

# 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  $\pi^0$ -Zerfälle, ...

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

Blei-Glas (Cerenkov-Licht)

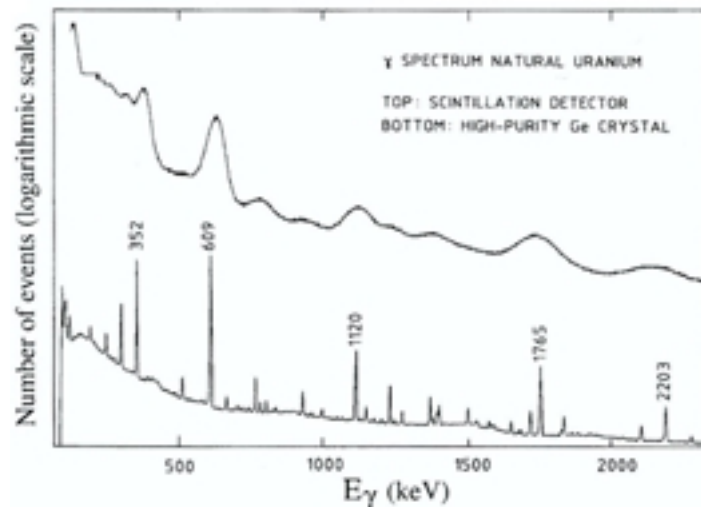
Ionisations-Kalorimeter

(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  $^{239}\text{Pu}$  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)

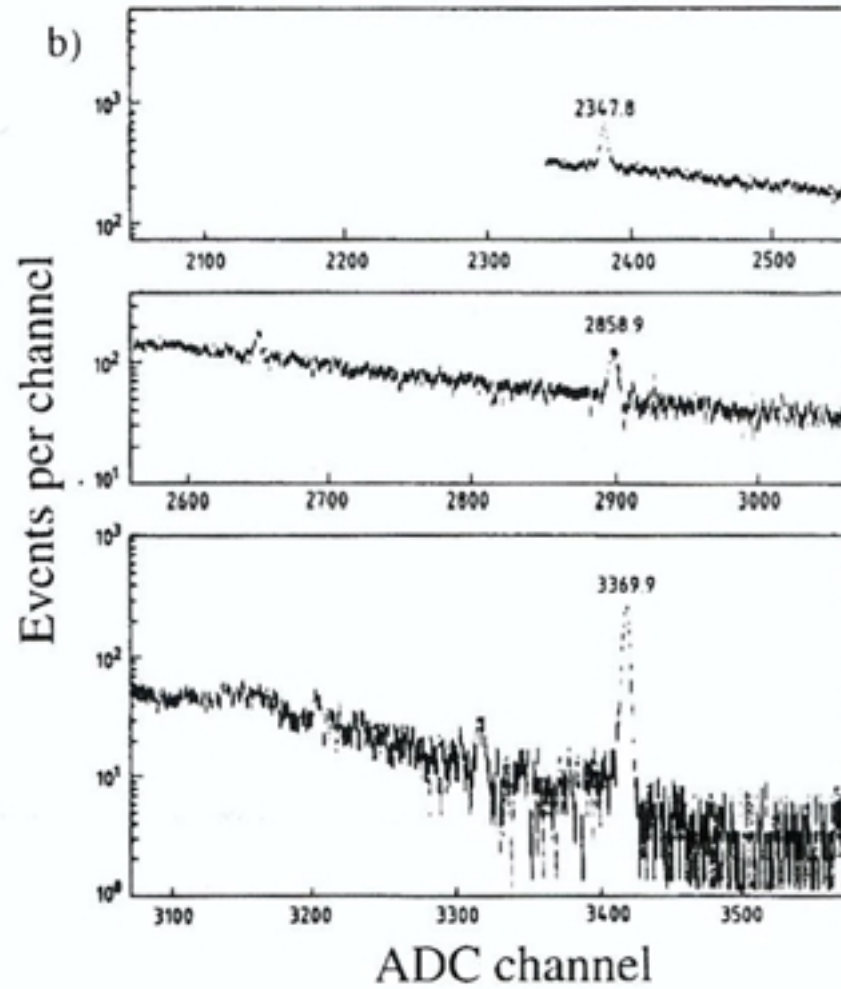
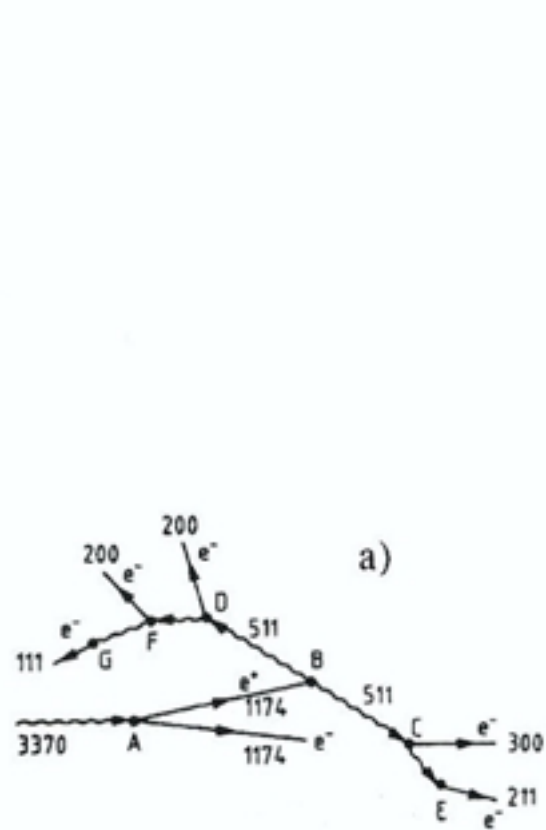
- (1) Ineleastische Stöße mit den Elektronen des Materials  
Dominant bei Energieverlusten von schweren Teilchen ( $\alpha$ , ...),  
 $\sigma \approx 10^{-17}$ - $10^{-16}$ cm<sup>2</sup>  $\approx 10^7$ - $10^8$  barn  
Energieverlust  $\Delta E$  sehr klein, aber viele Stöße pro cm  
(10 MeV Proton : Totaler Energieverlust in 0.25mm Cu)  
Weiche Stöße : Atom wird nur angeregt  
Harte Stöße : Atom wird ionisiert ( $\delta$ -Rays = Knock-On-Electrons)
  - (2) Elastische Stöße mit dem Kern  
I.a. seltener als (1)  
Wenig Energie wird übertragen (Ausnahme:  $\alpha$ -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  
 $\gamma$ -Quant verschwindet  
 $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$   
 $\mu = \text{Abs. Koeffizient}$

