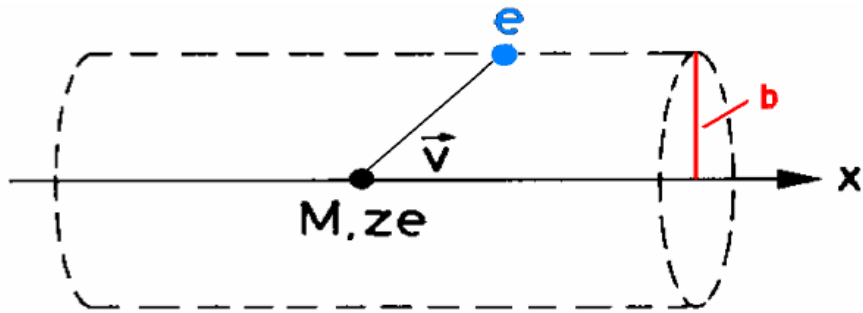


Abb. IV.1a Klassische Herleitung Bethe-Bloch



Energieübertrag:

$$\Delta E(b) = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2}$$

Energieübertrag im Intervall $[b, b+db]$:

$$-dE(b) = \Delta E(b) \cdot N_e \cdot dV = \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2} \cdot N_e \cdot 2\pi b db dx = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \frac{db}{b} dx$$

Impulsübertrag:

$$\Delta p = \int F dt = q \int E_{\perp} \frac{dt}{dx} dx = \frac{q}{v} \int E_{\perp} dx$$

$$\int_{\partial A} E_{\perp} dA = \int E_{\perp} \cdot 2\pi b dx = 4\pi z e \cdot$$

$$\rightarrow \int E_{\perp} dx = \frac{2ze}{b}$$

$$\Delta p = \frac{2ze^2}{bv}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \quad \text{Stoßparameter:} \quad b_{\min} = \frac{ze^2}{m_e v^2}; \quad b_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m_e I}} \frac{ze^2}{v}$$

Abb. IV.1b Energieverlust nach Bethe-Bloch

Energieverlust durch Ionisation (Bethe-Bloch)

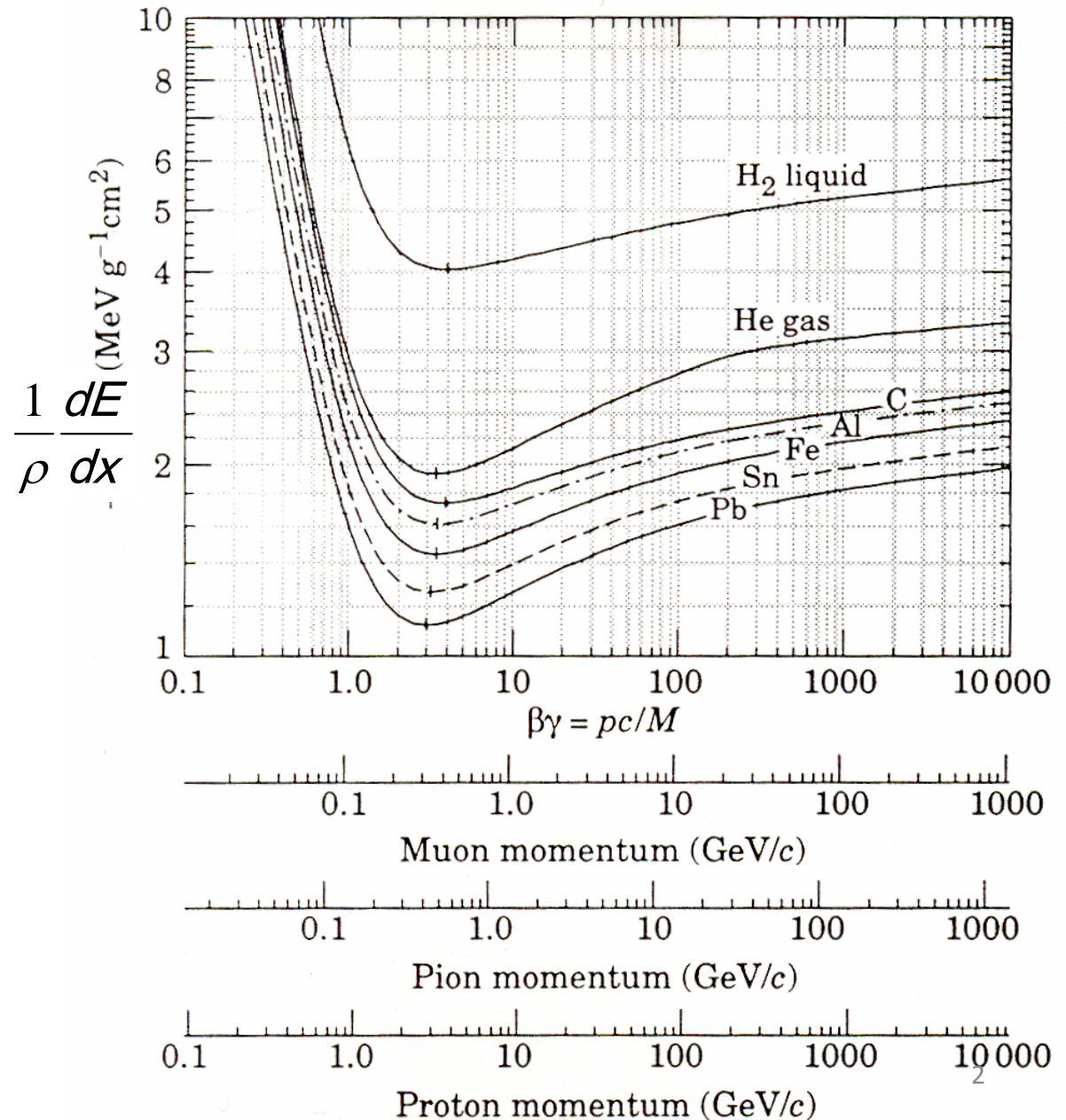


Abb. IV.2a Teilchenidentifikation

Kennt man den Impuls eines Teilchens so kann man den spezifischen Energieverlust zur Identifikation eines Teilchens benutzen

