

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

8. Mai 2018 – VL 6

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



2. Experimentelle Methoden

2.1 Teilchenbeschleuniger

2.2 Wechselwirkung geladener Teilchen in Materie (Ionisation)

2.2.1 Sonderfall: Abbremsung von Elektronen und Positronen in Materie

2.2.2 Cerenkov- und Übergangsstrahlung

2.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

2.4 Wechselwirkung von Hadronen mit Materie

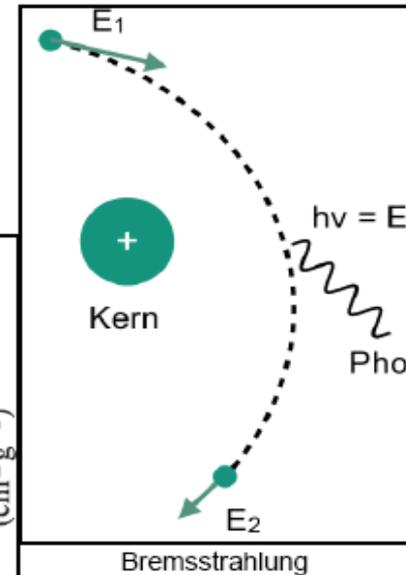
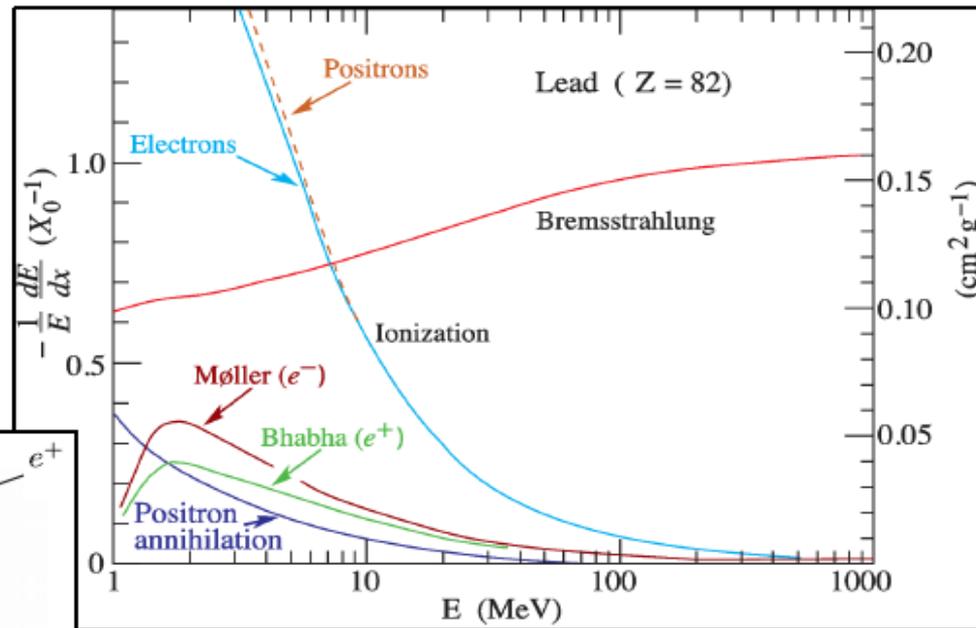
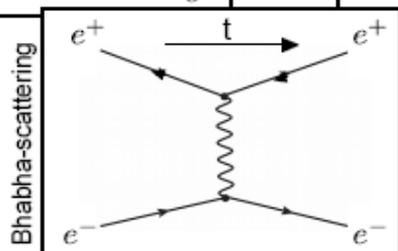
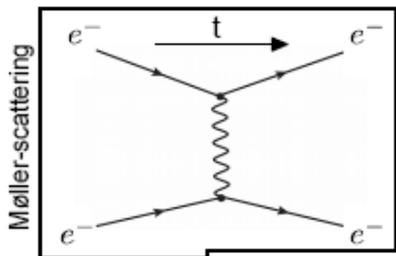
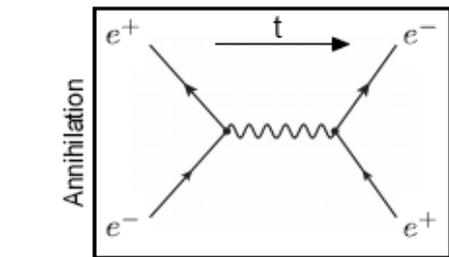
2.5 Teilchendetektoren

2.2.1 Sonderfall: Abbremsung von Elektronen und Positronen in Materie

- **Zusätzlich zur Ionisation:**

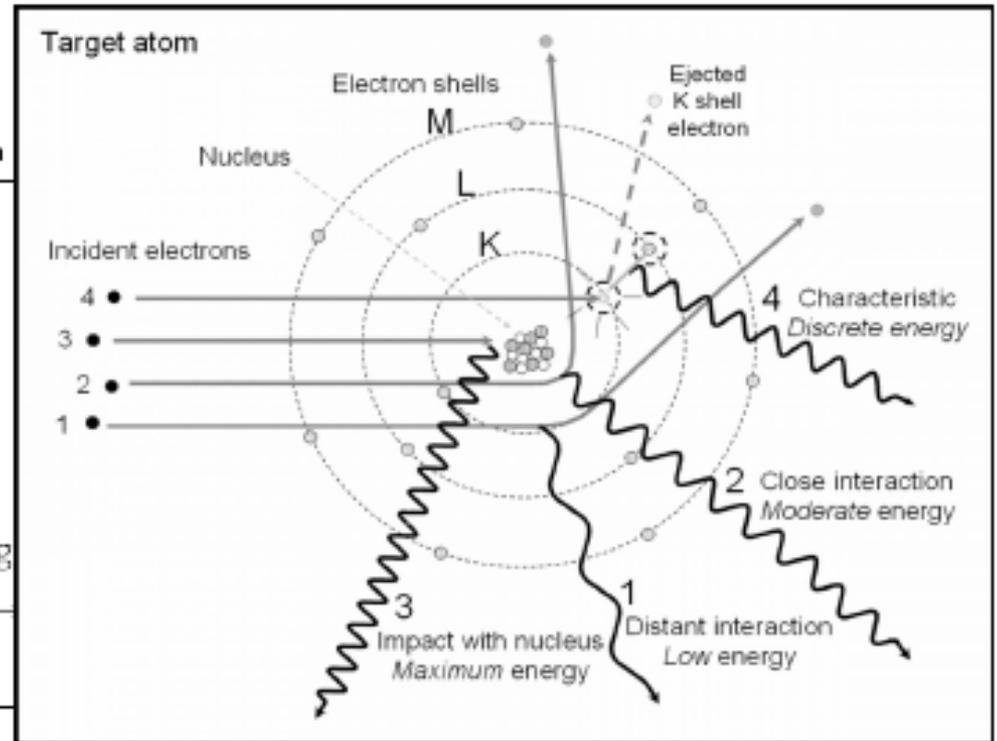
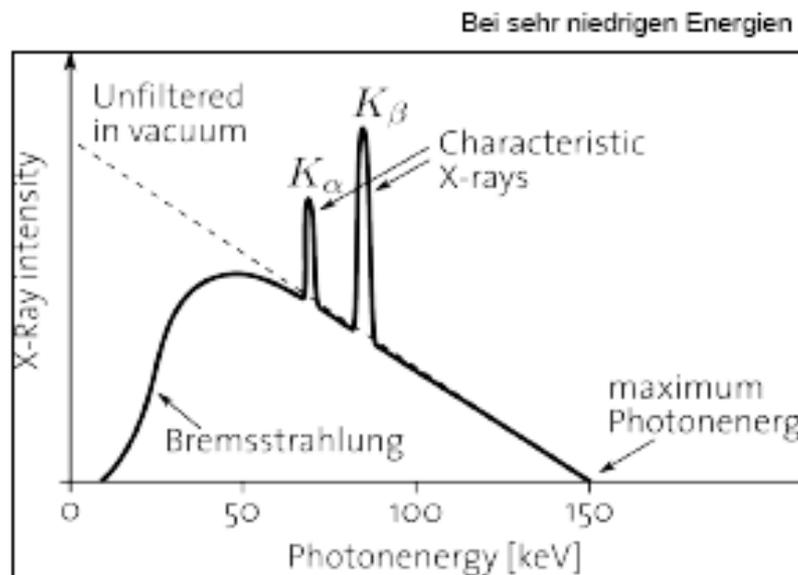
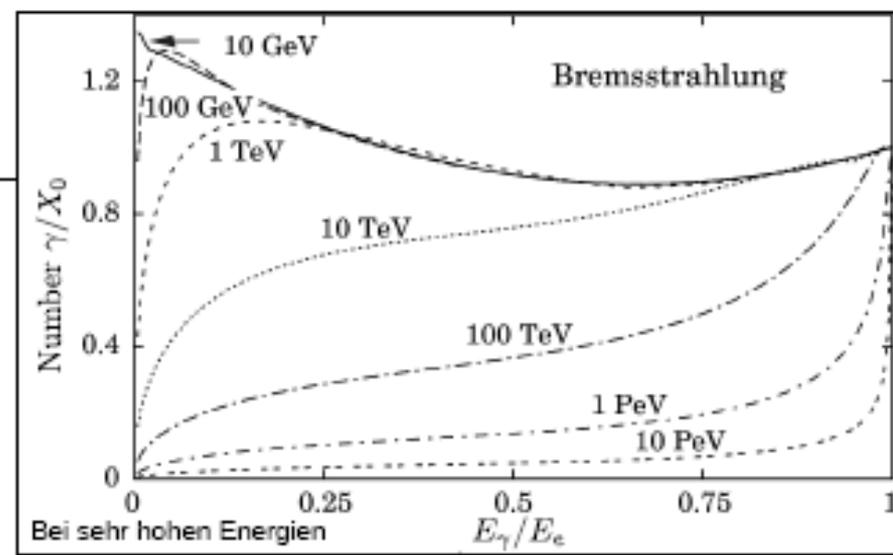
Niedrige Energien: $\xrightarrow{\hspace{10em}}$ Hohe Energien: $\xrightarrow{\hspace{10em}}$