# Elektromagnetische Schauer: WW von hochenergetischen $\gamma$ , $e^\pm$ mit Materie

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



Double escape peak

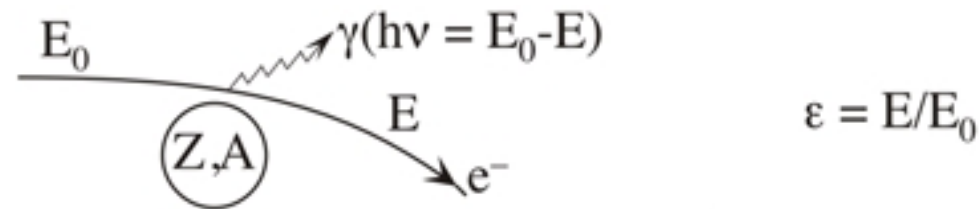
Single escape peak

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 <sup>2</sup> ]	[cm]
Air	36.20	30050
H <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>	9.91	2.05
Scint.	43.8	42.4

## 2) Energieverlust durch Ionisation

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

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

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

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

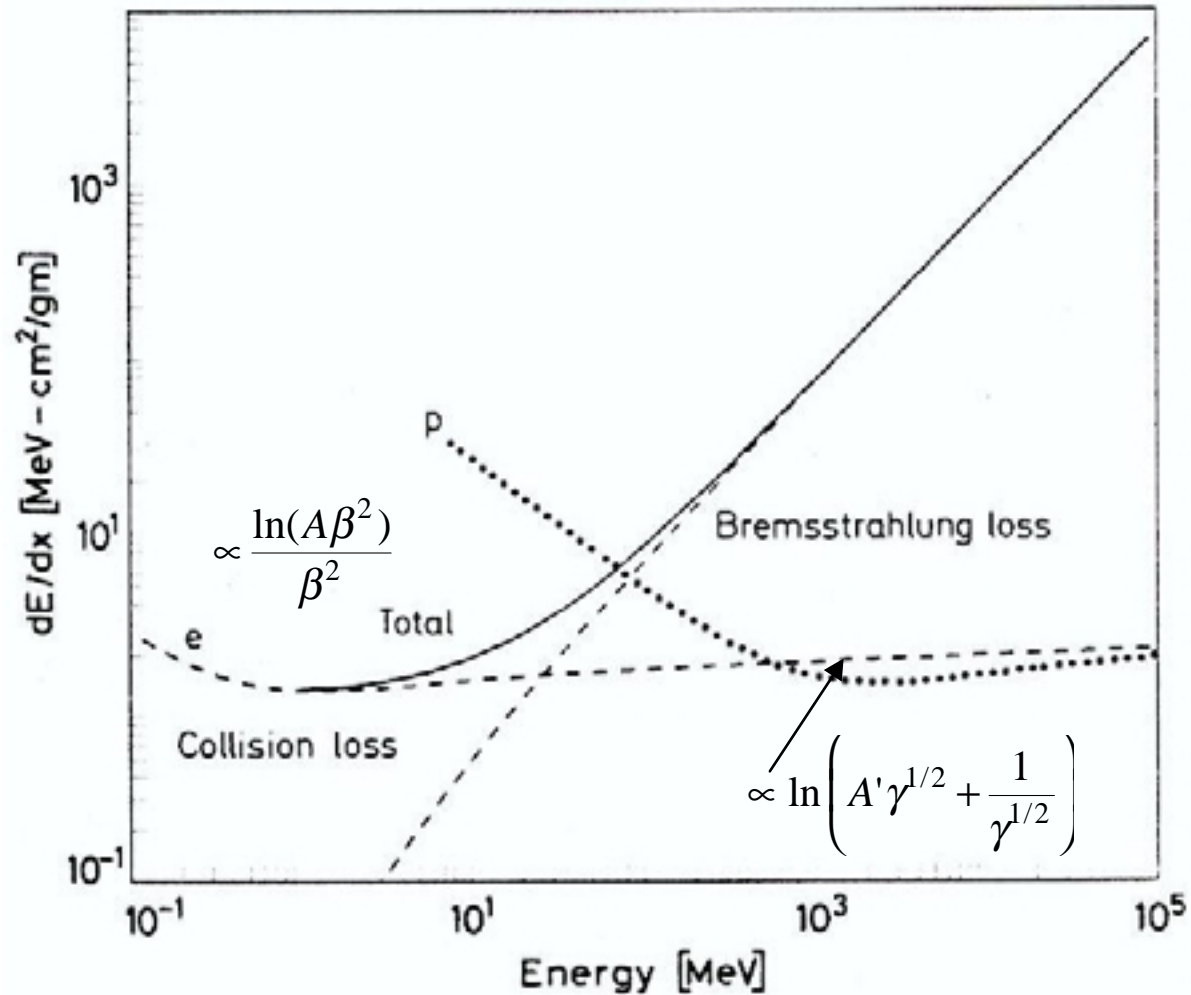
$$F(\tau) = 1 - \beta^2 \frac{\frac{1}{8} \epsilon^2 - (2\tau + 1) \ln 2}{(\tau + 1)^2} \quad \text{für } e^-$$

