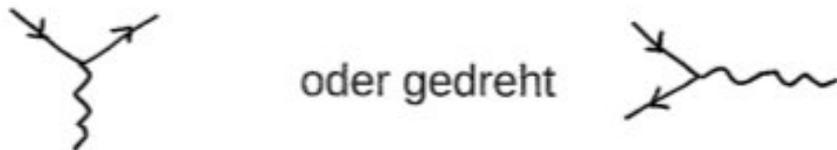


Feynman-Regeln in QED

- 1) Fermionen mit Pfeil in positive Zeitrichtung \longrightarrow
 Antifermionen mit Pfeil in neg. Zeitrichtung \longleftarrow

- 2) Austauschteilchen Photon

- 3) In QED gibt es nur einen Vertex

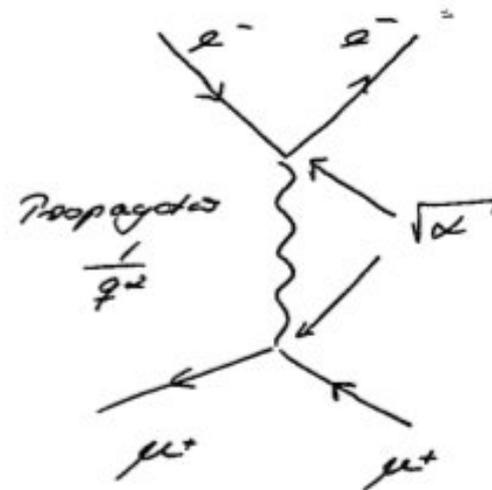


- 4) An jedem Vertex gilt Impulserhaltung, Leptonenzahl-Erhaltung, Fermionenzahlerhaltung, Ladungserhaltung

- 5) Innere Linien sind virtuell Teilchen (gehörchen i.d.R. nicht der rel. Energie-Impuls Beziehung)

- 6) Externe Linien entsprechen reellen Teilchen, d.h. gehörchen der rel. Energie-Impuls Beziehung

Bsp: $e^- \mu^+ \rightarrow e^- \mu^+$



$$\mathcal{U}(e^- \mu^+ \rightarrow e^- \mu^+)$$

$$\sim \sqrt{\alpha} \cdot \frac{1}{q^2} \cdot \sqrt{\alpha}$$

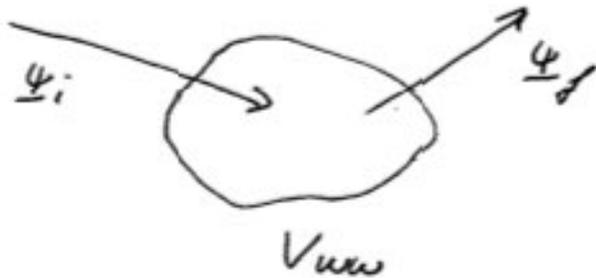
$$\alpha = \frac{1}{137} \quad (\text{Feinstrukturkonstante})$$

Fermi's golden rule

$$\omega_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} |U_{fi}|^2 \rho(E_f)$$

Transition amplitude

$$U_{fi} = \langle f | V_{\text{pert}} | i \rangle$$



Weak interaction potential

will be calculated using Feynman-Dyson equations

$\rho(E_f)$: density of states

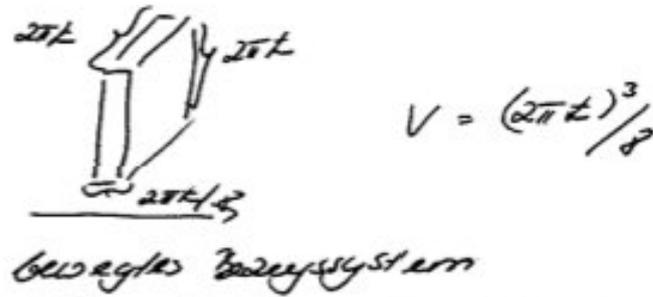
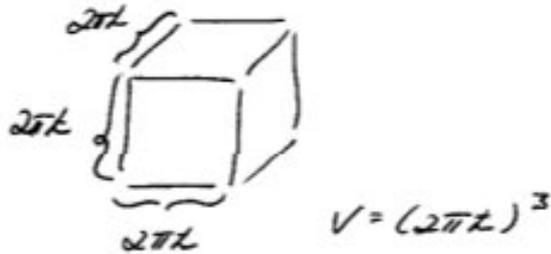
$$\rho(E_f) = \frac{dN}{dE}(E_f)$$