- Møller-Streuung (\rightarrow für e^-)
- Bhabha-Streuung & Paarvernichtung (\rightarrow für e^+)
- **Bremsstrahlung** (\rightarrow beschleunigte Ladung)



Bremsstrahlungsspektrum

- Kontinuierlich bis zur maximalen Energie des Elektrons
- Zusätzlich charakteristische monoenergetische Linien durch Fluoreszenz des Detektormaterials



Strahlungslänge bei Bremsstrahlung

- **Mittlerer Energieverlust** durch Bremsstrahlung (für Materialien mit großem Z):

$$\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle_{\text{Brem}} = -4 \alpha r_e^2 N_A \frac{Z^2}{A} \cdot \ln \left(\frac{187}{Z^{1/3}} \right) \cdot E = -\frac{E}{X_0}$$

$$X_0 = \frac{1}{4 \alpha r_e^2 N_A \frac{Z^2}{A} \cdot \ln \left(\frac{187}{Z^{1/3}} \right)} \quad (\text{Strahlungslänge})$$

- Materialspezifische Größe, Einheiten: $[X_0] = \text{g/cm}^2$
- Nach Durchqueren einer Strahlungslänge in einem bestimmten Material ist die Energie eines hochenergetischen Elektrons im Mittel auf den Bruchteil $1/e$ (e : Eulersche Zahl) abgefallen
- $X_0 \propto \frac{1}{Z^2} \rightarrow$ kürzere Strahlungslänge für Absorber mit höherer Kernladungszahl

- Mittlerer Energieverlust durch Bremsstrahlung (für Materialien mit großem Z):

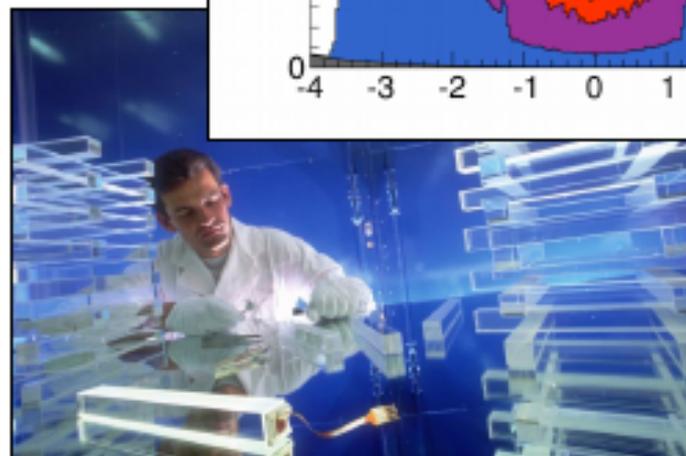
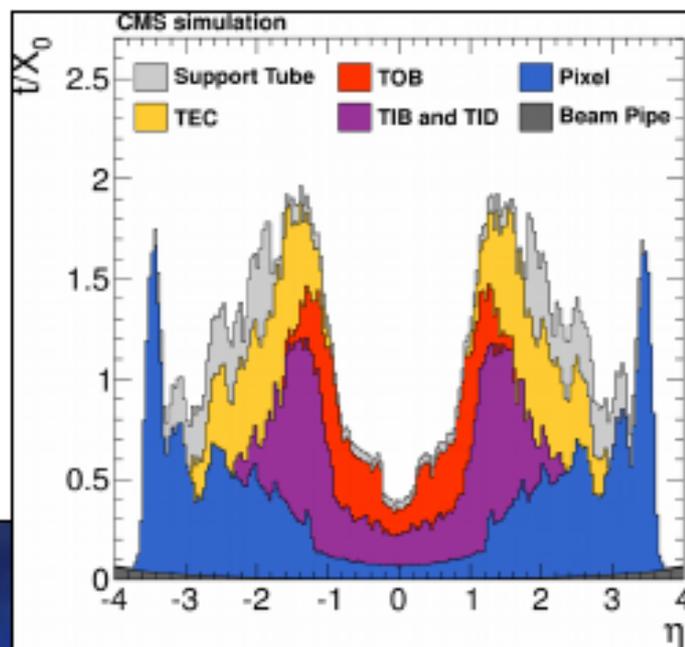
$$\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle_{\text{Brem}} = -4 \alpha r_e^2 N_A \frac{Z^2}{A} \cdot \ln \left(\frac{187}{Z^{1/3}} \right) \cdot E = -\frac{E}{X_0}$$

$$X_0 = \frac{1}{4 \alpha r_e^2 N_A \frac{Z^2}{A} \cdot \ln \left(\frac{187}{Z^{1/3}} \right)} \quad (\text{Strahlungslänge})$$

- Beispielwerte:

Material	X_0 in g/cm ²	X_0/ρ in cm
Si	21.82	9.37
LAr	19.55	14.00
Eisen	13.84	1.757
Blei	6.37	0.5612

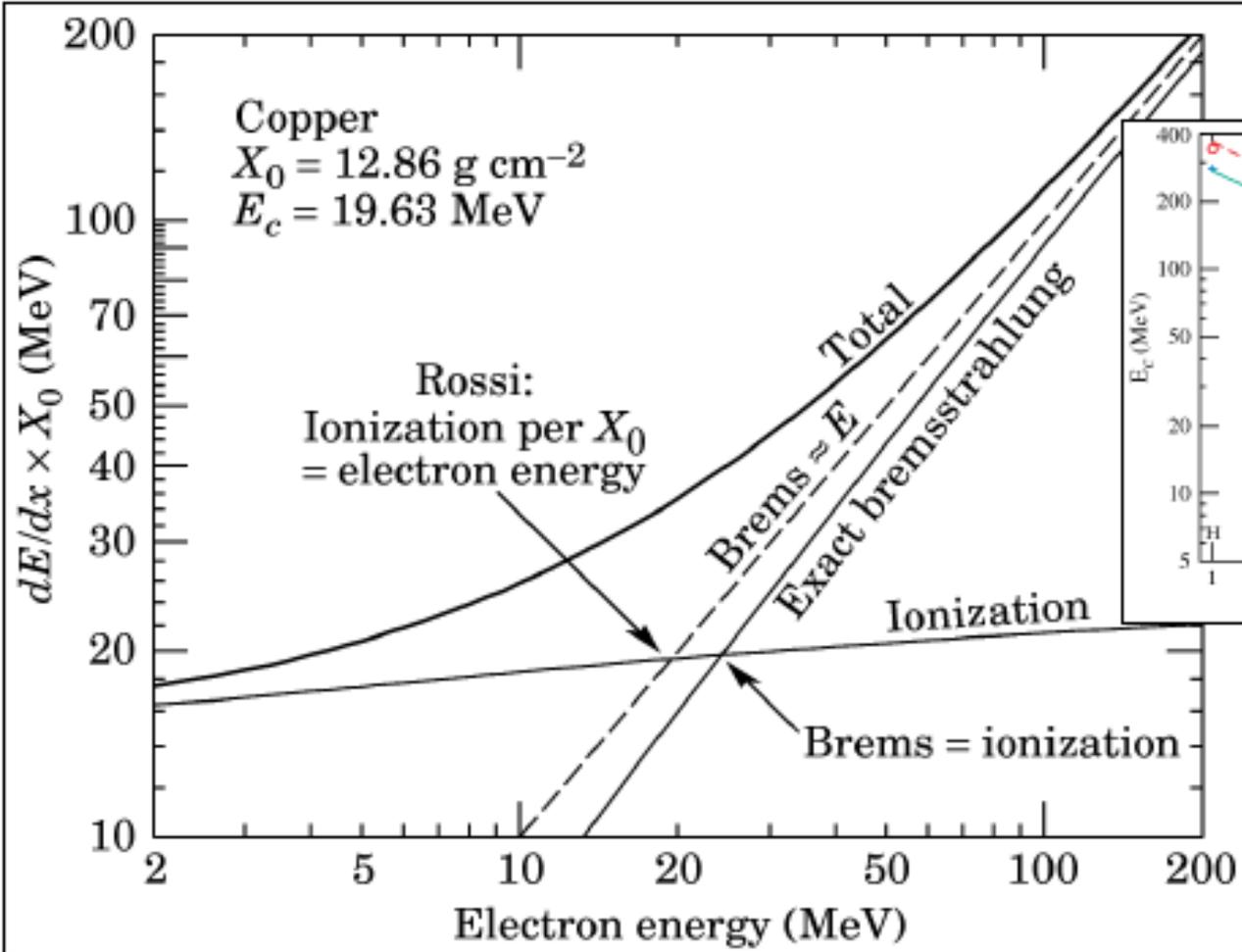
Materialbudget CMS Tracker:



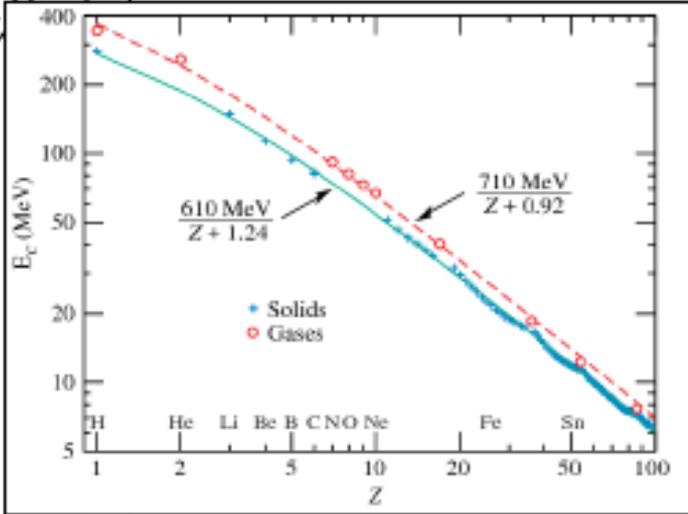
CMS em Kalorimeter (PbWO_4 , $x/X_0 = 28$)

Kritische Energie

- E_c : Energieverlust durch Ionisation = Energieverlust durch Bremsstrahlung
- Faustformel für Materialabhängigkeit von E_c in Festkörpern: $E_c \approx \frac{610 \text{ MeV}}{Z+1.24}$ (Festkörper)



$$E_c \approx \frac{710 \text{ MeV}}{Z+0.92} \text{ (Gase)}$$

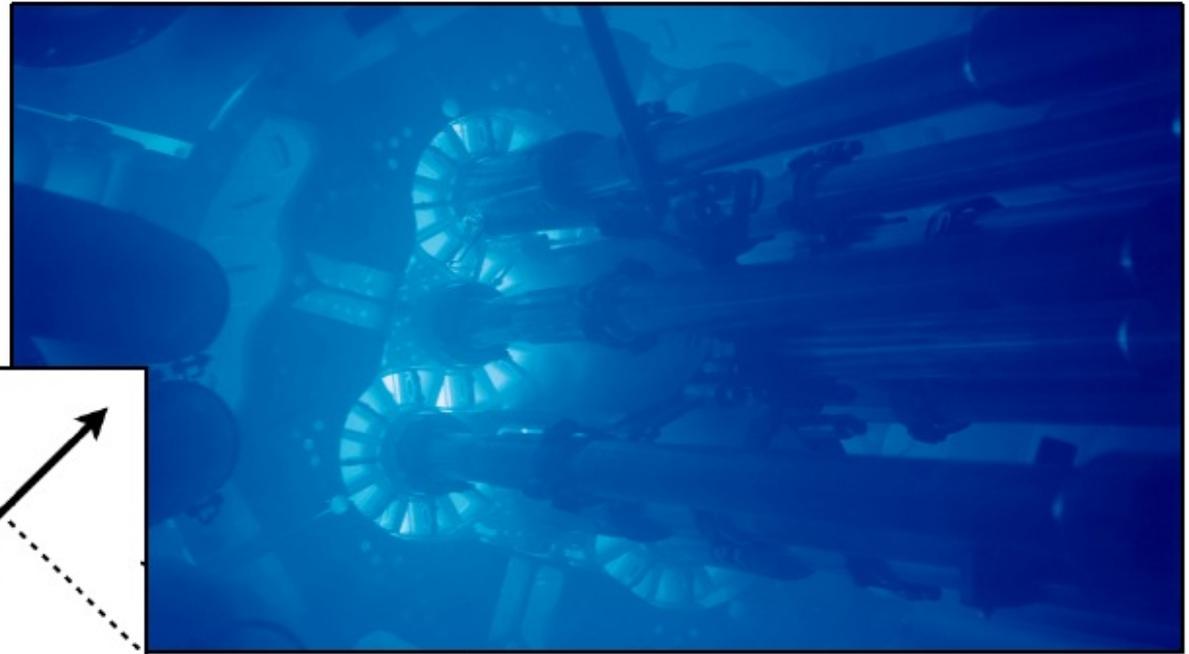
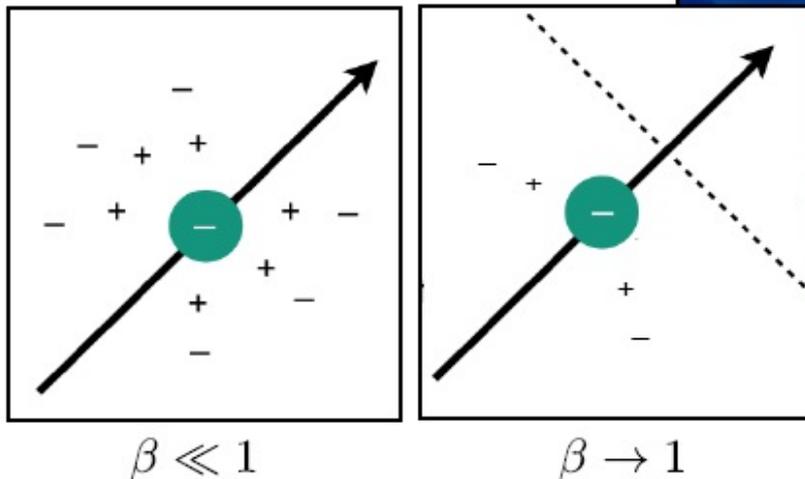


Genauere Werte
 i.a. [tabelliert](#)

2.2.2 Cherenkov- und Übergangsstrahlung

- Charakteristische Strahlung geladener Teilchen, wenn Geschwindigkeit größer als Lichtgeschwindigkeit in Medium (c/n , n : Brechungsindex) selbst OHNE Beschleunigung der Ladung
- Zuerst beobachtet von Pavel Cherenkov (1934), theoretische Erklärung von **Ilya Frank** und **Igor Tamm** (1937)

- Klassisches Bild:



(Schnelle geladene Teilchen in einem Kernreaktor)

Energiespektrum

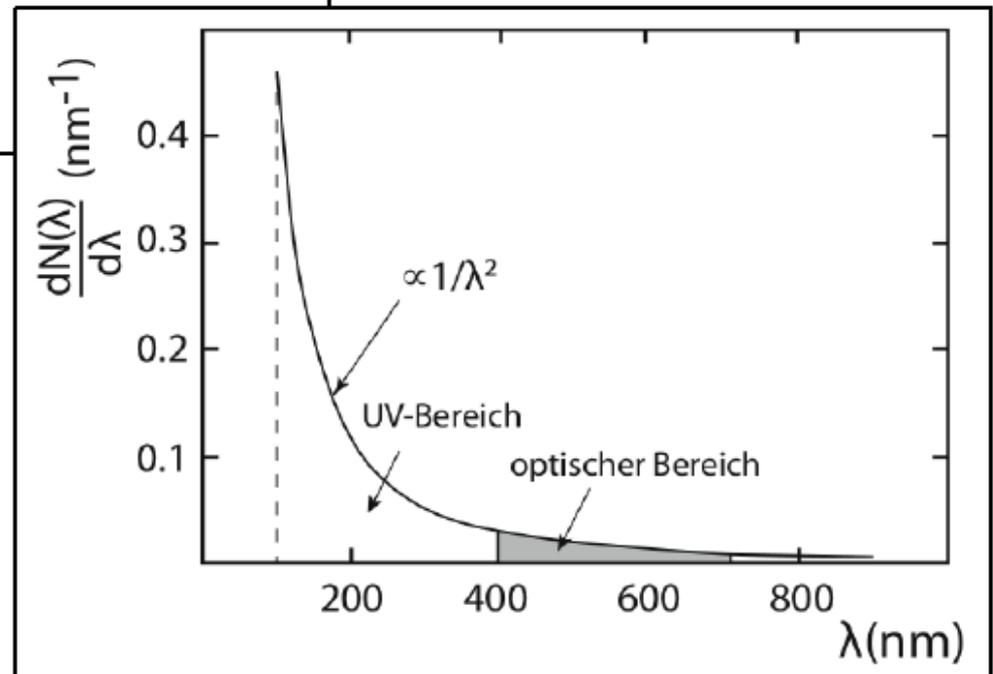
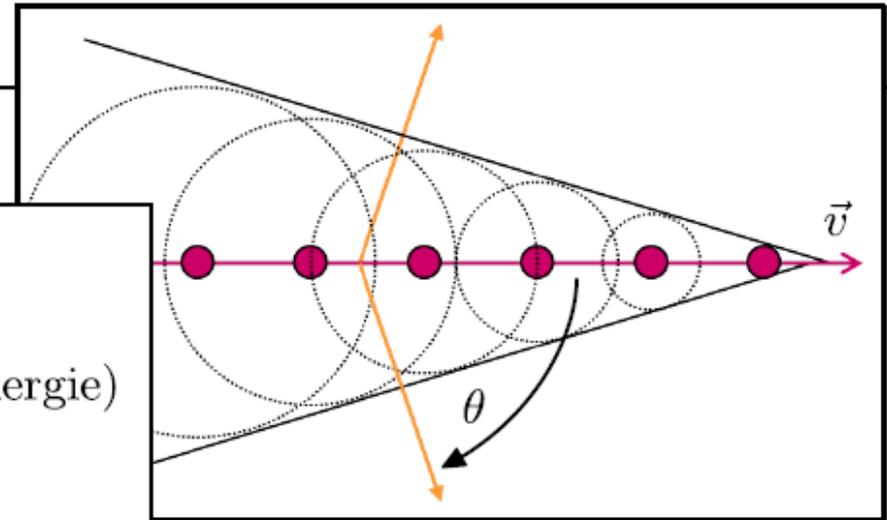
- Ermittelt aus Poynting-Vektor:

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} (\vec{E} \times \vec{H})$$

$$W = \int \vec{S} \cdot d\vec{f} dt \quad (\text{abgestrahlte Gesamtenergie})$$

$$\frac{d^2W}{dzd\omega} \stackrel{(*)}{=} \frac{e^2 z^2}{c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \cdot \omega$$

$$\frac{d^2N_\gamma}{dzdE_\gamma} \stackrel{(*)}{=} \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right)$$



(*) Anmerkung: bei diesen Gleichungen entspricht dz auf der linken Seite einem Wegelement und z auf der rechten Seite der Ladung des einfallenden Teilchens

Schwellenzähler:

Teilchen benötigt minimale Geschwindigkeit um Cherenkovstrahlung zu verursachen

Beispiel:

$$n(H_2O) = 1.33 \rightarrow \beta_{th} = \frac{1}{n} = 0.75$$

$$m(\pi) = 140 \text{ MeV}$$

Verursacht ein π^+ mit 1 GeV Cherenkovstrahlung in Wasser?

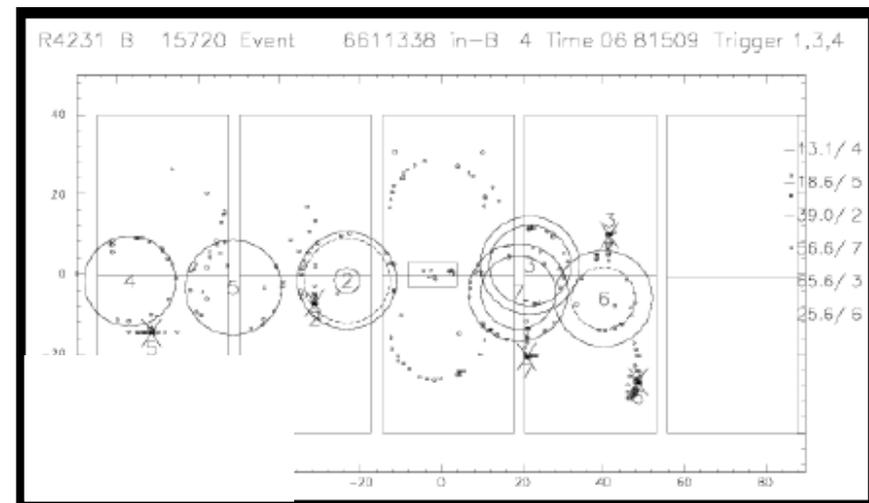
$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m^2}{p^2}}} = 0.99 \quad \checkmark$$

Wie sieht die Situation für ein Proton mit der Masse 1 GeV aus?

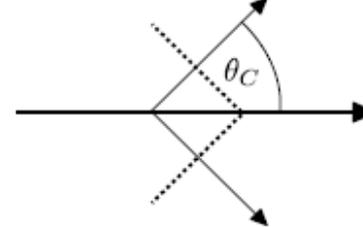
$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m^2}{p^2}}} = 0.71$$

Abbildung des Cherenkov-Kegels (engl. imaging counter):

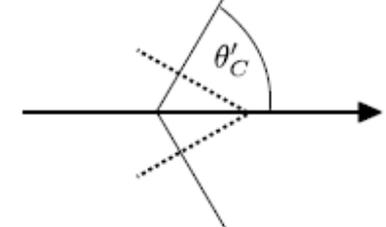
Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit aus Öffnungswinkel θ_C



Teilchen A:

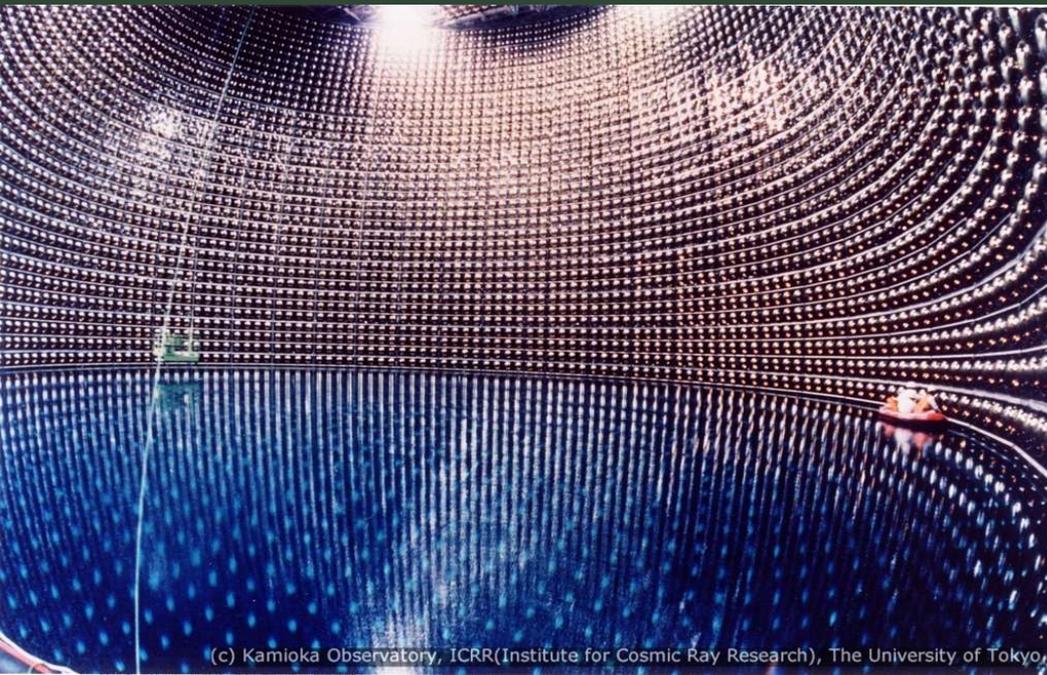
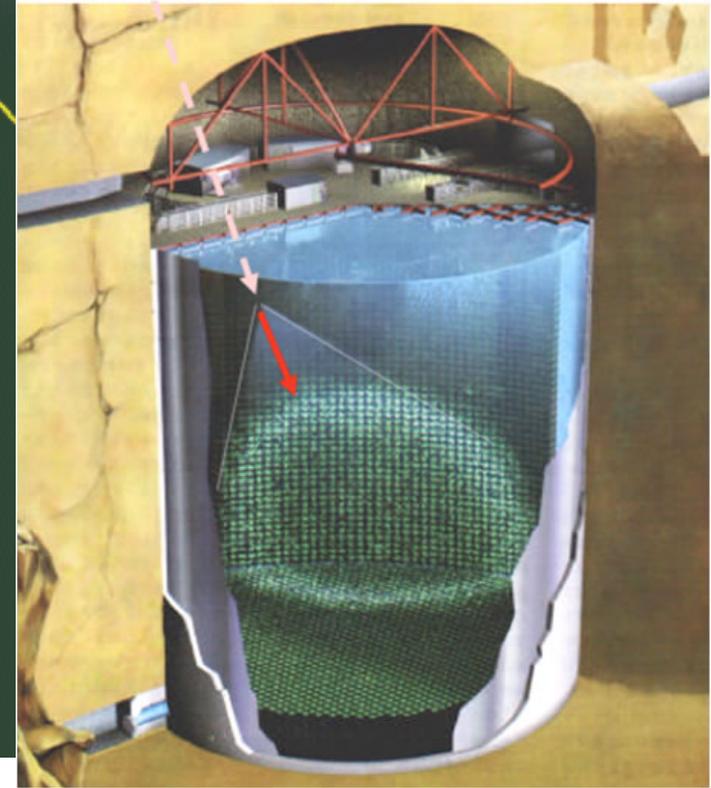
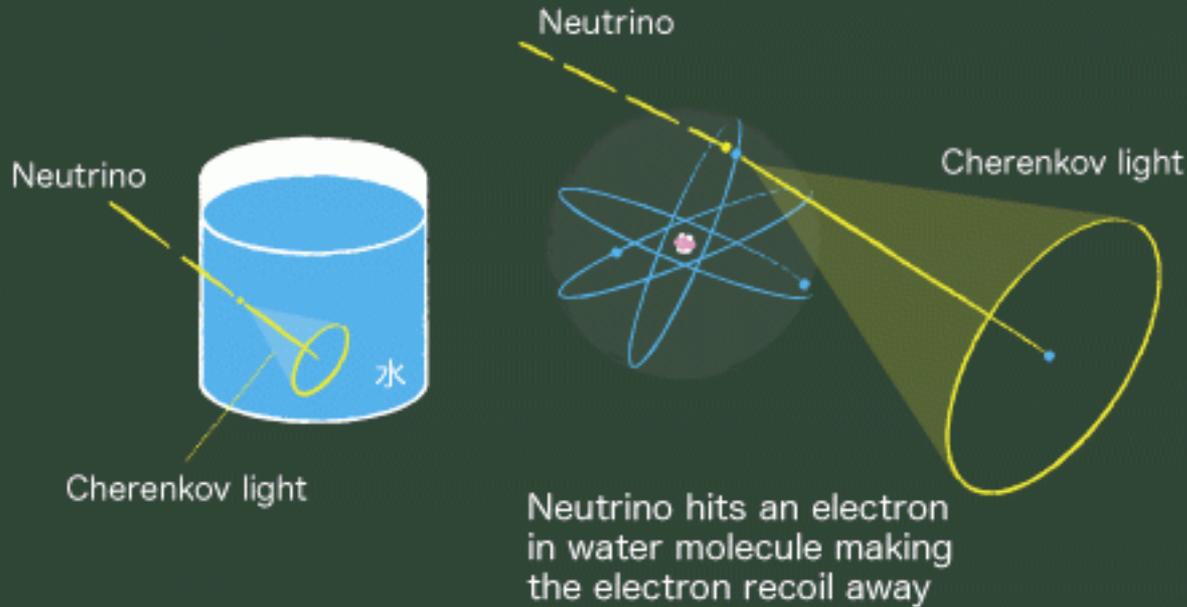


