

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Historische Entwicklung:

Gammas (Niedere Energien):

Szintillations-Zähler + PMT (NaJ(Tl), ...)

Halbleiter-Detektoren (Si, Ge, ...)

Gammas (Hohe Energien):

Schauer-Detektoren für π^0 -Zerfälle, ...

Große (modulare) Szintillat.-Det. (NaJ (hygroskopisch), CsJ, ...)

Blei-Glas (Cerenkov-Licht)

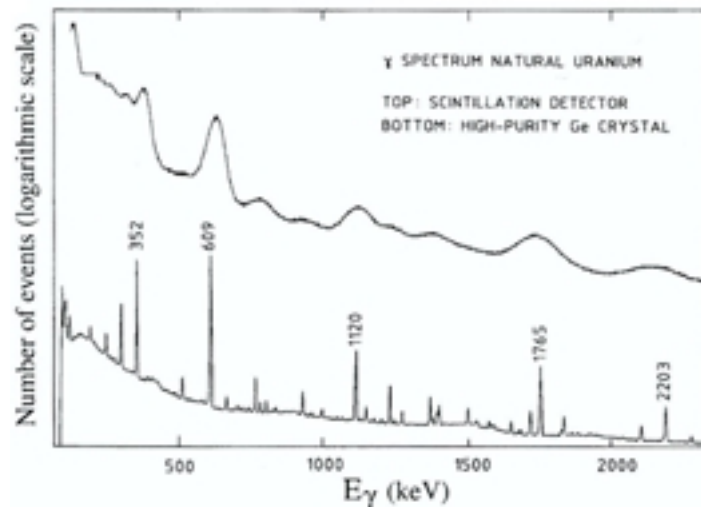
Ionisations-Kalorimeter

(Sehr reine) Flüssigkeiten (LAr, LKr, LXe)

Gase in Driftröhren

Homogene
Kalorimeter

i.a. Sampling-
Kalorimeter



Klassische Kalorimeter:

Apparate zur Messung einer Wärmemenge (Isolierte Boxen mit Thermometer)

Auch verwendet zur Messung der Radioaktivität von Material :

1g ^{239}Pu produziert eine Wärmeenergie von 2mWatt

Kalorimeter in der Kern/Teilchenphysik:

Teilchen der Energie E_0 werden total in einem (großen) Block Materie (fest, flüssig, gasförmig) absorbiert. Es wird ein Signal entnommen, das möglichst proportional zur Energie des Teilchens ist.

Signale: (Nur sehr kleiner Teil der Gesamtenergie E_0)

- Szintillationslicht
- Durch Ionisation freigesetzte Elektronen/Löcher,
- Cerenkov-Licht
- Wärmemessung i.a. nicht geeignet ($1\text{cal} \hat{=} 10^7\text{TeV}$)

Wechselwirkungen von geladenen Teilchen mit Materie (Unterscheidung: e^\pm /schwerere Teilchen)

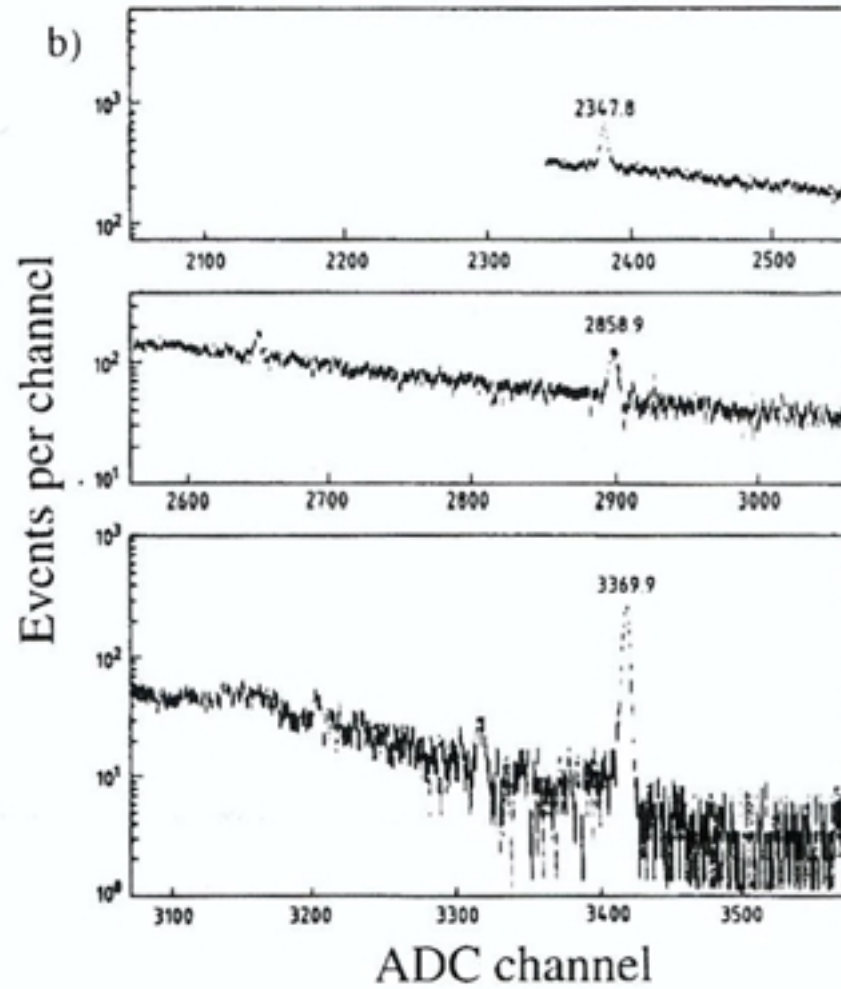
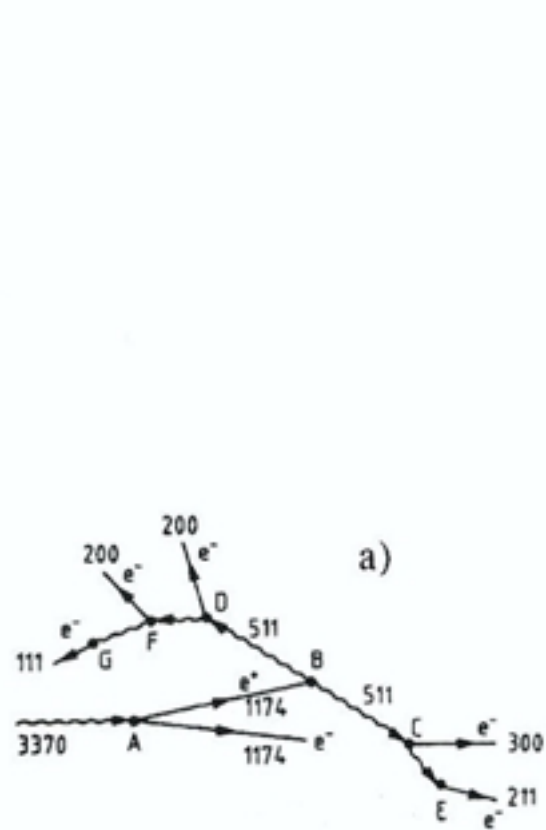
- (1) Ineleastische Stöße mit den Elektronen des Materials
Dominant bei Energieverlusten von schweren Teilchen (α , ...),
 $\sigma \approx 10^{-17}$ - 10^{-16} cm² $\approx 10^7$ - 10^8 barn
Energieverlust ΔE sehr klein, aber viele Stöße pro cm
(10 MeV Proton : Totaler Energieverlust in 0.25mm Cu)
Weiche Stöße : Atom wird nur angeregt
Harte Stöße : Atom wird ionisiert (δ -Rays = Knock-On-Electrons)
 - (2) Elastische Stöße mit dem Kern
I.a. seltener als (1)
Wenig Energie wird übertragen (Ausnahme: α -Streuung an Wasserstoff;
Trotzdem: Dominanz von (1))
 - (3) Emission von Cerenkov-Strahlung
 - (4) Kern-Reaktionen
 - (5) Bremsstrahlung (Wichtig für e^+/e^-)
- } Seltene Prozesse für schwere Teilchen

