Επταχυντές - Ανιχνευτές

Κ.Κορδάς

Ανιχνευτές : Μάθημα 2

Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη.

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τι θα συζητήσουμε

- Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας/σωματιδίων με την ύλη
  - Σχετικά βαριά φορτισμένα σωματίδια
  - Ηλεκτρόνια
  - Φωτόνια

Από κεφάλαιο 13, βιλίου πυρηνικής 5ου εξαμήνου,Cottingham & Greenwood

- Ταυτοποίηση σωματιδίων

Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων - Πολύπλοκα πειράματα

Συνέργεια πολλών:

- Δέσμες σωματιδίων
- Ανιχνευτές
- Ηλεκτρονικά
- Υπολογιστές

Πειράματα στο CERN:

- πειράματα στο LEP:
  > 300 άτομα
- πειράματα στο LHC:
  > 2000 άτομα (φυσικοί, μηχανικοί, τεχνικοί)

Επιταχυντές δεσμών Σωματιδίων

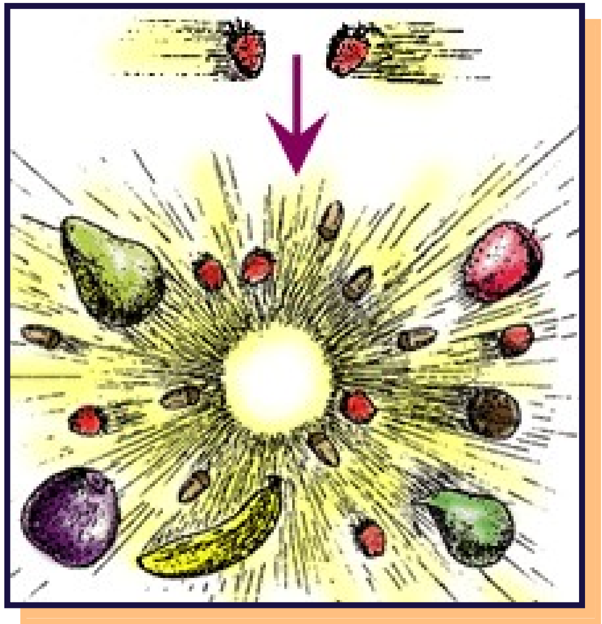
Ανιχνευτική Διάταξη

Συλλογή Δεδομένων

Ανάλυση Δεδομένων

Φυσική - Νέα Γνώση

Για να μάθουμε κάτι από τις συγκρούσεις που παρέχει ο επιταχυντής, Χρειαζόμαστε Ανιχνευτές



Σκοπός:

- Να μετρήσουμε την ενέργεια και την ορμή των σωματιδίων που παράγονται στις συγκρούσεις
- Να ταυτοποιήσουμε το είδος των σωματιδίων

Αλλα πώς;

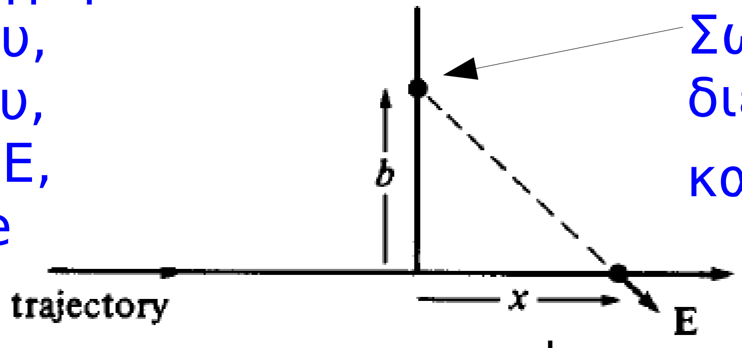
1. Αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη:

dE/dx από διεγέρσεις και ιονισμούς (Bethe-Bloch)

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη (1): μεταβολή της ορμής του

b = impact parameter = παράμετρος κρούσης

Τροχιά γρήγορου σωματιδίου, ταχτητας υ, ενέργειας E, φορτίου ze



Σωμάτιο του υλικού διέλευσης, μάζας m_R και φορτίου z' e

x=ut

$$E_x = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(z'e)x}{(b^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}, \qquad E_y = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(z'e)b}{(b^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Εξίσωση κίνησης: Δύναμη = $\frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}t} = ze\mathbf{E}$

Μεταβολή ορμής:

$$\Delta p_x = ze\int_{-\infty}^{\infty} E_x\,\mathrm{d}t \approx \left(\frac{zz'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\frac{vt\,\mathrm{d}t}{(b^2+v^2t^2)^{\frac{3}{2}}} = 0$$

Δεν έχουμε συνολική μεταβολή ορμής κατά τον άξονα κίνησης

$\Delta p_y = p_T$

$$p_T = ze\int_{-\infty}^{\infty} E_y\,\mathrm{d}t = -\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\frac{b\,\mathrm{d}t}{(b^2+v^2t^2)^{\frac{3}{2}}} = -\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)\frac{2}{bv}$$

$\rightarrow p_T \sim 1/\upsilon$

Μεταβολή ορμής κάθετα στην κίνηση

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη (2): απώλεια ενέργειας σε ένα άτομο υλικού

Θεωρώντας το "ακίνητο" σωμάτιο: αποκτά ορμή $-p_T$.

Και κερδίζει κινητική ενέργεια: $(p_T^2/2m_R)$

(θεωρώντας ότι δεν είναι αρκετή για να το κάνει σχετικιστικό)

Η οποία είναι όση ενέργεια έχασε το κινούμενο.

Άρα απώλεια ενέργειας κινούμενου:

$$\Delta E = -\frac{p_T^2}{2m_R} = -2\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{1}{b^2 v^2 m_R}$$

← Δεν εξαρτάται από τη μάζα του γρήγορου σωματιδίου.
ισχύει και για σχετικιστικό σωματίδιο

Για "ακίνητα" σωμάτια του υλικού =
πυρήνες ατόμων του υλικού, καθώς και τα ατομικά του ηλεκτρόνια
(θυμηθείτε: η ταχύτητα των ατομικών ηλεκτρονίων είναι της τάξης
$\beta = \alpha = 1/137$)

Μεγάλη μάζα mR → μεγάλη απώλεια ενέργειας. Ποσοτικά:

$$\frac{\text{Απώλεια λόγω αλληλεπίδασης με τα Z ατομικά ηλεκτρόνια (μάζας } Zm_e)}{\text{Απώλεια λόγω αλληλεπίδρασης με τον πηρήνα (μαζας} \sim Am_p \sim 2Z{*}m_p)}$$

$\sim 2\, m_p / m_e \sim 4 * 10^3$ ~ΌΛΗ η απώλεια ενέργειας στα ατομικά ηλκετρόνια!

