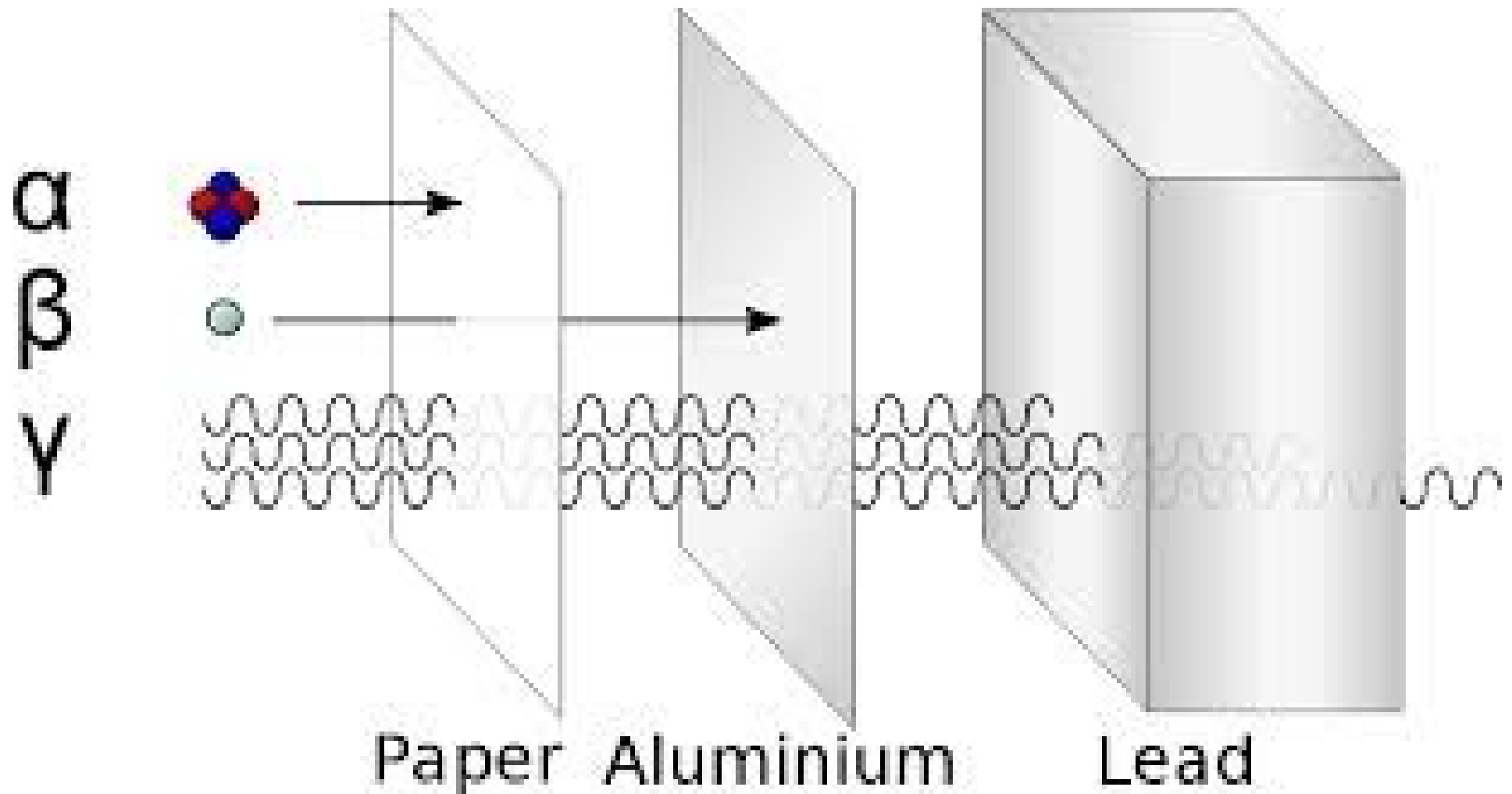


Μαγνητικό πεδίο (κάθετο στην διαφάνεια)