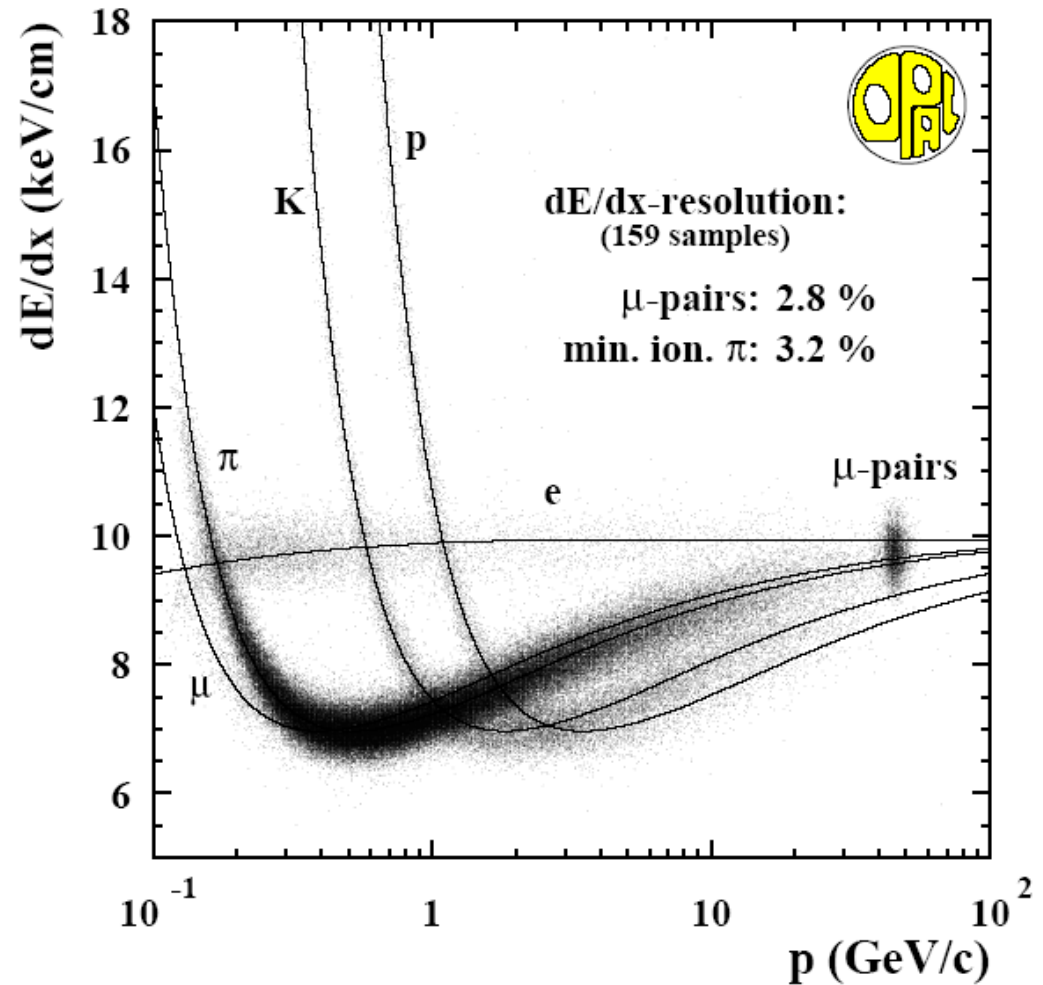
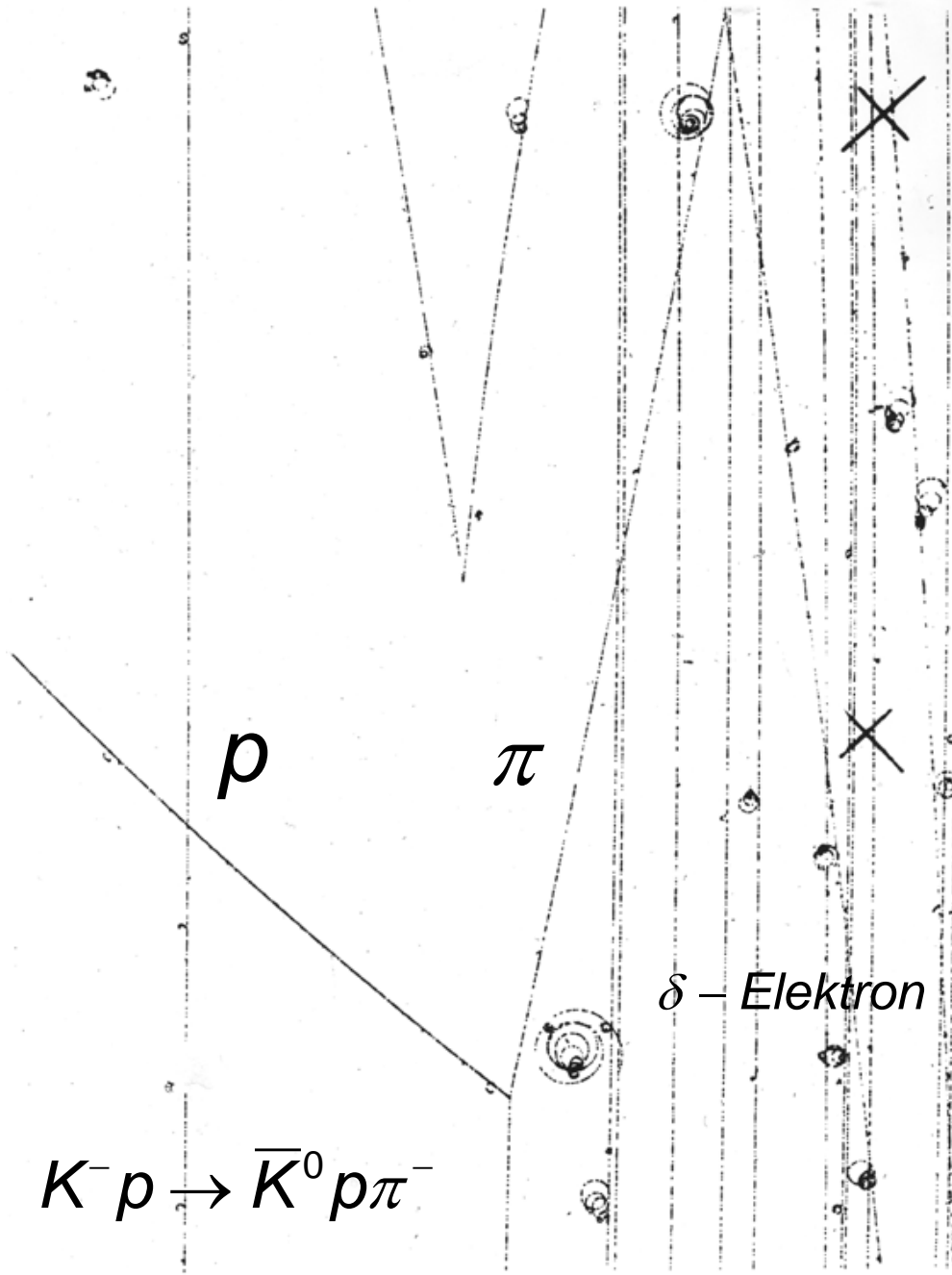