Wechselwirkung von Röntgenstrahlen und Gammas mit Materie

- (1) Photo-elektrischer Effekt
 - (2) Compton-Streuung (inclusive Thomson und Rayleigh-Streuung)
 - (3) Paar-Produktion ($E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$)
- Alles oder Nichts-WW
 γ -Quant verschwindet
 $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$
 $\mu = \text{Abs. Koeffizient}$

Elektromagnetische Schauer: WW von hochenergetischen γ , e^\pm mit Materie

Beispiel : Einfacher (niederenergetischer Schauer) : $^{65}\text{Ga} \rightarrow \gamma(3370)+X$



Double escape peak

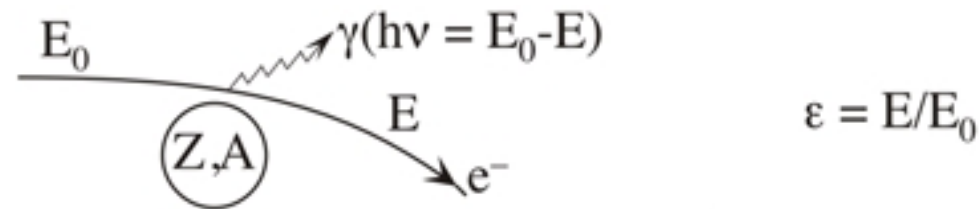
Single escape peak

Full energy peak

Elektronen/Positronen

1) Energieverlust durch Bremsstrahlung

Abstrahlung von reellen Photonen im Coulombfeld der Kerne des Absorber-Materials



Zusätzlich: Bremsstrahlung auch an Elektronen des Absorber-Materials (kleiner Effekt)

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha^2 \frac{d\nu}{\nu} \left\{ (1 + \varepsilon^2) \left[\frac{1}{4} \phi_1(\xi) - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right] - \frac{2}{3} \varepsilon \left[\frac{1}{4} \phi_2(\xi) - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right] \right\} \begin{array}{l} \text{QED,} \\ \text{Details: Leo} \end{array}$$

$f(Z)$ = Coulomb – Korrektur

$\phi_1(\xi), \phi_2(\xi)$ = Abschirm – Funktionen mit $\xi = 100 \cdot m_e c^2 \cdot h\nu / E_0 E Z^{1/3}$

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

Damit:
$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Rad} = N \int_0^{v_0} h\nu \frac{d\sigma}{d\nu}(E_0, \nu) d\nu$$

$E_0 / m_e c^2 \gg 137 \cdot Z^{1/3}; \xi = 0$ (Vollst. Abschirmung)

$$\Rightarrow 4Z^2 r_e^2 \alpha N E_0 \left[\ln(183Z^{-1/3}) + \frac{1}{18} - f(Z) \right]$$

$$\approx \underbrace{4Z^2 r_e^2 \alpha N \ln(183Z^{-1/3})}_{1/X_0} \cdot E_0 \quad \propto E_0; \propto Z^2; \propto r_e^2$$

$$= \frac{E_0}{X_0} \quad (X_0 = \text{Strahlungslänge})$$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Rad} = \frac{E_0}{X_0} \propto E_0$$

$$\propto \frac{1}{m_e^2}$$

↓

Bremsstr. für schwerere
Teilchen sehr unwahrscheinlich

z.B.:
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Rad, \mu} \ll \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Rad, e} \quad (4 \times 10^4)$$

Table 2.3. Radiation lengths for various absorbers

| Material | [gm/cm ²] | [cm] |
|------------------|-----------------------|-------|
| Air | 36.20 | 30050 |
| H ₂ O | 36.08 | 36.1 |
| NaI | 9.49 | 2.59 |
| Polystyrene | 43.80 | 42.9 |
| Pb | 6.37 | 0.56 |
| Cu | 12.86 | 1.43 |
| Al | 24.01 | 8.9 |
| Fe | 13.84 | 1.76 |
| BGO | 7.98 | 1.12 |
| BaF ₂ | 9.91 | 2.05 |
| Scint. | 43.8 | 42.4 |

2) Energieverlust durch Ionisation

Bethe- Bloch, speziell für Elektronen/Positronen (verschieden von Bethe-Bloch für α 's, ...)

(Besonderheit: Masse der Teilchen = Masse der Stoßpartner
Stöße zwischen identischen Teilchen)

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ion.} = 2\pi Z r_e^2 \cdot m_e c^2 \rho \frac{N}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left\{ \ln \frac{\tau(\tau+2)}{2(I/m_e c^2)^2} + F(\tau) - \delta - 2 \frac{C}{Z} \right\}$$