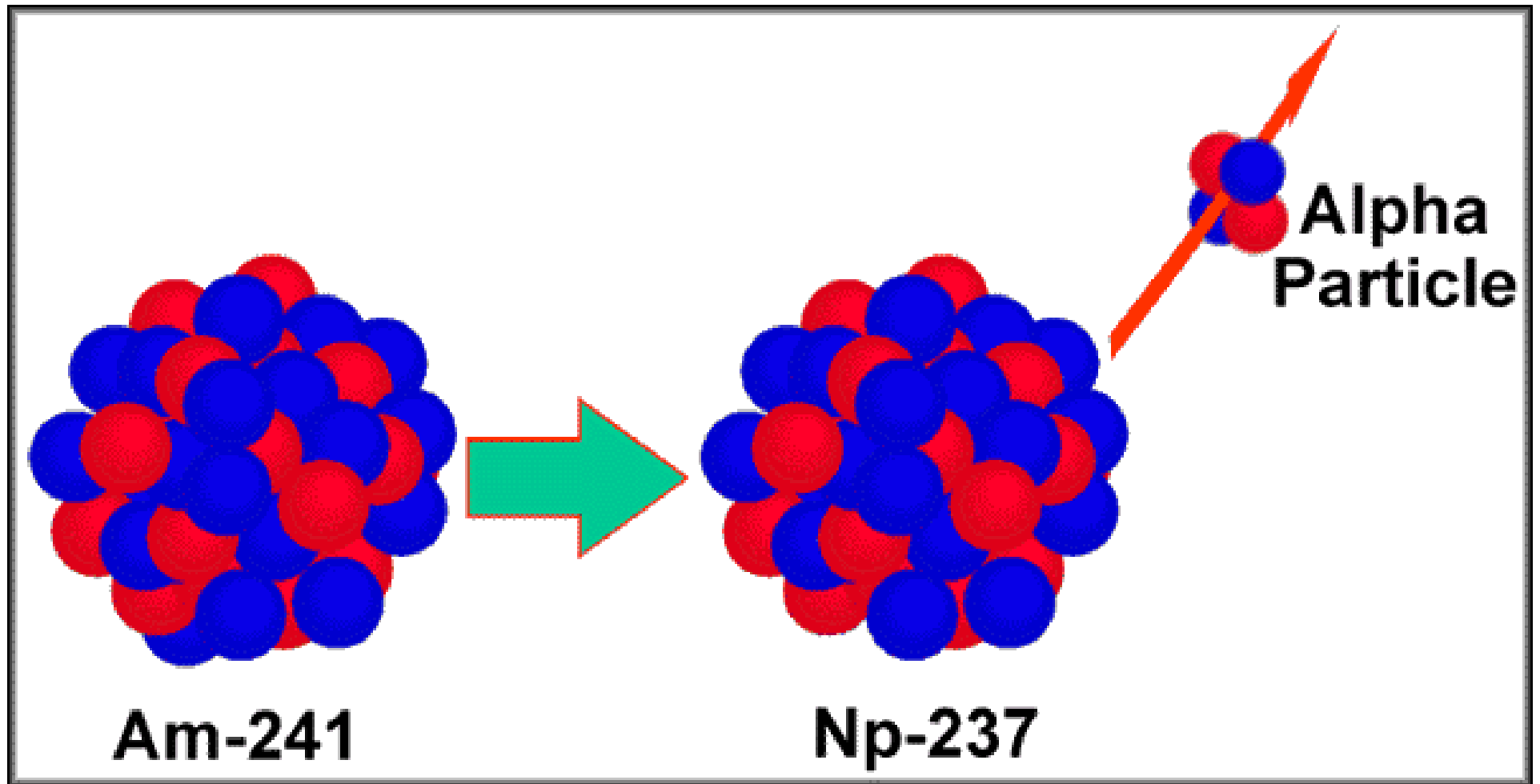


Effect of a magnetic field on alpha, beta and gamma radiation

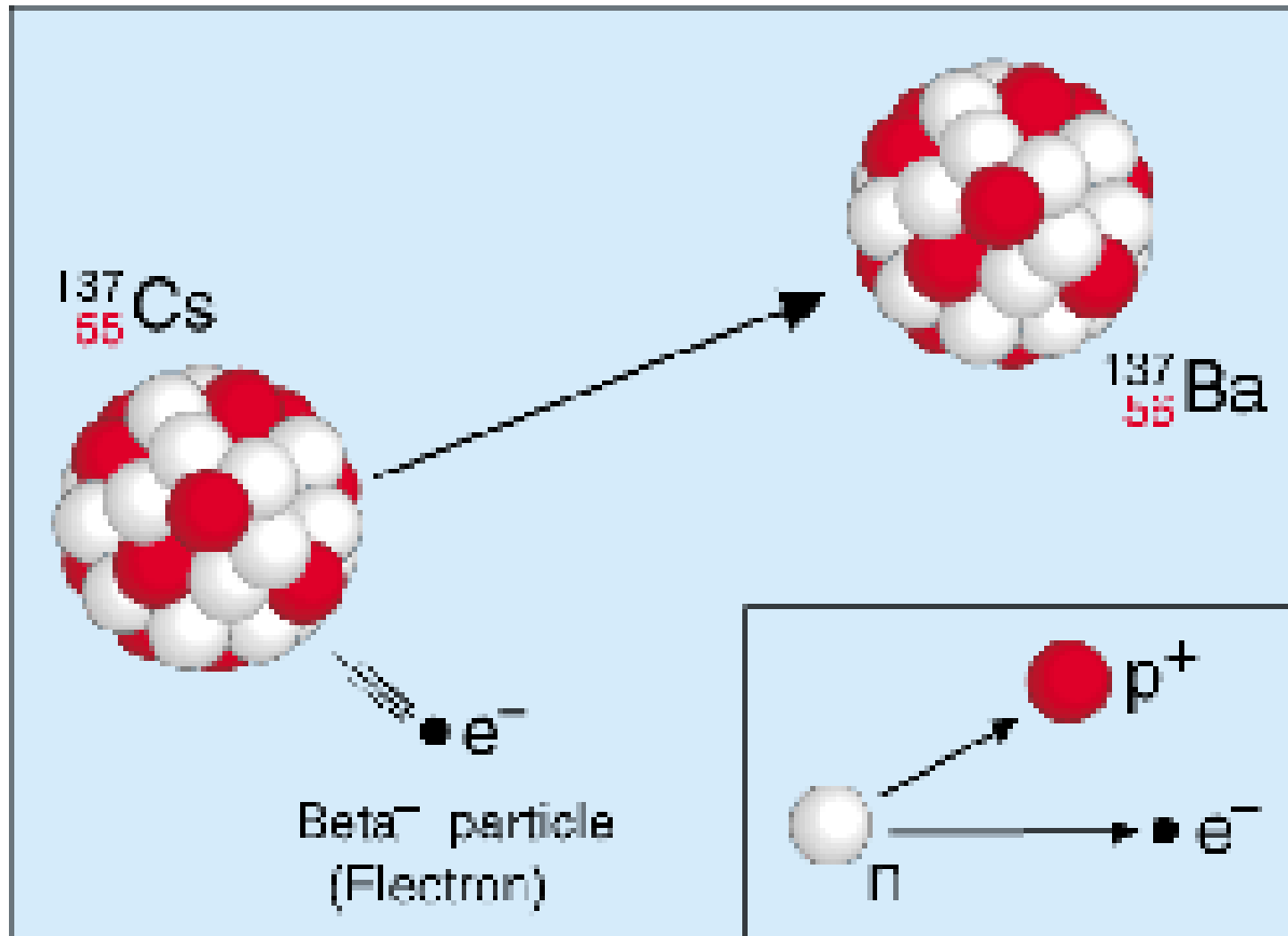
Εμβέλεια ακτινοβολιών



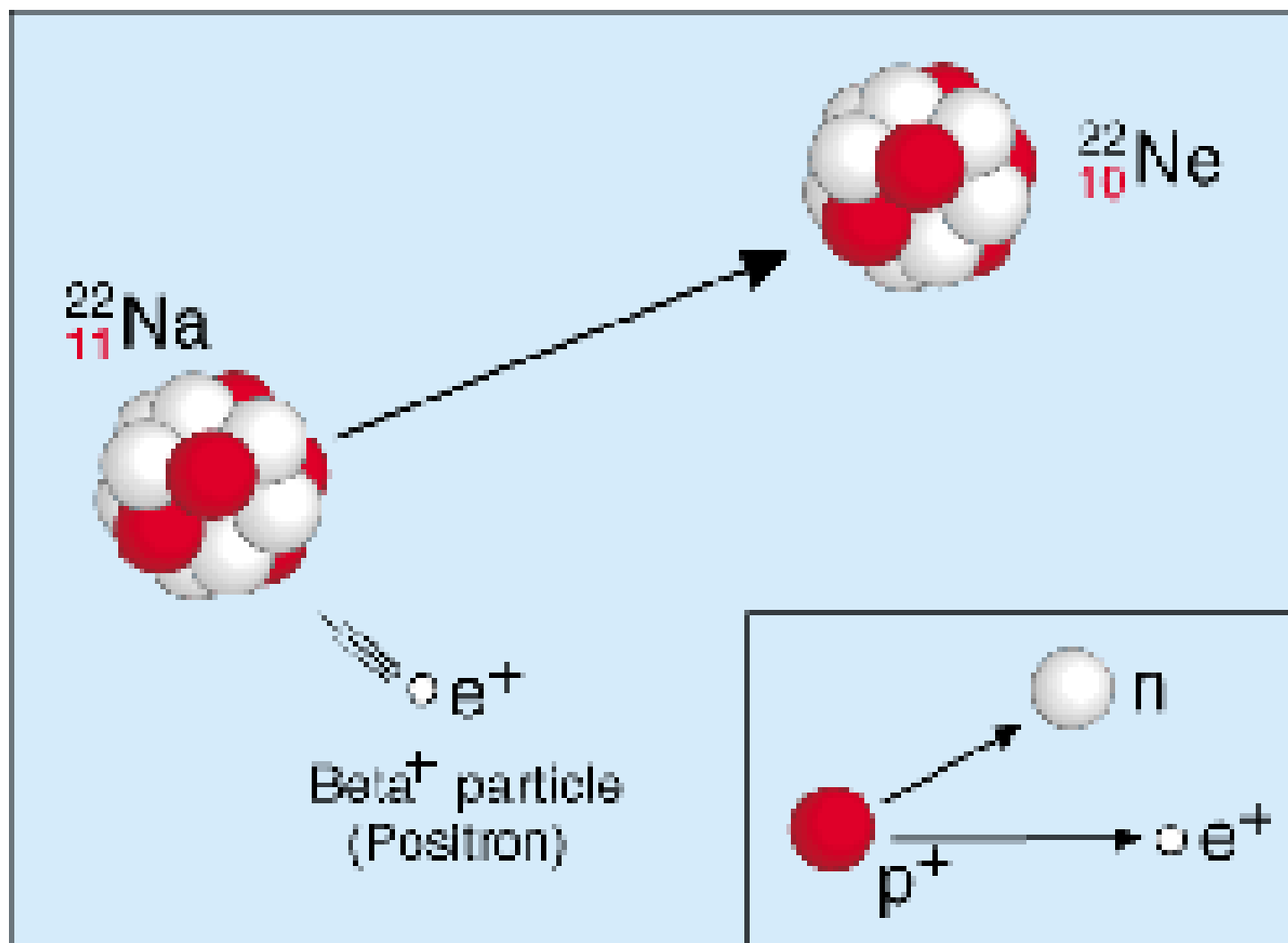
Άλφα διάσπαση



Βήτα- διάσπαση

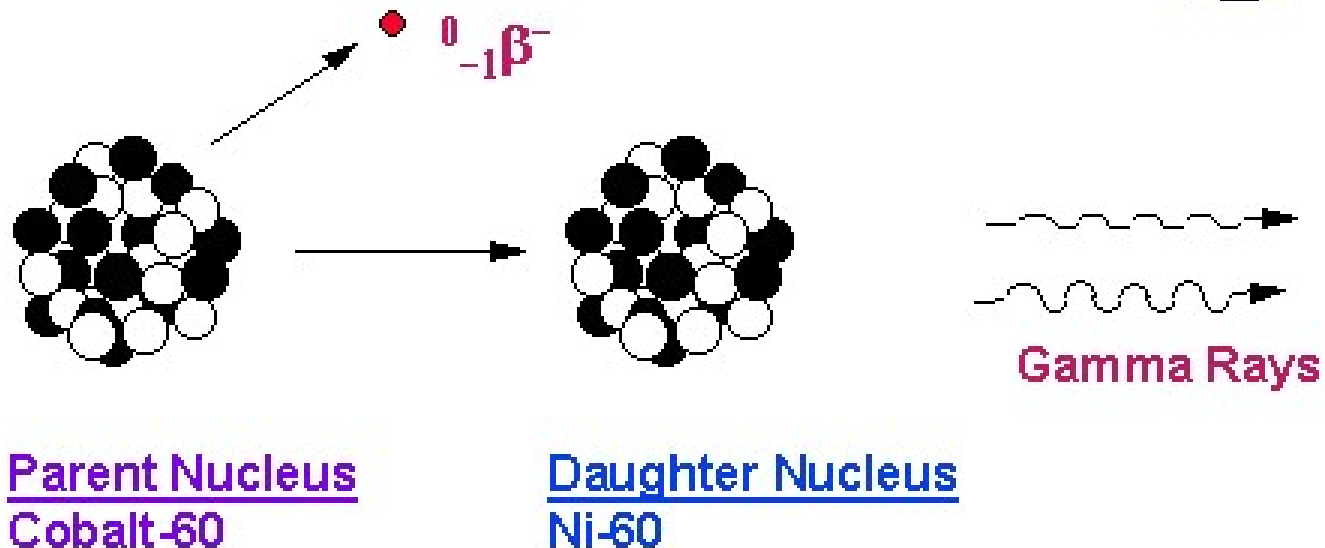
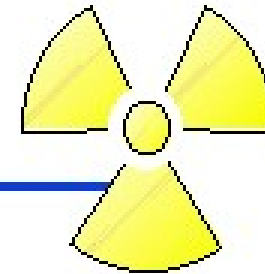


Βήτα+ διάσπαση



Γάμμα διάσπαση

Gamma-Ray Radiation



Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με ύλη

Διάφοροι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας των σωματιδίων

Ιονισμοί και διεγέρσεις (τύπος Bethe-Bloch)

Ακτινοβολία πέδησης

Άμεση δίδυμη γένεση (από ηλεκτρόνια)

Πολλαπλή σκέδαση Coulomb

Ακτινοβολίας διέλευσης (transition radiation)

Ακτινοβολία Cerenkov

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.

Πάχος υλικού σε g/cm^2

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:

$$\mathbf{x = \ell \cdot \rho(\ell)}$$

Το γινόμενο αυτό αντιπροσωπεύει το **πάχος x του υλικού** που το σωματίδιο διαπερνά και έχει διαστάσεις μάζας ανά μονάδα επιφάνειας: **g/cm^2 , kg/cm^2 , kg/m^2 .**

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/cm^2 (εφ'όσον $1 \text{ atm} = 1 \text{ Bar} = 1033 \text{ g/cm}^2$).