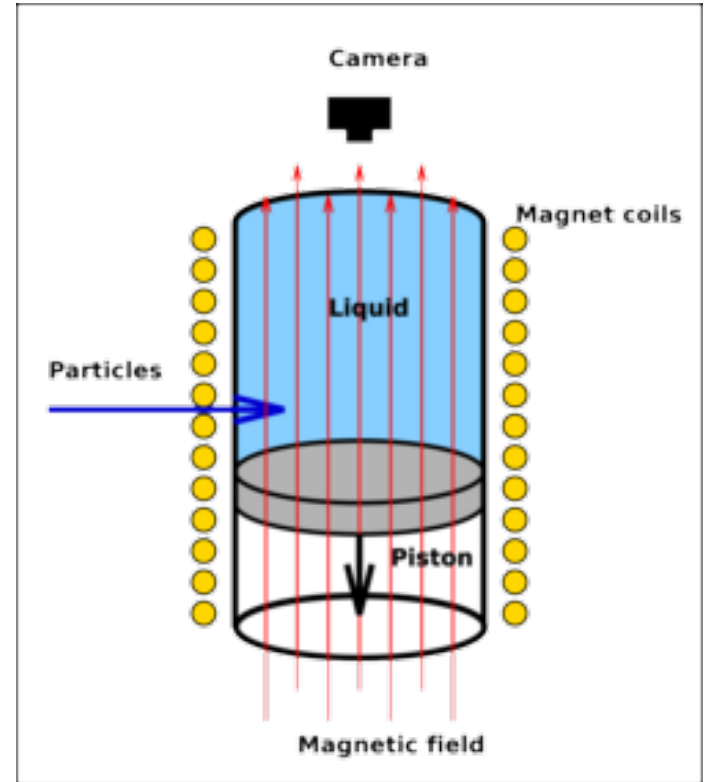


