

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



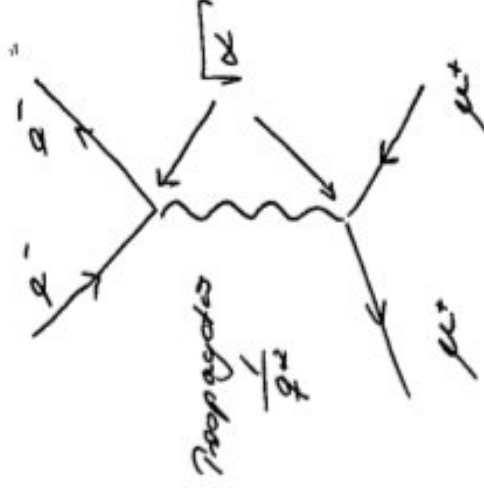
oder gedreht

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

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

6) Externe Linien entsprechen realen Teilchen, d.h.
 gehorchen der rel. Energie-Impus Beziehung

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



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

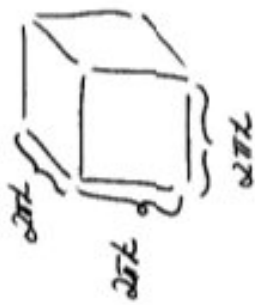
$$\sim \sqrt{\alpha} \cdot \frac{1}{q^2} \cdot \sqrt{\alpha}$$

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

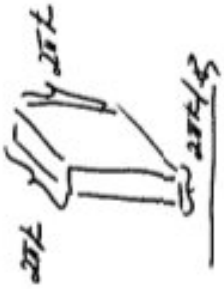
WQ σ ist eine lorentzinvariante (LI) Größe! [$d\sigma/d\Omega$ nicht, da Ω nicht LI ist]

$$\sigma = \frac{\omega \mathcal{E}_i}{v} \cdot \frac{\omega \mathcal{E}}{L} \cdot \frac{\omega \mathcal{E}_i}{L} \int (\mathcal{E}_i)^2 \frac{1}{v}$$

Phasenraumelement ist keine LI Größe



$$V = (2\pi L)^3$$



$$V = \frac{(2\pi L)^3}{\gamma}$$

Bewegtes Bezugssystem

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

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

$$\psi_i \rightarrow \gamma \psi_i / \text{Hwal } \psi_i >$$

Geschwindigkeit ist nicht LI

→ Änderung der Normierung: 2E Teilchen/Volumen

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

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

$$|\psi_i|^2 \rightarrow 4 E_f E_i |\psi_i|^2 = 1 \gamma \mathcal{E}_i / \omega^2 \leftarrow \text{Matrixelement}$$