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη(3): απώλεια ενέργειας στην ύλη

Το σωματίδιο κατά την διέλευσή του από κάποιο υλικό,
θα αλληλεπιδράσει με πολλά ηλεκτρόνια σε διάφορες αποστάσεις, b.
Αν τα ηλεκτρόνια του υλικού είναι τυχαία κατανεμημένα στο χώρο γύρω από την τροχιά του σωματιδίου, ο αριθμός ηλεκτρονίων που περιέχονται σε κυλινδρικό όγκο ακτίνας b , πάχους db και μήκους dx θα είναι:
= Z * αριθμός ατόμων στον όγκο αυτό = $Z * (\rho * b * 2\pi * db * dx)/m_a$

Όπου m_a είναι η μάζα του κάθε ατόμου (προσέγγιστττικά: m_a = A amu).
Οπότε:

ΔΕ = διπλό διαφορικό
(ως προς b και ως προς x):

$$\mathrm{d}^2 E = -4\pi \left(\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0} \right)^2 \frac{\rho Z}{m_\mathrm{a}} \frac{1}{v^2 m_\mathrm{e}} \frac{\mathrm{d}b}{b} \mathrm{d}x$$

Ολοκληρώνοντας ώς προς όλα τα πιθανά b, προσέχουμε ότι
το b δεν μπορεί να γίνει μηδέν (τότε απέλεια ενέργειας άπειρη), ούτε άπειρο:
Το b ξεκινάει από κάποιο bmin (~ απόσταση ελάχιστης προσέγγισης),
μέχρι κάποιο μέγιστο bmax , πέρα από το οποίο η μεταφορά ενέρειας δεν είναι αρκετή για να κάνει ούτε διέγερση του ατομου, οπότε και δεν γίνεται!
(θυμηθείτε το Frank-Hertz?)

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη(4): απώλεια ένεργειας

Ολοκλήρωση για όλα τα πιθανά b:

$$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = 4\pi\left(\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{\rho Z}{m_\mathrm{a} m_\mathrm{e}} \frac{1}{v^2} L,$$

where $L = \ln(b_{\max}/b_{\min})$.

Since $m_\mathrm{a} \approx A$ atomic mass units, where A is the mass number of the atoms, we write this as

$$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = D\left(\frac{Z}{A}\right)\rho\left(\frac{zc}{v}\right)^2 L,$$

where

$$D = 4\pi\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{1}{m_\mathrm{e}(931.5\ \mathrm{MeV})} = 0.307\ \mathrm{MeV\ cm^2\ g^{-1}}.$$

and the mass density ρ of the material is expressed in $\mathrm{g\,cm^{-3}}$. (Note the units.)

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη: απώλεια ένεργειας και όρια ολοκλήρωσης (1)

Ολοκλήρωση για όλα τα πιθανά b: $$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = 4\pi\left(\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{\rho Z}{m_a m_e}\frac{1}{v^2}L,$$

where $L = \ln(b_{max}/b_{min})$.

1. Πόσο είναι το bmin;

Θυμηθείτε τη μεταφορά ενέργειας σε ένα άτομο: $$\Delta E = -\frac{p_T^2}{2m_R} = -2\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{1}{b^2v^2m_R}$$

Για bmin=0 το ΔΕ απειρίζεται!

Αφύσικο, αφού δεν μπορεί ποτέ το σωματίδιο να χάσει ενέργεια πιό πολύ από αυτή με την οποία μπήκε στο υλικό από το οποίο διέρχεται.

Άρα:

…. bmin = όσο το μήκος του κυματοπακέτου που χαρακτηρίζει το σωμάτιο = το μηκος Compton του σωματιδίου = hbar / p = hbar / (γmυ)

Δεν έχει νόημα να πούμε οτι το σωματίδιο πλησίασε πιό κοντά, γιατί η απροσδιοριστία μας λέει ότι δεν ξέρουμε τη θέση του σωματιδίου με καλύτερη ακρίβεια. Οπότε πάλι θα μπορούσαμε να το πούμε ως εξής:

Δp * Δx > hbar → Δx > hbar / Δπ = habr / <p> = hbar / (γmυ)

→ **bmin = hbar / (γmυ)**

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη: απώλεια ένεργειας και όρια ολοκλήρωσης (2)

Ολοκλήρωση για όλα τα πιθανά b: $-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = 4\pi \left(\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{\rho Z}{m_a m_e} \frac{1}{v^2} L,$

where $L = \ln(b_{max}/b_{min})$.

2. Πόσο είναι το bmax;

$$\Delta E = -\frac{p_T^2}{2m_R} = -2\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{1}{b^2 v^2 m_R}$$

Θυμηθείτε τη μεταφορά ενέργειας σε ένα άτομο:
Για bmax=άπειρο το ΔΕ μηδενίζετα!
Αφύσικο, αφού δεν μπορεί ποτέ το άτομο (που είναι κβαντισμένο σύστημα) να πάρει ενέργεια λιγότερη από την ενέργεια διέγερσης από μία στάθμη σε μιά άλλη (θυμηθείτε το πείραμα Frank-Hertz)
~ τάξη μεγέθους όσο η ενέργεια ιονισμού, Ι.

Άρα:
.... bmax = περατωμένο.
ΔΕ*Δt = hbar → Δt = hbar / ΔΕ , αλλά ΔΕ > Ι → Δt < hbar/I
Αλλά το Δt είναι ο χρόνος αλληλεπίδρασης: Δt ~ b/(γυ)
Οπότε: b/(γυ) < hbar/I → b < hbar/(Iγυ) → **bmax = hbar / (Iγυ)**

Οπότε: $L = \ln\left(\frac{b_{max}}{b_{min}}\right) \approx \ln\left(\frac{\gamma^2 m_e v^2}{\langle I \rangle}\right)$

Απώλεια ενέργειας με ιονισμό και διέγερση του υλικού (Bethe-Bloch) : specific Energy Loss (1/ρ dE/dx)

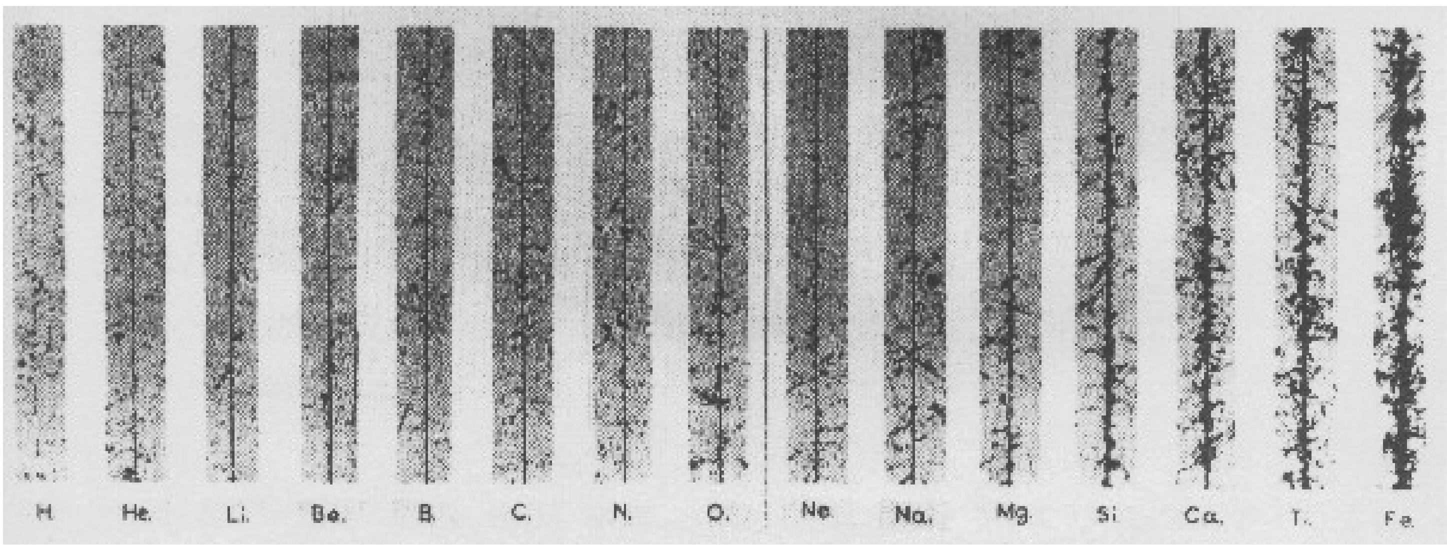
$$\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx} = -4\pi r_e^2\, m_e c^2\, \frac{Z_1^2}{\beta^2}\, N_A \frac{Z}{A}\left[\ln\frac{2m_e c^2\beta^2\gamma^2 F}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right]$$