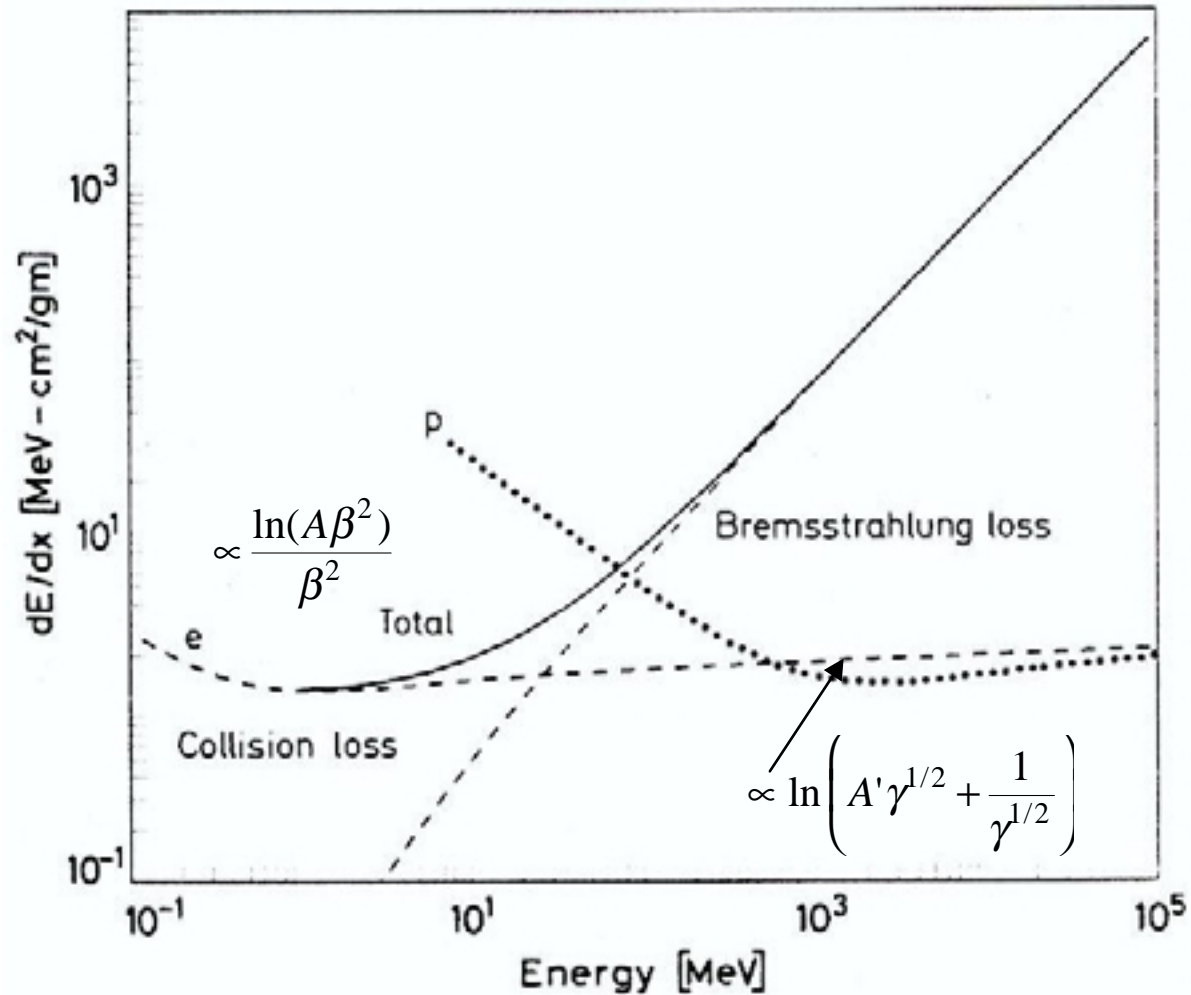
$$\tau = T_e / m_e c^2$$

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 \frac{\frac{1}{8} \epsilon^2 - (2\tau+1) \ln 2}{(\tau+1)^2} \quad \text{für } e^-$$

$$F(\tau) = \dots \quad \text{für } e^+ \text{ (verschieden!)}$$

δ = Dichte – Korrektur

C = Schalen – Korrektur



Unterschied: e^+ , p : Bei kleinen Energien: $(dE)_p \gg (dE)_e$
 Bei großen Energien: „Relativistic Rise“ kleiner bei e^+

Vergleich $(dE)_{Rad}/(dE)_{Ion} \Rightarrow E_C$ (Kritische Energie)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Rad} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ion} \quad \text{für } E = E_C$$

$$E_{Kritisch}^{Fest/Flüssig} \approx \frac{610 \text{ MeV}}{Z+1.24} \alpha \frac{1}{Z}$$

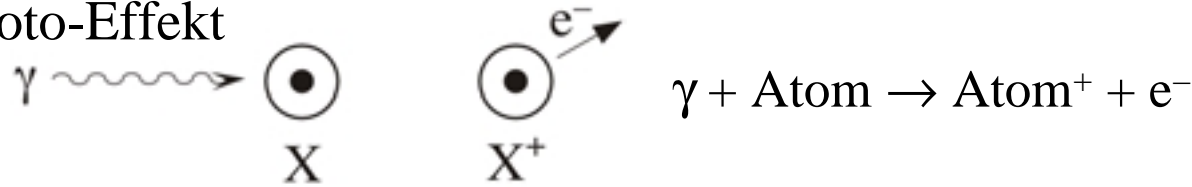
$$E_{Kritisch}^{Gas} = \frac{710 \text{ MeV}}{Z+1.24} \text{ (Dichte-Effekt bei Ionisation)}$$

| Material | $X_0[\text{g/cm}^2]$ | $E_C[\text{MeV}]$ | $\lambda_{Had}[\text{g/cm}^2]$ |
|---|----------------------|-------------------|--------------------------------|
| H ₂ | 63 | 340 | 52.4 |
| Al | 24 | 47 | 106.4 |
| Ar | 18.9 | 35 | 119.7 |
| Kr | 11.3 | 21.5 | 147 |
| Xe | 8.5 | 14.5 | 168 |
| Fe | 13.8 | 24 | 131.9 |
| Pb | 6.3 | 6.9 | 193.7 |
| Bleiglas SF 5 | 9.6 | ~11.8 | |
| Plexiglas | 40.5 | 80 | 83.6 |
| H ₂ O | 36 | 93 | 84.9 |
| NaI(Tl) | 9.5 | 12.5 | 152.0 |
| Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ | 8.0 | 10.5 | 164 |

$$E_{Kritisch}(\mu^-) \approx 1 \text{ TeV} \quad (\text{in Fe})$$

Photonen

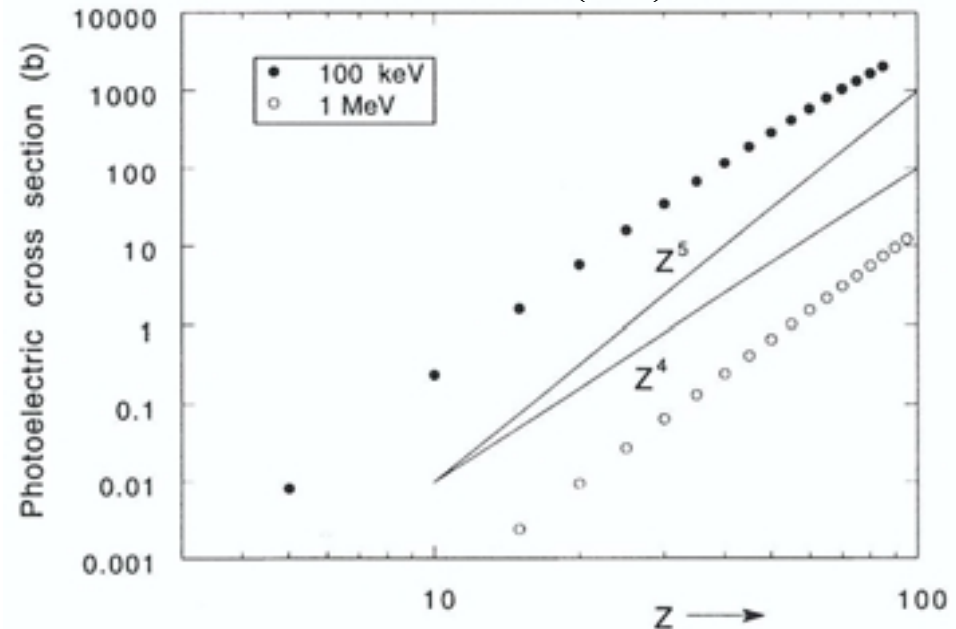
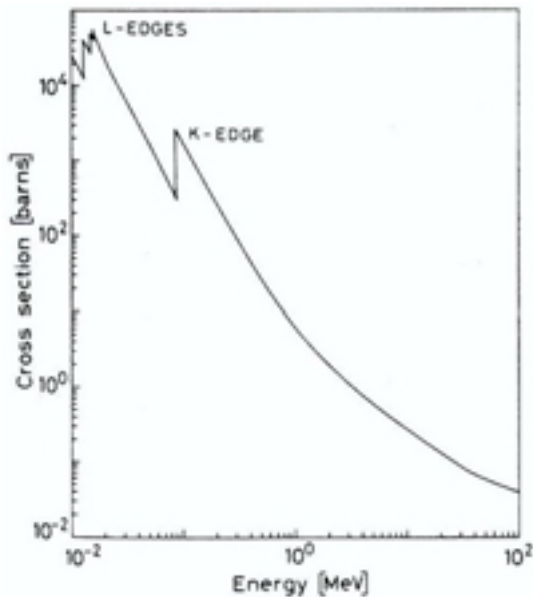
1) Photo-Effekt