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

$\delta$  = 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)

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

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

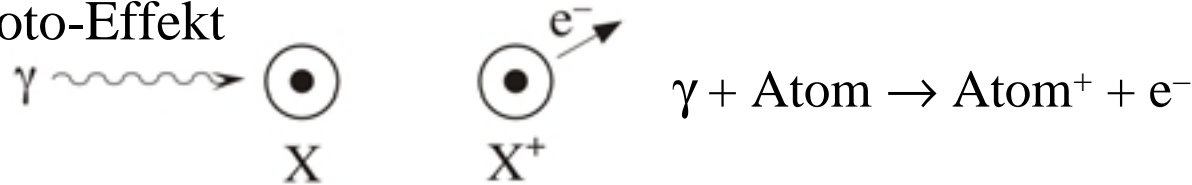
$$E_{Kritisch}^{Gas} = \frac{710MeV}{Z+1.24} \text{ (Dichte – Effekt bei Ionisation)}$$

Material	$X_0[g/cm^2]$	$E_C[MeV]$	$\lambda_{Had}[g/cm^2]$
H <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> O	36	93	84.9
NaI(Tl)	9.5	12.5	152.0
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	8.0	10.5	164

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

# Photonen

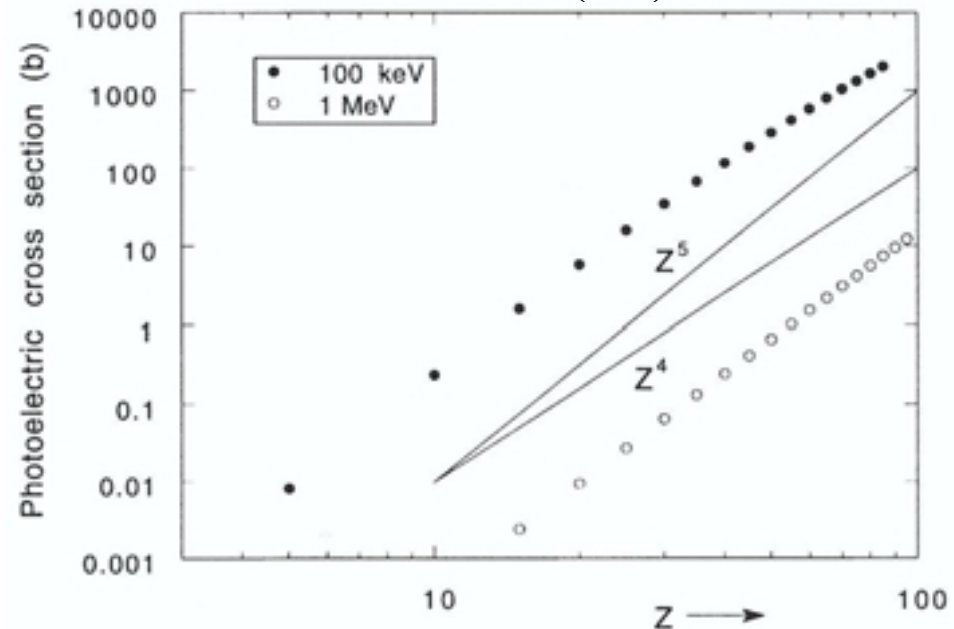
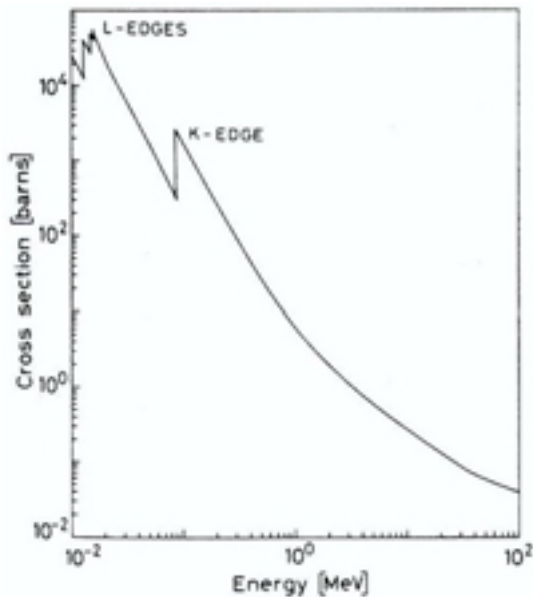
## 1) Photo-Effekt