Teilchen B:



Welches Teilchen ist schneller, A oder B?

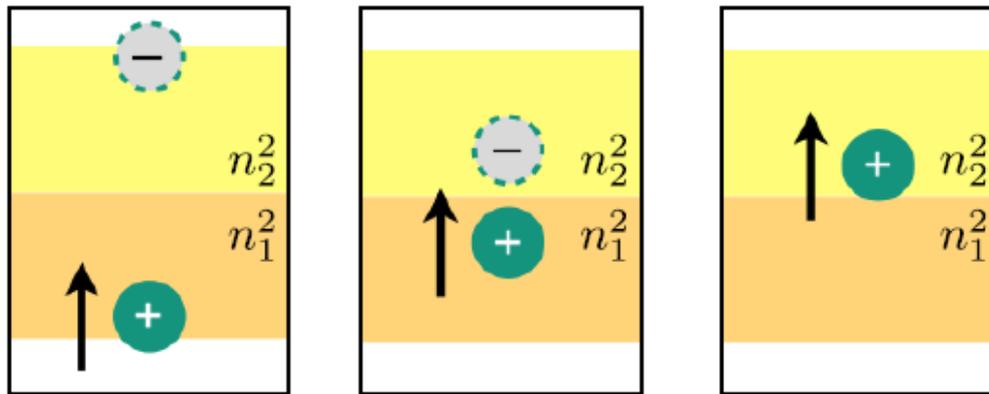
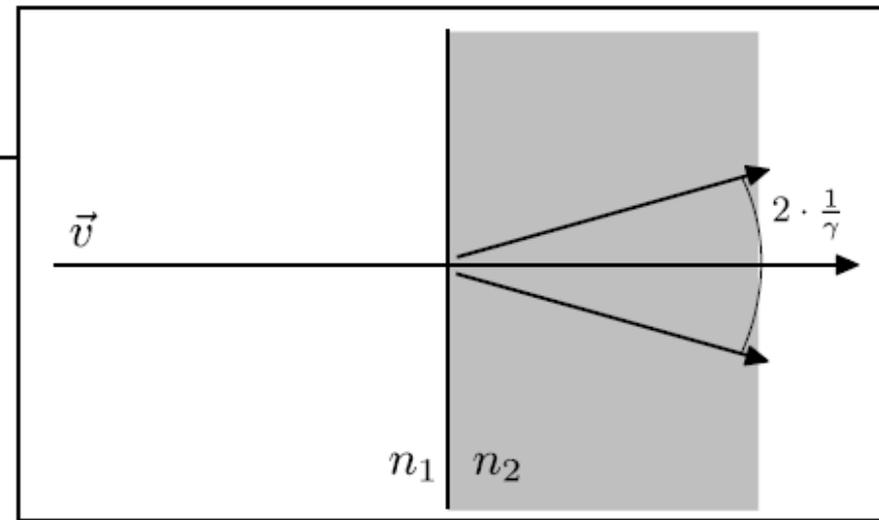
Super-Kamiokande experiment



Detektor:
50.000 t Ultra-pures Wasser
Tank 40m X 41m
11200 Photoröhren

Übergangsstrahlung

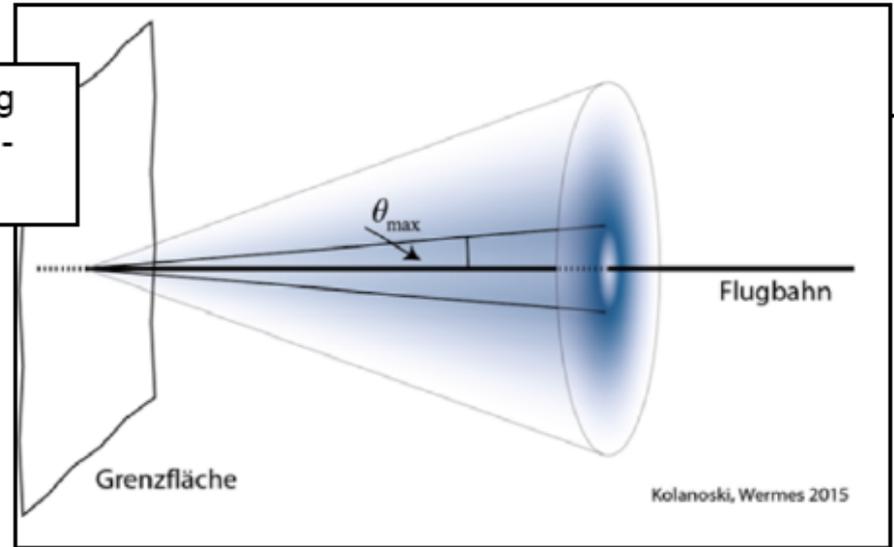
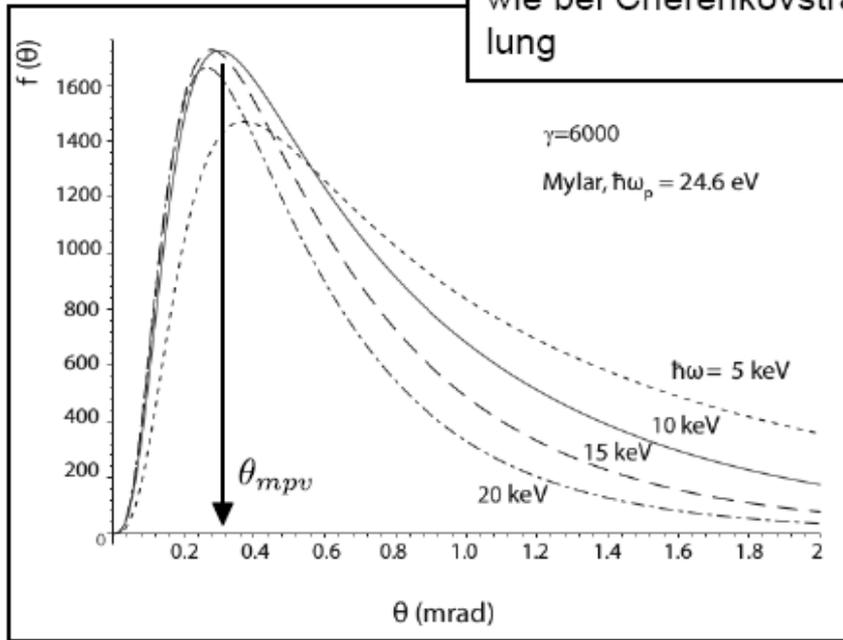
- Theoretische Erklärung durch **Ilya Frank** und **Vitaly Ginzburg**
- Analog zu Erklärung der Cherenkovstrahlung (aber mit anderen Randbedingungen!)
- **Lichtsignal an Grenzfläche**, bevorzugt in Forwärtsrichtung (zusätzlich zu eventueller Cherenkovstrahlung in Medium)
- Klassisches Bild: “Spiegelladungsmodell”



Abstrahlung eines zeitlich veränderlichen Dipols aus Ladung und Spiegelladung an Grenzfläche

Winkelspektrum

Keine scharfe Verteilung
wie bei Cherenkovstrahlung



- Wahrscheinlichster Winkel (“most probable value” – mpv) für die Abstrahlung:

$$\theta_{mpv} \approx \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} + \left(\frac{\omega_{p,1}}{\omega}\right)^2} \approx \frac{1}{\gamma} \quad (\text{für } \omega_{p,2} \gg \omega_{p,1})$$

$$\Delta\theta_{rms} \approx \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} + \left(\frac{\omega_{p,2}}{\omega}\right)^2} \quad \omega_{p,i}^2 = \frac{e^2 \rho_e}{m_{e,i}^2} \text{ Plasmafrequenz}$$

Übergangsstrahlungsdetektoren (engl. transition radiation detector TRD):