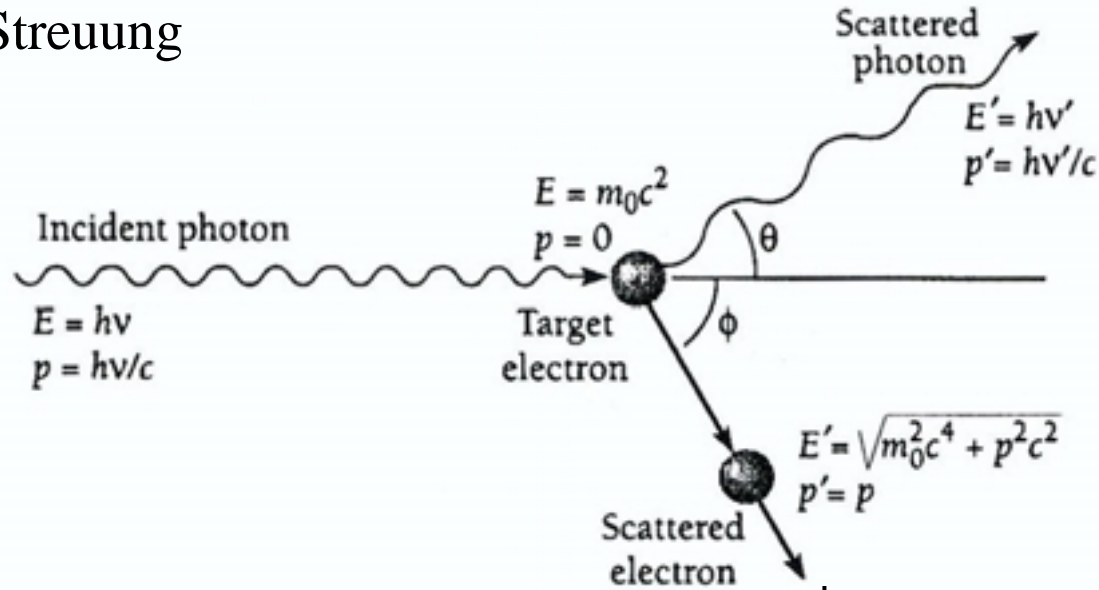
Nur möglich nahe einem dritten Partner → Photo-Effekt entfernt vor allem Elektronen aus der K-Schale

$$\sigma_{\text{Photo}}(E_\gamma \text{ nahe K-Kante}) = 4\sqrt{2} \alpha^4 Z^5 \cdot \frac{8}{3} \pi r_e^2 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{7/2} \propto Z^5 \approx 10^3 - 10^4 \text{ b}$$

$$\propto \left(\frac{1}{E_\gamma} \right)^{7/2}$$

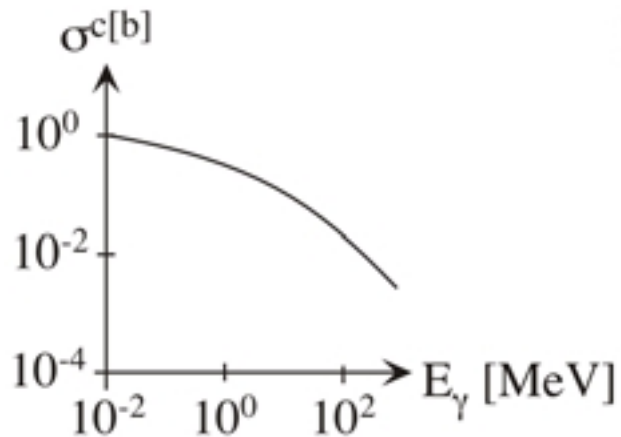


2) Compton-Streuung

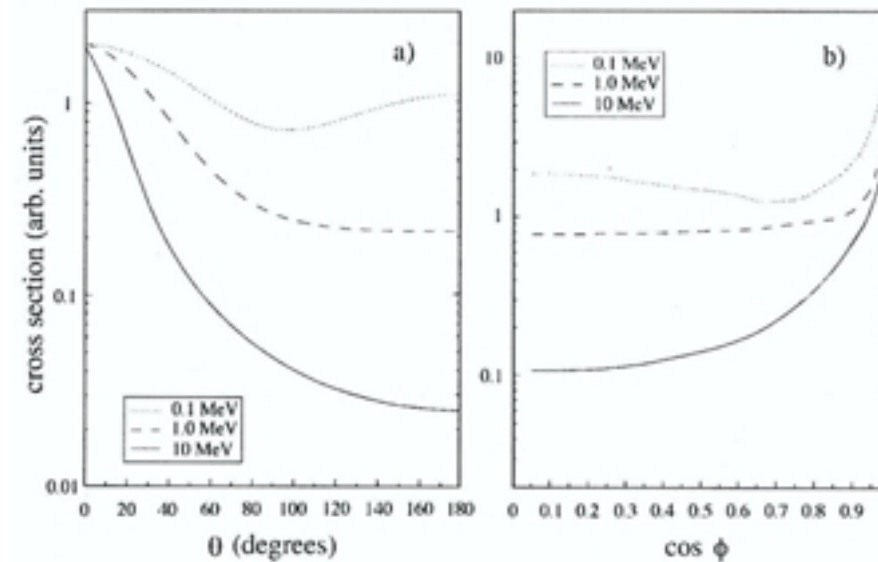


Klein – Nishina:
$$\frac{d\sigma^c}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{[1 + \zeta (1 - \cos \theta)^2]} \left\{ 1 + \frac{\zeta^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) [1 + \zeta (1 - \cos \theta)^2]} \right\}$$
 (QED)

$$\Rightarrow \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) \text{ für kleine } \zeta = E_\gamma / m_e c^2$$



$$\sigma^c = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1 + \zeta}{\zeta^2} \left[\frac{2(1 + \zeta)}{1 + 2\zeta} - \frac{1}{\zeta} \ln(1 + 2\zeta) \right] + \frac{1}{2\zeta} \ln(1 + 2\zeta) - \frac{1 + 3\zeta}{(1 + 2\zeta)^2} \right\} \quad \sigma^c \approx 10^{-2} - 10^0 b$$

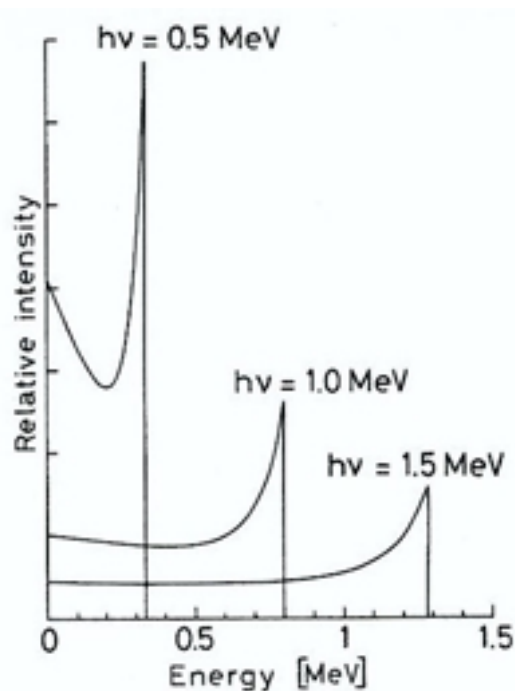


Compton-Streuung bei hoher Energie (1. Streuung): γ ändert Richtung nur wenig
Weitere Compton-Streuungen bei kleinen Energien: γ -Emission \approx isotrop

Energieverlust nach Compton-Streuung: $E'_\gamma = E_\gamma \frac{1}{1 + \zeta(1 - \cos\theta)}$

$E_\gamma - E'_\gamma$ maximal bei $\theta = \pi$.