Abb. IV.2b Veranschaulichung des Energieverlustes:

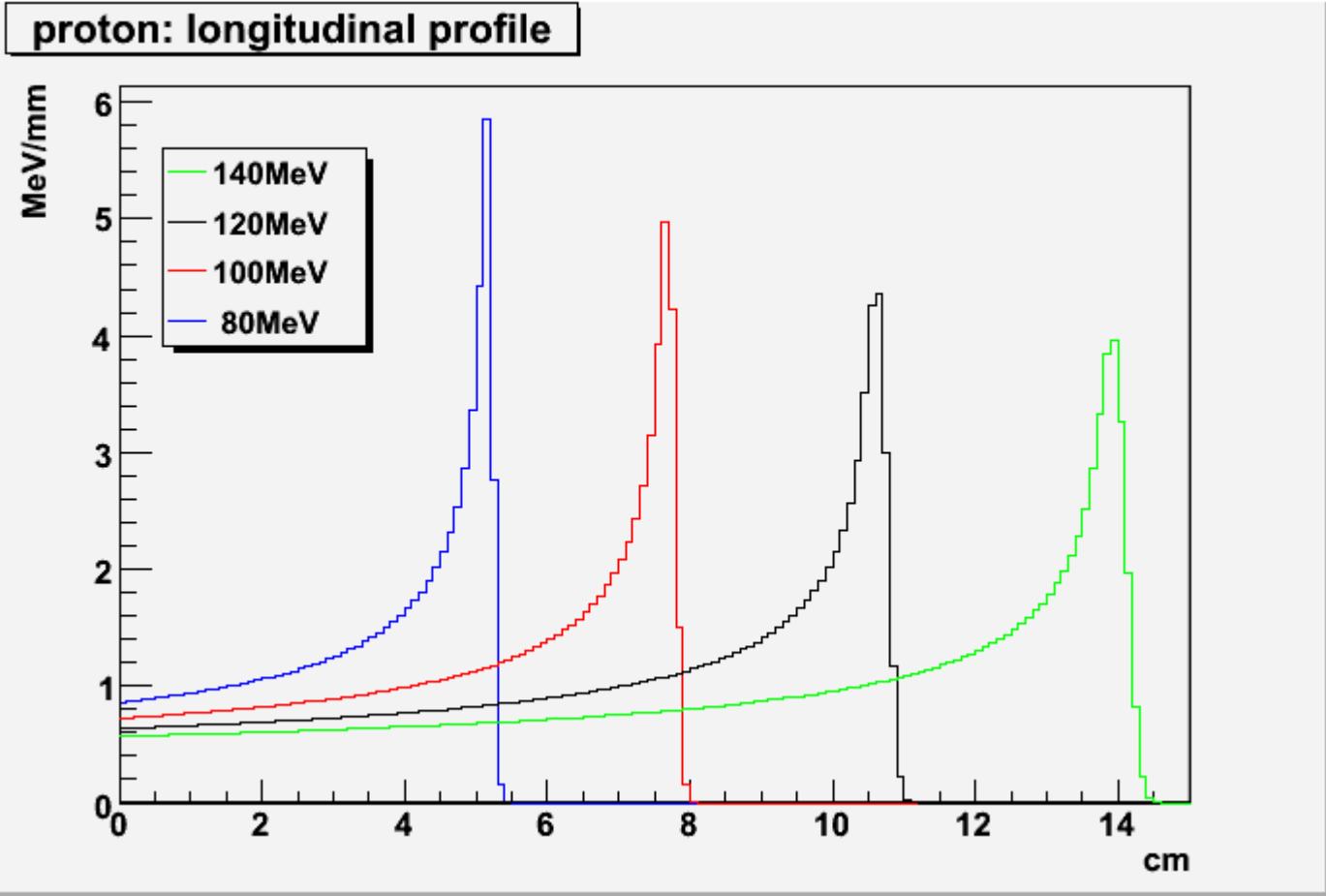


Blasenkammer



Dichte der Blasen ist Maß für spez. Energieverlust dE/dx

Abb. IV.2c Bragg-Peak



slac.stanford.edu: Calculated with Geant4

Abb. IV.3 Strahlungslänge X_0