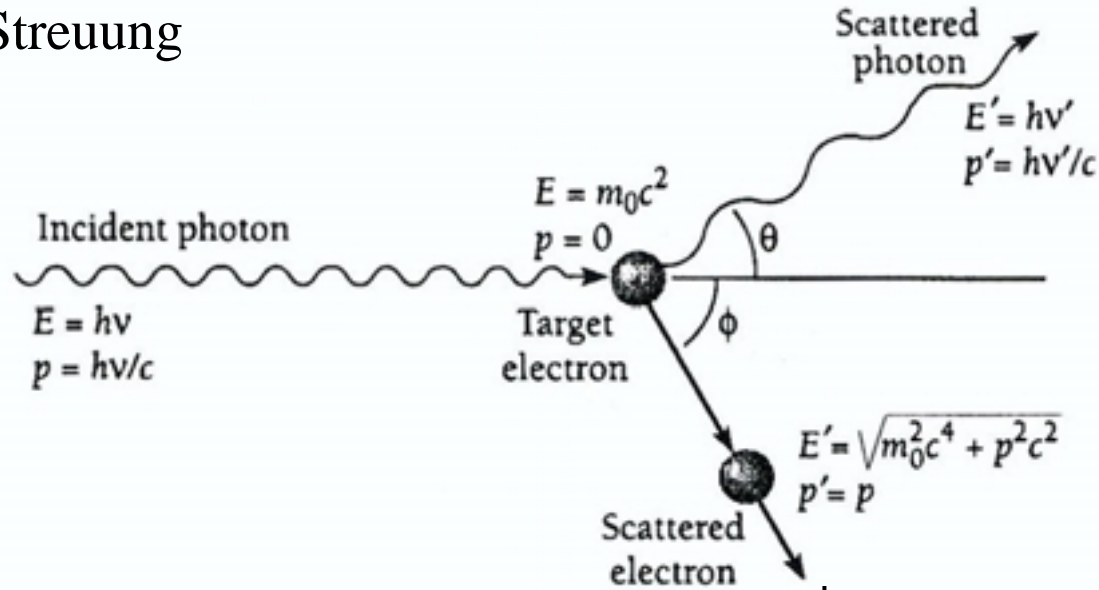
Nur möglich nahe einem dritten Partner → Photo-Effekt entfernt vor allem Elektronen aus der K-Schale

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

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

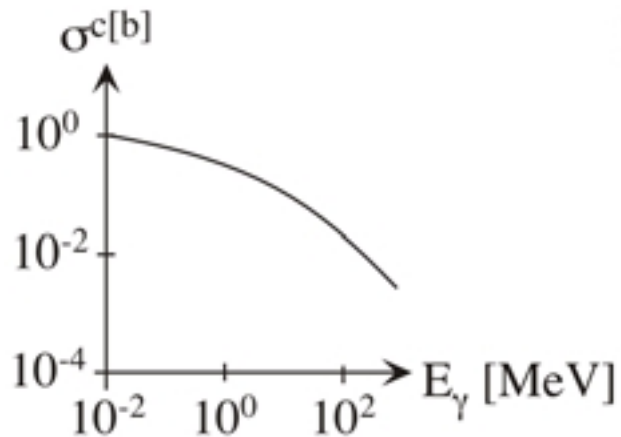


## 2) Compton-Streuung

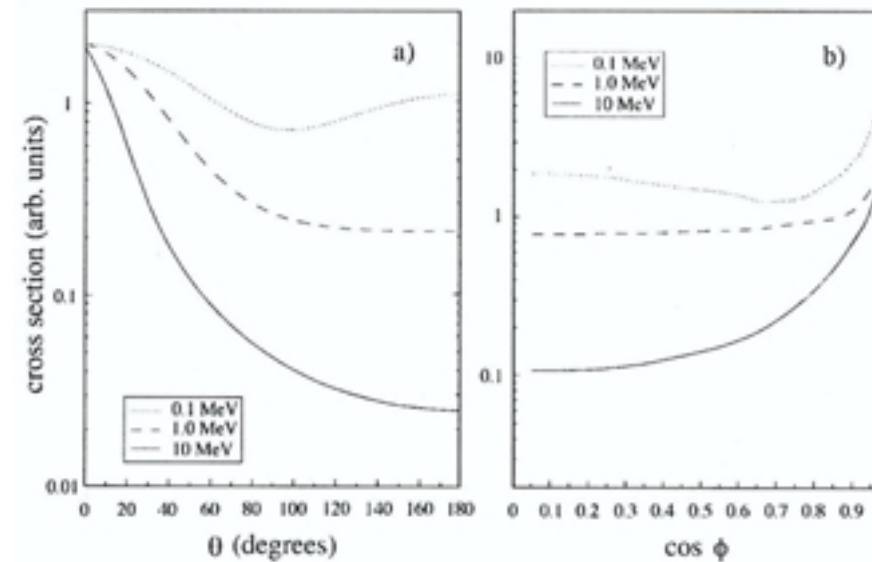


Klein – Nishina: 
$$\frac{d\sigma^c}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{[1 + \zeta (1 - \cos \theta)^2]} \left\{ 1 + \frac{\zeta^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) [1 + \zeta (1 - \cos \theta)^2]} \right\}$$
 (QED)

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



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

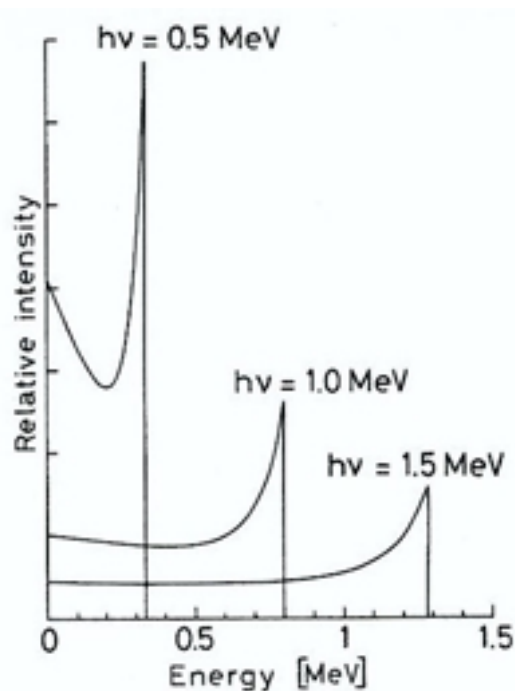


Compton-Streuung bei hoher Energie (1. Streuung):  $\gamma$  ändert Richtung nur wenig  
Weitere Compton-Streuungen bei kleinen Energien:  $\gamma$ -Emission  $\approx$  isotrop