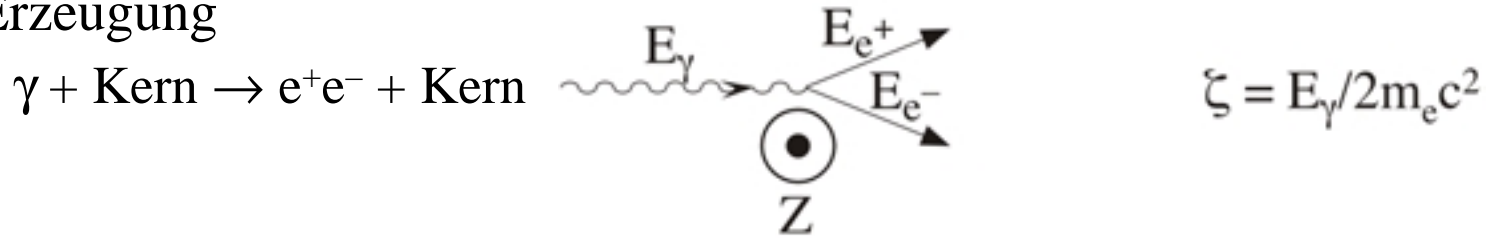
Energie-Transfer auf Elektron nach Compton-Streuung: $T = E_\gamma \frac{\zeta(1 - \cos\theta)}{1 + \zeta(1 - \cos\theta)}$



⇒ Compton-Kanten

Atomarer Wirkungsquerschnitt: $\sigma_c^{Atom} = Z \cdot \sigma^c \propto Z$

3) Paar-Erzeugung



Nur möglich im Coulombfeld eines Kernes (oder Elektrons)
für $E_\gamma \geq 2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$

Wirkungsquerschnitte (ohne Abschirmeffekte, Details siehe Leo)

$$\begin{aligned} < \zeta < 137 / Z^{1/3} & \quad \sigma_{Paar} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln(2\zeta) - \frac{109}{54} \right) \propto \ln E_\gamma; \propto Z^2 \\ \zeta \gg 137 / Z^{1/3} & \quad \sigma_{Paar} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) - \frac{1}{54} \right) \text{ unabh. von } E_\gamma \\ & \quad \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \cdot \frac{1}{X_0} \propto \frac{1}{X_0} \end{aligned}$$

Mittlere freie Weglänge zwischen 2 Paarerzeugungsprozessen

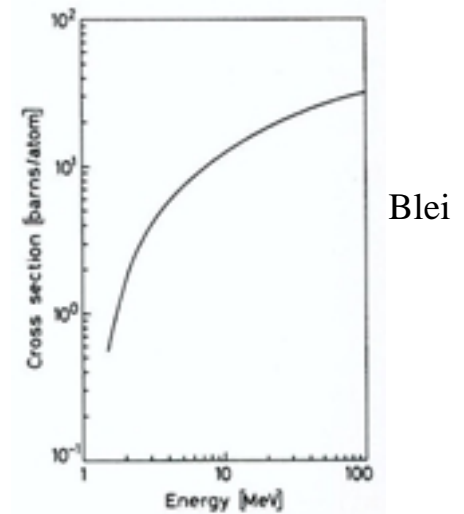
$$\lambda_{Paar} = \frac{9}{7} \cdot X_0$$

↳ Weitere Bedeutung von X_0 :

Bei hohen Energien findet mit der Wahrscheinlichkeit

$$P = 1 - \exp(-7/9) = 54\%$$

nach der Strecke X_0 **eine** Paarbildung statt





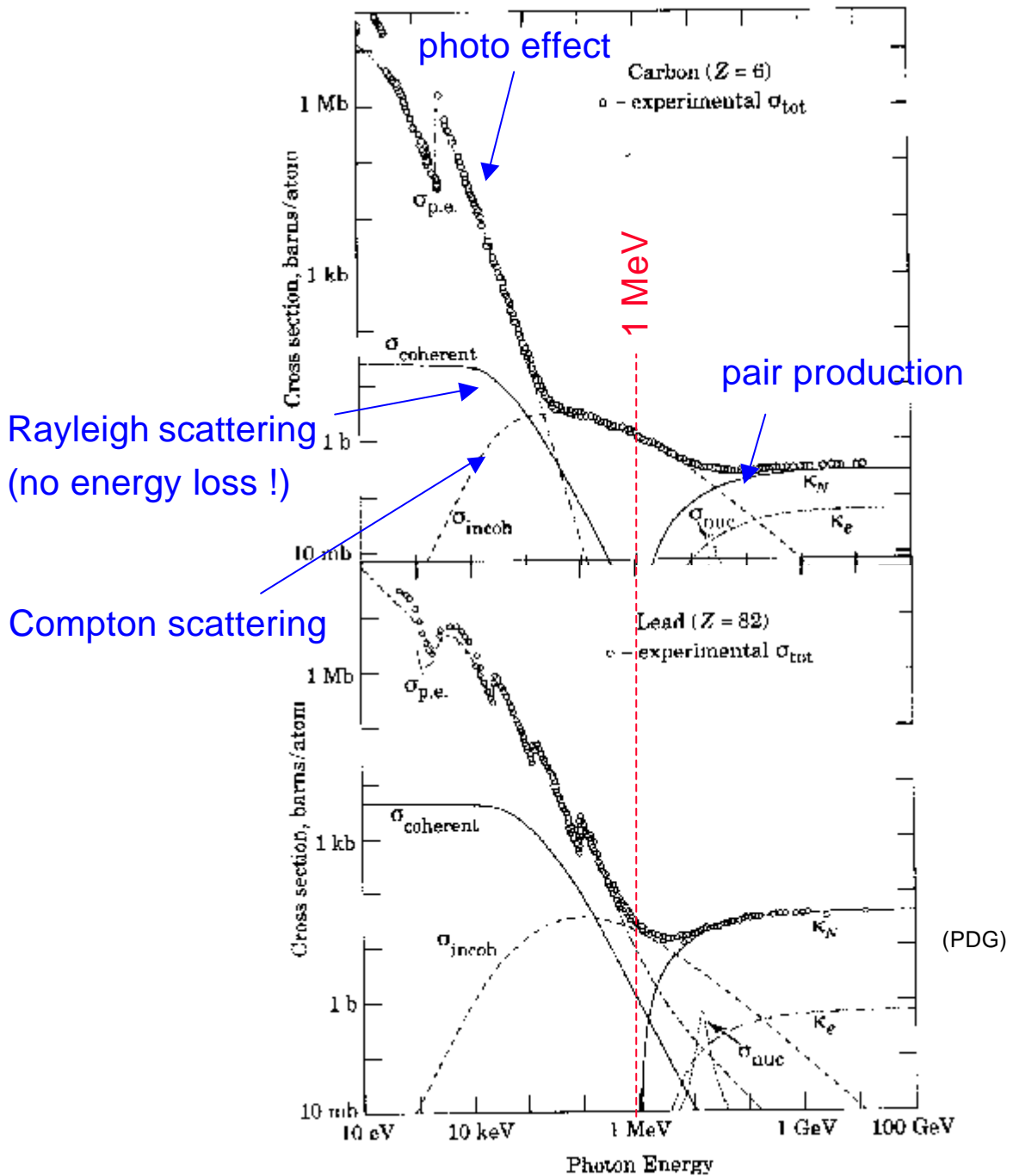
Interaction of photons



In summary: $I_g = I_0 e^{-\mu x}$: mass attenuation coefficient

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{Compton} + \mu_{pair} + \dots$$

