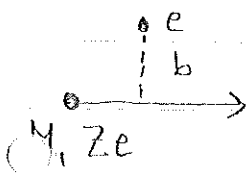
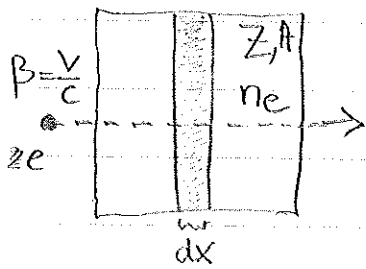


a) Energieverlust geladener Teilchen aufgrund von Ionisation (für schwere Teilchen d. h. keine e^-)

Beim Durchgang durch ein Medium ionisieren Teilchen Atome und verlieren Energie: E-Feld einer bewegten Ladung übt eine Kraft auf die gebundenen Elektronen aus und ionisiert die Atome aufgrund des Impuls-Energieübertrages



Mittlerer Energiebeitrag ergibt sich durch Integration über die möglichen Stoßparameter und unter Berücksicht. QM-Effekte. \rightarrow genaue Rechnung schwierig.



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

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

$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

$n_e =$ Elektronendichte im Medium

$I =$ mittleres Ionisationspotential für Elektronen

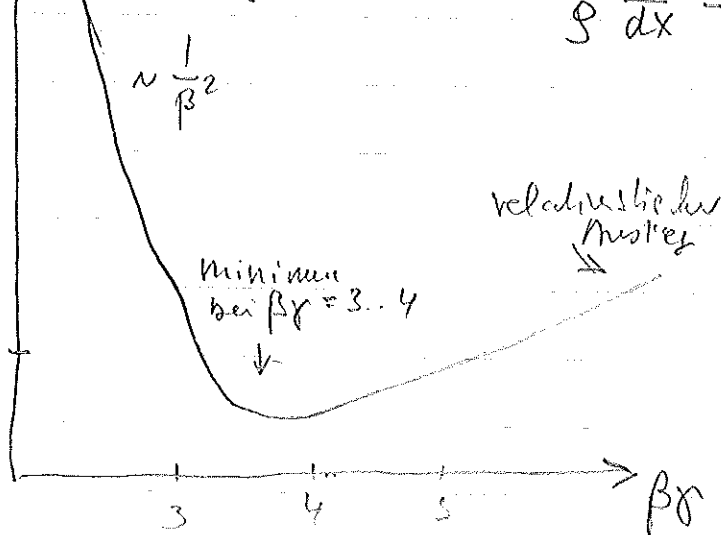
für $Z > 20$: $I \approx 10Z \cdot eV$

häufig wird statt $-dE/dx$ die Größe $-dE/dx \cdot \frac{1}{\rho}$ angegeben, die eine geringere Materialabhängigkeit aufweist:

$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \text{ [MeV/g cm}^2\text{]}$

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

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



relativistischer Anstieg

Bsp.: Aluminium $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$

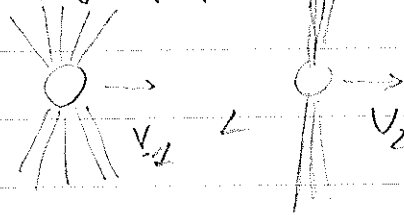
$-\frac{dE}{dx} \Big|_{\min} \approx (1 \cdot 2) \times 2.7 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$

Fig -2.4 & 2.5

Diskussion der $\beta\gamma$ -Abhängigkeit des Energieverlustes

- (1) Bei kleinen ($\beta\gamma$): $-\frac{dE}{dx} \sim \frac{1}{\beta^2}$; starke Ionisation von „langsamen“ Teilchen \rightarrow bleiben schnell „stecken“
- (2) Minimum für $\beta\gamma \approx 3 \dots 4$; typ. $1 \dots 2 \text{ MeV/g} \cdot \text{cm}^2$
- (3) Relativistischer Anstieg für große $\beta\gamma$.

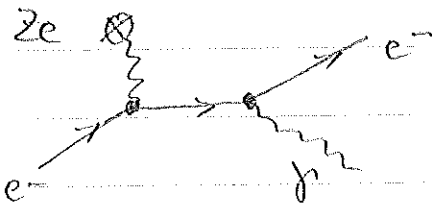
Bewegte Ladung:



transversale E-Feld
Komponente nimmt zu,

b) Energieverlust von Elektronen

Neben dem Energieverlust durch Ionisation dominiert bei „schnellen“ Elektronen aber ein weiterer Effekt: Bremsstrahlung.



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

$$\frac{dN_\gamma(E)}{dE} \sim Z^2 \frac{1}{E_p}$$

\rightarrow Energieverlust beschreiben durch charakteristische

Zahl der Photonen mit $(E; E+dE)$ proportional zu $1/E_p$.