Τύπος Bethe-Bloch

Η απώλεια της ενέργειας ενός φορτισμένου σωματιδίου (πλήν e και μ) **μέσω ιονισμών και διεγέρσεων**, ανά μονάδα διαδρομής του σωματιδίου, δίνεται από τον **τύπο Bethe – Bloch**:

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

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:

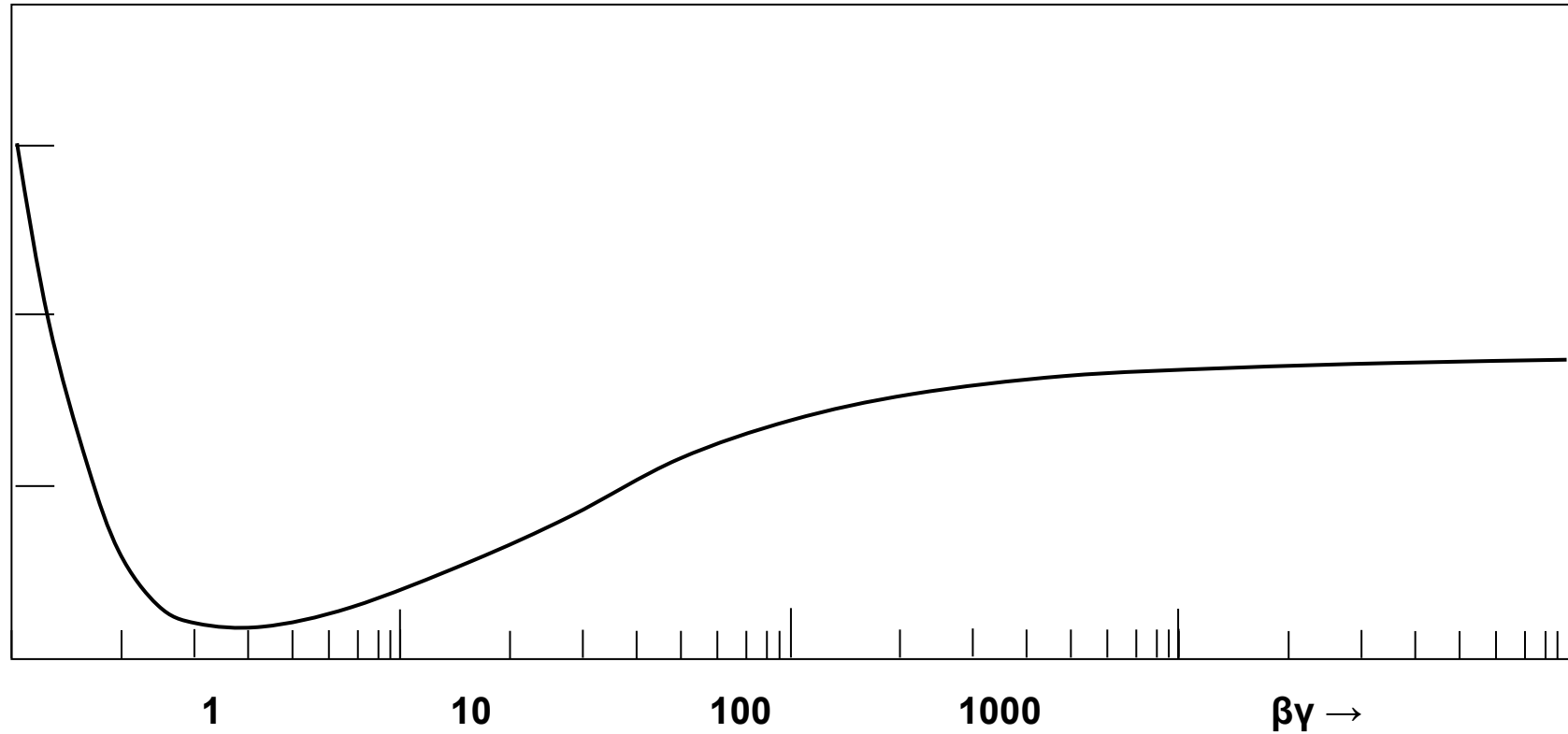
$$\beta \gamma \approx 3.5 - 4 \quad \text{ή} \quad \beta \approx 0.96 \quad \text{ή} \quad E_{\text{mip}} \approx 4m_0 c^2.$$

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:

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

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

Άμεση δίδυμη γένεση (ζεύγους ηλεκτρονίων) από σχετικιστικά φορτισμένα σωματίδια

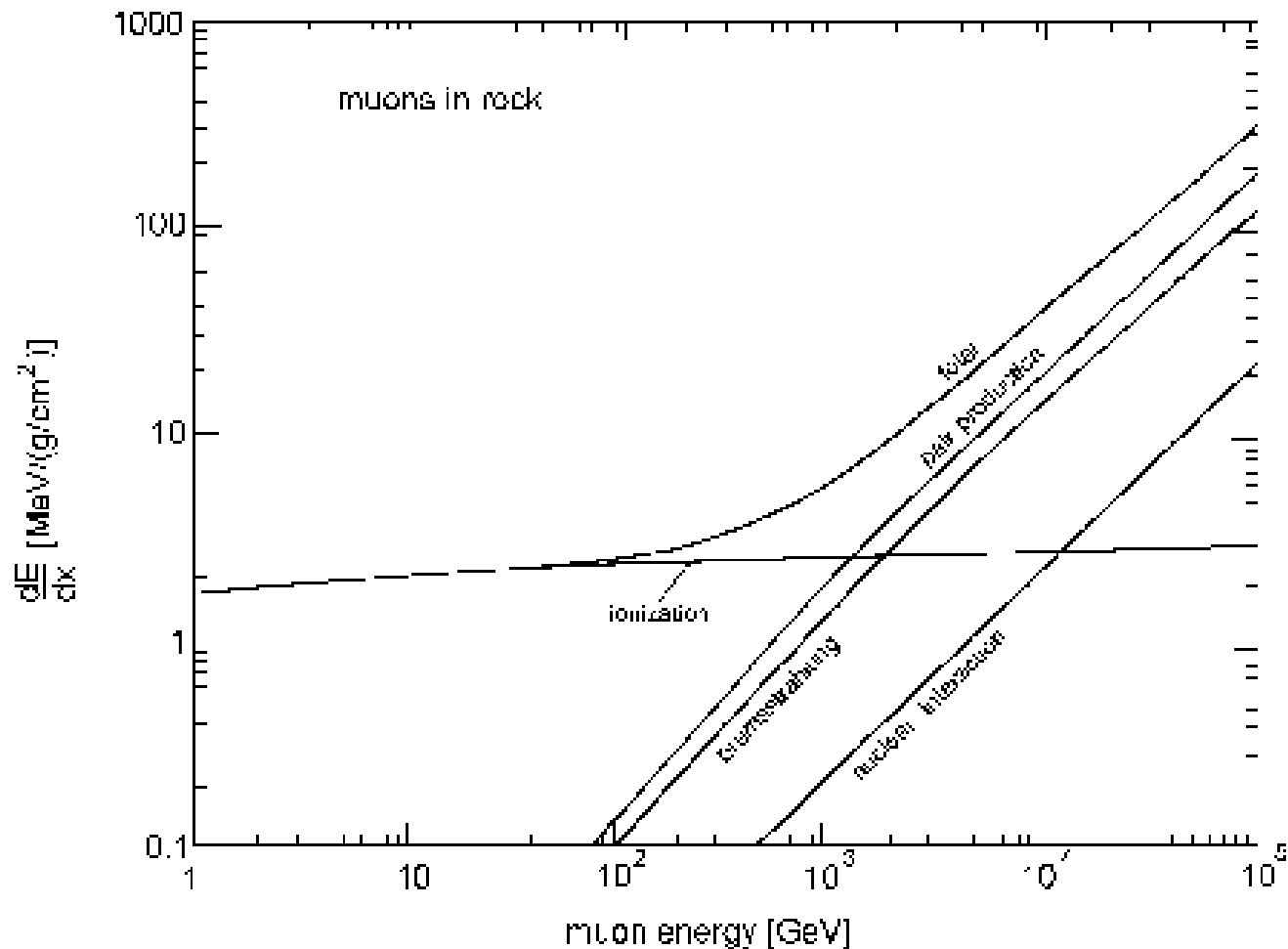
Ένας άλλος μηχανισμός απώλειας ενέργειας των πολύ ταχέων φορτισμένων σωματιδίων είναι η **άμεση δίδυμη γένεση ηλεκτρονίων**. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως η δίδυμη γένεση που κάνουν τα δυνητικά φωτόνια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του σχετικιστικού σωματιδίου, μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα.

Αυτός ο μηχανισμός συνυπάρχει με τον μηχανισμό δημιουργίας φωτονίων πέδησης και γίνεται ο κύριος μηχανισμός στις πάρα πολύ μεγάλες ενέργειες.

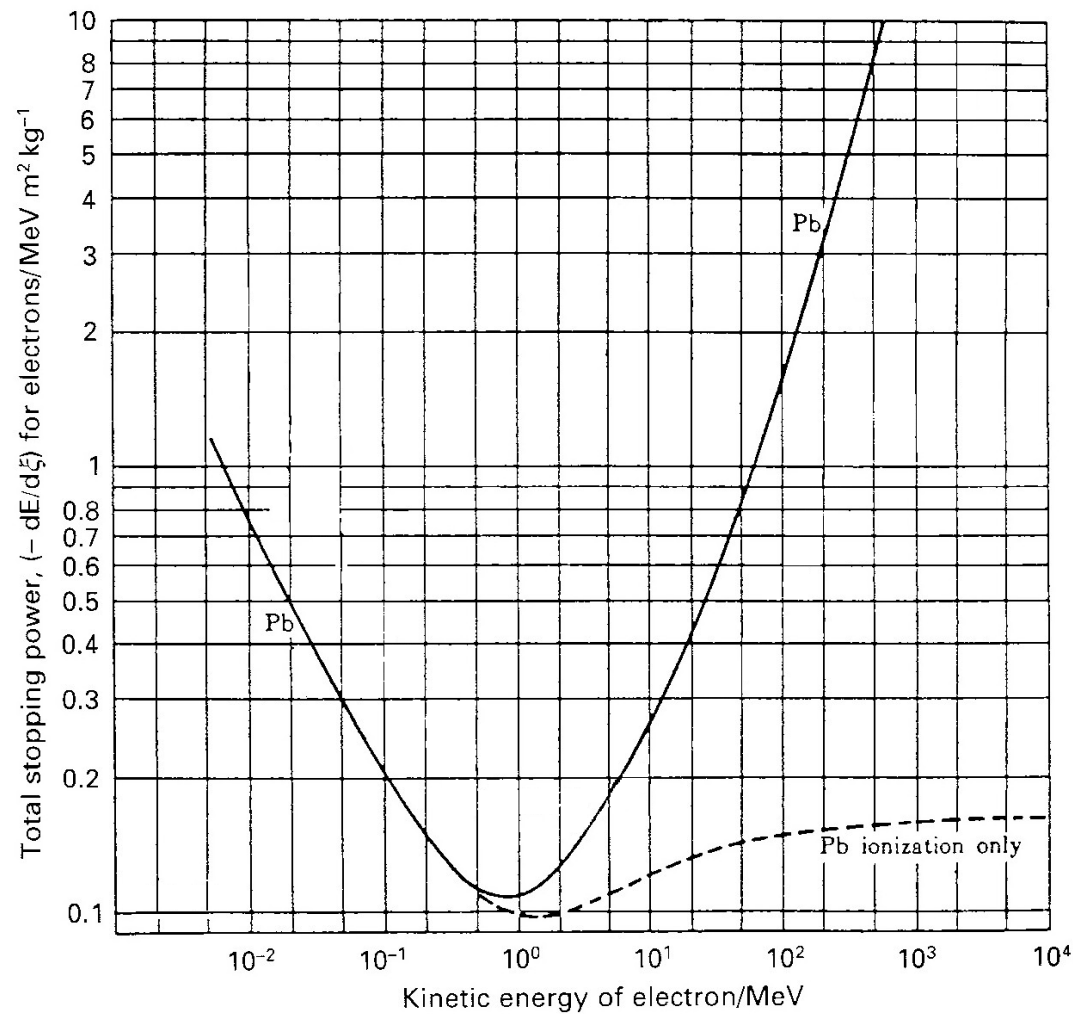
Η απώλεια ενέργειας σωματιδίου με άμεση δίδυμη γένεση, είναι ανάλογη της ενέργειας E του σωματιδίου (όπως συμβαίνει και με την ακτινοβολία πέδησης).