$$\mu_i = \frac{N_A}{A} S_i \quad [cm^2 / g]$$

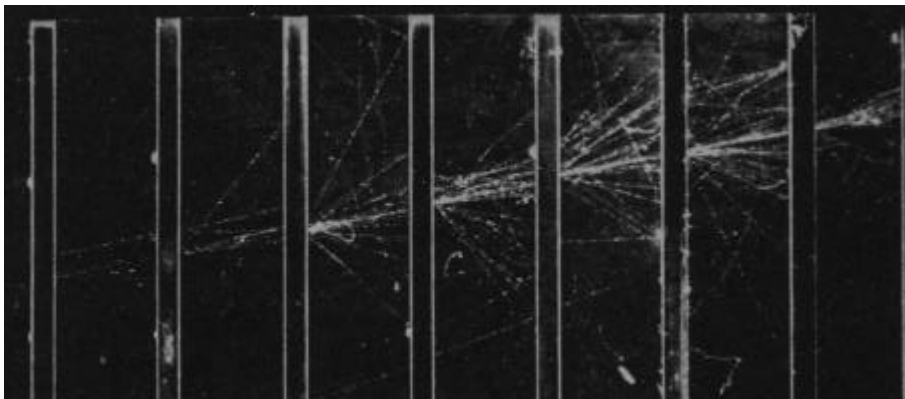




Electromagnetic cascades



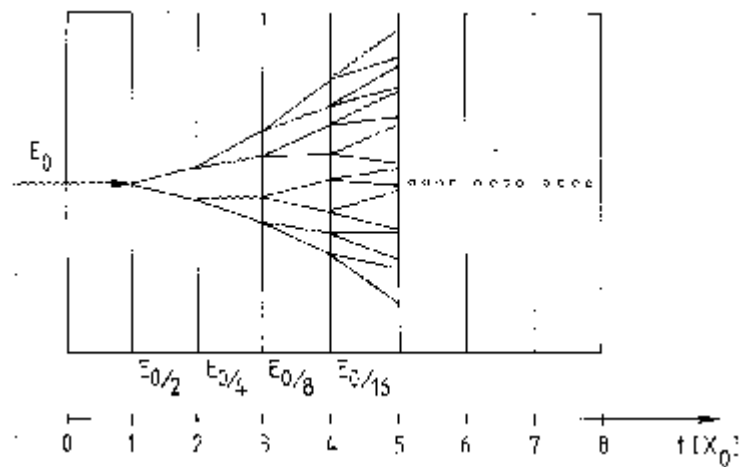
Electromagnetic Cascades



Electron shower in a cloud chamber with lead absorbers

◆ Simple qualitative model

Consider only Bremsstrahlung and pair production. Symmetric energy splitting in each step.



$$N(t) = 2^t \quad E(t) / \text{particle} = E_0 \times 2^{-t}$$

Process continues until $E(t) < E_c$

$$t_{\max} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2} \quad N^{\text{total}} = \sum_{t=0}^{t_{\max}} 2^t = 2^{(t_{\max} + 1)} - 1 \quad 2 \times 2^{t_{\max}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

After $t = t_{\max}$ the dominating processes are ionization, Compton effect and photo effect absorption.



Electromagnetic cascades



Longitudinal shower development:

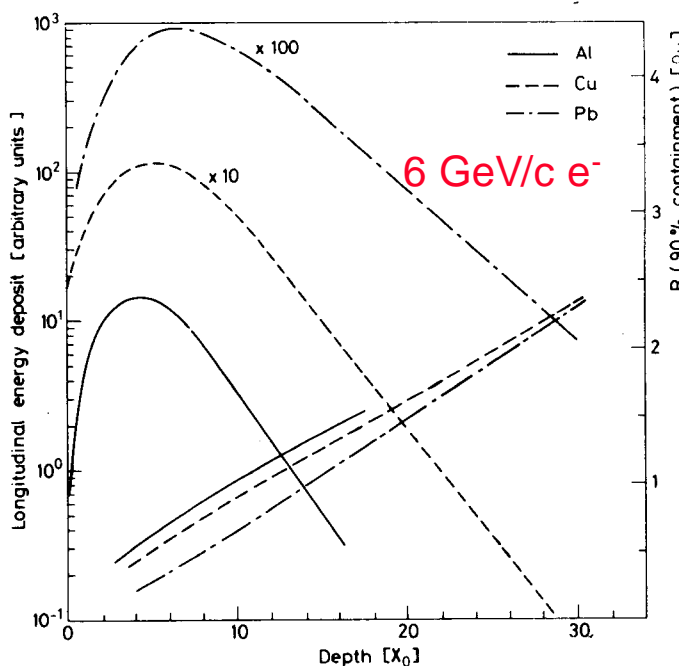
$$\frac{dE}{dt} \propto t^a e^{-t}$$

Shower maximum at $t_{\max} = \ln \frac{E_0}{E_c} \frac{1}{\ln 2}$

95% containment $t_{95\%} = t_{\max} + 0.08Z + 9.6$

Example: 100 GeV in lead glass ($E_c=11.8$ MeV) $t_{\max} = 13, t_{95\%} = 23$

Size of a calorimeters grows only logarithmically with E



(C. Fabjan, T. Ludlam, CERN-EP/82-37)

longitudinal
development scales
with X_0

Transverse shower development:

95% of the shower cone is located in a cylinder with

radius $2 R_M$ $R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \quad [g/cm^2]$