Material	X_0 [cm]	X_0 [g cm ⁻²]
H ₂ (Gas)	731×10^3	61.3
C	18.8	42.7
Al	8.9	24.0
Pb	0.6	6.4

<http://pdg.lbl.gov/>

Abb. IV.4 Cherenkov-Strahlung

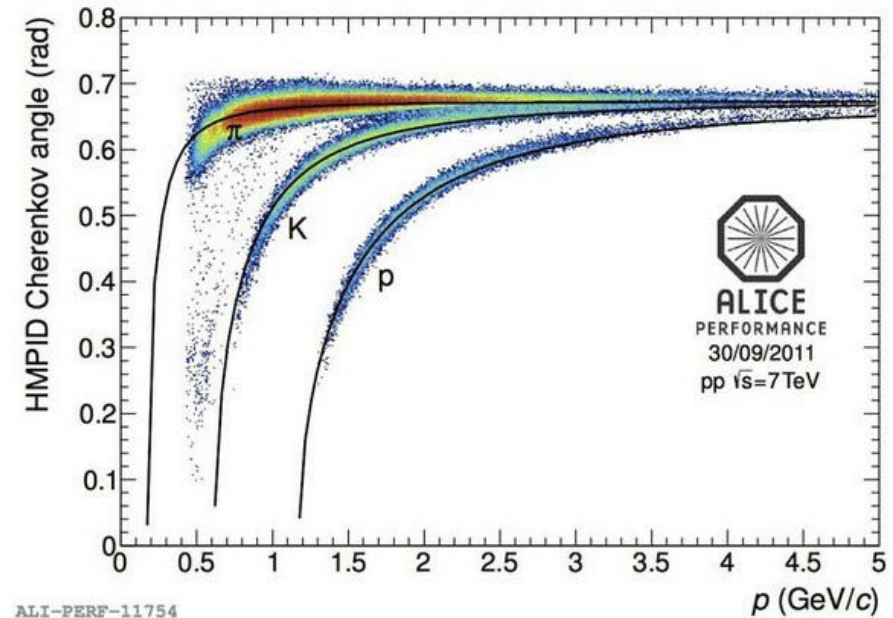
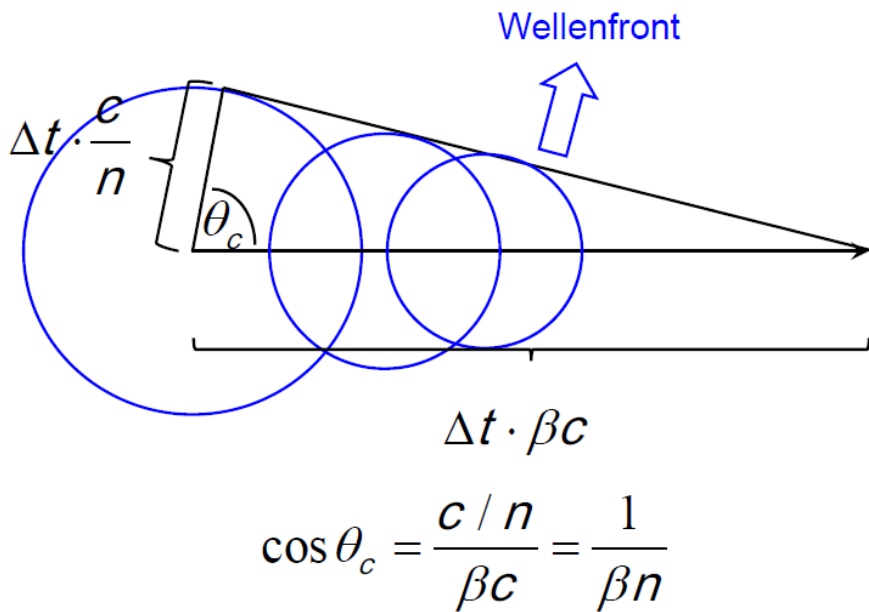
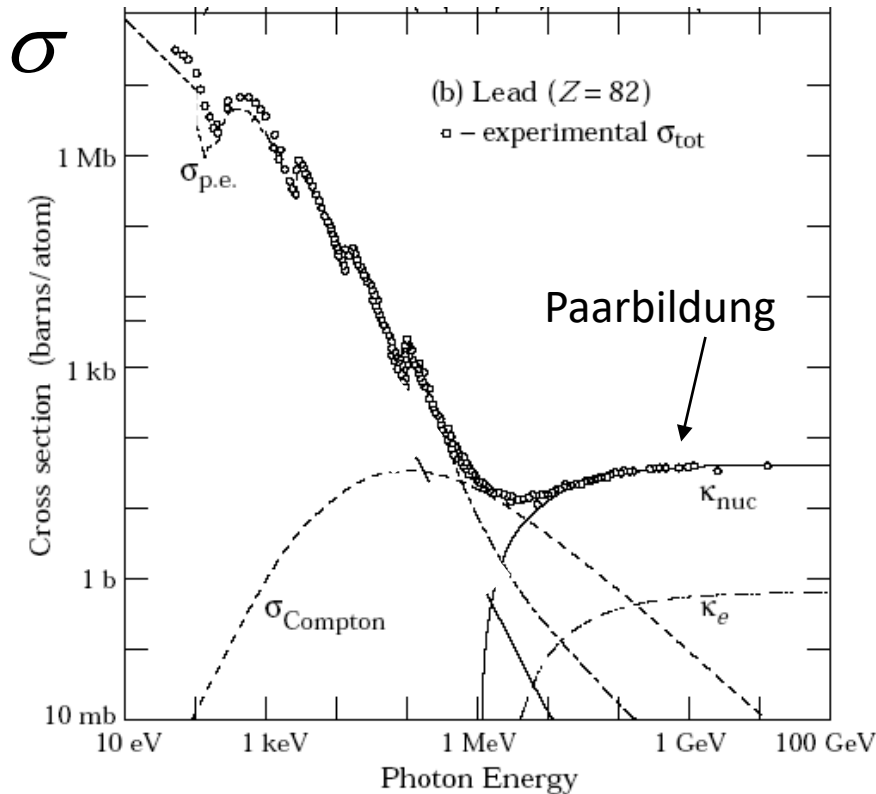