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

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

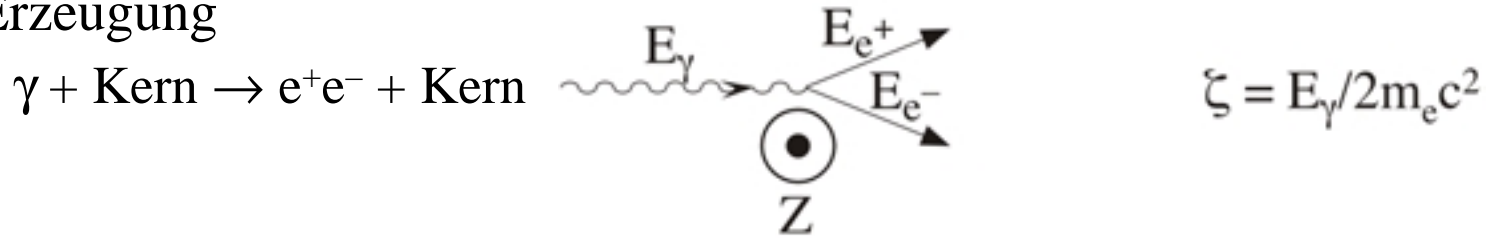
Energie-Transfer auf Elektron nach Compton-Streuung:  $T = E_\gamma \frac{\zeta(1 - \cos\theta)}{1 + \zeta(1 - \cos\theta)}$



⇒ 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

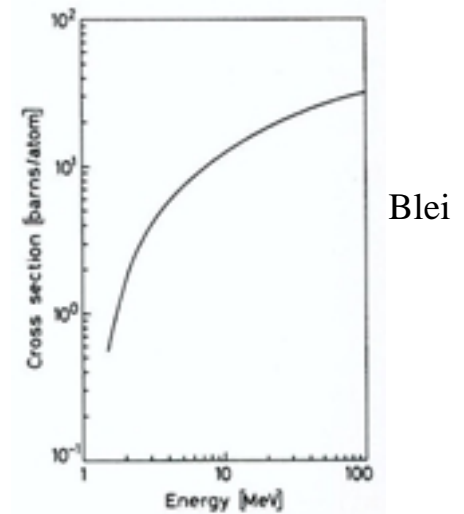
$$\lambda_{Paar} = \frac{9}{7} \cdot X_0$$