Bethe Bloch Formula

$Z_1 e$ = φορτίο προσπίπτοντος σωματιδίου

β=η ταχύτητά του

ρ,Z,A = πυκνότητα κλπ του ανιχνευτή



Π.χ., Φορτισμένα σωματίδια (από κοσμική ακτινοβολία) διαπερνούν υλικό πυκνότητας ρ.

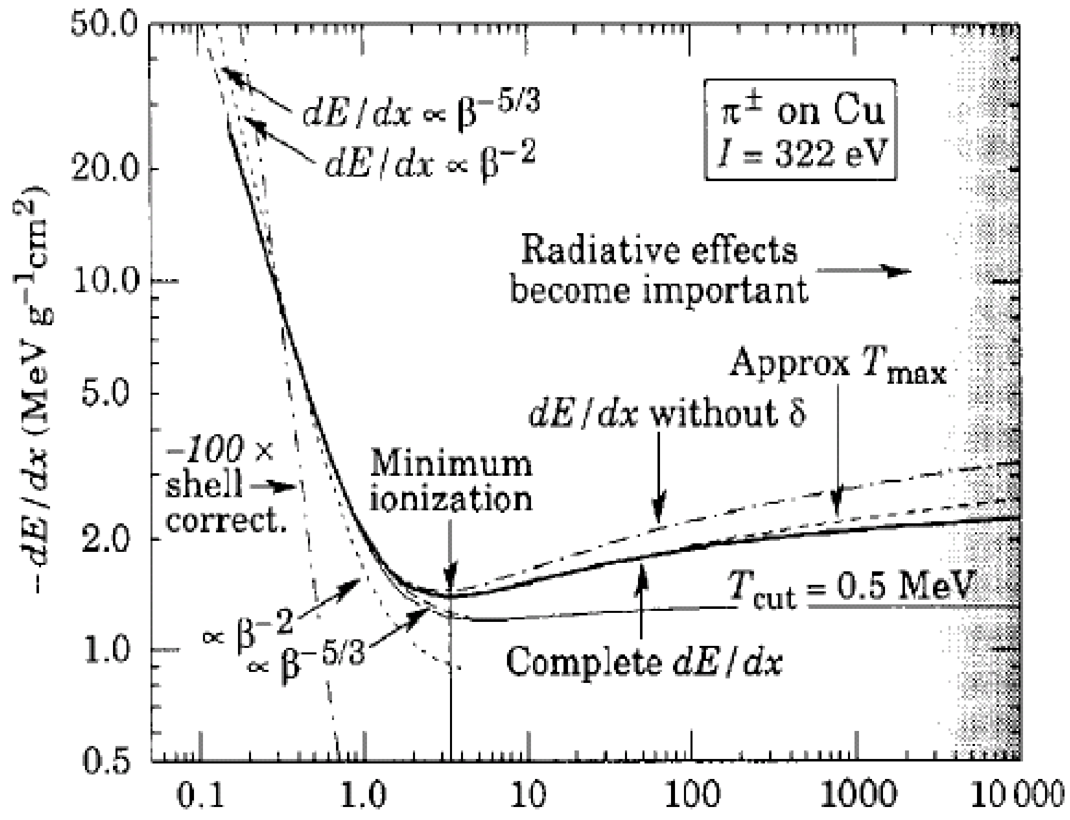
→ Η απώλεια ενέργειάς του είναι μεγαλύτερη, όσο περισσότερο φορτίο έχει το σωματίδιο: **$dE/dx \sim Z_1^2$**

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ένεργεια διαπερνώντας την ύλη: specific Energy Loss (1/ρ dE/dx)

Για να υπολογίσουμε την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα απόστασης (dE/dx, σε MeV/cm),

πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το 1/ρ dE/dx (σε MeV cm^2/g) με την πυκνότητα ρ του υλικού.

1/ρ dE/dx



βγ = p / Mc

Ένα σωματίδιο διασχίζει ένα υλικό με πυκνότητα ρ. Ανάλογα με την ορμή του, το σωματίδιο χάνει ενέργεια και με διαφορετικό μηχανισμό. Π.χ., στην περιοχή βγ=[0.1 – 1000] (περιοχή Bethe-Bloch) έχουμε απώλειες με ιονισμό του υλικού. Από εκεί και πάνω, η απώλεια ενέργειας είναι κυρίως λόγω εκπομπής φωτονίων (δηλ., με radiation = Bremsstahlung)

Απώλεια ενέργειας με ιονισμό και διέγερση του υλικού (Bethe-Bloch) : specific Energy Loss (1/ρ dE/dx)

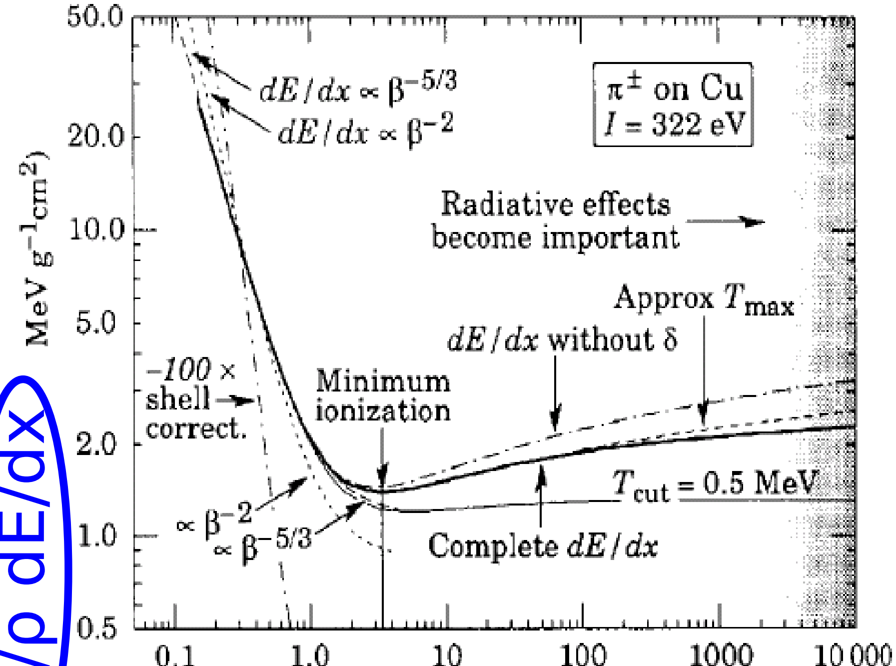
$$\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx} = -4\pi r_e^2\, m_e c^2\, \frac{Z_1^2}{\beta^2}\, N_A \frac{Z}{A}\left[\ln\frac{2m_e c^2\beta^2\gamma^2 F}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right]$$