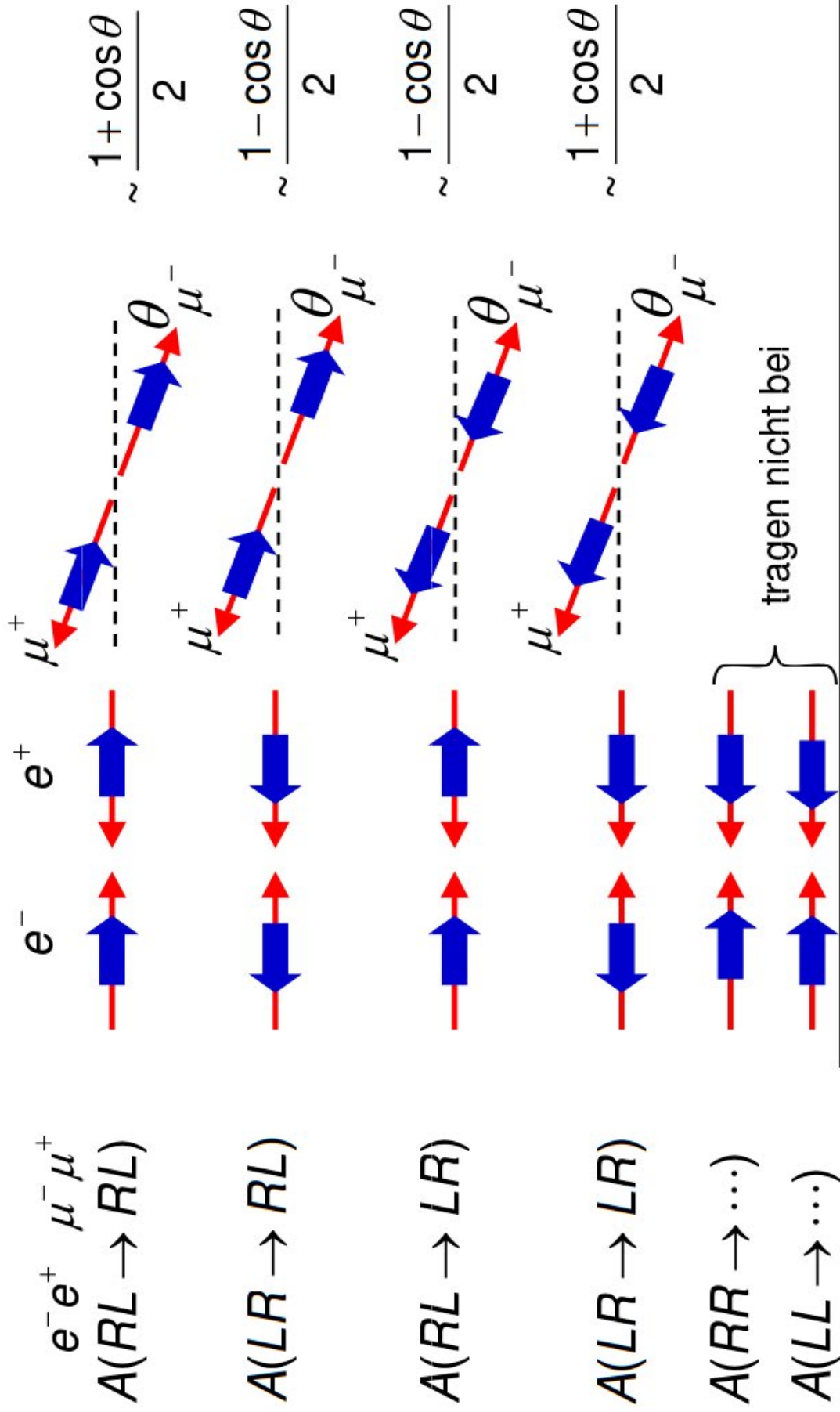
Definition des WQ ändert sich durch Wechsel auf LI Matrixelement und LI Phasenraumfaktoren nicht.

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

$$v_i \rightarrow \underbrace{E_i v_i}_{LI \text{ Faktor}}$$

Bestimmung der möglichen Spinamplituden: Photon-Spin = 1

(U. Uwer)