↳ 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





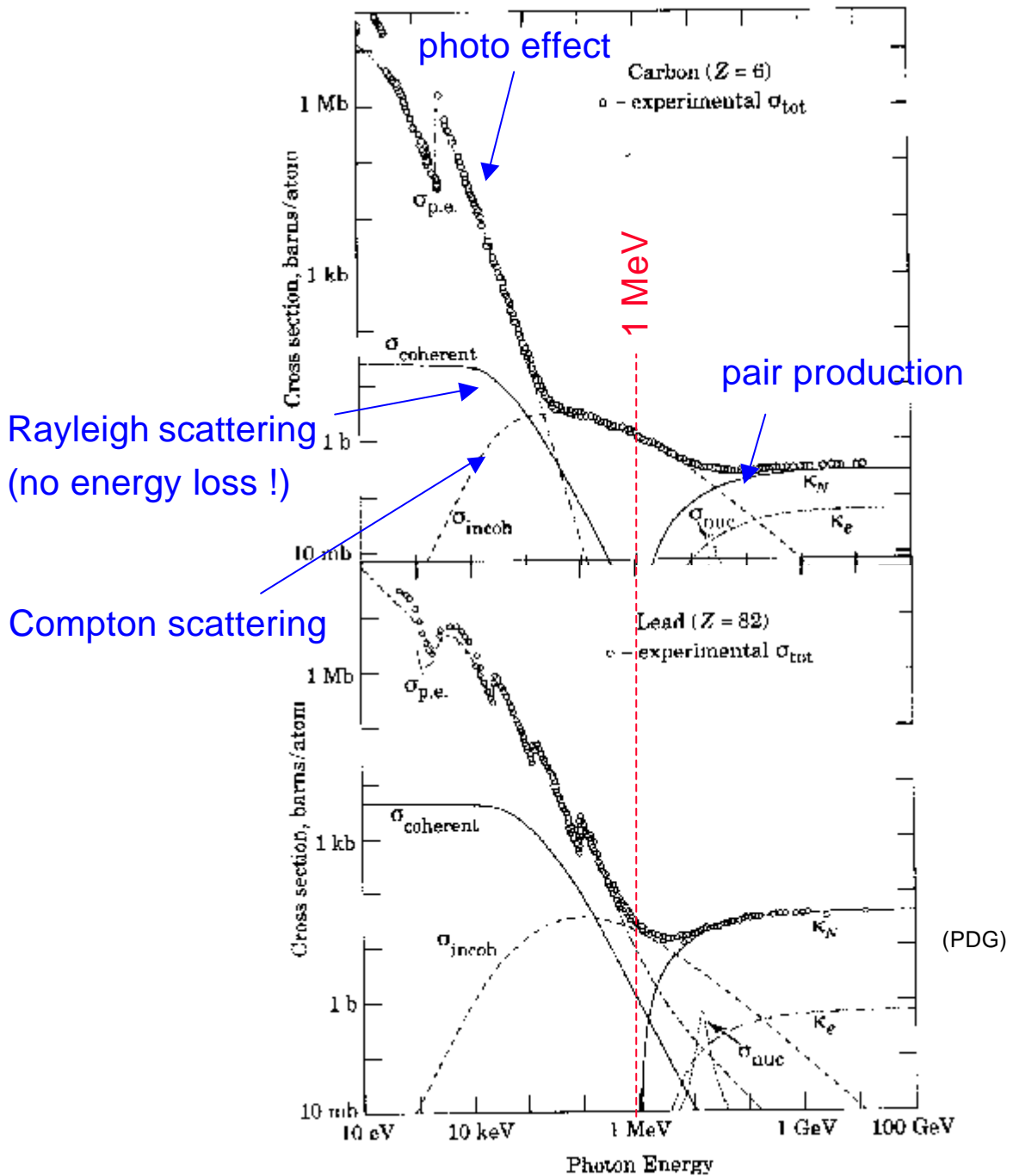
### Interaction of photons



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

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

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



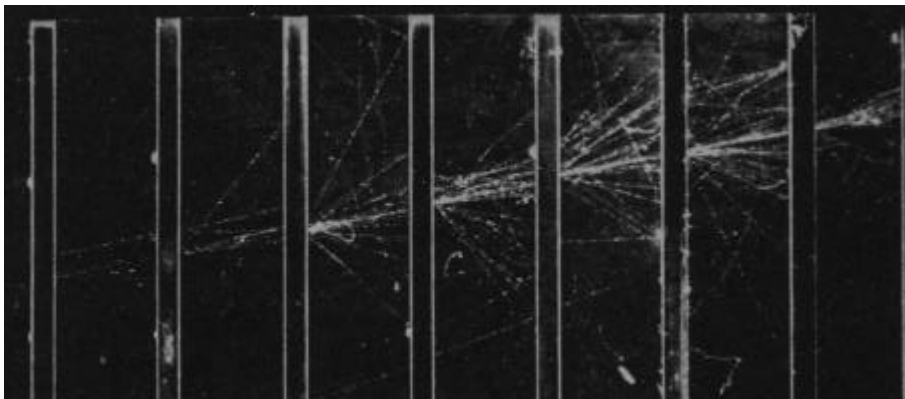




## Electromagnetic cascades



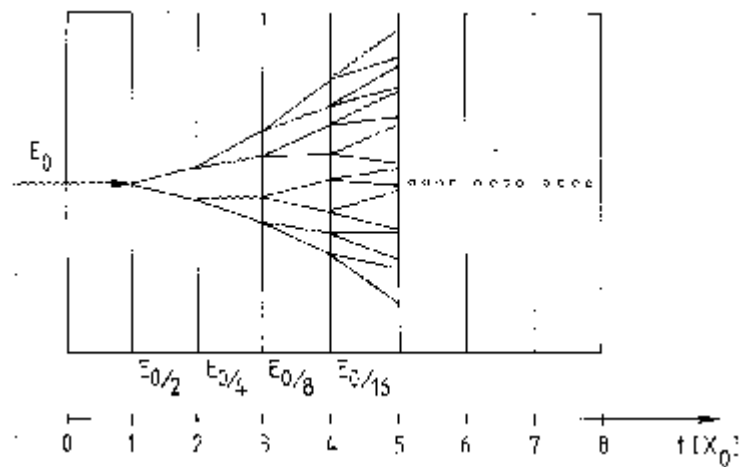
### Electromagnetic Cascades



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:

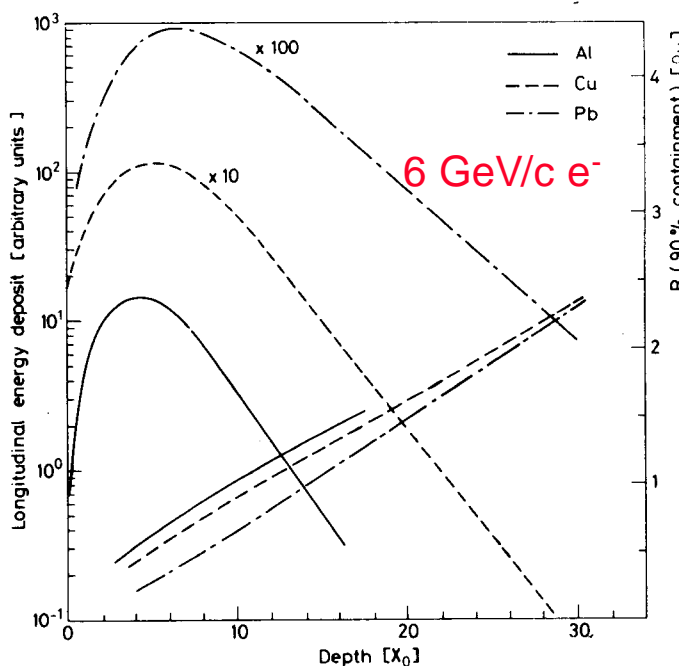
$$\frac{dE}{dt} \propto t^a e^{-t}$$

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

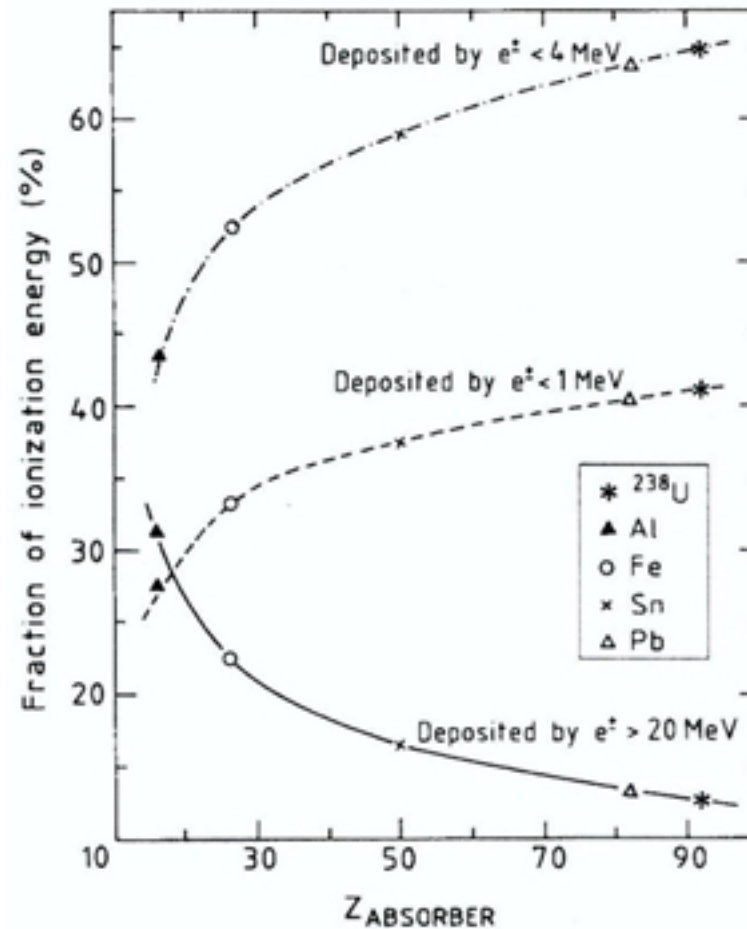
Example: lead glass  $R_M = 1.8 X_0 = 3.6$  cm (depends on glass type)

# 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:



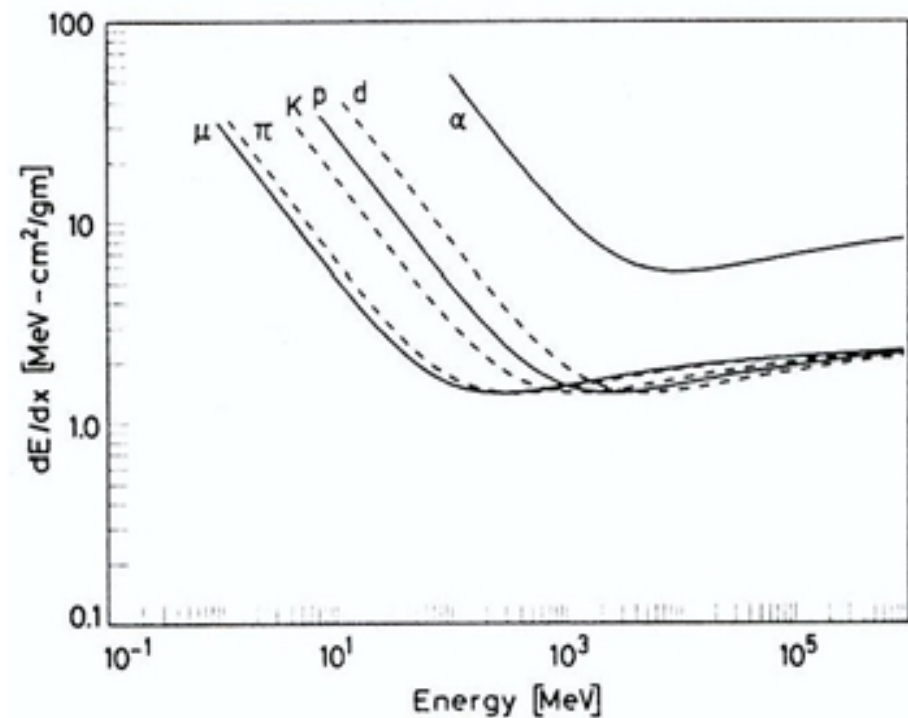
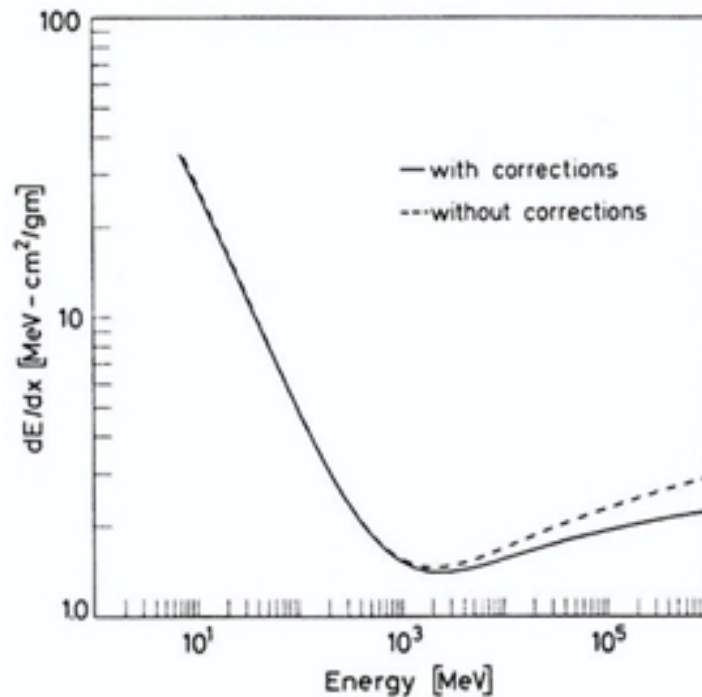
## Wechselwirkung von anderen Teilchen (ausser $e^+$ , $e^-$ , $\gamma$ ) in e.-m. Kalorimetern

1) Geladene Teilchen ( $p$ ,  $\bar{p}$ ,  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $\mu^\pm$ , ...)