Abb. IV.5 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Photonenergie \longrightarrow
 Photoeffekt Compton-Effekt Paarbildung



Abschwächung der einfallenden
 Photonintensität

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

$$\mu = \mu_{Ph} + \mu_C + \mu_{Paar}$$

mit
$$\mu_i = \rho \frac{N_A}{A} \sigma_i$$

Abb. IV.6 Compton-Spektrum (Elektronen)

Kinematik:
$$E'_\gamma = E_\gamma \frac{1}{1 + \underbrace{\frac{E_\gamma}{m_e}}_{\mathcal{E}} (1 - \cos \theta_\gamma)}$$

Compton-Kante:

Min. Photonenergie
$$E'_\gamma|_{\min} = \frac{E_\gamma}{1 + 2\mathcal{E}}$$

Max. Elektronenergie
$$E_{kin}^e|_{\max} = E_\gamma \frac{2\mathcal{E}}{1 + 2\mathcal{E}}$$

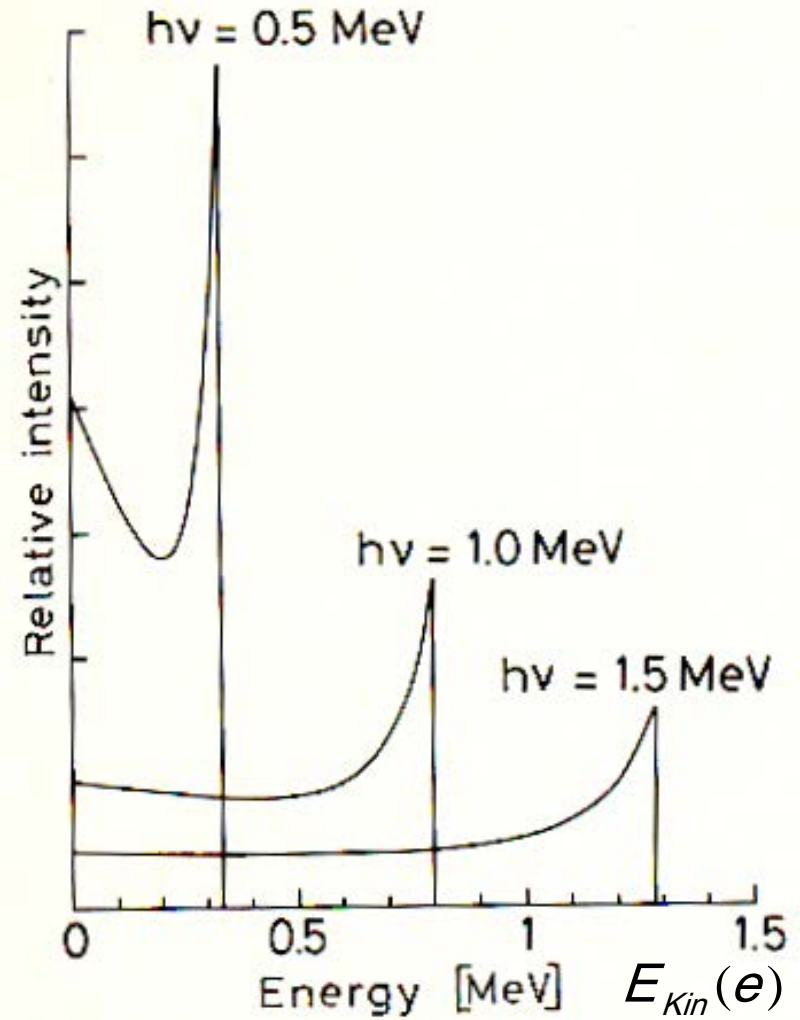
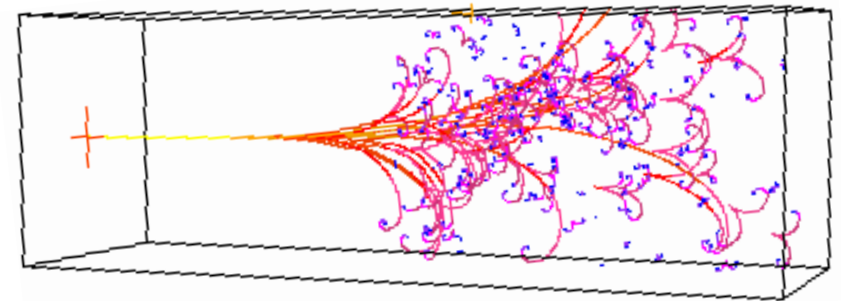
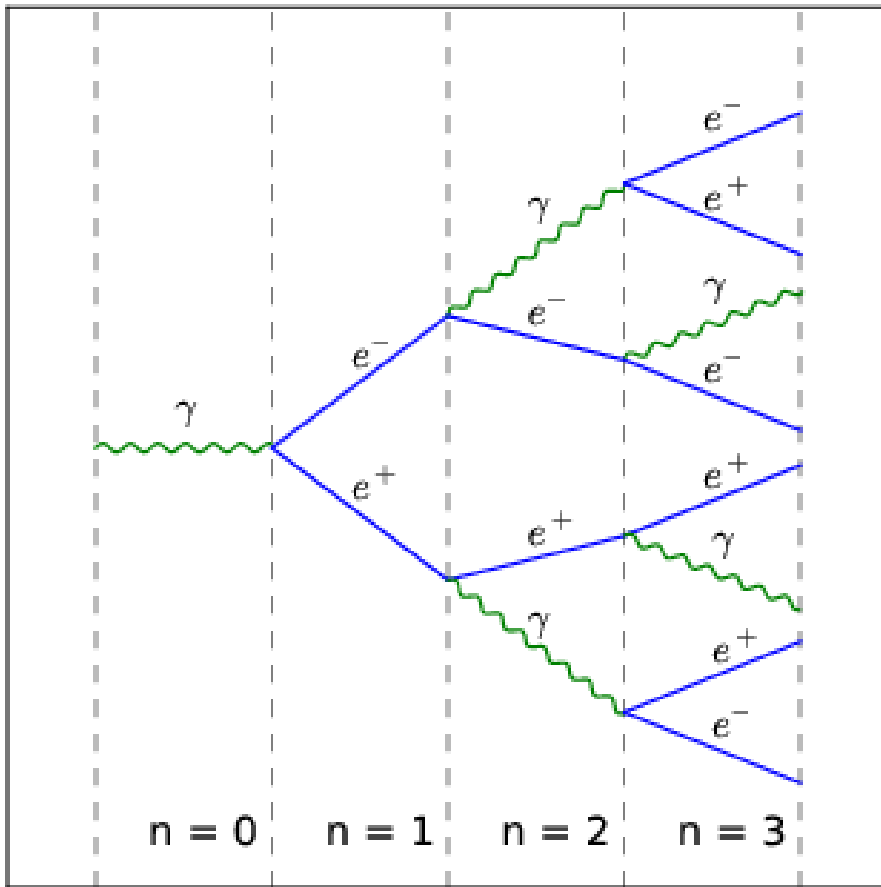