$Z_1 e$ = φορτίο προσπίπτοντος σωματιδίου

β=η ταχύτητά του

ρ,Z,A = πυκνότητα κλπ. του ανιχνευτή

Bethe Bloch Formula



1/ρ dE/dx

βγ=p/Mc

The specific Energy Loss 1/ρ dE/dx

- first decreases as $1/\beta^2$
- increases with ln γ for β =1
- is ≈ independent of M ($M>>m_e$)
- is proportional to Z_1^2 of the incoming particle.
- is ≈ independent of the material (Z/A ≈ const)
- shows a plateau at large βγ (>>100)
- dE/dx ≈ 1-2 * ρ [g/cm³] MeV/cm

Προσεγγιστικά:

$$\frac{dE}{dx} \approx \rho\,(2\,\mathrm{MeV cm^2/g})\frac{Z^2}{\beta^2}$$

π.χ. Μιόνιο διαπερνά σίδερο - απώλεια ενέργειας (Energy Loss)

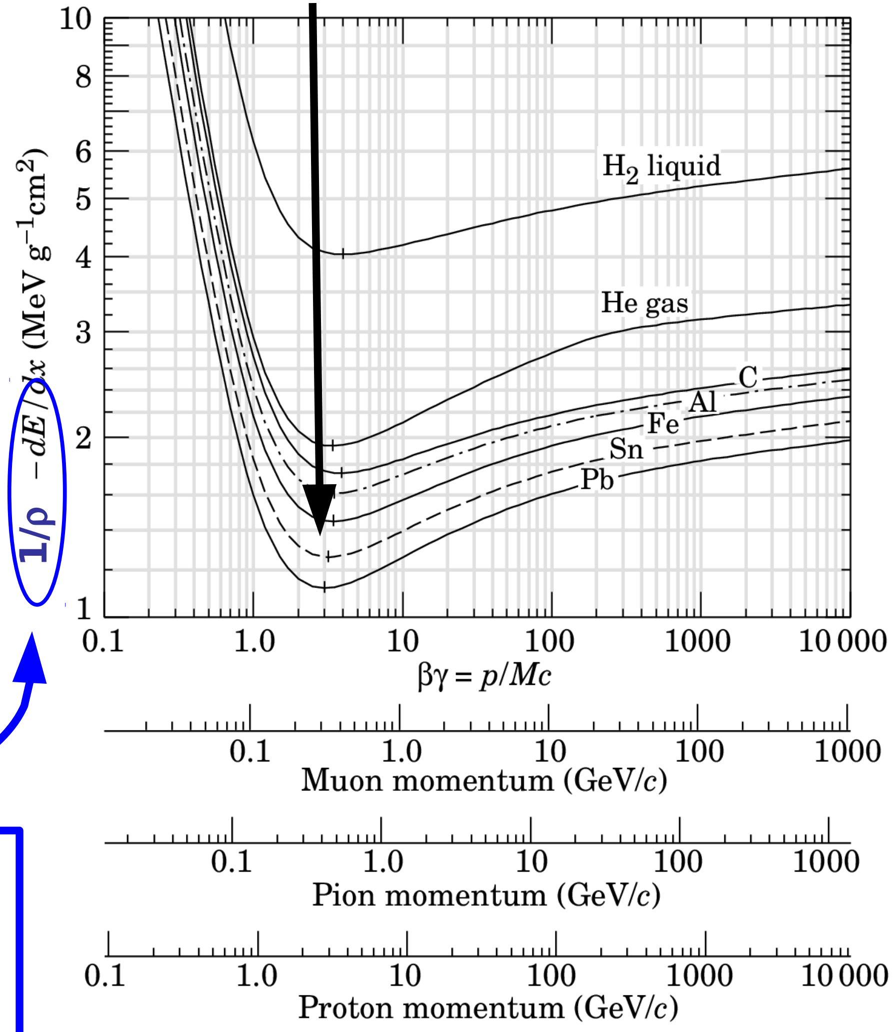
Bethe Bloch Formula, a few Numbers:

Σημειώστε ότι για $Z \approx 0.5$ A:
$1/\rho \; dE/dx \approx 1.4$ MeV cm^2/g ,
όταν $\beta\gamma \approx 3$ (minimum ionizing)

Παράδειγμα :
Σίδερο: πάχος = 100 cm;
$\rho = 7.87$ g/cm^3
$dE \approx 1.4 * 100 * 7.87$
$= 1102$ MeV

→ A 1.15 GeV Muon can traverse 1m of Iron!

"a minimum ionizing particle (MIP)"



Για να υπολογίσουμε την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα απόστασης (dE/dx, σε MeV/cm),
πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το 1/ρ dE/dx (σε MeV cm^2/g) με την πυκνότητα ρ του υλικού.

2. dE/dx και μέγιστο βάθος εναπόθεσης ενέργειας

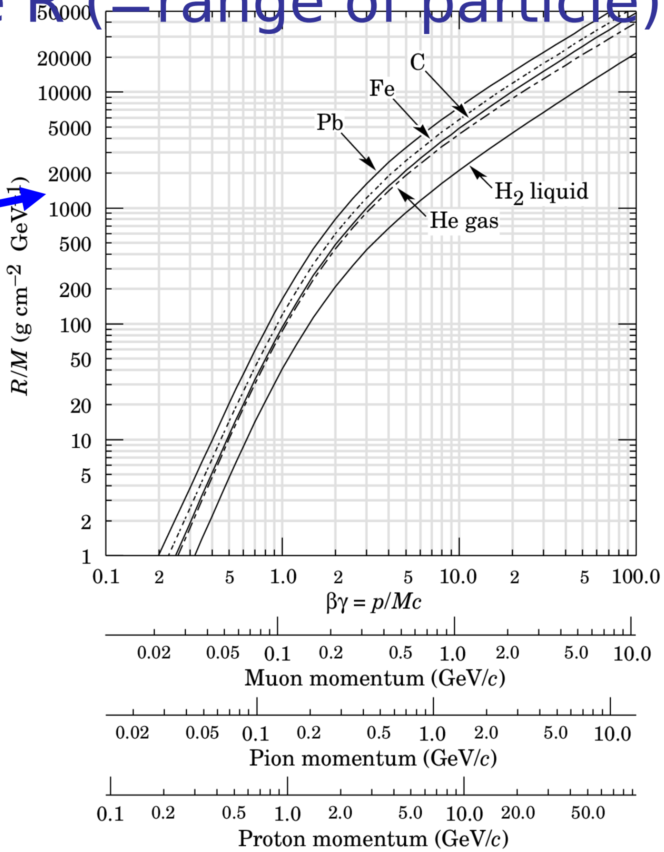
Σωμάτια σταματούν – απόσταση(range)

Particle of mass M and kinetic Energy E_0 enters matter and looses energy until it comes to rest at distance R (=range of particle).

$$R(E_0) = \int_{E_0}^{0} \frac{-1}{dE/dx} dE$$

$$R(\beta_0\gamma_0) = \frac{Mc^2}{\rho} \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0\gamma_0)$$

$$\frac{\rho}{Mc^2} R(\beta_0\gamma_0) = \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0\gamma_0)$$