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  $\text{H}_2\text{O}$ ): Energieverlust  $\approx 400\text{eV/cm}$   
(Ionisat.:  $2\text{MeV/cm}$ )

Spektrum  $\propto 1/\lambda^2$

### **Hadronische Wechselwirkungen**

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

↳ Geladenes Teilchen macht nur sehr selten eine hadronische WW

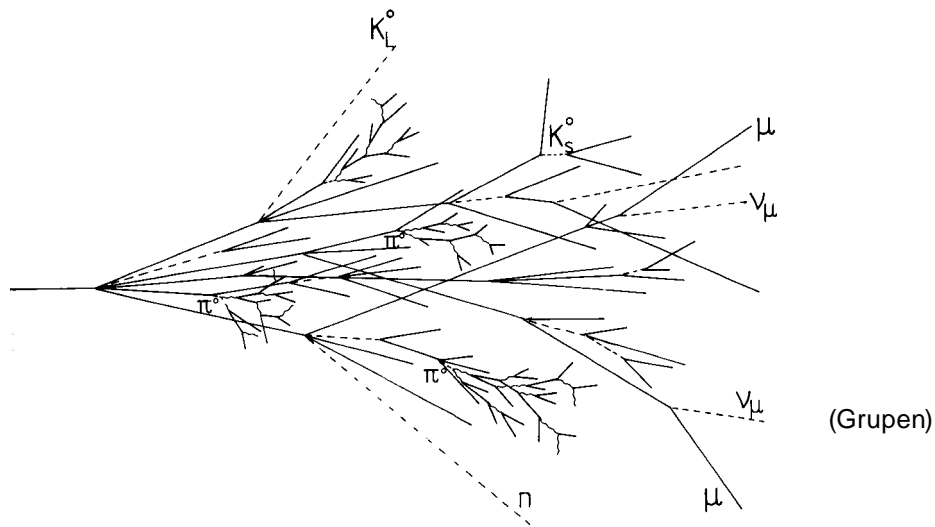


# Hadronic cascades



## 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  $\gamma$ 's  
 muons .... invisible energy



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

Large energy fluctuations

limited energy resolution

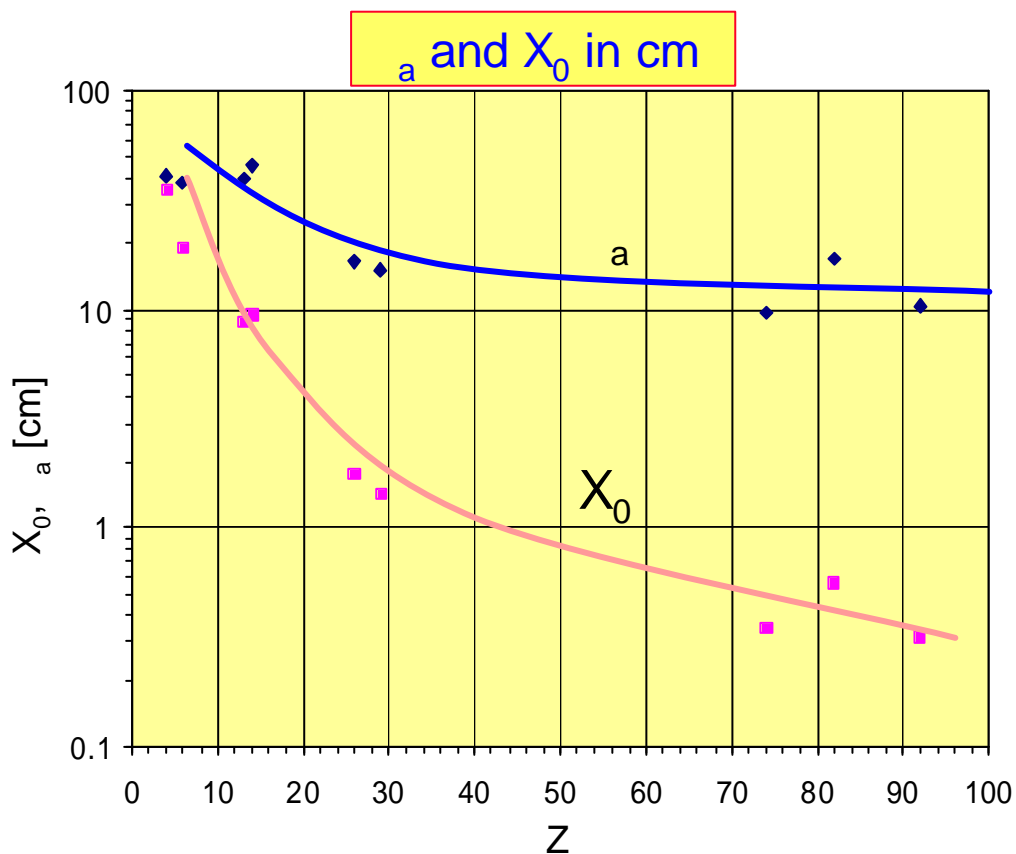


### I.2.1 Interaction of charged particles



Material	Z	A	[g/cm <sup>3</sup> ]	X <sub>0</sub> [g/cm <sup>2</sup> ]	a [g/cm <sup>2</sup> ]
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

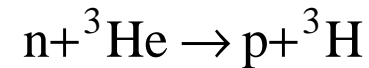
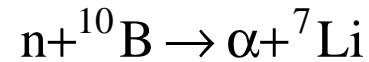
For Z > 6: a > X<sub>0</sub>



## 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