= number of states in $[E_f, E_f + dE]$

WQ σ ist eine lorentzinvariante (LI) Größe! [$d\sigma/d\Omega$ nicht, da Ω nicht LI ist]

$$\sigma = \omega_{fi} / v = \frac{2\pi}{\lambda} |U_{fi}|^2 \rho(E_f) \frac{1}{v}$$

Phasenraumelement ist keine LI Größe



Normierung der Wellenfunktion auf 1 Teilchen / Volumen ist nicht LI
d.h. Amplitudenquadrat ist nicht LI

$$\int_V \psi^* \psi dV = 1$$

$$U_{fi} = \langle \psi_f | H_{\omega\omega} | \psi_i \rangle$$

Geschwindigkeit ist nicht LI

→ Änderung der Normierung: 2E Teilchen/Volumen

$$\psi_i \rightarrow \sqrt{2E_i} \psi_i$$

$$\psi_f \rightarrow \sqrt{2E_f} \psi_f$$

$$S \rightarrow \frac{S}{2E_f}$$

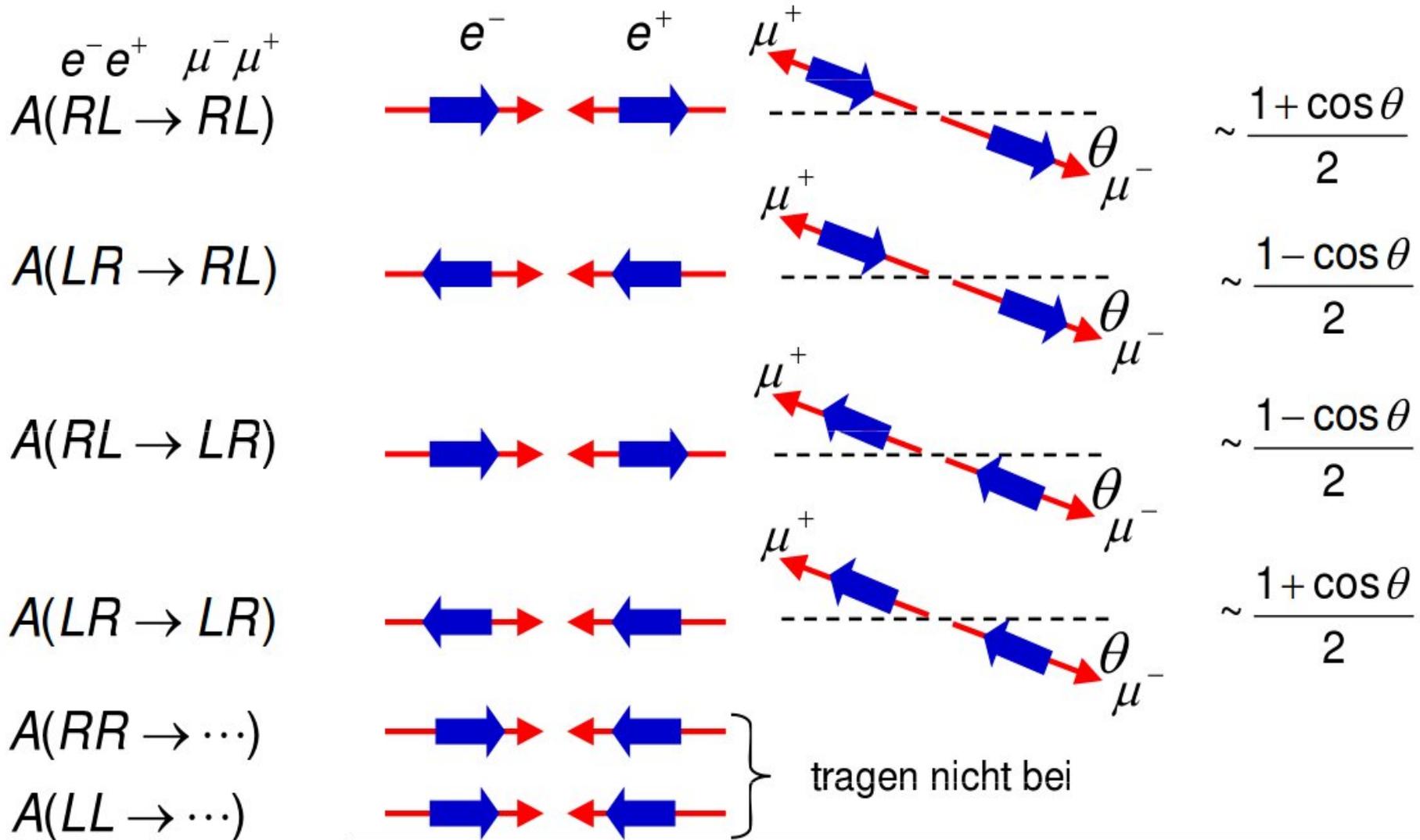
$$v_i \rightarrow \frac{E_i v_i}{LI \text{ Fluss}}$$