Άμεση δίδυμη γένεση από σχετικιστικά μίονια

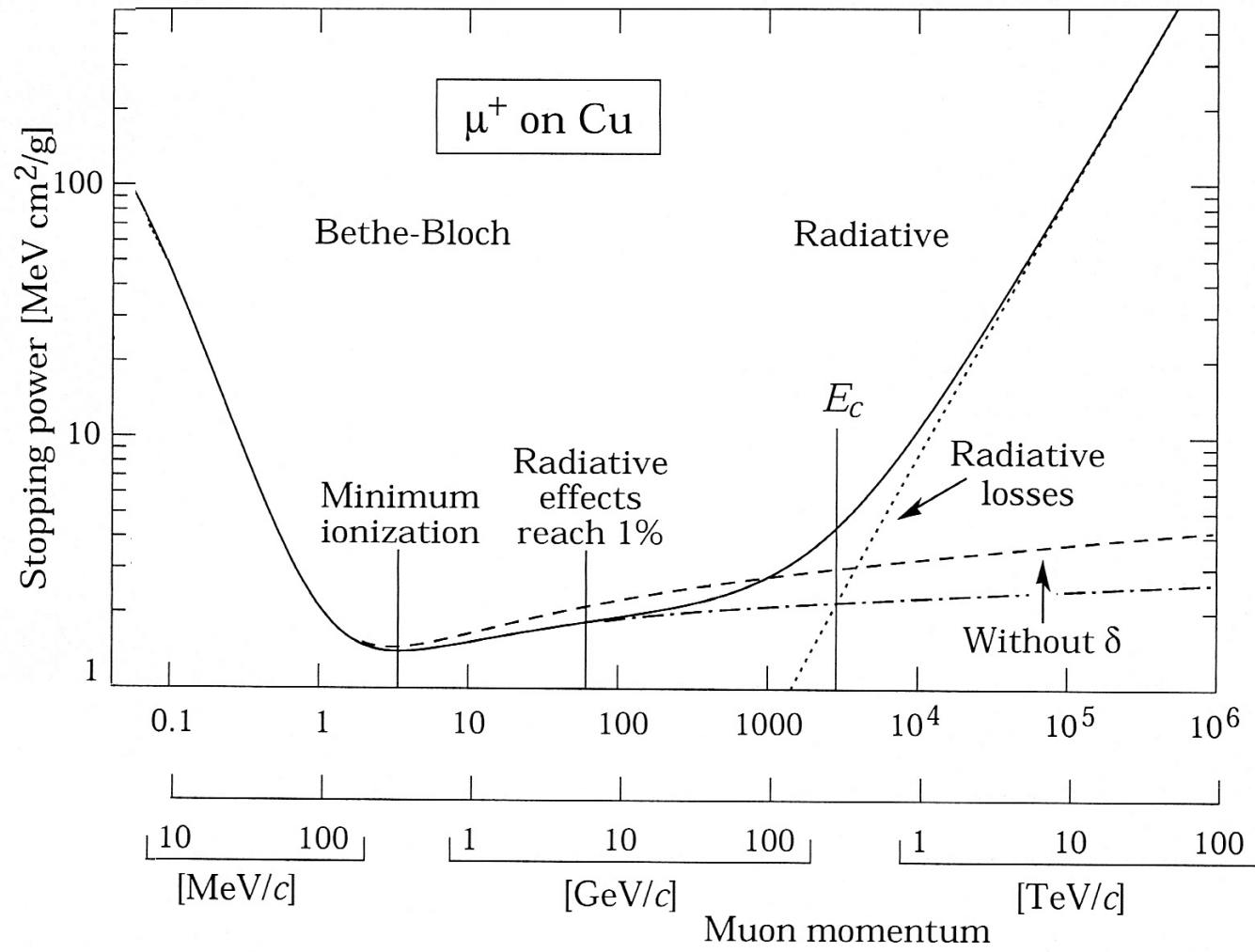
Συνεισφορά στην απώλεια ενέργειας μιονίων που διέρχονται μέσα από βράχο (standard rock: $Z = 11$, $A = 22$, $\rho = 3 \text{ g/cm}^3$), λόγω: ιονισμών, άμεσης δίδυμης γένεσης, φωτονίων πέδησης και πυρηνικής αλληλεπίδρασης (photonuclear int.).



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 για την απώλεια ενέργειας των ηλεκτρονίων**, το **μήκος ακτινοβολίας X_0** .

Αυτό είναι, εξ ορισμού:

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

Άρα:

$$E = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}} \quad \text{και}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

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 ($\sim 37\%$). Δηλαδή, **μέσα σε ένα X_0 το ηλεκτρόνιο χάνει με ακτινοβολία πέδησης (φωτόνια) περίπου το 63% της ενέργειάς του**.

Μήκος ακτινοβολίας στα διάφορα υλικά

Το X_0 στα διάφορα υλικά δίνεται, προσεγγιστικά, 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:

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

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

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

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

Κρίσιμη ενέργεια (critical energy)

Ο λόγος του ρυθμού απώλειας ενέργειας με ακτινοβολία πέδησης, προς τον ρυθμό απώλειας ενέργειας με ιονισμούς, μεταβάλλεται με την ενέργεια E και τη μάζα του σωματιδίου και το Z του υλικού:

$$\frac{(dE/dx)_{\alpha\kappa\tau}}{(dE/dx)_{\text{ion}}} = \frac{Z \cdot E}{1600 \cdot m_0 c^2}$$

Κρίσιμη ενέργεια λέμε την ενέργεια για την οποία οι δύο ρυθμοί απώλειας ενέργειας γίνονται ίσοι:

$$E \equiv E_{\text{crit}} \quad \text{όταν} \quad \left[\frac{dE}{dx} \right]_{\text{rad}} = \left[\frac{dE}{dx} \right]_{\text{ion}}$$

Η κρίσιμη ενέργεια εξαρτάται από το σωματίδιο και από το υλικό:

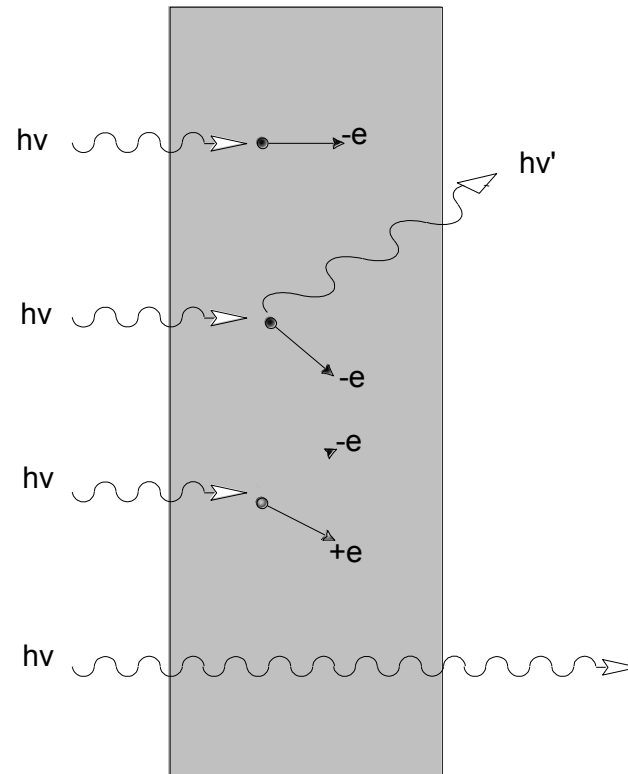
$$E_{\text{crit}} = \frac{1600 \cdot m_0 c^2}{Z}$$

Π.χ. για τα ηλεκτρόνια, η κρίσιμη ενέργεια στον αέρα ($Z \approx Z_N = 7$) είναι περίπου 100 MeV :

$$E_{\text{crit}} = \frac{1600 \cdot m_0 c^2}{Z} = \frac{1600 \cdot 0,511 \text{ MeV}}{7} \cong 100 \text{ MeV}$$

ενώ στον μόλυβδο ($Z_{\text{Pb}} = 82$) είναι περίπου 10 MeV.

