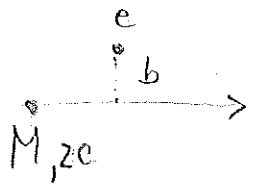


2.6 WW von Teilchen mit Materie

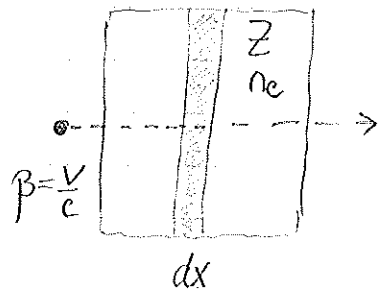
a) Energieverlust geladener Teilchen aufgrund von Ionisation („schwere Teilchen“ d.h. keine e)

Beim Durchgang durch ein Medium ionisieren geladene Teilchen Atome:

Das E-Feld einer bewegten Ladung übt eine Kraft auf die gebundenen Elektr. aus und ionisiert die Atome aufgrund des Impuls + Energi übertragen.



Mittlerer Energieübertrag ergibt sich durch Integration über mögliche Stoßparameter und unter Berücksichtigung OH Effekte ... genaue Rechnung ist schwierig



Mittlerer Energieverlust  $-dE$  pro Strecke  $dx$  wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben:

$$-\frac{dE}{dx} = \left( \rho N_A \frac{Z}{A} \right) \cdot \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2} \left( \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right)$$

$n_e$  = Elektronendichte im Medium

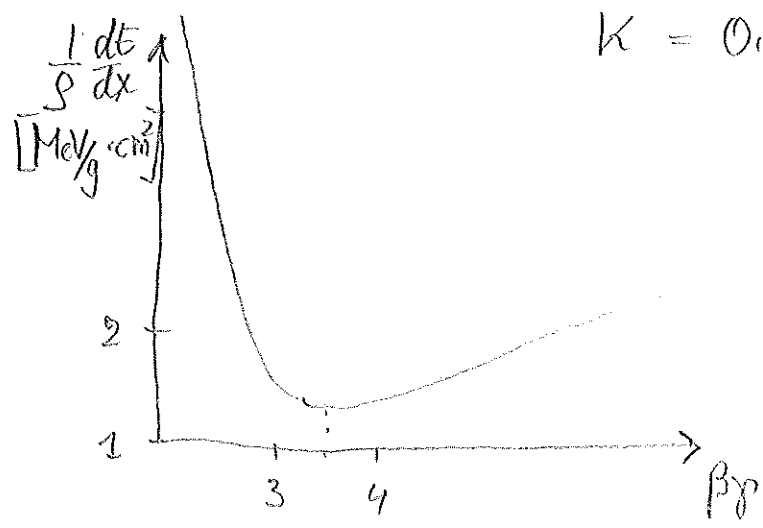
$I$  = mittleres Ionisationspotential für Elektronen  
für  $Z > 20$ :  $I \approx 10Z$  eV

$m_e = 0.511$  MeV/c<sup>2</sup> = Elektronenmasse

Häufig wird statt  $-\frac{dE}{dx}$  die Größe  $\frac{-dE}{dx} \frac{1}{\rho}$  angegeben die eine geringere Materialabh. aufweist:

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

$$K = 0.307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$



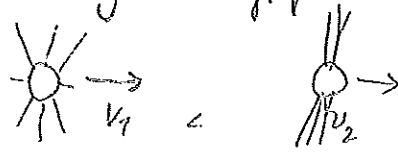
Bsp. Aluminium,  $\rho = 2.7$  g/cm<sup>3</sup>

$$\left( \frac{-dE}{dx} \right)_{\min} \approx (1 \dots 2) \times 2.7 \text{ MeV/cm}$$

Bred TP-2.4  
Bild TP-2.5

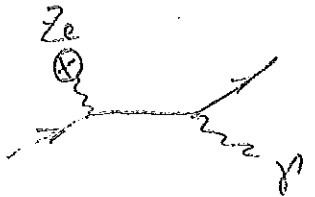
## Diskussion des $\beta\gamma$ -Abh des Energieverlusts

- (1) Bei kleinen ( $\beta\gamma$ ):  $\sim \frac{1}{\beta^2}$ , starke Ionisation von langsamen Teilchen (langsame Teilchen bleiben sehr schnell "stehen")
- (2) Minimum im Bereich  $\beta\gamma \in [3; 4]$ , typ. 1.-2. MeV/g  $\cdot$  cm<sup>2</sup>
- (3) Relativistischer Anstieg bei großen  $\beta\gamma$ .

Bewegte Ladung:  transverse E-Komponente nimmt zu.

## b) Energieverlust von Elektronen

Neben dem Energieverlust durch Ionisation dominiert bei "schnellen" Elektronen aber ein weiterer Effekt: "Bremsstrahlung"



$$N_{\gamma}(E_{\gamma}) \sim Z^2 \cdot \frac{1}{E_{\gamma}}$$

Elektronen werden durch Coulomb-Feld des Kerns beschleunigt und emittieren Bremsstrahlung.