$$|U_{fi}|^2 \rightarrow 4 E_f E_i |U_{fi}|^2 = |M_{fi}|^2 \leftarrow \text{Matrixelement}$$

Definition des WQ ändert sich durch Wechsel auf LI Matrixelement und LI Phasenraumfaktoren nicht.

Bestimmung der möglichen Spinamplituden: Photon-Spin = 1

(U. Uwer)

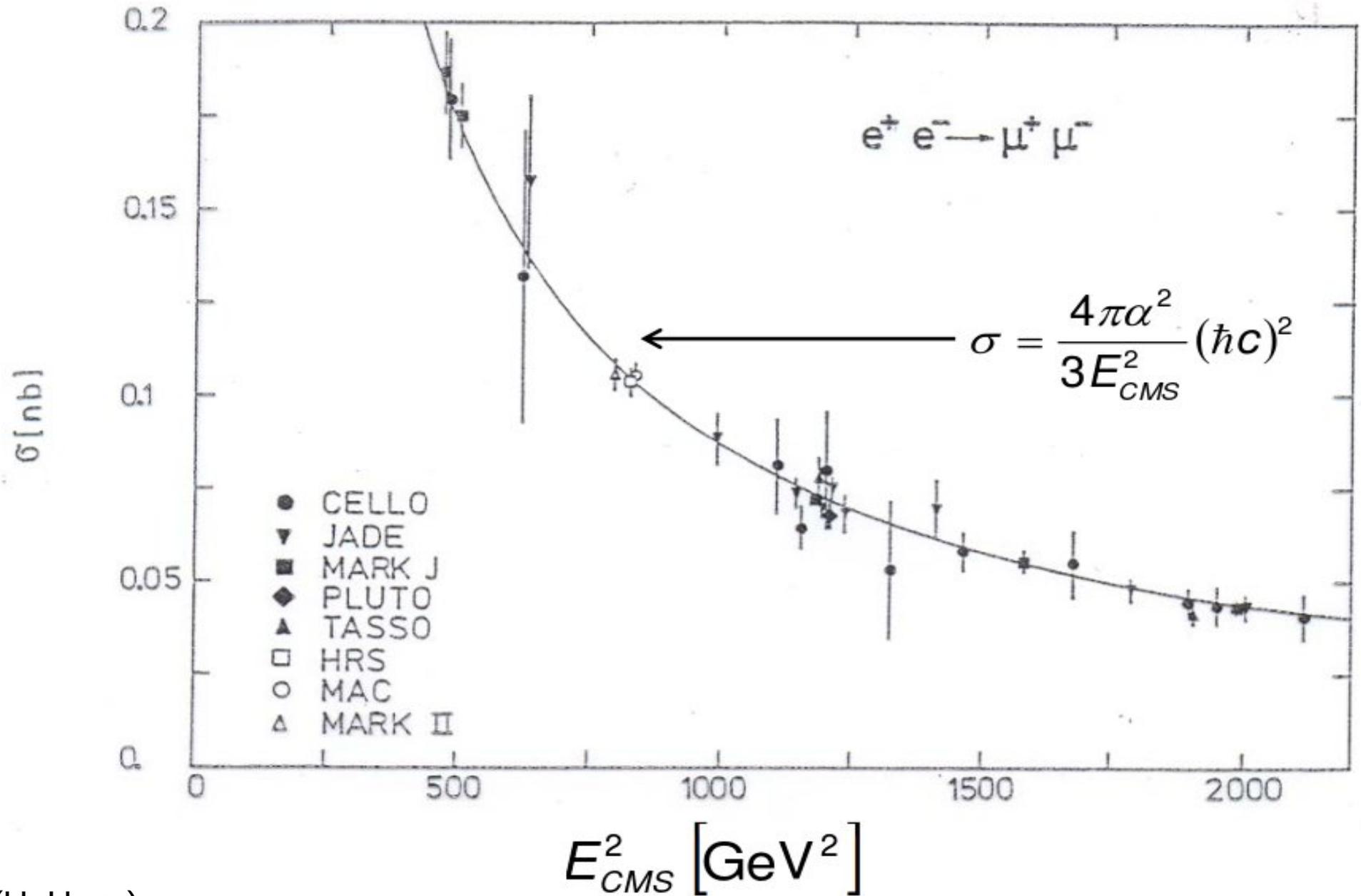


Summiere aller (Ausgangsamplituden)²
 Mittel über 4 mögliche Eingangsamplituden

$$\overline{|A_{fi}|^2} = \frac{1}{4} \sum_i |A_i|^2$$

$$\overline{|A_{fi}|^2} = \frac{1}{4} (1 + \cos^2 \theta) \cdot \left(\frac{4\pi\alpha}{E_{CMS}^2} \right)^2 (\hbar c)^6$$

Totaler Wirkungsquerschnitt für $e^+e^- \rightarrow \mu^-\mu^+$



Energy Loss of Heavy Charged Particles

a) Ionisation and excitation in scattering process

MEAN energy loss given by Bethe Bloch formula

$$-\frac{dE}{dx} = K \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$\begin{aligned} \gamma &= E/m \\ \beta &= p/E \end{aligned}$$

N_A Avogadro's number

z charge of incident particle

Z atomic number of absorber