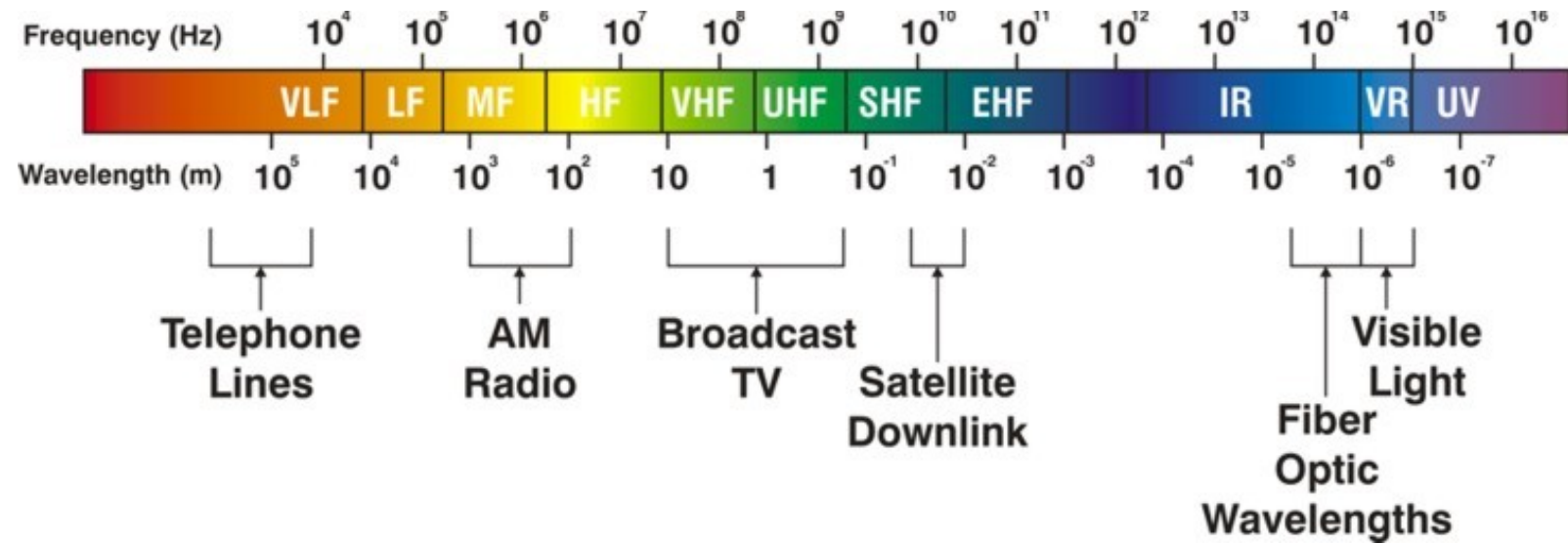
Αλληλεπίδραση των γάμμα με την ύλη



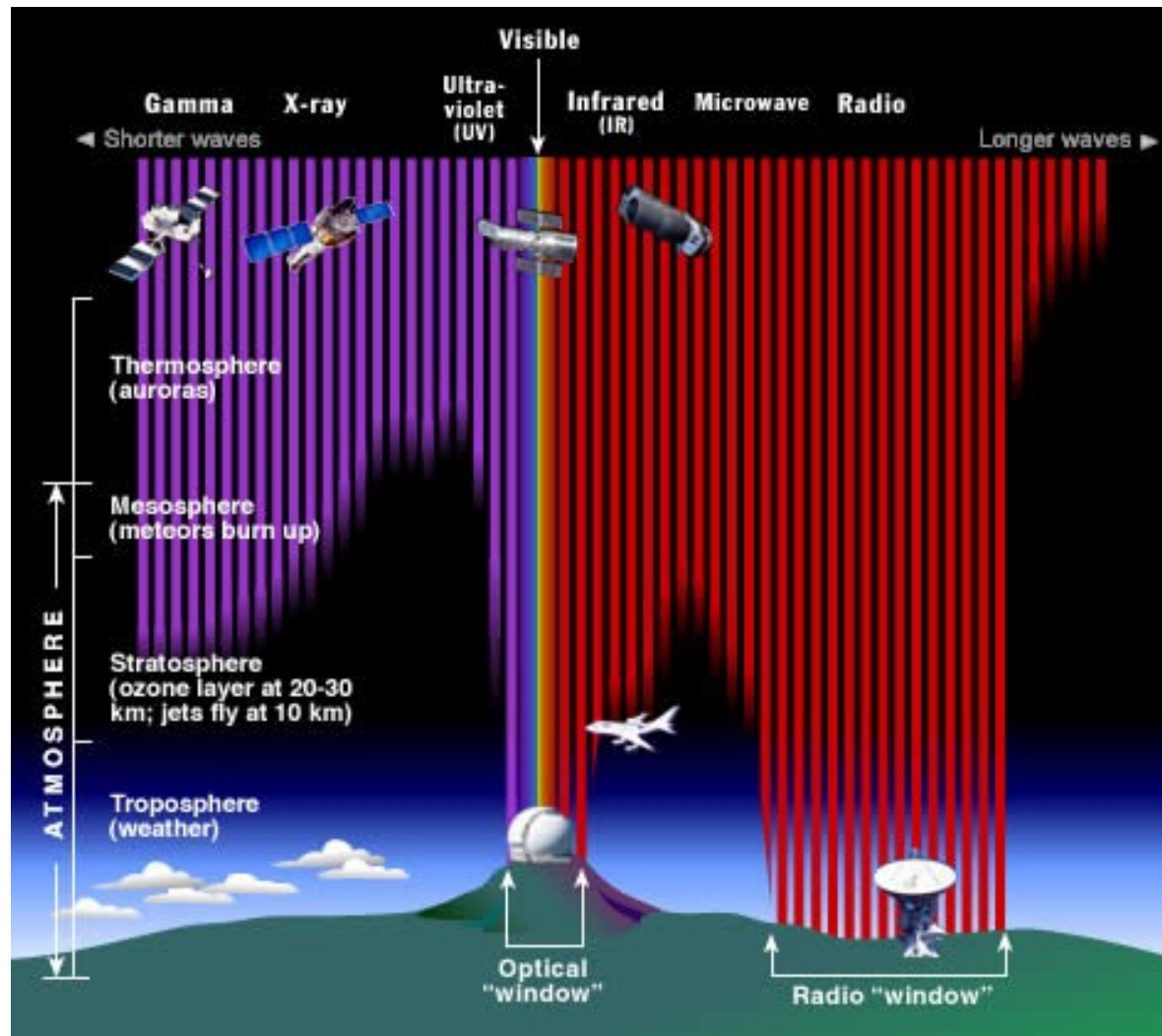
-
-
-
-

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο
Φαινόμενο Compton
Δίδυμη Γένεση

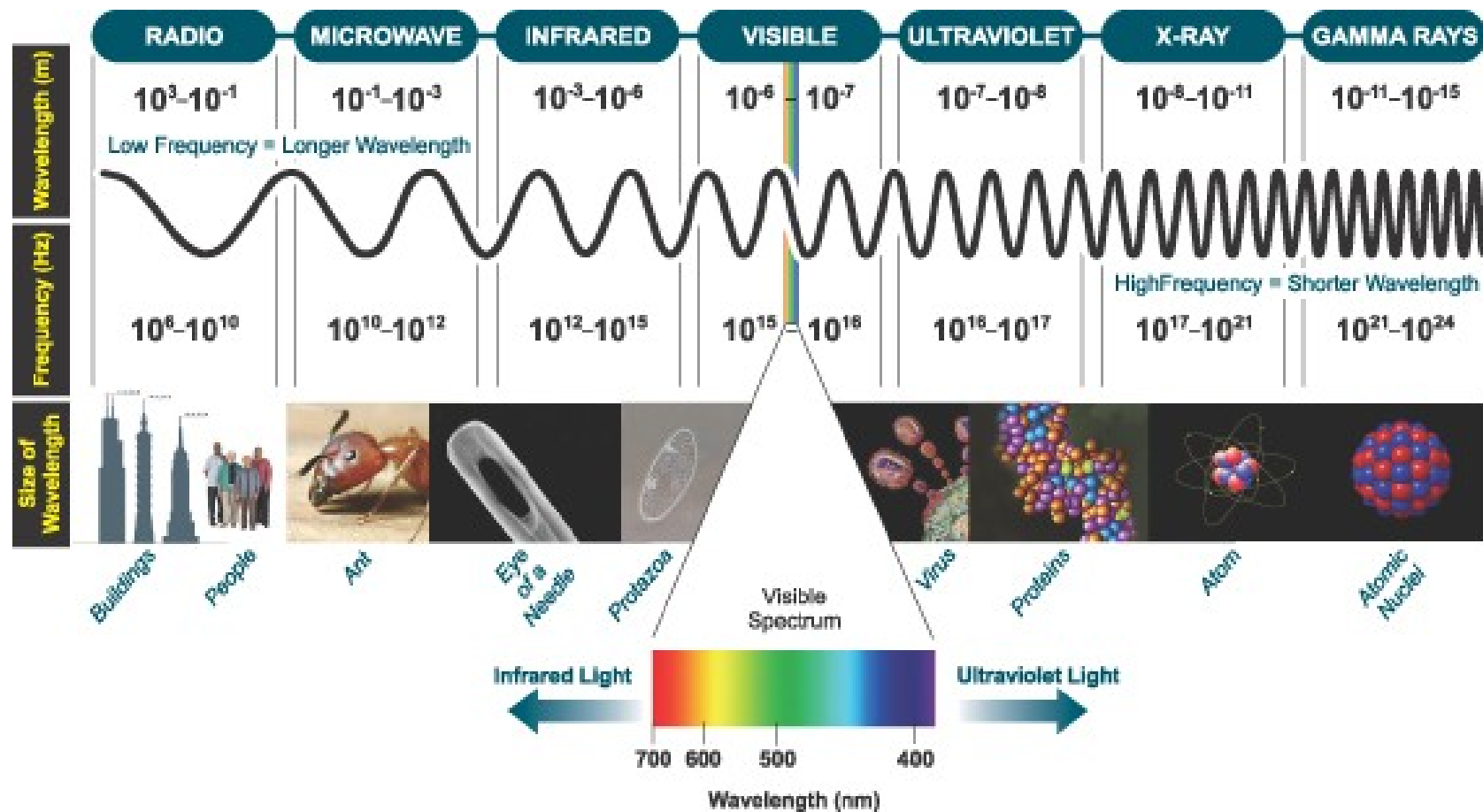
Φωτόνια...