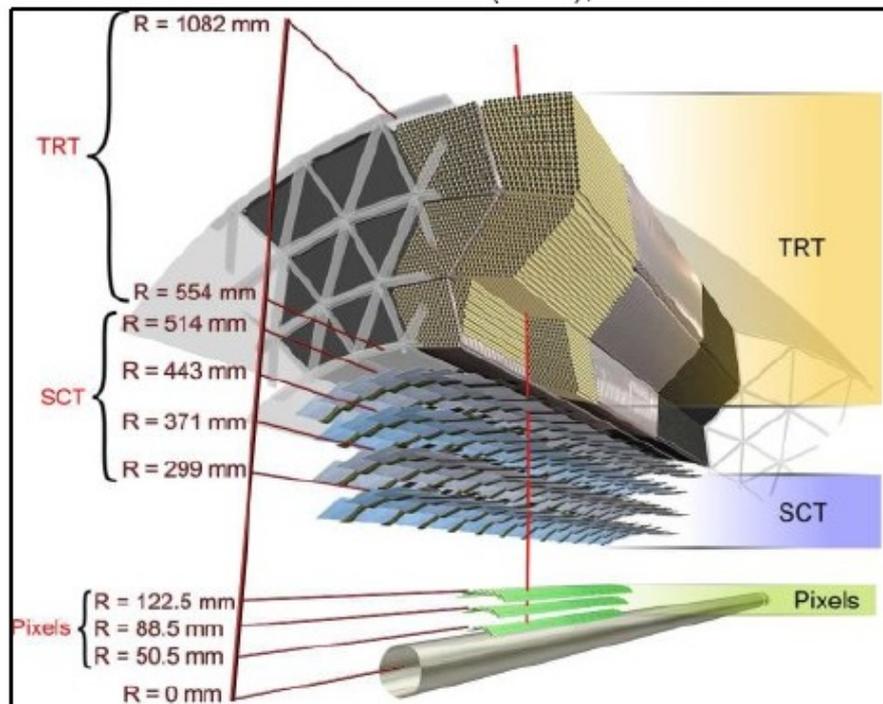
Lichtgewinn aus vielen Übergängen (dünne Folien).

Aus Kenntnis von Impuls p und $\gamma \rightarrow$ bestimme Teilchenart.

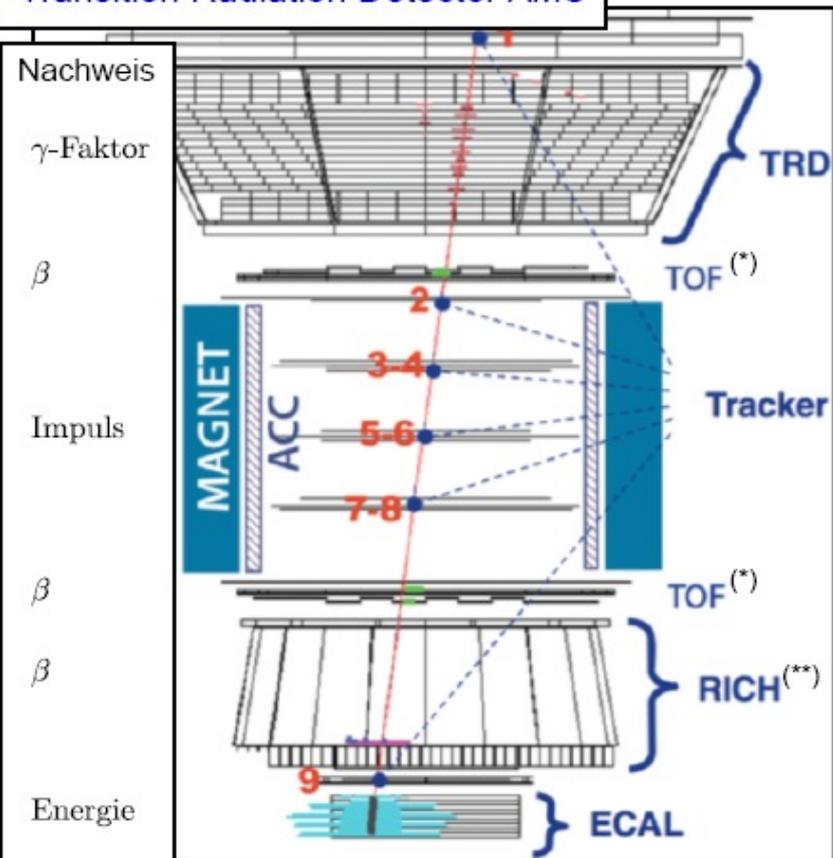


Transition Radiation Detector AMS

Transition Radiation Tracker (TRT), ATLAS



(*) TOF = Time of flight (**) RICH = Ring Imaging Cherenkov Counter



2.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

- **Photoelektrischer Effekt ($\sigma_{p.e.}$):**

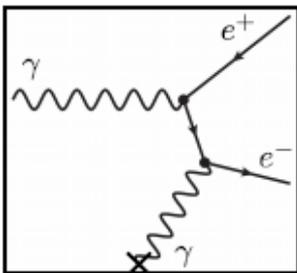
Photon schlägt Elektron aus
Atomhülle aus

- **Compton-Streuung (σ_{Compton}):**

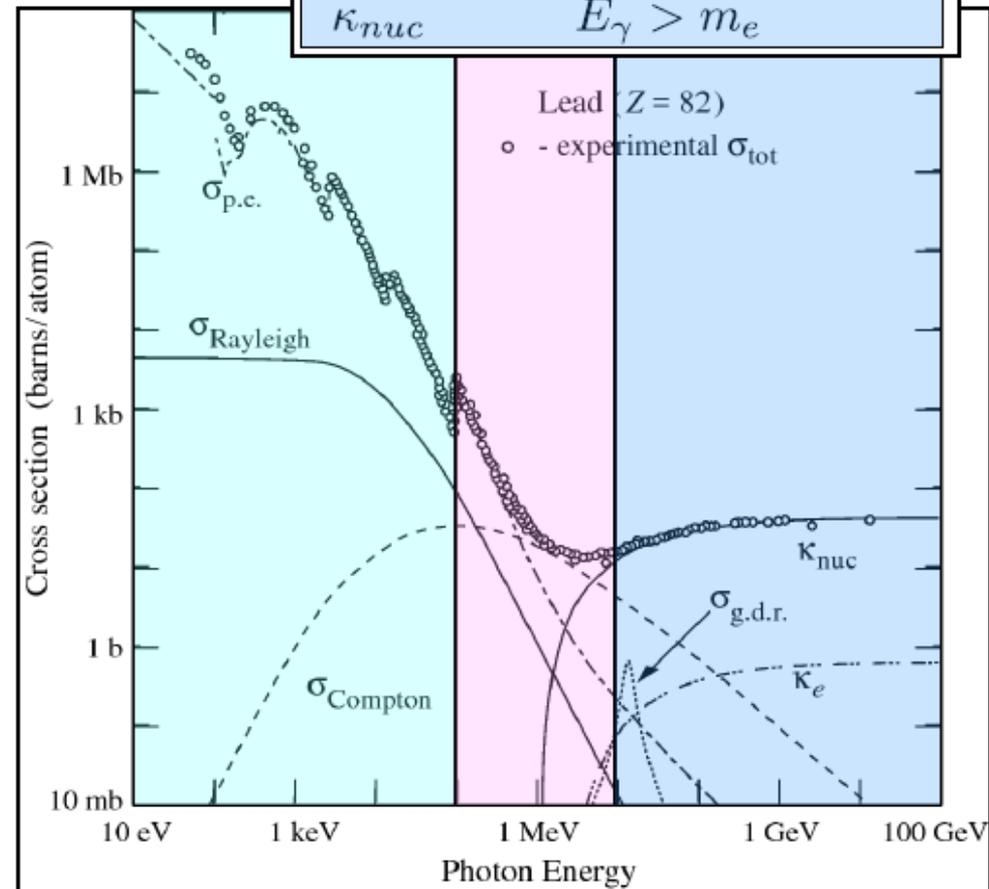
Inelastische Streuung an quasi-freiem
Elektron in Atomhülle

- **Paarproduktion in Kernfeld (κ_{nuc}):**

Elektron-Positron-Paar aus Photon
(s-Kanal Prozess)



Prozess	Energiebereich
$\sigma_{p.e.}$	$E_\gamma < 1 \text{ MeV}$
σ_{Compton}	$E_\gamma = \mathcal{O}(1 \text{ MeV})$
κ_{nuc}	$E_\gamma > m_e$



Photoelektrischer Effekt

- **Photoelektrischer Effekt ($\sigma_{p.e.}$):**

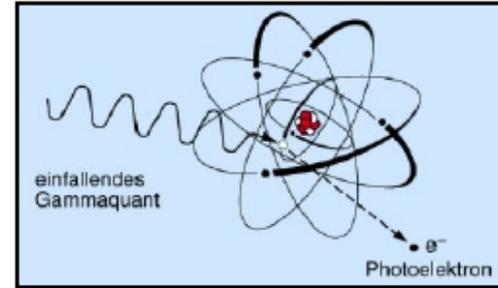
Photon schlägt Elektron aus Atomhülle aus