A atomic mass of absorber [g/mol]

$$K/A = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2/A = 0.307075 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2 \text{ for } A = 1 \text{ g/mol}$$

r_e classical electron radius $e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$

I mean excitation energy [eV] (for $Z > 20$: $I = 10 Z$ eV)

ρ density

δ density correction to ionization energy loss

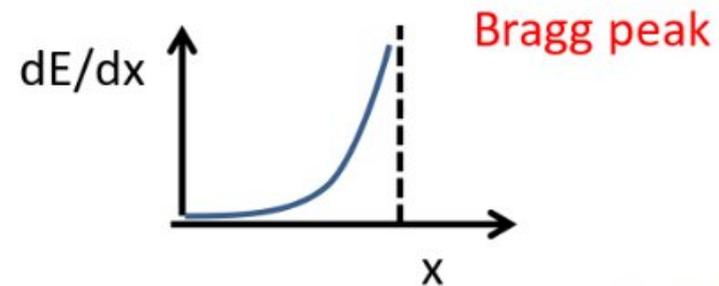
Bethe Bloch is an empirical formula/approximation valid of $\pm 5\%$ up to several 100 GeV.
Not valid at very low momenta.

Bethe Bloch I

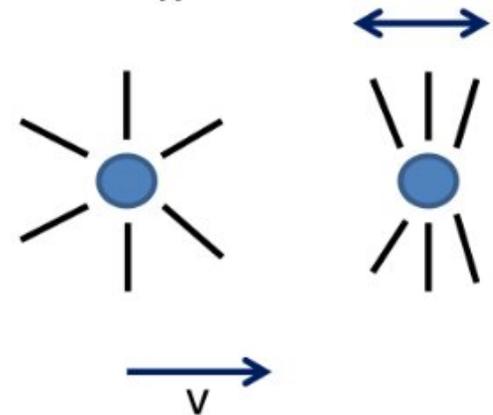
$$-\frac{dE}{dx} = K \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 \left(-\frac{\delta}{2} \right) \right] \quad \begin{array}{l} \gamma = E/m \\ \beta = p/E \end{array}$$

0) very small energies: Bethe Bloch not valid $-\frac{dE}{dx} \sim \beta$

1) **small energies** ($\beta\gamma > 0.1$): $-\frac{dE}{dx} \sim \frac{1}{\beta^2}$
 strong ionisation of slow particles
 → get stucked