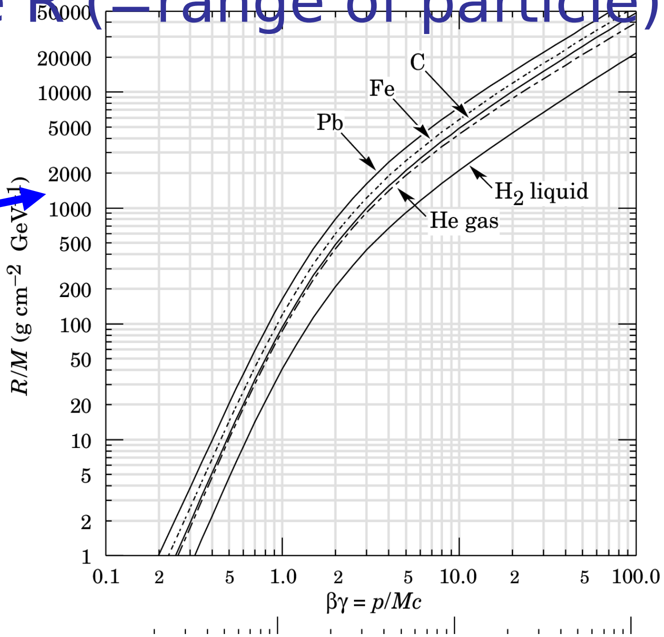
Σωμάτια σταματούν – απόσταση(range)

Particle of mass M and kinetic Energy E_0 enters matter and looses energy until it comes to rest at distance R (=range of particle).

$$R(E_0) = \int_{E_0}^{0} \frac{-1}{dE/dx} dE$$

$$R(\beta_0\gamma_0) = \frac{Mc^2}{\rho} \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0\gamma_0)$$

$$\frac{\rho}{Mc^2} R(\beta_0\gamma_0) = \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0\gamma_0)$$

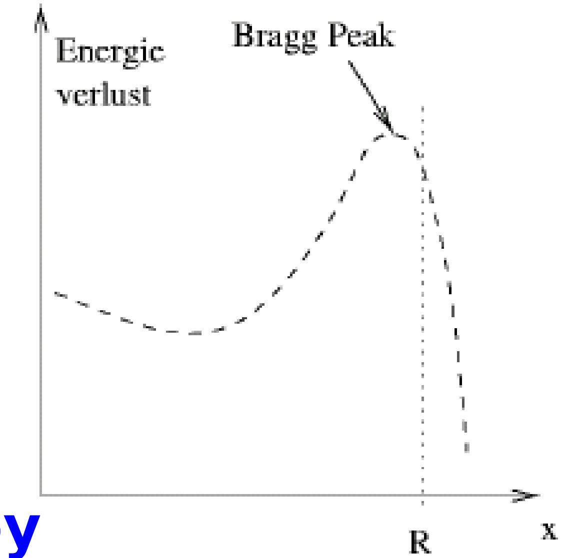


Bragg Peak:

- For βγ>3 the energy loss is ≈ constant (Fermi Plateau)

- As the energy of the particle falls, below βγ=3, the energy loss rises as $1/\beta^2$

- **Towards the end of the track the energy loss is largest → Cancer Therapy**

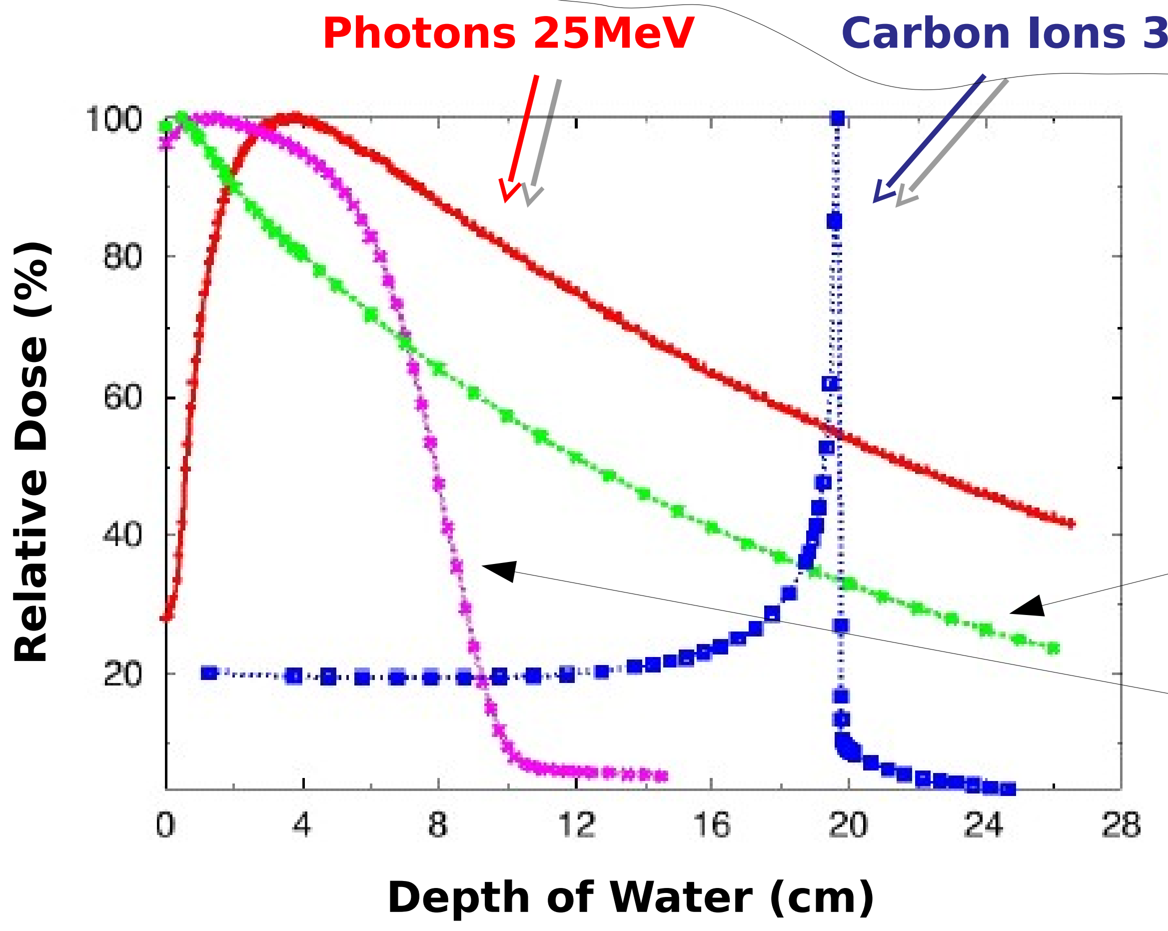


Χωρική κατανομή εναπόθεσης της ενέργειας

Average Range:

Towards the end of the track the energy loss is largest

→ Bragg Peak → **Cancer Therapy**



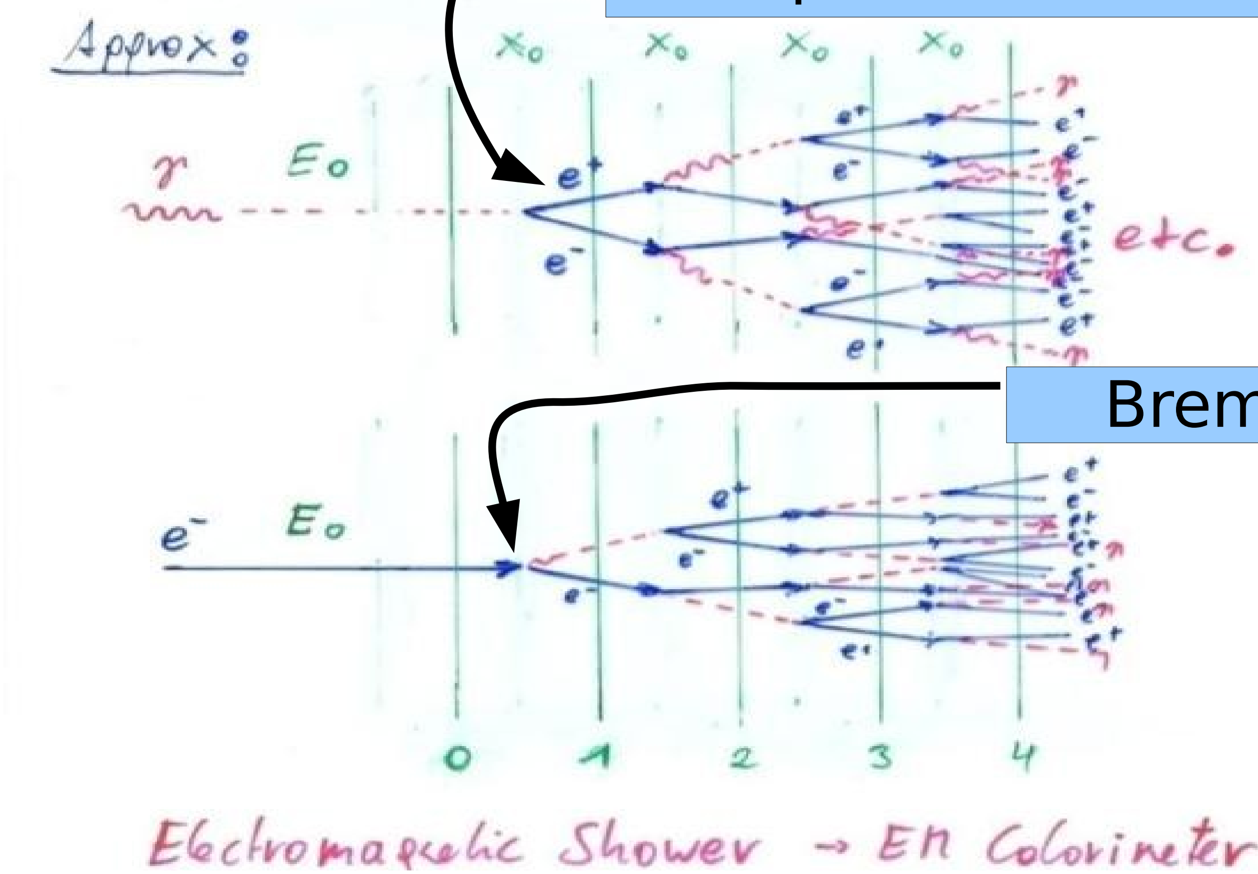
Εναπόθεση της ενέργειας της ακτινοβολίας/σωματιδίων με ακρίβεια στην παθογενή περιοχή

3. Ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung):

Απώλεια ενέργειας λόγω ακτινοβόλησής της από επιβραδυνόμενο φορτισμένο σωμάτιο

Ηλεκτρόνια και φωτόνια σε “πυκνή ύλη” - EM shower

Pair production (δίδυμη γένεση)



Bremsstahlung

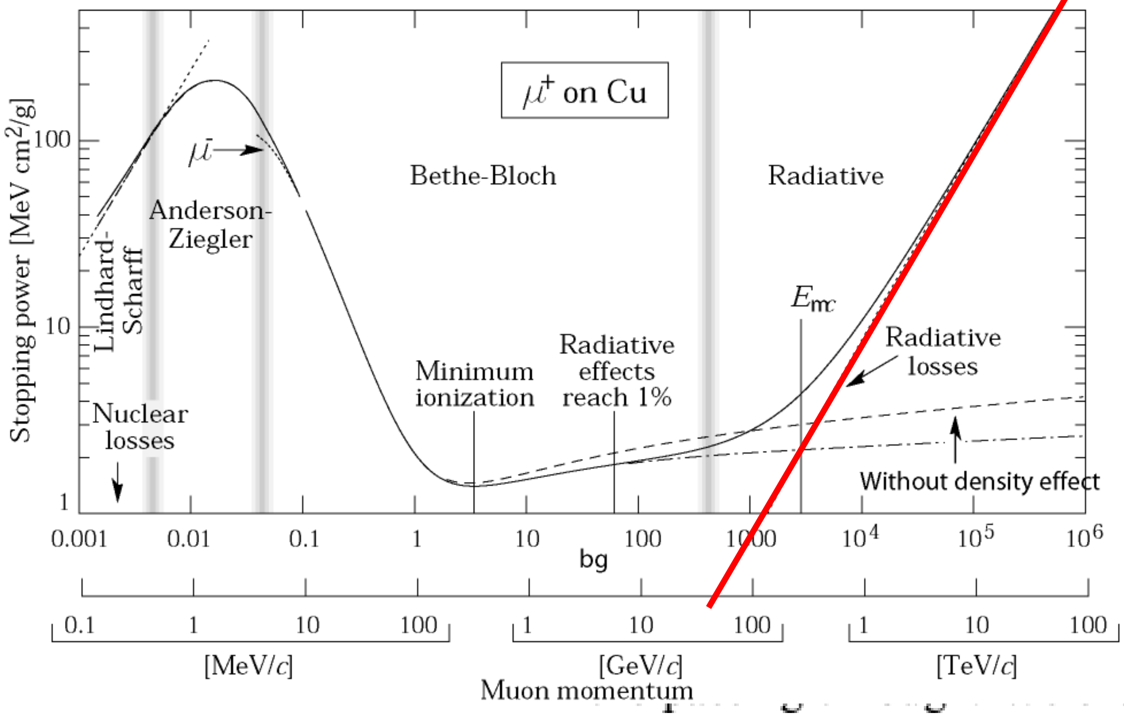
X_0 = radiation length = average distance a high energy electron has to travel before reducing it’s energy from E_0 to $E_{0/}$/e by photon radiation (Bremsstrahlung)

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

$$E(x) = E_0\, e^{-\frac{x}{X_0}}$$

Ηλεκτρόνια/φωτόνια – μπορείς έυκολα να τα σταματήσεις

such as copper to about 1% accuracy for energies between about 6 MeV and 6 GeV



Ο συνετελεστής 700-800 είναι για ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια.
Για άλλης μάζας σωματίδια η τιμή του παρονομαστή είναι άλλη

Bremsstrahlung is... most significant in heavy elements, in which the Coulomb fields of the nuclei are strongest. For electrons and positrons, the ratio of energy loss rates is given approximately by