Και πάλι φωτόνια...

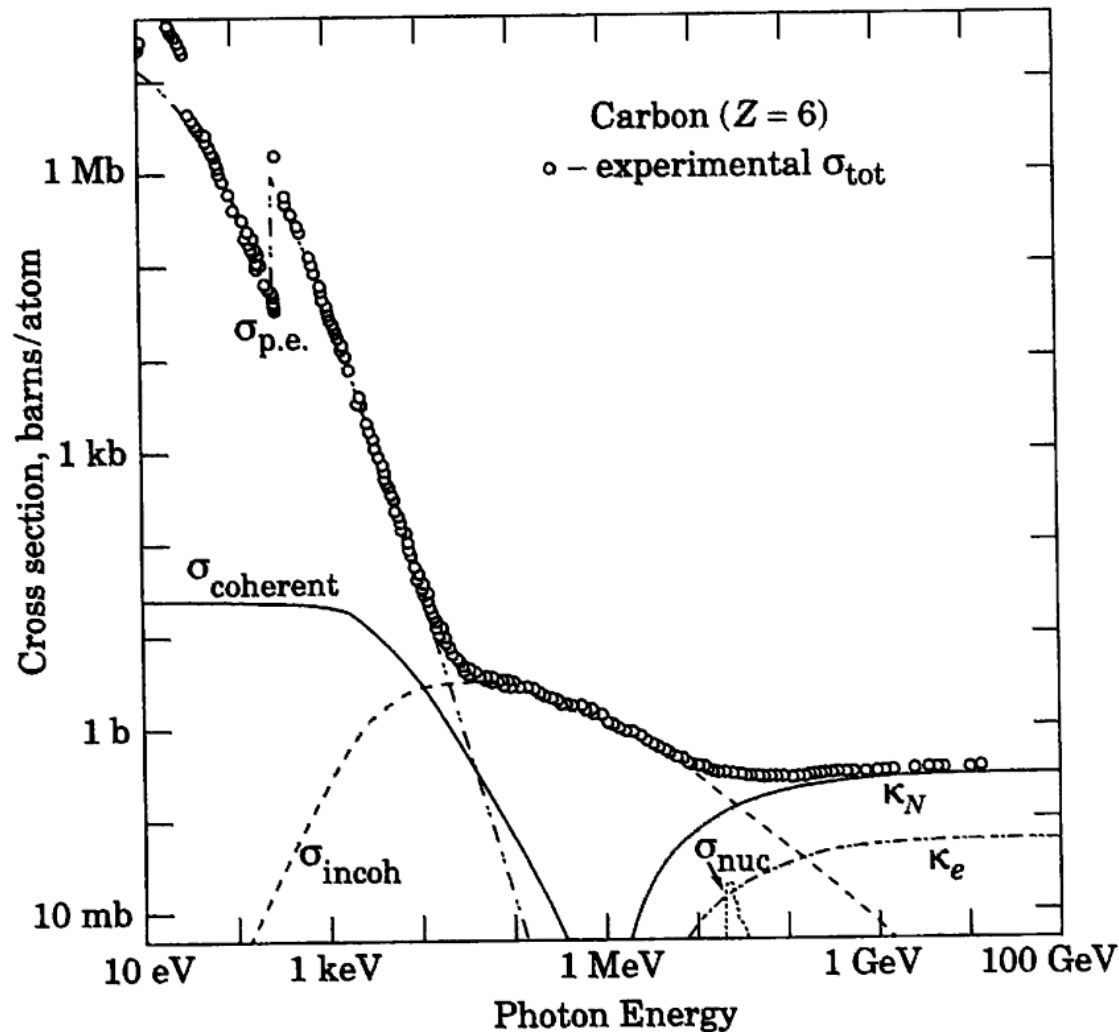


Η προσοχή στα φωτόνια προς τις υψηλές ενέργειες...



Απώλεια ενέργειας των γάμμα υψηλής ενέργειας

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



Απορρόφηση των γάμμα με δίδυμη γένεση

Η απορρόφηση των φωτονίων με δίδυμη γένεση ακολουθεί τη σχέση:

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

όπου $I(0)$ και $I(x)$ είναι ο αριθμός φωτονίων της δέσμης (ένταση της δέσμης) πριν και μετά την διέλευσή της από υλικό πάχους x και τ είναι ο συντελεστής απορρόφησης της δέσμης με δίδυμη γένεση (attenuation coefficient). Η φυσική σημασία του συντελεστή τ είναι μετά από πάχος υλικού ίσο με $1/\tau$, το ποσοστό φωτονίων που διέρχονται χωρίς να αλληλεπιδράσουν είναι ίσο με το $1/e$ ($\sim 37\%$). Άρα, κατά τη διέλευση της δέσμης από πάχος ίσο με $1/\tau$, ποσοστό φωτονίων $\sim 63\%$ δημιουργούν ζεύγη $e^\pm$.

Ο συντελεστής απορρόφησης τ ισούται με το γινόμενο της ενεργού διατομής σ , επί την πυκνότητα ρ των πυρήνων στο υλικό. Προκύπτει ότι είναι περίπου ίσος ($7/9$) με το αντίστροφο του μήκους ακτινοβολίας X_0 , οπότε:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\frac{7}{9} \frac{1}{X_0} x}$$

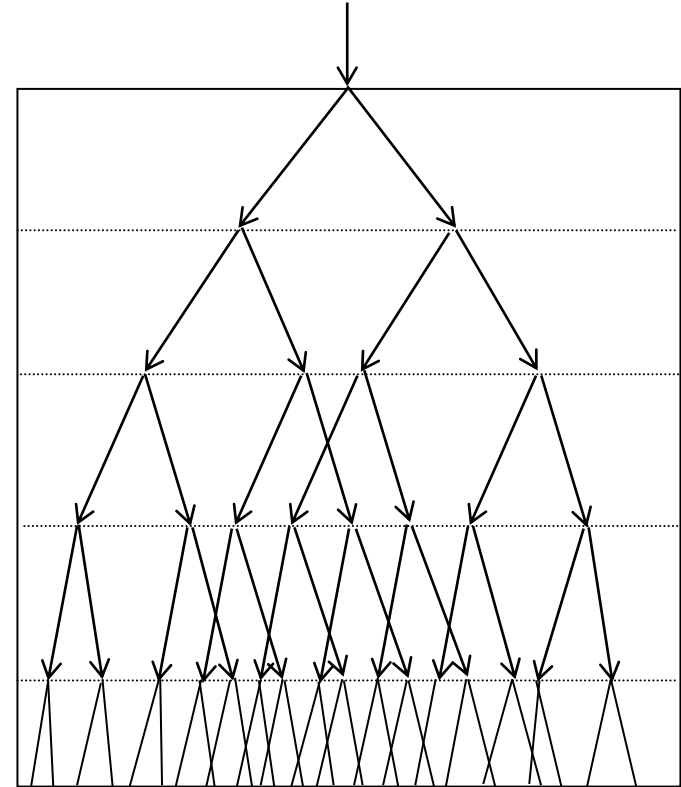
Άρα, κατά τη διέλευση της δέσμης από πάχος ίσο με X_0 , ποσοστό φωτονίων $\sim 54\%$ δημιουργούν ζεύγη $e^\pm$. Με άλλα λόγια, μετά από διαδρομή ίση με X_0 , ένα φωτόνιο θα έχει μετατραπεί σε ζεύγος $e^\pm$ με πιθανότητα 54% .

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, εφ'όσον 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.

Αριθμός και ενέργεια των σωματιδίων

Μετά από μέση απόσταση $1 X_0$:

Τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας δημιουργούν φωτόνια πέδησης δίνοντας το 63% της ενέργειάς τους.

Τα φωτόνια υψηλής ενέργειας έχουν πιθανότητα 54% να εξαφανιστούν με δίδυμη γένεση, δημιουργώντας e^- και e^+ έχοντας το καθένα το 50% της ενέργειας του φωτονίου.

Στον ηλεκτρομαγνητικό καταιγισμό λοιπόν το μήκος ακτινοβολίας X_0 μπορεί να θεωρηθεί ως το μέσο μήκος γενιάς παραγωγής νέων σωματιδίων (γ , e) της μισής περίπου ενέργειας.

Σε κάθε γενιά, ο αριθμός των σωματιδίων διπλασιάζεται.

$$n(t) = 2^t$$

Έτσι, στην γενιά t ο αριθμός των σωματιδίων θα έχει γίνει:

$$E(t) = \frac{E_0}{n(t)} = \frac{E_0}{2^t}$$

με ενέργεια ανά σωματίδιο (κατά μέσο όρο):