- **Compton-Streuung (σ_{Compton}):**

Inelastische Streuung an quasi-freiem Elektron in Atomhülle

- **Paarproduktion in Kernfeld (κ_{nuc}):**

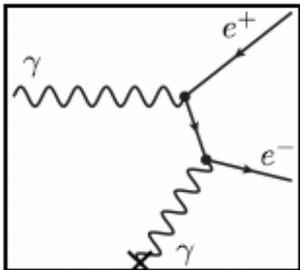
Elektron-Positron-Paar aus Photon (s-Kanal Prozess)



$$\sigma_{p.e.} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 Z^5 \alpha^4 \left(\frac{E_\gamma}{m_e c^2} \right)^\delta$$

$$\delta = \begin{cases} 3.5 & \text{falls } \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \ll 1 \\ 1 & \text{falls } \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \gg 1 \end{cases}$$

- Charakteristische Absorptionskanten
- Beachte starke Abhängigkeit von Kernladungszahl Z



Compton-Streuung

- **Photoelektrischer Effekt ($\sigma_{p.e.}$):**

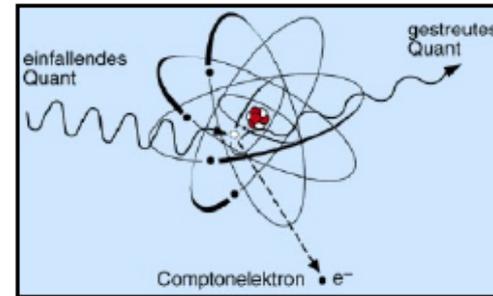
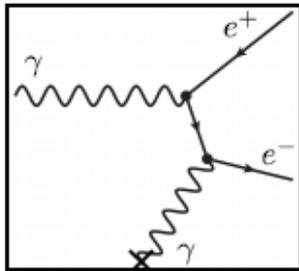
Photon schlägt Elektron aus
Atomhülle aus

- **Compton-Streuung (σ_{Compton}):**

Inelastische Streuung an quasi-freiem
Elektron in Atomhülle

- **Paarproduktion in Kernfeld (κ_{nuc}):**

Elektron-Positron-Paar aus Photon
(s-Kanal Prozess)



$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

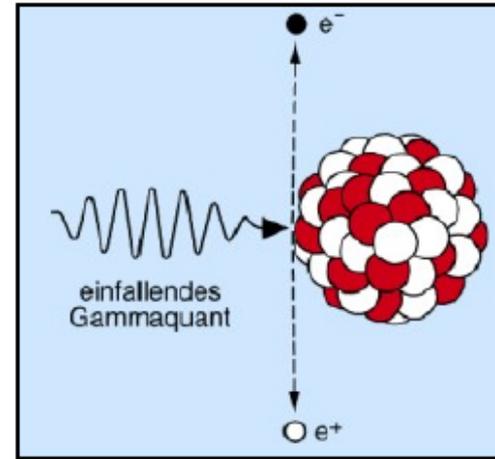
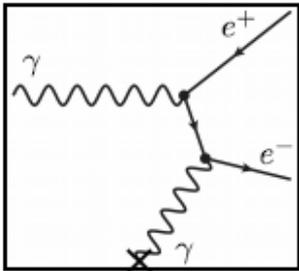
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

- Kontinuierliches Energiespektrum mit **Compton-Kante** (bei Rückstreuung) und Photopeak

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Compton}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{m_e^2} \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \cdot \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} + \frac{E_\gamma}{E'_\gamma} - \sin \theta \right)$$

Paarbildung

- **Photoelektrischer Effekt ($\sigma_{p.e.}$):**
Photon schlägt Elektron aus
Atomhülle aus
- **Compton-Streuung (σ_{Compton}):**
Inelastische Streuung an quasi-freiem
Elektron in Atomhülle
- **Paarproduktion in Kernfeld (κ_{nuc}):**
Elektron-Positron-Paar aus Photon
(s-Kanal Prozess)



- Erzeugung eines reellen e^+e^- -Paares (\rightarrow kin. Schwelleneffekt)
- Nur in äußerem em. Feld möglich

$$\sigma_{\text{Paar}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{54} \right]$$

- Exakte Berechnung im Rahmen der QED: Bethe, Heitler (1934)

Absorption von Photonen in Materie (I)

- Intensitätsverlust eines Photonenstrahls aufgrund von Absorption in Materie

$$I(X) = I_0 e^{-\mu X}$$

μ : Absorptionskoeffizient

$\frac{1}{\mu}$: mittlere freie Weglänge

(Lambert-Beersches Gesetz)

- Mittlere freie Weglänge proportional zu totalem Wirkungsquerschnitt (σ_{tot})

$$dp_{abs} = \eta \cdot \sigma_{tot} \cdot dx$$

p_{abs} : Wahrscheinlichkeitsdichte für Absorption

η : Teilchendichte des Mediums

dx : Wegstrecke in Medium

Absorption von Photonen in Materie (II)

- Differential-Gleichung für Fluß einfallender Teilchen (= Photonenintensität I)

$$dI = -I \eta \sigma_{tot} dx = -I \rho \frac{N_A}{A} \sigma_{tot} dx = -I \frac{N_A}{A} \sigma_{tot} dX$$

$$\frac{dI}{I} = -I \frac{N_A}{A} \sigma_{tot} dX$$

$$\ln \left(\frac{I(X)}{I_0} \right) = -\frac{N_A}{A} \sigma_{tot} X$$

$$I(X) = I_0 \cdot e^{-\frac{N_A}{A} \sigma_{tot} X} = I_0 \cdot e^{-\mu X}$$

- Erwartungswert von X :

$$\langle X \rangle = \frac{\int X e^{-\mu X} dX}{\int e^{-\mu X} dX} = \frac{-\partial_{\mu} \int e^{-\mu X} dX}{\int e^{-\mu X} dX} = \frac{-\partial_{\mu} \left(-\frac{1}{\mu} \right)}{-\frac{1}{\mu}} = \frac{1}{\mu} \quad (\text{mittlere freie Weglänge})$$

Absorption aufgrund von Paarbildung (*)

(*) Einziger relevanter Prozess bei Photonen mit GeV-Energien (s. Folie 16)

- Totaler Wirkungsquerschnitt für Paarproduktion (s. Folie 19)

$$\sigma_{tot} \equiv \sigma_{\text{Paar}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{54} \right]$$

$$I(X) = I_0 \cdot e^{-\frac{N_A}{A} \sigma_{tot} X} = I_0 \cdot e^{-\mu X}$$

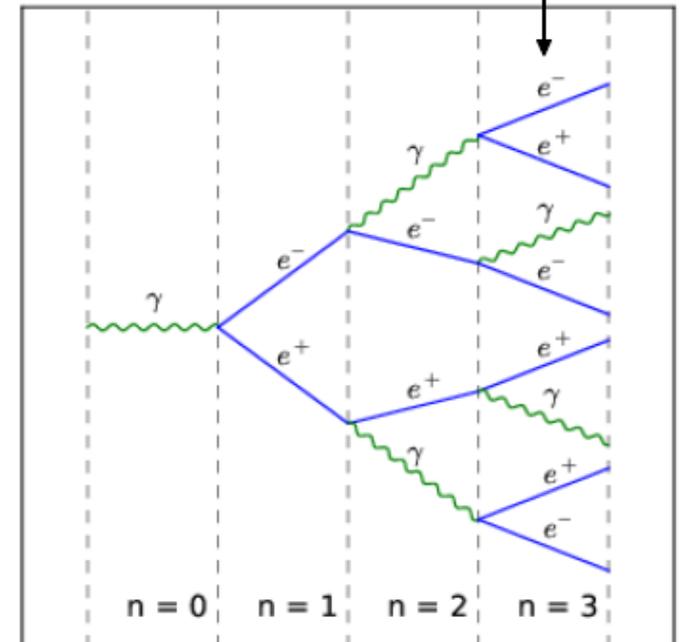
$$\mu_{\text{Paar}} = 4\alpha r_e^2 N_A \frac{Z^2}{A} \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{187}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{54} \right] \approx \frac{7}{9} \frac{1}{X_0} \quad (\text{Vergleiche mit Folie 3})$$

- **Stahlunglänge** X_0 charakteristisch sowohl für Bremsstrahlung also auch für Paarbildung:
 - Elektronen-Energie aufgrund von Bremsstrahlung auf Anteil $1/e$ abgefallen
 - Intensität Photonstrahl auf Anteil $e^{-7/9} = 0.46$ abgefallen

Einfaches Schauermodell (nach W. Heitler, 1954)

- Prozesse: **Paarbildung & Bremsstrahlung**
- Energie teilt sich gleichmäßig auf alle Teilchen im Schauer auf $E_N = \frac{E_0}{N}$
- Abbruch der Kaskade nach Erreichen der kritischen Energie $E_{N_{max}} = E_c$
- Nach n Generationen:
 - Schauerlänge $X_n = n \cdot X_0 \ln 2$
 - Teilchenzahl $N = 2^n = e^{\frac{X_n}{X_0}}$
- Schauermaximum bei Erreichen von E_c
 - Maximale Anzahl an Teilchen $N_{max} = E_0/E_c$
 - Zahl der Generationen $n_{max} = \ln(E_0/E_c) / \ln 2$

“Initial photon” oder “initial electron” nicht mehr unterscheidbar



2.4 Wechselwirkung von Hadronen mit Materie

Elektromagnetische Teilchen \leftrightarrow Hadronen

- **Hadron** (altgr.: hadros = dick, stark):
 - Sammelbegriff für zusammengesetzte Teilchen, die an starker WW teilnehmen.