Größe des Mediums: $X_0 = \text{Strahlungslänge} \sim \frac{1}{Z^2}$

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

Typ. Strahlungslängen:

C = 18.8 cm

Al = 8.9 cm

Pb = 0.6 cm

Bem: (1) $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Brem}} \sim \frac{1}{m_e^2 \text{ (rel.)}}$

$$e/\mu^- \approx \frac{m_p^2}{m_e^2} \approx 4 \cdot 10^4$$

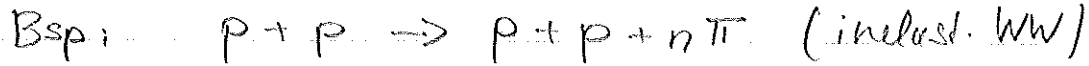
(2) kritische Energie E_c : $-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Brem}} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}}$

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

[Bied Fig 2.6]

c.) WW von Hadronen

Neben der Ionisation trägt für hochenergetische Hadronen die „starke WW“ mit dem Absorbermedium zum Energieverlust bei:



Die entstehenden Sekundärhadronen können selbst wieder „stark“ mit dem Medium wechselwirken \rightarrow

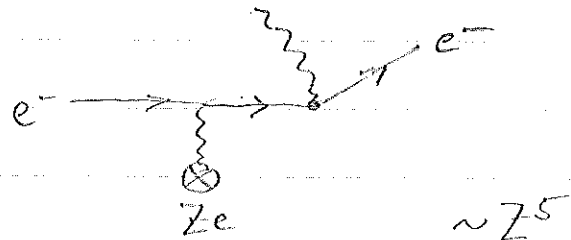
Ausbildung einer Kaskade/Schau

Typ. Wechselwirkungslänge für Hadronen:

$$\sigma(p+C) \approx 231 \text{ mb} \rightarrow \lambda_{\text{WW}} = \frac{A}{\rho \cdot N_A \cdot \sigma} \approx 39 \text{ cm}$$

d.) WW von Photonen mit Materie

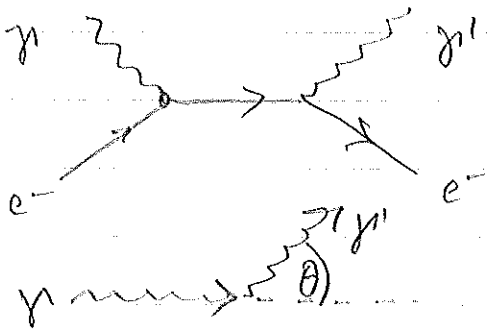
Photoeffekt für geb. e^-



am stärksten für die effektiv
am stärksten gebundene e^- :

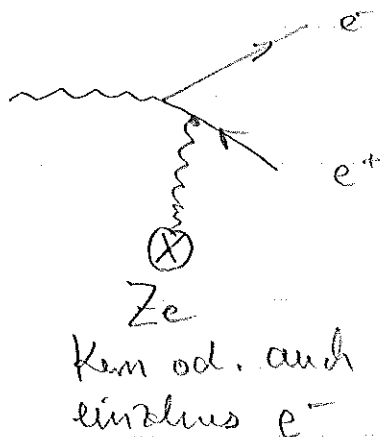
$\rightarrow e^-$ auf K, L Schale

Compton-Effekt an quasi-freien Elektronen



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

Paarbildung an einem Stoßpartner



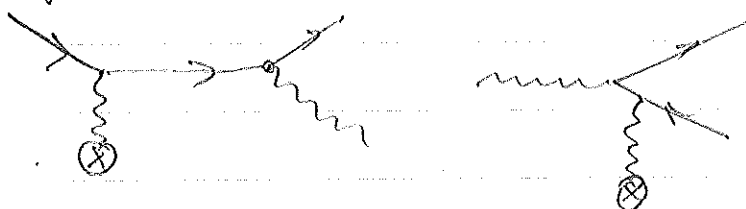
Konversion von freier e^- kinematisch nicht möglich!

Kinematische Schwelle:

$$E_{\gamma} \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{(m_e c^2)^2}{m_K c^2} \geq 1,02 \text{ MeV}$$

↑
Rückstoßpartner

Feynman-Graphen für Paarbildung und Bremsstrahlung



Energie- bzw. Intensitätsverlust wird in beiden Fällen durch die material spezifische Stahllänge X_0 beschrieben;

Energieabnahme durch Bremsstr. Photonminderung der Paarbildung

$$E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$$

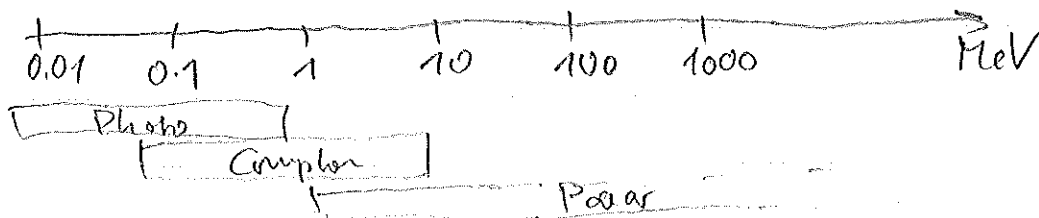
$$I(x) = I_0 e^{-x/X_0}$$

Die Kombination von Bremsstr. und Paarbildung führt für hochenergetische Elektronen/Photonen zu e.m. Schauern/Kaskaden

Photonabsorption: Abschwächungskoeff. $\mu_{tot} = \mu_{Photo} + \mu_{Comp} + \mu_{Pair}$

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

Für verschiedene Photonenergien sind verschiedene Effekte dominant



Siehe auch Fig 2.7