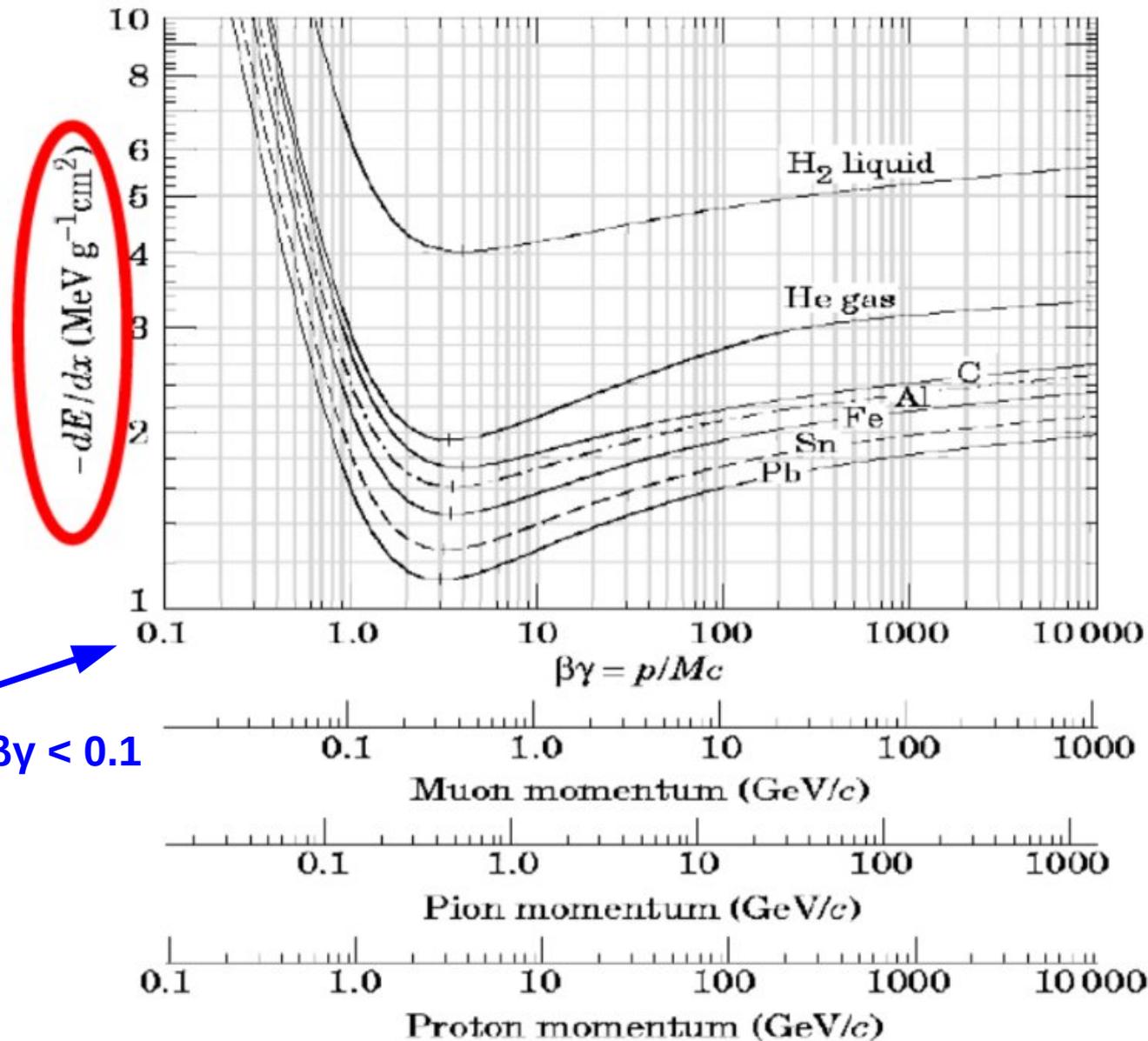
2) **large energies** $\beta \sim 1$: $-\frac{dE}{dx} \sim \ln(\beta\gamma)$ **relativistic rise**
 higher field density due to contraction of field lines



3) **Minimum at** $\beta\gamma$ ($=p/m$) $\in [3,4]$
 typical value $\sim 1-2 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$

4) Density correction due to screening of charge at large energies
 smaller net charge for distant (nucleus/ e^-)

Bethe Bloch II



$-dE/dx$ ($\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$)



Bethe-Bloch
not valid below $\beta\gamma < 0.1$

Less material dependent: $-\frac{dE}{dx} \frac{1}{\rho}$