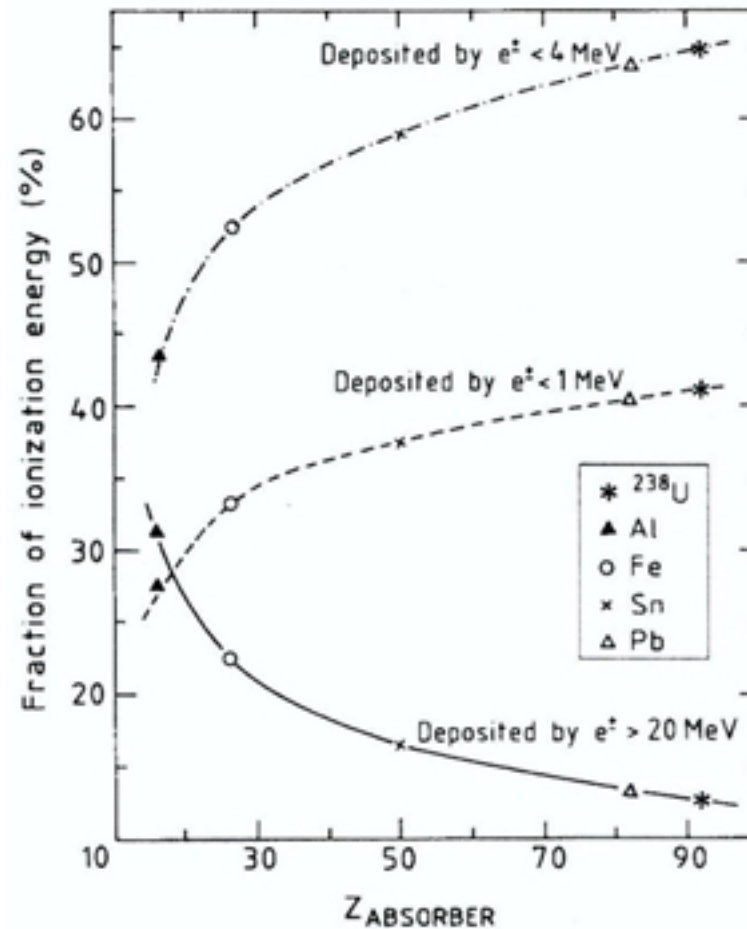
Example: lead glass $R_M = 1.8 X_0 = 3.6$ cm (depends on glass type)

Charakterisierung von e.-m. Schauern

Longitudinale Ausdehnung: t_{\max} , $t_{95\%}$

Laterale Ausdehnung: $R_{\text{Molière}} = 21\text{MeV} \cdot X_0/E_C$ $3R_M$: 99% der Schauerenergie

Zusammensetzung des e.-m. Schauers:



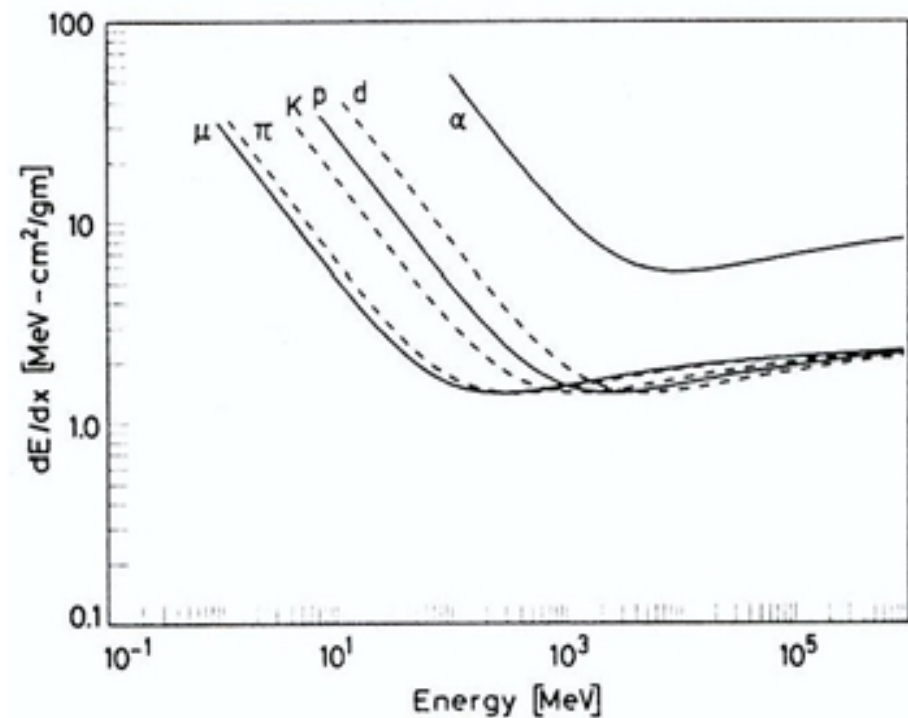
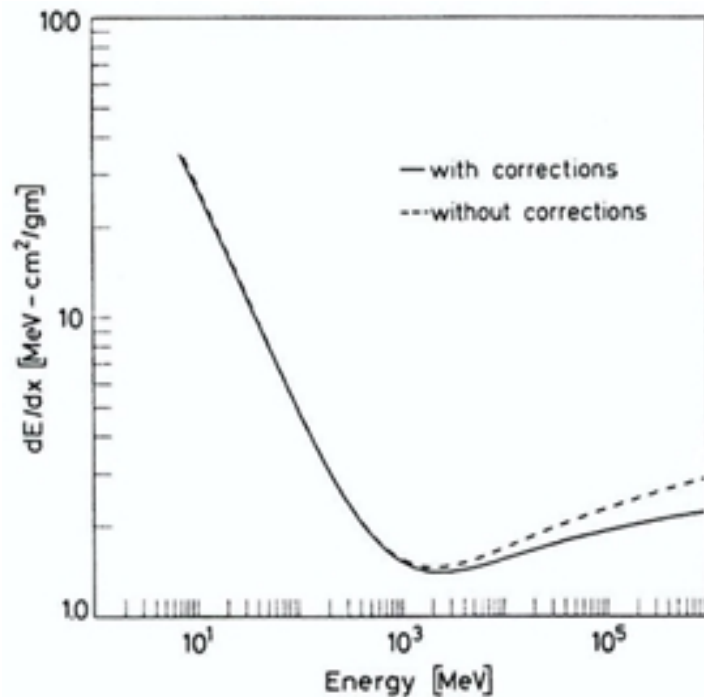
Wechselwirkung von anderen Teilchen (ausser e^+ , e^- , γ) in e.-m. Kalorimetern

1) Geladene Teilchen (p , \bar{p} , π^\pm , K^\pm , μ^\pm , ...)

Im Wesentlichen nur $(dE/dx)_{\text{Ion.}}$

„Übliche“ Bethe-Bloch-Formel:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ion.}} = 2\pi r_e^2 m_e c^2 \cdot Z \cdot \rho \frac{N_A}{A} Z^2 \cdot \frac{1}{\beta^2} \left\{ \ln\left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\text{max}}}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right\}$$



Bei Durchgang durch Kalorimeter : Min.-Ionisierung für MIP's (Eichung!)

Zusätzlich:

Cerenkov-Licht (von e^\pm im Schauer mit $E > 0.7\text{MeV}$)

Sehr wenig Photonen : Beispiel ($\beta \approx 1$ Teilchen in H_2O): Energieverlust $\approx 400\text{eV/cm}$
(Ionisat.: 2MeV/cm)

Spektrum $\propto 1/\lambda^2$

Hadronische Wechselwirkungen

λ_{Hadr} i.a $\gg X_0$ für e.-m. Kalorimeter

↳ Geladenes Teilchen macht nur sehr selten eine hadronische WW

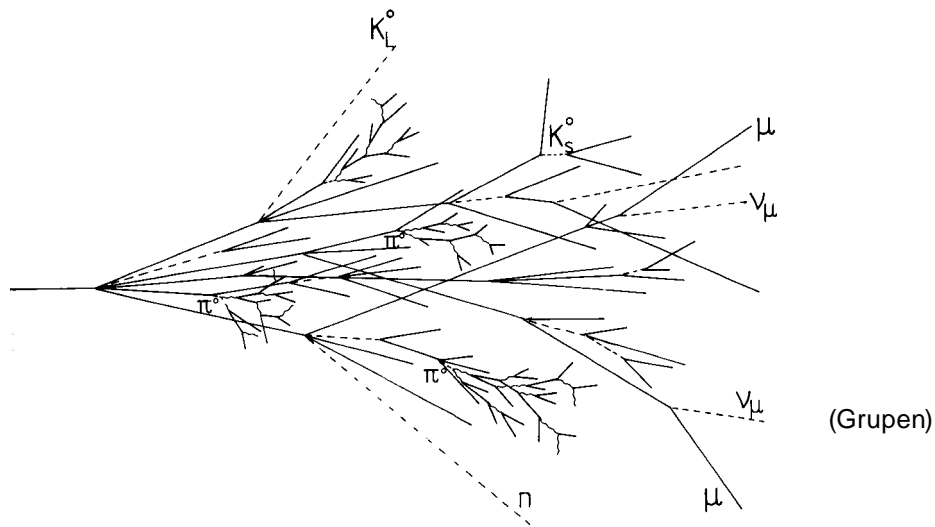


Hadronic cascades



Hadronic cascades

Various processes involved. Much more complex than electromagnetic cascades.