$$\sim \frac{1 + \cos \theta}{2}$$

$$\sim \frac{1 - \cos \theta}{2}$$

$$\sim \frac{1 - \cos \theta}{2}$$

$$\sim \frac{1 + \cos \theta}{2}$$

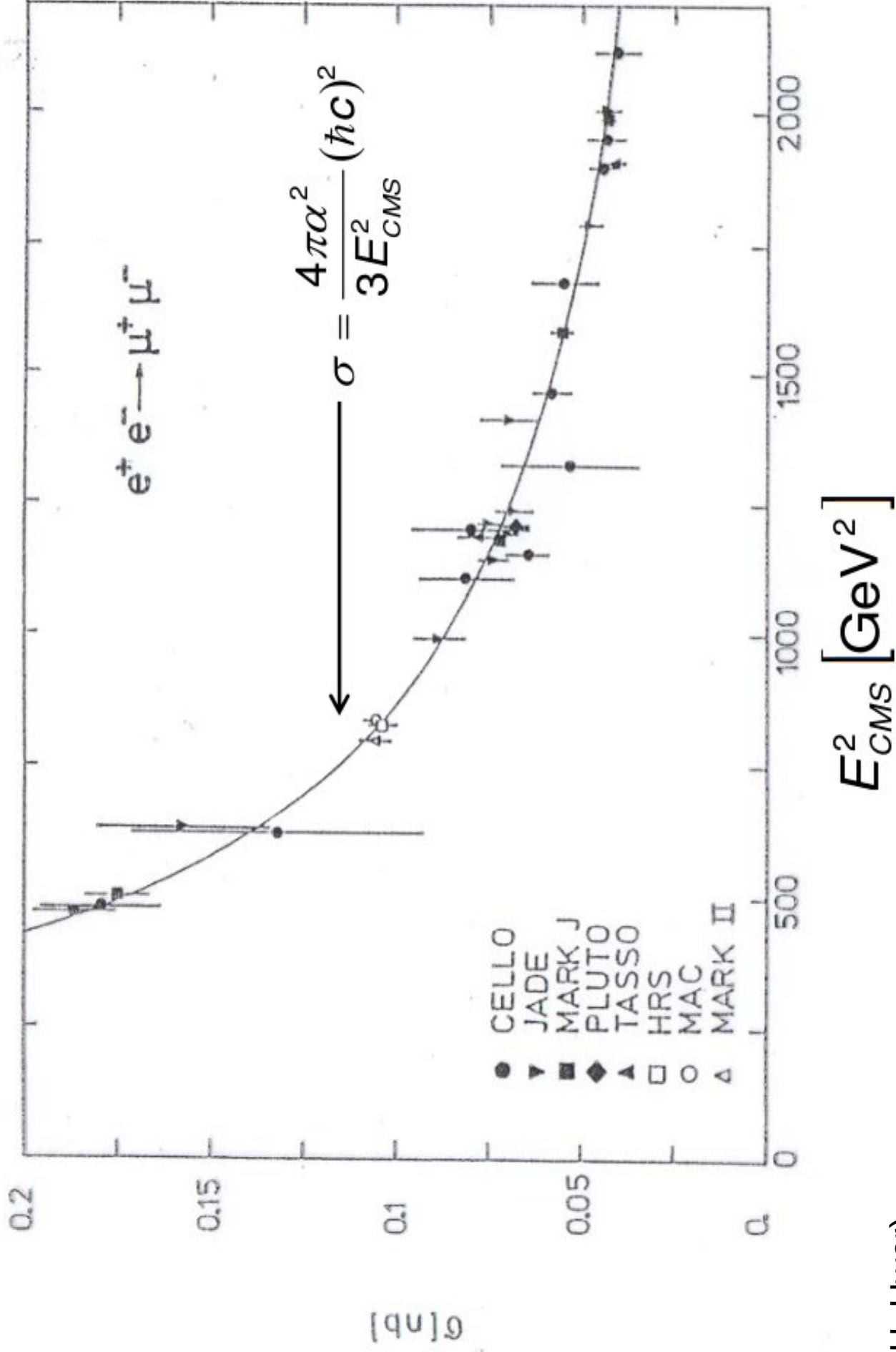
$$\overline{|A_f|^2} = \frac{1}{4} \sum_i |A_i|^2$$

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

Summiere aller (Ausgangsamplituden)²

Mittel über 4 mögliche Eingangsamplituden

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

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

$$\gamma = E/m$$
$$\beta = p/E$$

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

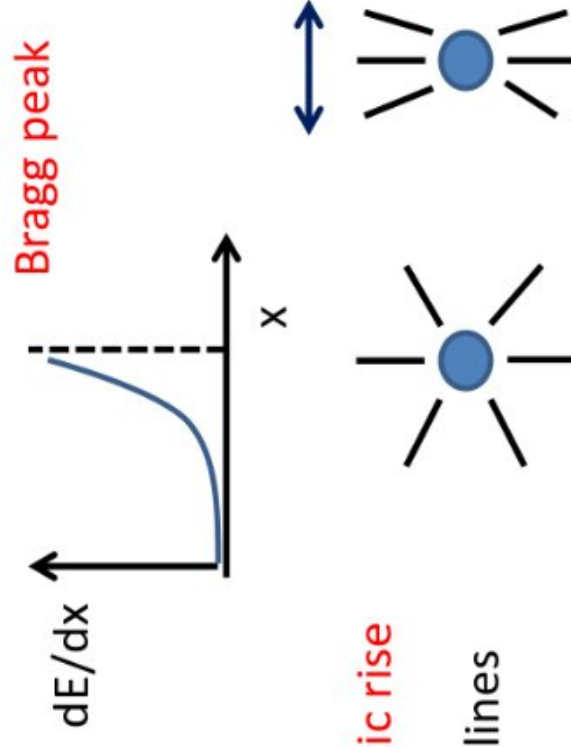
$$-\frac{dE}{dx} = K \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 m e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right)^2 - \beta^2 \left(-\frac{\delta}{2} \right) \right]$$