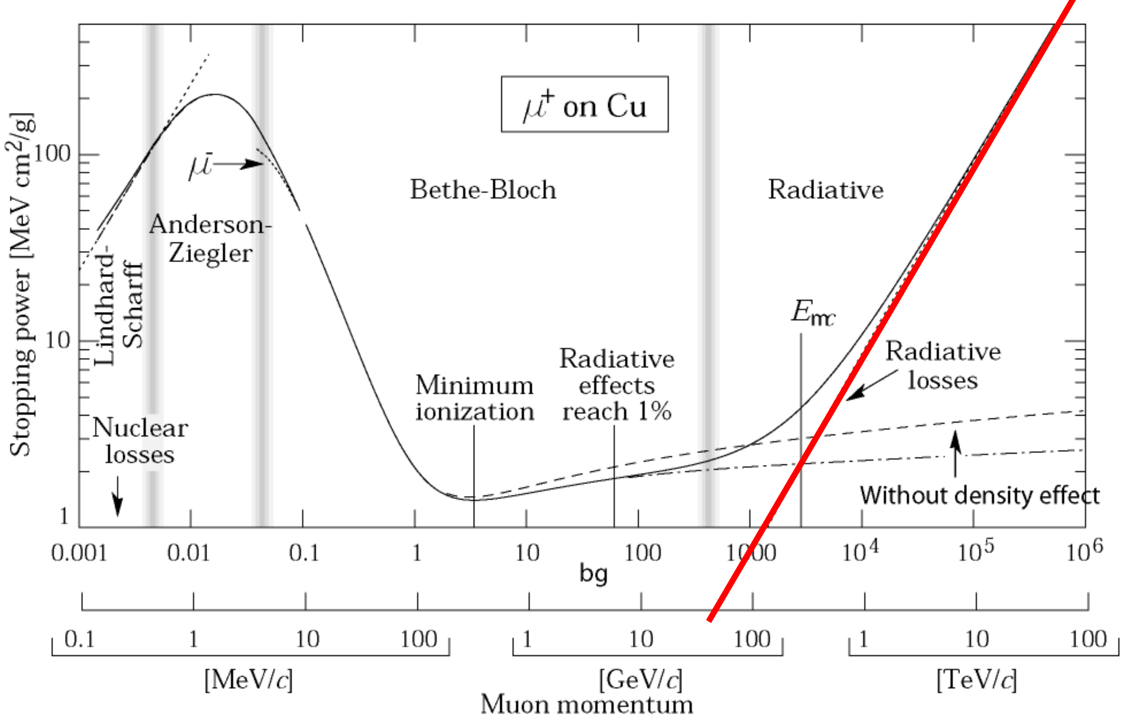
Ακτινοβολία πέδησης σε σχέση με την ακτινοβολία λόγω ιονισμών

$$\frac{\text{Bremsstrahlung energy loss}}{\text{ionisation energy loss}} \approx \frac{T(Z+1.2)}{700}$$

where T is the kinetic energy in MeV, and Z the atomic number of the material.

Critical Energy: από εκεί και πάνω η ακτινοβολία πέδησης είναι σημαντικότερη από την απώλεια λόγω ιονισμών

such as copper to about 1% accuracy for energies between about 6 MeV and 6 GeV



Electron Momentum 5 50 500 MeV/c

Critical Energy (κριτική ενέργεια): όταν
dE/dx (Ionization) =
dE/dx (Bremsstrahlung)

For the **muon** (the second lightest particle after the electron) the critical energy is at 400GeV.

Για ηλεκτρόνια:

$$E_c = [800\ \mathrm{MeV}]/(Z+1.2)$$

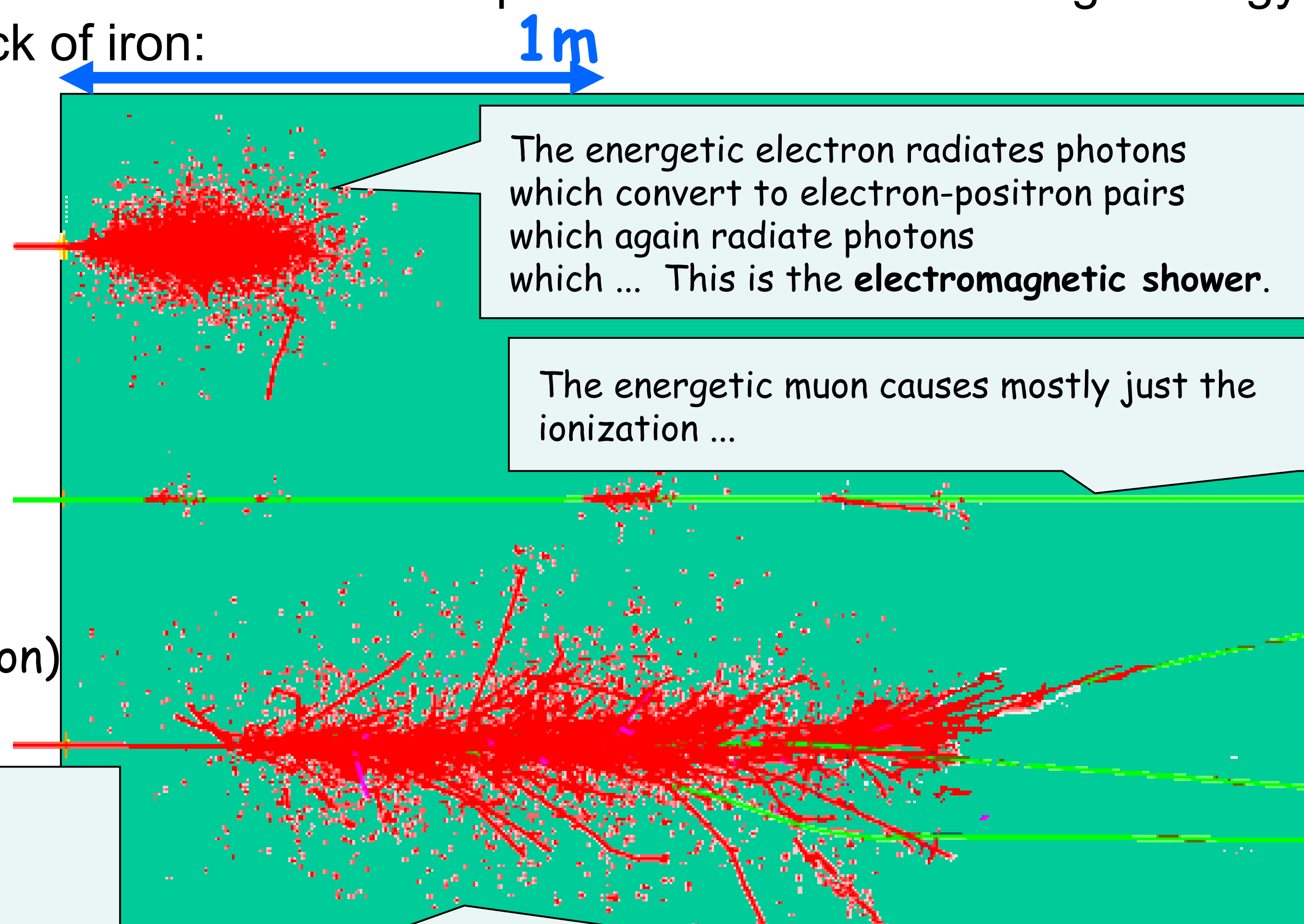
- Muon in Copper: σε p ≈ 400GeV φτάνει κριτική ενέργεια
- Electron in Copper: σε p ≈ 20MeV φτάνει κριτική ενέργεια

→ Η ΗΜ ακτινοβολία Bremsstrahlung είναι σημαντική σχεδόν μόνο για ηλκετρόνια (στις ενέργειες στους ανιχνευτές μας μέχρι τώρα)

→ μόνο τα ηλεκτρόνια κάνουν EM shower

Καλοριμετρία – Stopping particles

Let us have a look at interaction of different particles with the same high energy (here 300 GeV) in a big block of iron:



The energetic electron radiates photons which convert to electron-positron pairs which again radiate photons which ... This is the **electromagnetic shower**.