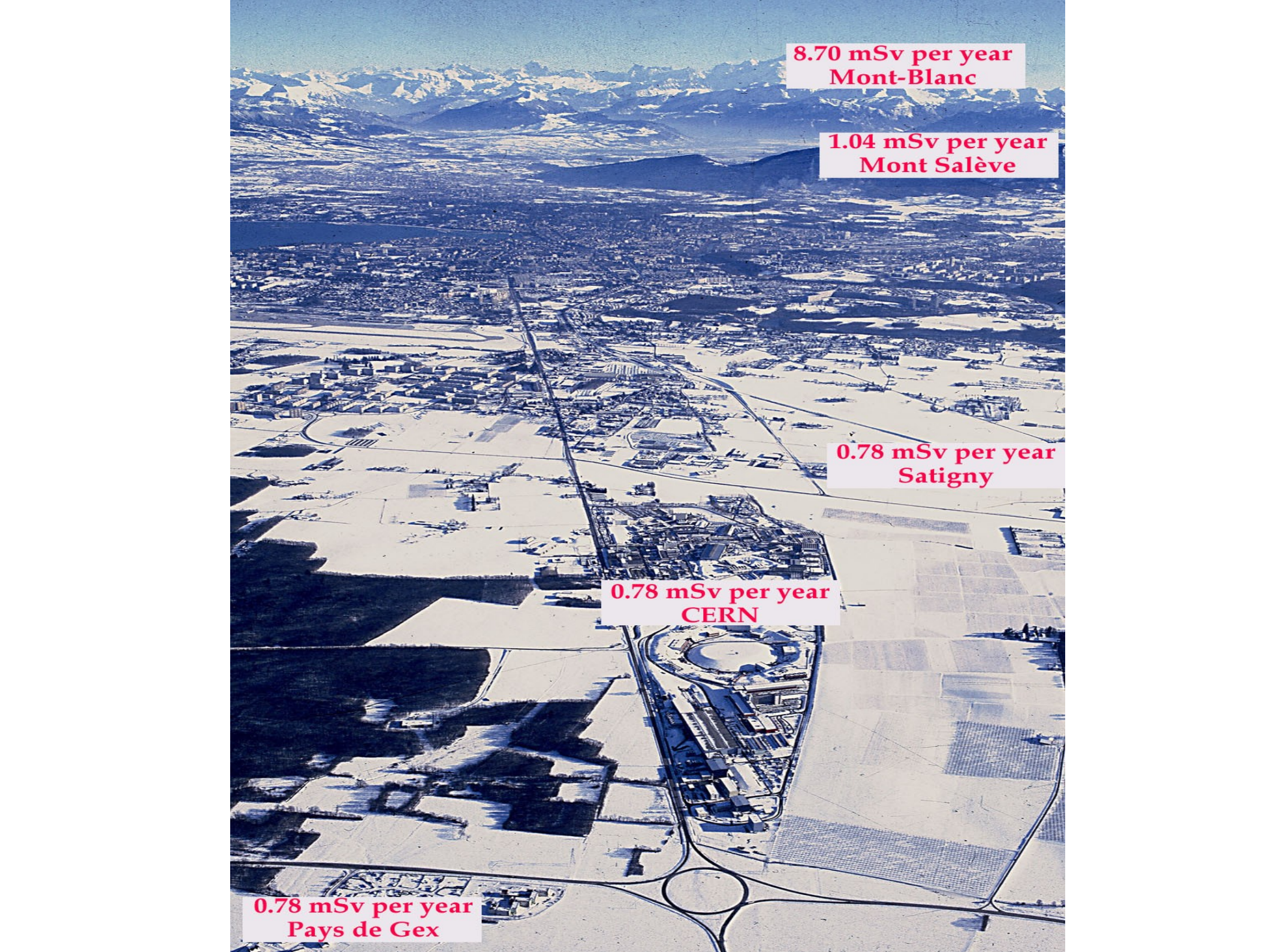
Μέγιστο του ΗΜ-καταιγισμού

Η μείωση της ενέργειας και η αύξηση του αριθμού των σωματιδίων σταματά πρακτικά, σε κάποια γενιά $t = t_{\max}$, όταν η ενέργεια ανά σωματίδιο γίνει περίπου ίση με την κρίσιμη ενέργεια $E(t_{\max}) = E_{\text{crit}}$, δηλαδή στον αέρα περίπου 100 MeV. Άρα στην τελευταία γενιά έχουμε:

$$E(t_{\max}) = \frac{E_0}{2^{t(\max)}} = E_{\text{crit}} \cong 100 \text{ MeV}$$

οπότε λογαριθμίζοντας: $t_{\max} \ln 2 = \ln \frac{E_0}{E_{\text{crit}}}$ και $t_{\max} = \frac{1}{\ln 2} \ln \frac{E_0}{E_{\text{crit}}}$

Έτσι π.χ. για αρχική ενέργεια $E_0 = 10 \text{ GeV}$ παράγονται μετά από $t_{\max} = \ln 100 / \ln 2 \approx 6.6$ γενιές, $n = 2^{6.6} \approx 100$ σωματίδια, με μέση ενέργεια ανά σωματίδιο $E \approx E_0 / 100 = 100 \text{ MeV}$. Τα ηλεκτρόνια της τελευταίας γενιάς στον αέρα έχουν λοιπόν μέση ενέργεια $E_{\text{crit}} \approx 100 \text{ MeV}$, την οποία χάνουν τελικά με ιονισμούς και διεγέρσεις.



8.70 mSv per year
Mont-Blanc

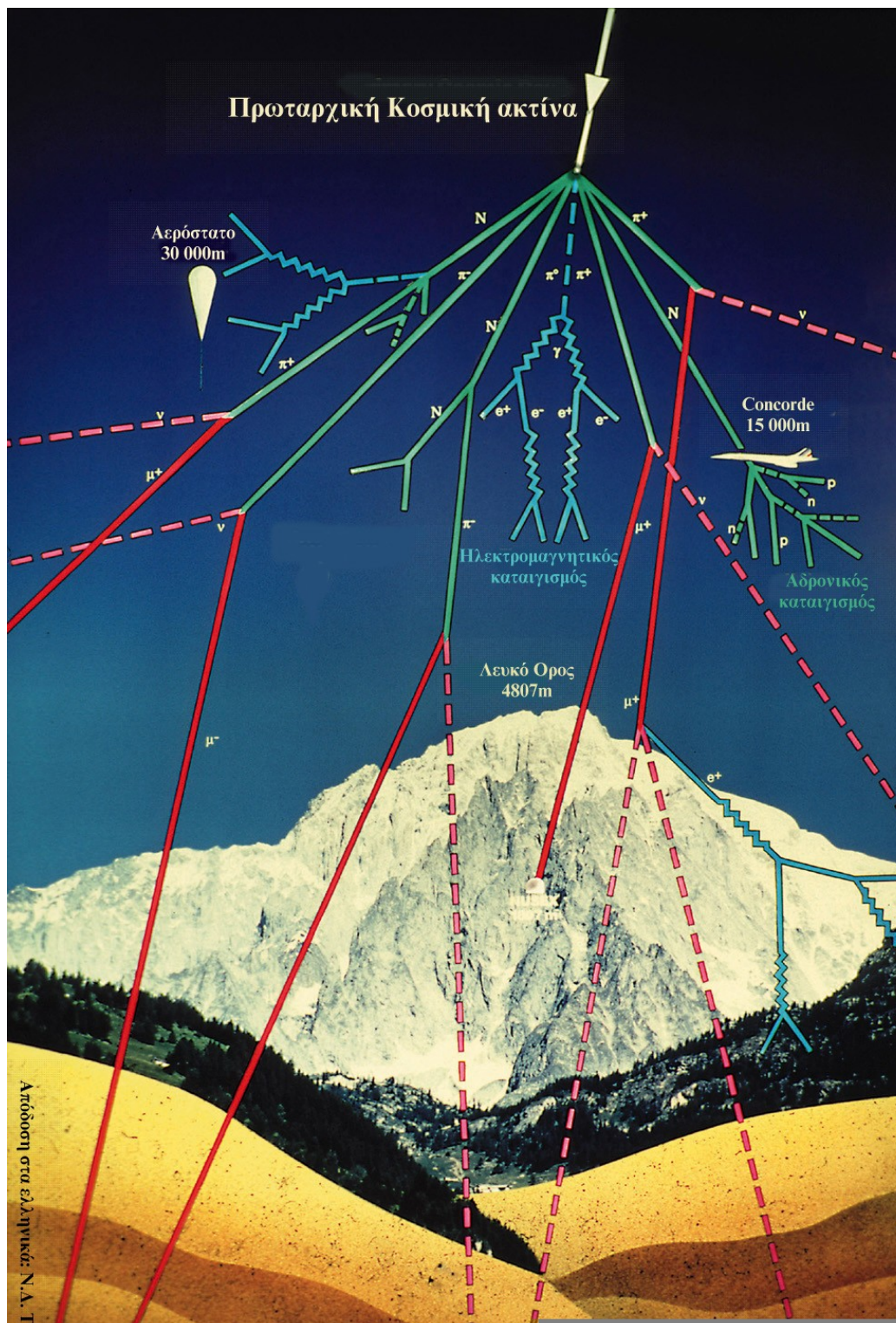
1.04 mSv per year
Mont Salève

0.78 mSv per year
Satigny

0.78 mSv per year
CERN

0.78 mSv per year
Pays de Gex

Πρωταρχική Κοσμική ακτίνα

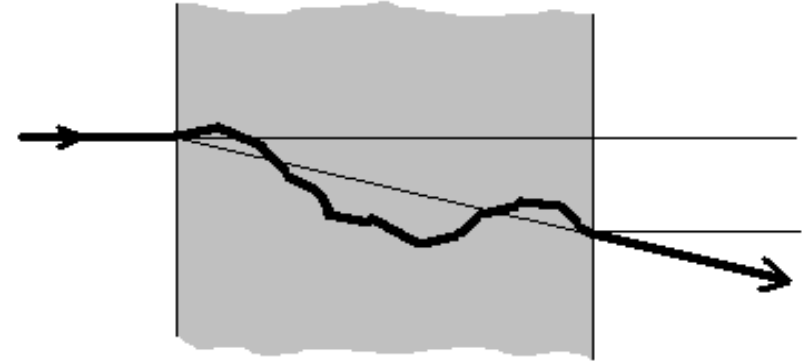


Ελαστικές σκεδάσεις

Η απώλεια ενέργειας των σωματιδίων (Bethe-Bloch) γίνεται κυρίως με ιονισμούς και διεγέρσεις (δηλαδή με ελαστικές σκεδάσεις) και οφείλεται στην αλληλεπίδραση με τα e του υλικού.

Υπάρχουν όμως και ελαστικές σκεδάσεις, κυρίως από τους πυρήνες του υλικού, οι οποίες προκαλούν μικρές αποκλίσεις του σωματιδίου από την ευθύγραμμη τροχιά. Ένα σωματίδιο μετά την διέλευσή του από κάποιο υλικό πάχους x , υφίσταται πολλές διαδοχικές σκεδάσεις, ή όπως λέγεται **πολλαπλή σκέδαση** Coulomb.

Η κατανομή των γωνιών σκέδασης δίνεται από τη θεωρία Moliere.



$$\theta_s^{rms} = (13,6 \text{ MeV}) \frac{z}{\beta c \cdot p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} (1 + 0,038 \cdot \ln \frac{x}{X_0})$$

όπου p η ορμή, βc η ταχύτητα και z το φορτίου του σωματιδίου.