Abb. IV.7 Elektromagnetische Schauer

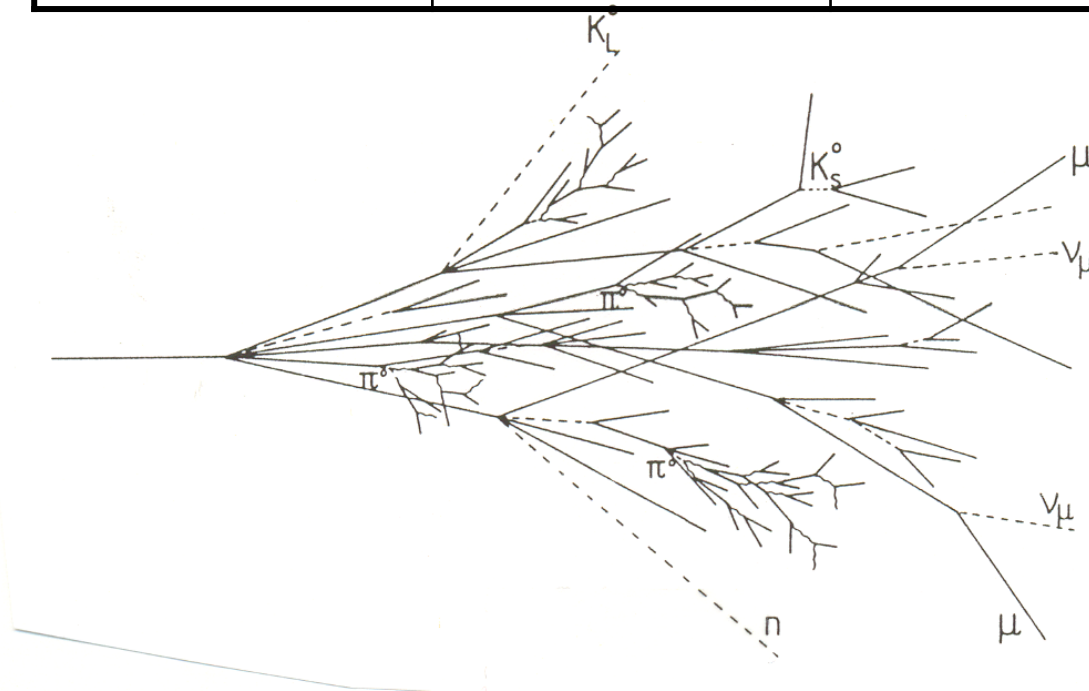


Detaillierte Schauersimulation

Abb. IV.8 Hadronische Wechselwirkungslängen

<http://pdg.lbl.gov/2017/AtomicNuclearProperties/index.html>

Material	X_0 [cm]	λ_{WW} [cm]
C	19	39
Plastik	35	70 - 80
Fe	1.8	16.8
Pb	0.6	17.6
U	0.3	11

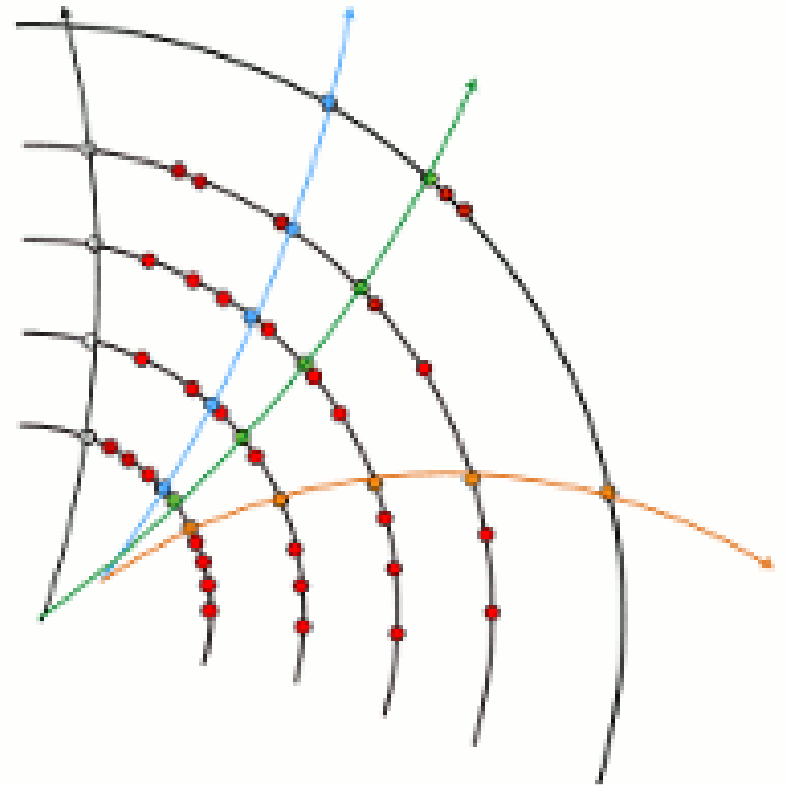


7. Detektorsysteme:

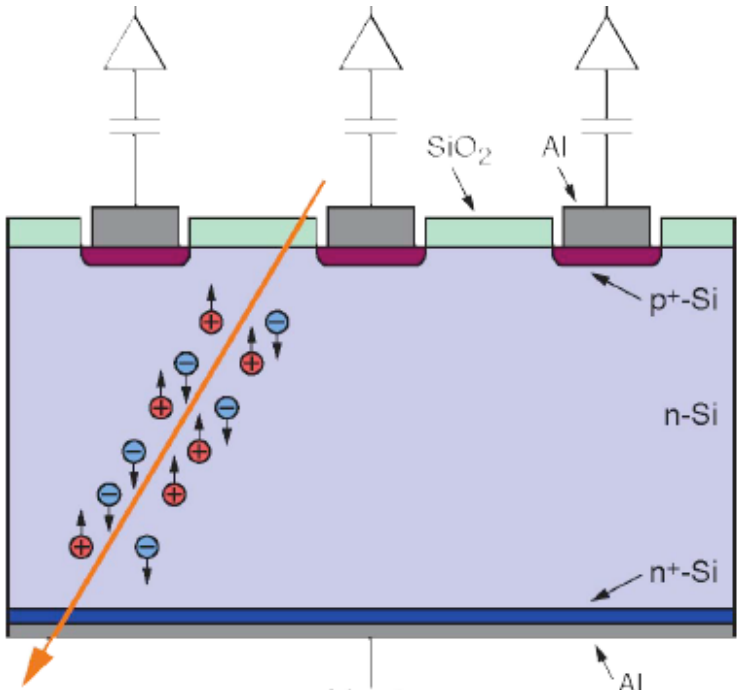
- Rekonstruktion der Trajektorien geladener Teilchen (Spursysteme)
- Impulsmessung für geladene Teilchen (Spektrometer)
- Energiemessung e.m. und hadronischer Schauer (Kalorimeter)
- Teilchenidentifikation

a) Spursysteme

Rekonstruktion der Trajektorien geladener Teilchen. Rekonstruktion von Primär- und Sekundärvertices.