The energetic muon causes mostly just the ionization ...

Electrons and pions with their "children" are almost comple-tely absorbed in the sufficiently large iron block.

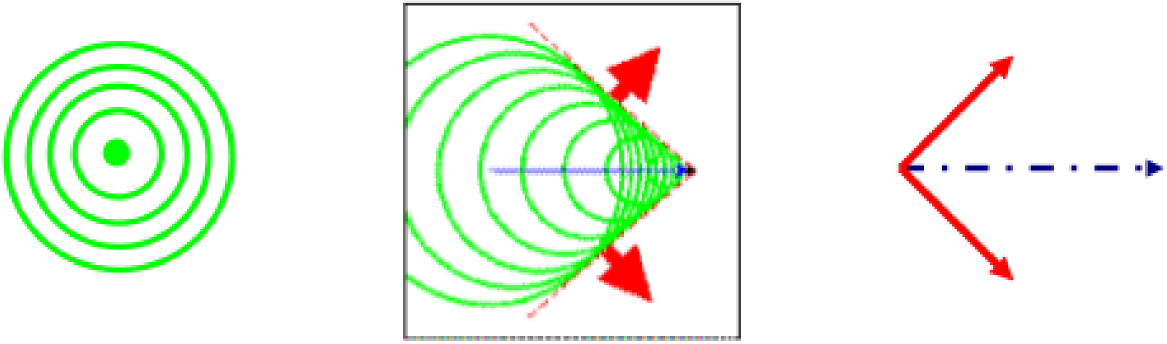
The strongly interacting pion collides with an iron nucleus, creates several new particles which interact again with iron nuclei, create some new particles ...
This is the hadronic shower.
You can also see some muons from hadronic decays.

4. Ακτινοβολία Cerenkov

Cerenkov (από Τ. Λιόλιο) (1/4)

Ακτινοβολία Cerenkov

- **Εκπέμπεται μόνο από φορτισμένα σωματίδια**
- **Εκπέμπεται μόνο όταν η ταχύτητα του σωματιδίου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσον**
- **Το μέτωπο της ακτινοβολίας είναι κωνικού σχήματος**



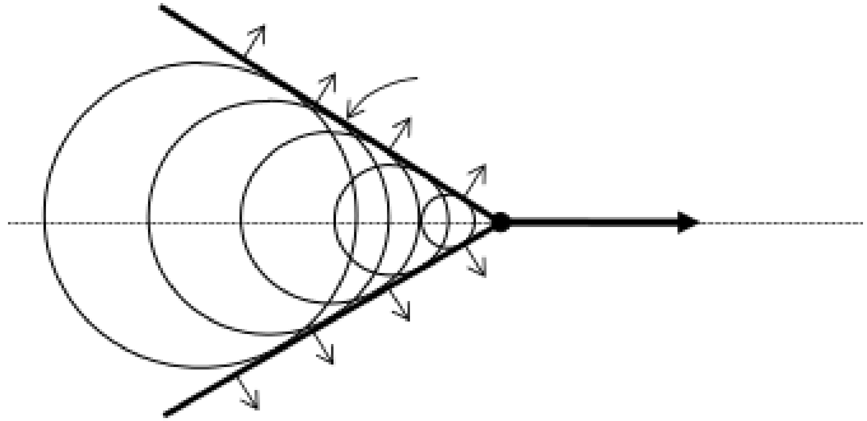
Το γωνιακό άνοιγμα του κώνου εξαρτάται από την ταχύτητα του σωματιδίου. Άρα, η πληροφορία που δίνουν οι ανιχνευτές Cerenkov είναι η ταχύτητα του σωματιδίου.

⌧ Ορμή (mv) και ταχύτητα (v) ⇒ μάζα σωματιδίου

Cerenkov (2/4): εκπομπή όταν ταχύτητα > όριο Cerenkov

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.



- Συνθήκη εκπομπής ακτινοβολίας Cerenkov:

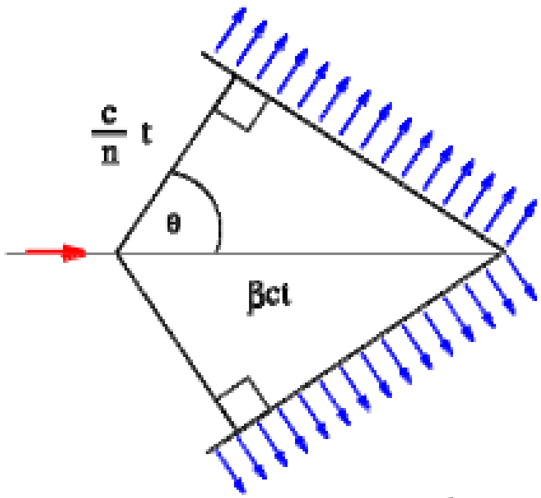
$$\upsilon \geq \upsilon_{\varphi} \quad \Rightarrow \quad \frac{\upsilon}{c} \geq \frac{\upsilon_{\varphi}}{c} \quad \Rightarrow \quad \beta \geq \frac{1}{n}$$

π.χ.

για το νερό:	n = 1,33	άρα:	βmin = 0,7519
για τον αέρα:	n = 1,000283	άρα:	βmin = 0,9997

Cerenkov (3/4): γωνία εκπομπής → μέτρηση ταχύτητας

Ακτινοβολία Cerenkov



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

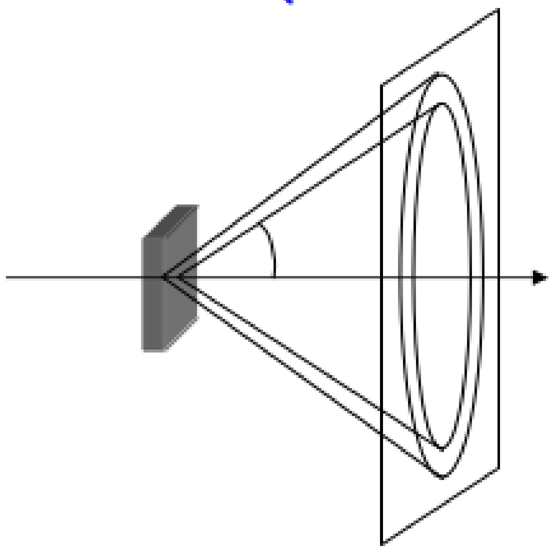
$$\cos\theta = \frac{\upsilon_\varphi t}{\upsilon t} = \frac{\upsilon_\varphi}{\upsilon} = \frac{c/n}{\upsilon} = \frac{c}{\upsilon n} = \frac{1}{\beta n}$$

π.χ. για το <u>νερό</u>:

β(min) = 0,7519 άρα θ(max) = 41,25^0

για τον <u>αέρα</u>:

β(min) = 0,9997 άρα θ(max) = 1,36^0



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

Cerenkov (4/4)

Cerenkov rings