Η σχέση αυτή δεν ισχύει για πολύ μεγάλα πάχη υλικού (πρέπει: $x < 100 \cdot X_0$).

Ακτινοβολίας διέλευσης (transition radiation)

Ακτινοβολία διέλευσης εκπέμπεται όταν φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται από την επιφάνεια που διαχωρίζει δύο υλικά τα οποία έχουν διαφορετικές διηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες.

Το σωματίδιο συνοδεύεται από το ηλεκτρικό του πεδίο, η έκταση του οποίου μέσα σε κάποιο υλικό καθορίζεται (και) από την διηλεκτρική σταθερά του υλικού (αφού μικρότερη διηλεκτρική σταθερά συνεπάγεται χαμηλότερη πόλωση του μέσου, άρα μεγαλύτερη έκταση του πεδίου). Το πέρασμα του σωματιδίου από την διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών, σημαίνει απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού του πεδίου και επομένως απότομη επανακατανομή των φορτίων στην περιοχή, άρα εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, της **ακτινοβολίας διέλευσης**.

Στις υψηλές ενέργειες, η εκπομπή γίνεται κυρίως στις ακτίνες X, με κατεύθυνση παράλληλη προς την ταχύτητα του σωματιδίου. Ο **κώνος εκπομπής** έχει γωνιακό άνοιγμα θ αντιστρόφως ανάλογο του παράγοντα Lorentz γ :

$$\theta \propto \frac{1}{\gamma}$$

Η **ολική ενέργεια** που εκπέμπεται κατά την είσοδο σε ένα υλικό σωματιδίου με φορτίο ze , από το κενό, είναι:

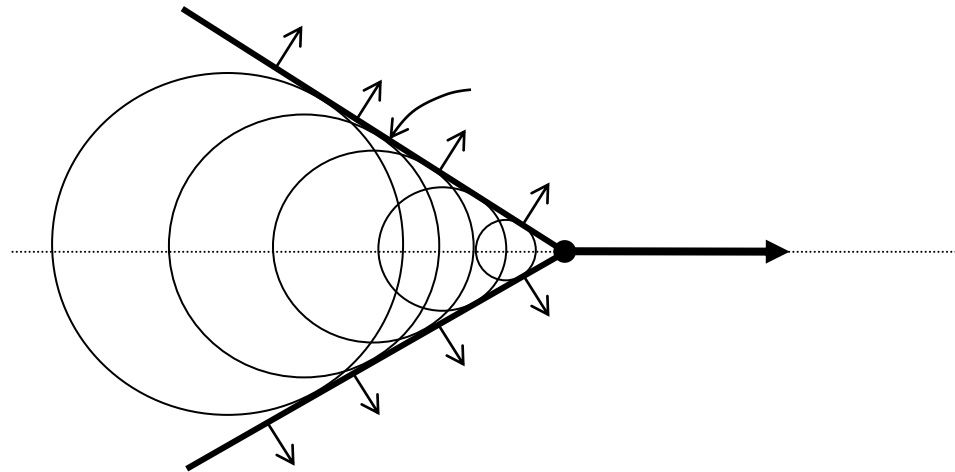
$$W = \frac{1}{3} \alpha z^2 \hbar \omega_p \gamma$$

όπου α η σταθερά της λεπτής υφής και ω_p η συχνότητα πλάσματος του μέσου.

Ακτινοβολία Cerenkov

Ακτινοβολία Cerenkov 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.



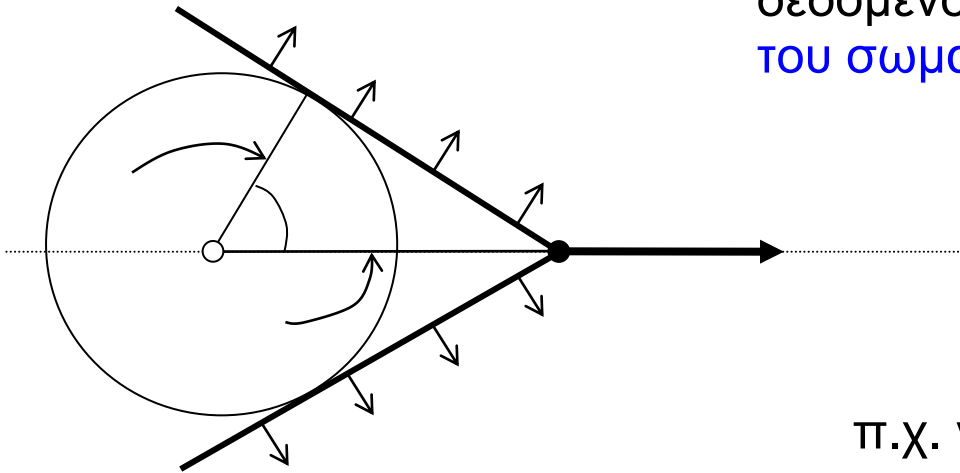
$$v \geq v_{\varphi} \Rightarrow \frac{v}{c} \geq \frac{v_{\varphi}}{c} \Rightarrow \beta \geq \frac{1}{n}$$

Συνθήκη εκπομπής ακτινοβολίας Cerenkov:

Ακτινοβολία Cerenkov

Η γωνία εκπομπής θ της ακτινοβολίας Cerenkov, σε δεδομένο μέσο, εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα u του σωματιδίου:

$$\cos \theta = \frac{v_{\phi} t}{v t} = \frac{v_{\phi}}{v} = \frac{c/n}{v} = \frac{c}{v n} = \frac{1}{\beta n}$$

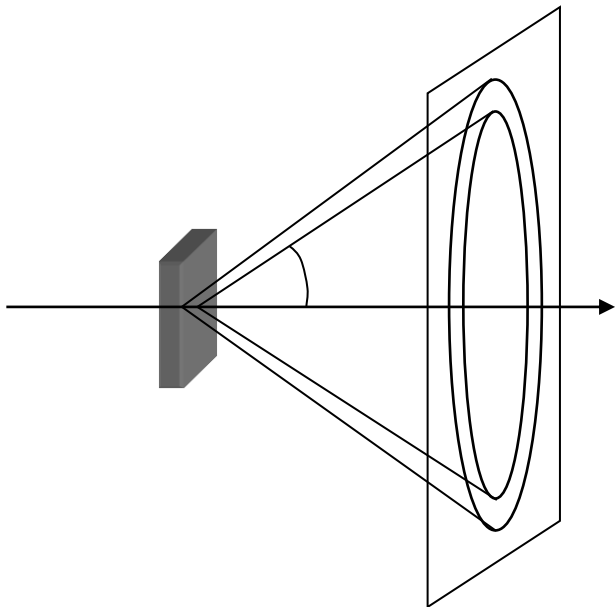


π.χ. για το νερό:

$$\beta(\min) = 0,7519 \quad \text{άρα } \theta(\max) = 41,25^{\circ}$$

για τον αέρα:

$$\beta(\min) = 0,9997 \quad \text{άρα } \theta(\max) = 1,36^{\circ}$$



Όταν η ακτινοβολία Cerenkov προσπίπτει σε πέτασμα κάθετο στην τροχιά του σωματιδίου, δημιουργεί **κυκλικό δακτύλιο**, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από την ταχύτητα u του σωματιδίου και την απόσταση του πετάσματος.

Αριθμός των φωτονίων Cerenkov

- Η ενέργεια του φωτός Cerenkov ανά μονάδα μήκους x του υλικού και ανά μονάδα μήκους κύματος λ , είναι:

$$\frac{d^2 E}{dx d\lambda} = (2\pi\alpha) \cdot z^2 \cdot \frac{1}{\lambda^2} \cdot \sin^2 \theta$$

όπου $\alpha = 1/137$ η σταθερά της λεπτής υφής και z το φορτίο του σωματιδίου. Η εξάρτηση του αριθμού των φωτονίων από το $1/\lambda^2$ είναι χαρακτηριστική της ακτινοβολίας Cerenkov και δείχνει ότι το **μπλέ φως** κυριαρχεί στο φάσμα της.

- Ο αριθμός N_γ των παραγομένων φωτονίων, εξαρτάται από την ταχύτητα:

$$N_\gamma \propto 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} = 1 - \frac{1}{n^2} \left(1 + \frac{m^2}{p^2}\right)$$

Η σχέση αυτή μας δείχνει ότι ο αριθμός των φωτονίων μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της μάζας, για δεδομένη ορμή. Μπορούμε λοιπόν να ξεχωρίσουμε δύο σχετικιστικά σωματίδια της ίδιας ορμής αλλά διαφορετικής μάζας, επειδή το βαρύτερο και επομένως πιο αργό σωματίδιο, θα παράγει πολύ λιγότερο φως Cerenkov (ανιχνευτές ταυτοποίησης σωματιδίων, particle identification detectors).

Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με ύλη

Συμπερασματικά:

Υπάρχουν σωματιδιακής φύσεως ακτινοβολίες, όπως (α , β , δ , fission fragments, κοσμικά πρωτόνια, φορτισμένοι πυρήνες κλπ...)

...και κυματικής φύσεως (φωτόνια...)

...και νετρίνα (εδώ μειδιούμε...)

Ανάλογα με τη φύση τους (και την ενέργειά τους), οι διάφορες ακτινοβολίες αλληλεπιδρούν με διάφορους τρόπους με την ύλη:

Οι σωματιδιακές αλληλεπιδρούν με συνεχή τρόπο (πολλά αλληπάλληλα βήματα)

Οι κυματικές με κβαντικό τρόπο (είτε αλληλεπιδρούν, είτε όχι)

The different regions :

Recombination before collection.

Ionisation chamber; collect all primary charge.
Flat area.

Proportional counter (gain to 10^6); secondary
avalanches need to be quenched.
Limited proportionality (secondary avalanches
distorts field, more quenching needed).

Geiger Muller mode, avalanches all over wire,
strong photoemission, breakdown avoided by
cutting HV.