→ Exponentieller Energieverlust längs des Weges beschrieben durch charakt. Größe des Mediums.

$$X_0 = \text{Strahlungslänge} \sim \frac{1}{Z^2}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \quad \text{bzw.} \quad E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$$

Typ. Strahlungslängen:

C	= 18,8 cm
Al	= 8,9 cm
Pb	= 0,6 cm

Bem.:

$$(1) \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{Brems}} \sim \frac{1}{m^2} : \text{Elektronen/Myon} = \frac{m_{\mu}^2}{m_e^2} = 4 \cdot 10^4 !!$$

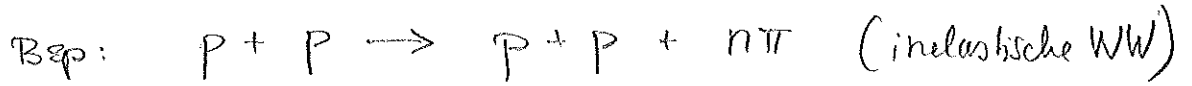
$$(2) \text{kritische Energie } E_c \text{ für } \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{Brems}} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}}$$

$$E_c \approx 560 \text{ MeV}/Z$$

Bild TP-2.6

### c.) WW von Hadronen

Neben der Ionisation trägt bei hochenerget. Hadronen die "starke WW" mit dem Absorbiermedium zum Energieverlust bei:



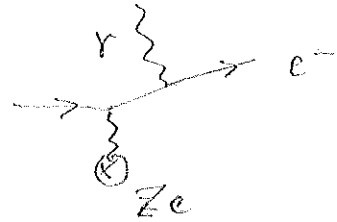
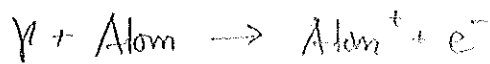
Die entstehenden Sekundär-Hadronen können, falls sie energetisch genug sind, selbst wieder stark WW  $\rightarrow$  Ausbildung einer Kaskade/Schauers.

Typ. Absorptionslänge für Hadronen:

$$\sigma_{\text{inel}} (p + G) = 231 \text{ mb} \rightarrow \lambda_{\text{abs}} = \frac{A}{\rho \cdot N_A \sigma_{\text{inel}}} \approx 39 \text{ cm}$$

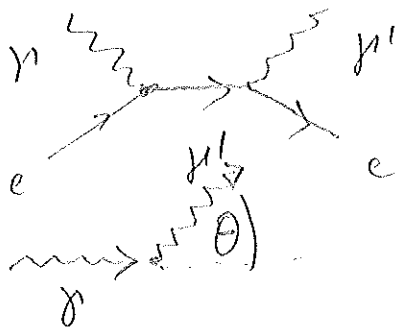
### d.) WW von Photonen mit Materie

d1) Photoeffekt (für geb.  $e^-$ ):



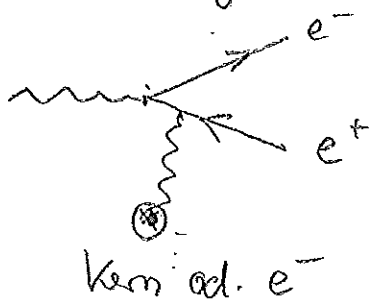
Photoeffekt am stärksten für die effektivste,  $\sim Z^2$  (max)  $\sim Z^5$   
 am stärksten gebundenen Elektronen!  
 $\rightarrow$  Elektronen auf innersten Schalen K, L

d2) Compton-Effekt an quasi freien Elektronen



$$E_p' = \frac{E_p}{1 + \frac{E_p}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

d3) Paarbeildung an einem „Stoßpartner“



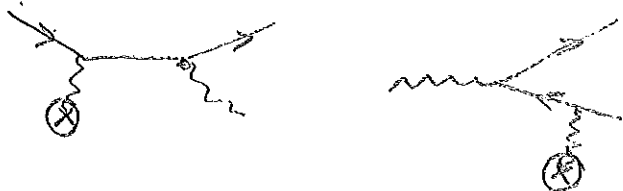
Konversion von frei  $e^-$  ist kinematisch nicht möglich!

Kinematische Schwelle:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + \frac{2(m_e c^2)^2}{m_K c^2} \geq 1,022 \text{ MeV}$$

Rückstoßpartner

Bem., Die Feynman-Graphen für Paarbeildung und Bremsstrahlung sind ähnlich:



Effekt wird in beiden Fällen durch die materialabhängige Strahlungslänge  $X_0$  beschrieben:

Bremsstr.: Energieabnahme

$$E(x) = E e^{-x/X_0}$$

Paarbeild.: Photon-Absorption

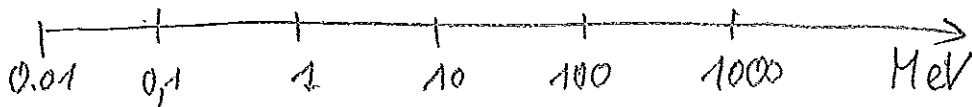
$$I(x) = I_0 e^{-x/X_0}$$

Kombination von Bremsstr. + Paarbeildung führt für hochenerget. Elektronen / Photonen zur e.m. Schwärzungsbedingung

Mit Abschwächungskoeff.  $\mu_{tot} = \mu_{Photo} + \mu_{Comp} + \mu_{Paar}$

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_{tot} \cdot x}$$

Für verschiedene Energiebereiche des Photons sind verschiedene Effekte dominant.



siehe auch Fig-TP-2.7