Mesonen:

- Ganzzahliger Spin (\rightarrow Bosonen)
- Pionen, Kaonen, ...

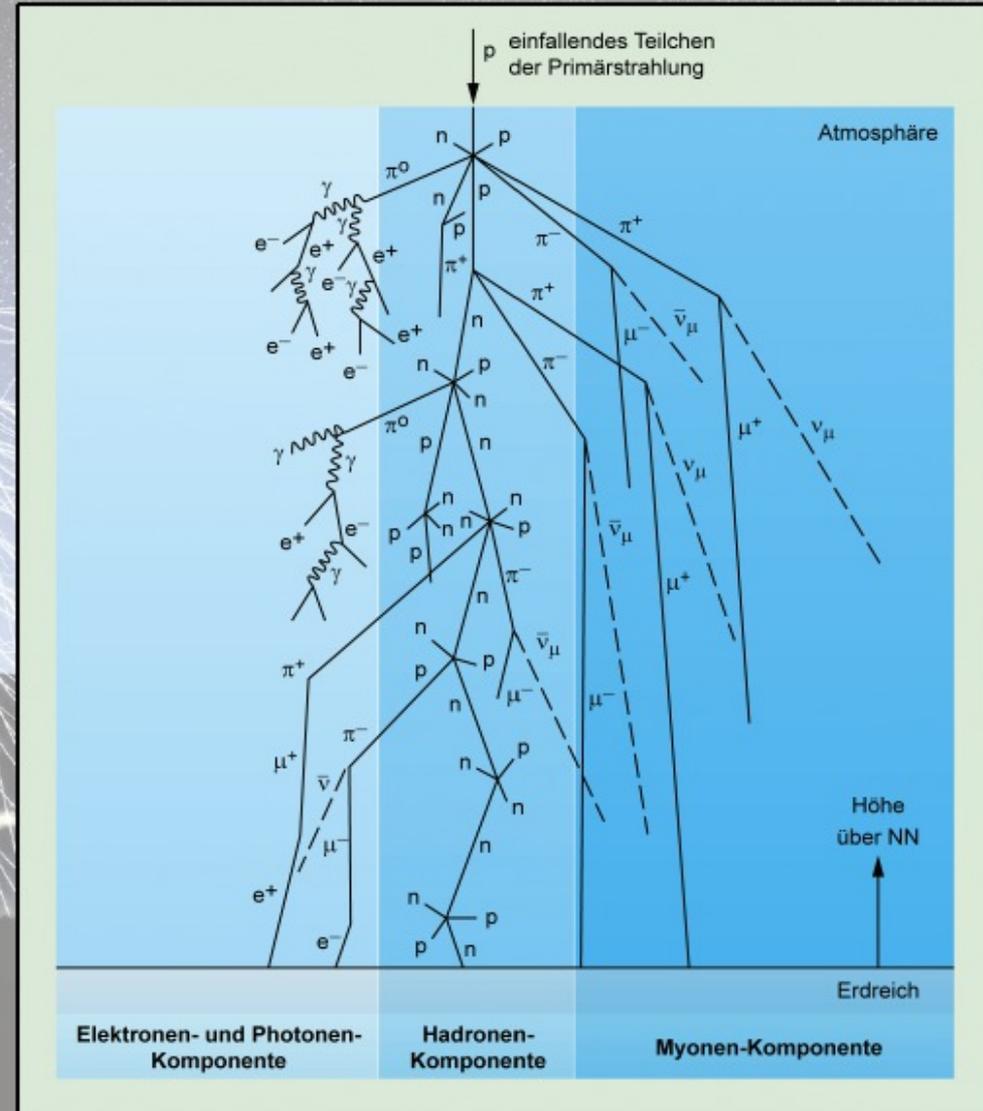
Baryonen:

- Halbzahliger Spin (\rightarrow Fermionen)
- Protonen, Neutronen, ...

- Zusätzlich zur elektromagnetischer WW starke WW \rightarrow **hadronische Schauer**.

Hadronischer Schauer

- **Prozesse** in hadronischen Schauern:
 - Kernanregung, Spallation, ...
 - Produktion sekundärer Hadronen (überwiegend Pionen π^+ , π^- , π^0)
 - Pion-Zerfälle: $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu + CC$,
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (\rightarrow induziert em Kaskade)
- **Anwendungen:**
 - Hadronische Kalorimeter in der Teilchenphysik
 - Luftschauerexperimente (\rightarrow Erdatmosphäre als "hadronisches Kalorimeter")



Hadronische Wechselwirkungslänge λ

- Charakteristische Längenskala:

$$I(X) = I_0^{-\frac{X}{\lambda}}$$

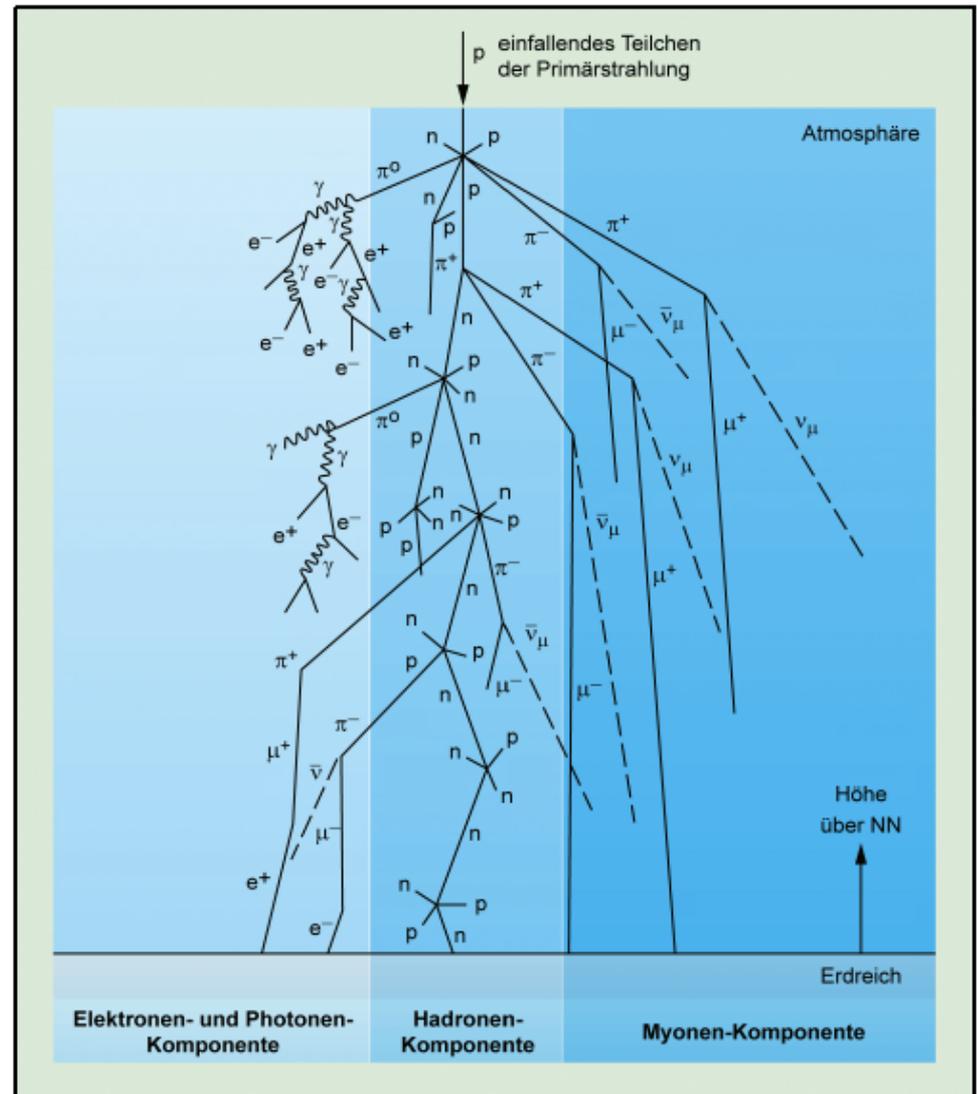
$$\lambda = \left(\sigma_{inel} \cdot \frac{N_A}{A} \right)^{-1}$$

σ_{inel} : inelastischer Wirkungsquerschnitt für Kernreaktionen

- Werte für λ tabelliert, z.B.:

Material	λ/ρ [cm]	X_0/ρ [cm]
Wasser	83.3	36.1
LAr	85.8	14.0
Fe	16.8	1.76
Pb	17.6	0.56

- Üblicherweise λ deutlich größer als X_0 und starke Fluktuationen um mittleren Wert von λ



Zusammenfassung: WW Teilchen mit Materie

- Übersicht über relevante Wechselwirkungen mit Materie:

	geladene Teilchen		Neutrale Hadronen
Photonen	Elektronen	Hadronen	
Paarbildung	Bremsstrahlung	Kernwechselwirkungen	
Compton			
Photoeffekt	Ionisation		
	Cherenkov- & Übergangsstrahlung		

- Charakterisiert durch Strahlungslänge (X_0) und Wechselwirkungslänge (λ)