Hadronic

+

electromagnetic component



charged pions, protons, kaons
 Breaking up of nuclei
 (binding energy),
 neutrons, neutrinos, soft γ 's
 muons invisible energy



neutral pions ≈ 2
 electromagnetic cascade
 $n(\gamma^0) \approx \ln E(\text{GeV}) + 4.6$
 example 100 GeV: $n(\gamma^0) \approx 18$

Large energy fluctuations

limited energy resolution

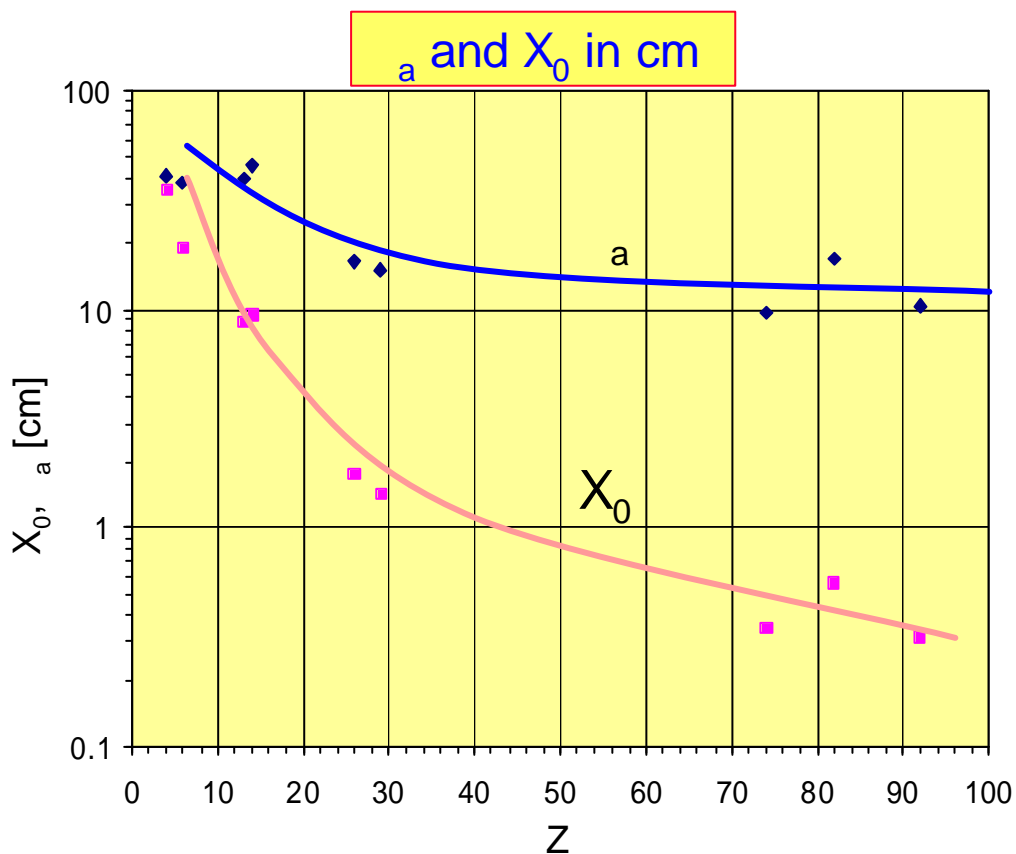


I.2.1 Interaction of charged particles



| Material | Z | A | [g/cm ³] | X ₀ [g/cm ²] | a [g/cm ²] |
|----------------|----|--------|----------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Hydrogen (gas) | 1 | 1.01 | 0.0899 (g/l) | 63 | 50.8 |
| Helium (gas) | 2 | 4.00 | 0.1786 (g/l) | 94 | 65.1 |
| Beryllium | 4 | 9.01 | 1.848 | 65.19 | 75.2 |
| Carbon | 6 | 12.01 | 2.265 | 43 | 86.3 |
| Nitrogen (gas) | 7 | 14.01 | 1.25 (g/l) | 38 | 87.8 |
| Oxygen (gas) | 8 | 16.00 | 1.428 (g/l) | 34 | 91.0 |
| Aluminium | 13 | 26.98 | 2.7 | 24 | 106.4 |
| Silicon | 14 | 28.09 | 2.33 | 22 | 106.0 |
| Iron | 26 | 55.85 | 7.87 | 13.9 | 131.9 |
| Copper | 29 | 63.55 | 8.96 | 12.9 | 134.9 |
| Tungsten | 74 | 183.85 | 19.3 | 6.8 | 185.0 |
| Lead | 82 | 207.19 | 11.35 | 6.4 | 194.0 |
| Uranium | 92 | 238.03 | 18.95 | 6.0 | 199.0 |

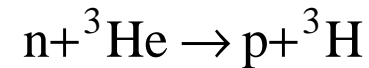
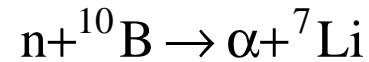
For $Z > 6$: $a > X_0$



2) (Langlebige) neutrale Teilchen : Neutronen, K_L^0

Neutronen :

$E_n < 20\text{MeV}$ $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{H}$ (Messung der geladenen Teilchen)



$E_n < 1\text{GeV}$ $n + p \rightarrow n + p$ (Elast.) (Messung des Rückstoßprotons)

$E_n > 5\text{GeV}$ Hadronische Schauer

K_L^0 : Hadronische Reaktionen

3) Neutrinos

Sehr kleine WQ, 1m Fe: $\epsilon_{\text{Det}} \approx 5 \times 10^{-17}$

Literatur

R. Wigmans, Calorimetry, Oxford Science Publications, 2000

W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer Verlag

K. Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlung, Teubner-Verlag

C. Joram, CERN Summer Student Lectures, Particle Detectors, 2002

Für Einzelheiten (Ionisation, Cerenkov-Str., Übergangsstr., Parametrische Str. (PXR),
Smith-Purcell-Str. (SPR), Channeling-Str., ...)

W. Allison, P. Wright, Ann. Rev. Nucl. Sci. 30 (1980) 253

I. Frank, V. Ginsburg, J. Phys. USSR 9 (1945) 36

L. Wartski et al., J. Appl. Phys. 46 (1975) 3644

J.D. Jackson, Klassische Elektrodynamik, de Gruyter, 1983

M. Ter-Mikaelian, High Energy Electromagnetic Processes, Wiley, 1972

V.G. Baryshewsky et al., J Physique 44 (1983) 91