$$\gamma = E/mc^2$$

$$\beta = p/E$$

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



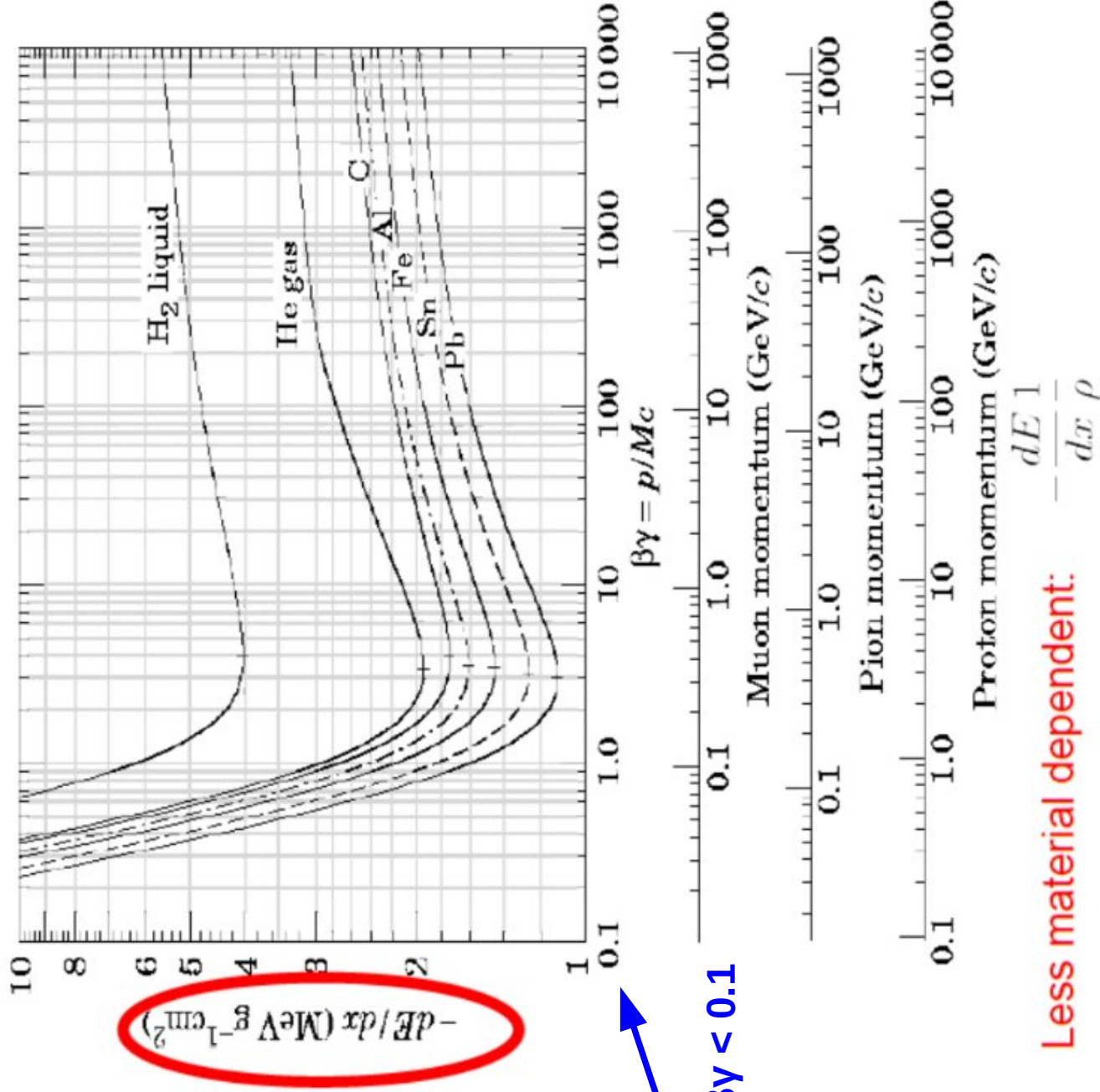
2) large energies $\beta \sim 1$: $-\frac{dE}{dx} \sim \ln(\beta\gamma)$ relativistic rise

higher field density due to contraction of field lines

3) Minimum at $\beta\gamma$ ($=p/m$) ϵ [3,4]
 typical value $\sim 1-2$ MeV cm²/g

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

Bethe Bloch II



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