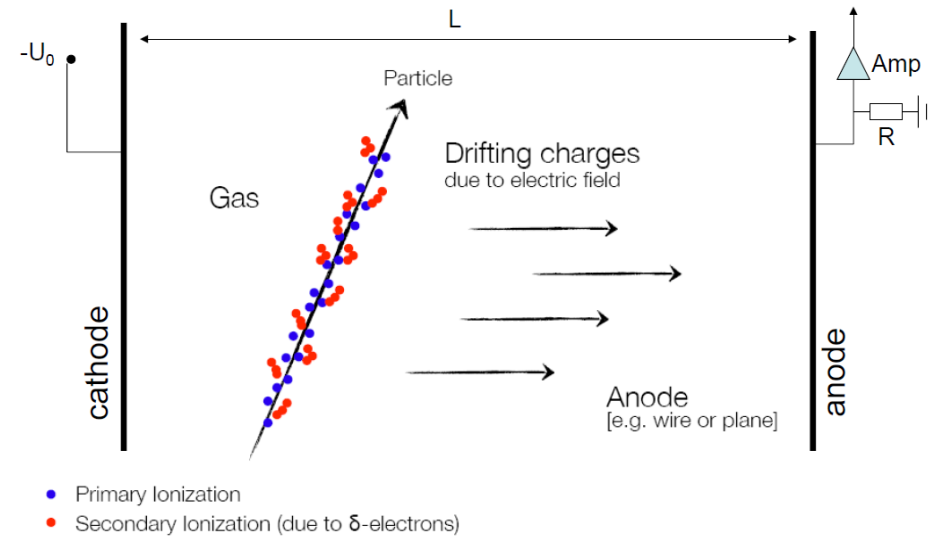
Technologien für Spurdetektoren



verarmter Halbleiter → e/Loch Paare

Halbleiterdetektoren:

- Streifendetektoren
- Pixeldetektoren

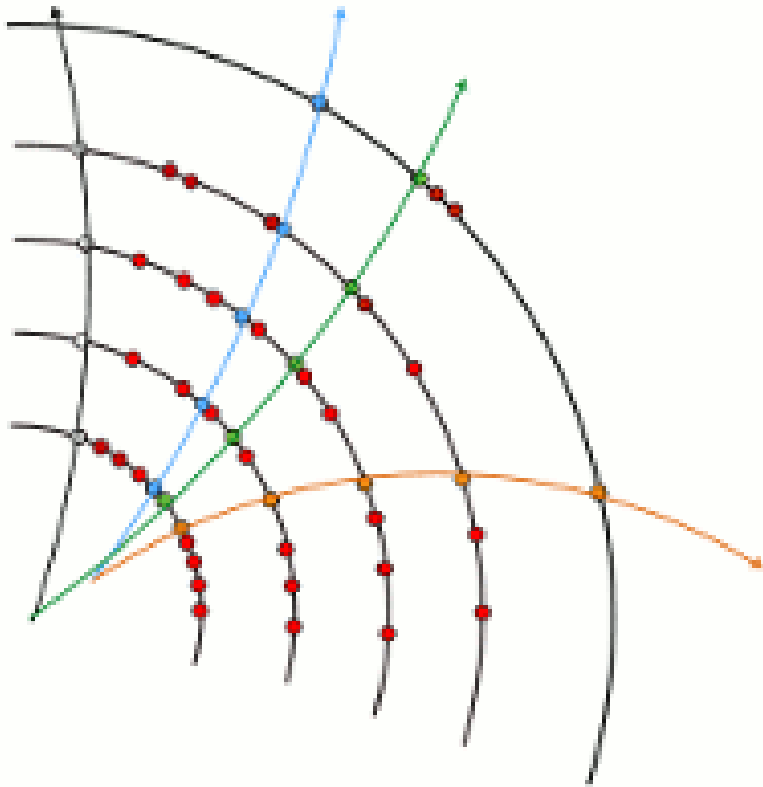


Gas → e/Ionen Paare

Gasdetektoren:

- Vieldrahtproportionalkammern
- Driftkammern
- Time-Projektion Chambers

b) Impulsmessung - Spektrometer:



Impulsmessung durch Ablenkung im Magnetfeld.

Standard-Anordnung:
Axiales Magnetfeld längs der z-Achse eines Detektors (Solonoid).

Impulsanteil **transversal** zum Magnetfeld:

$$p = q \cdot B \cdot R$$

Bzw für $q=1$:

$$p [\text{GeV}/c] = 0.3 \cdot B [\text{T}] \cdot R [\text{m}]$$

R = Krümmungsradius der Spuren

c) Energiemessung mittels Kalorimeter

Elektromagnetische Kalorimeter:

Homogene Kalorimeter:

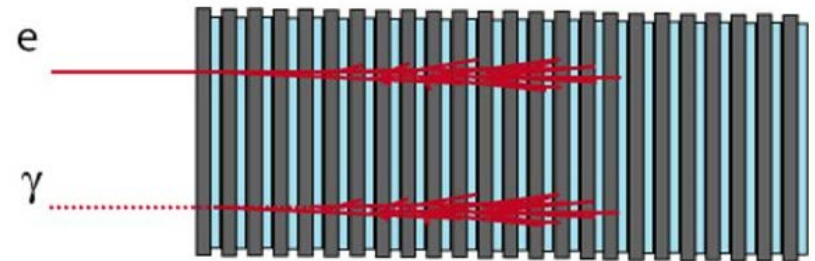
- Szillierende Kristalle



$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{2-5\%}{\sqrt{\hat{E}}} \quad \hat{E} \text{ in GeV}$$

Sampling-Kalorimeter:

- Sandwich: Szintillator+Blei



$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{20\%}{\sqrt{\hat{E}}}$$

Energieauflösung von Kalorimeter ist durch die statistische Fluktuation des erzeugten Signals gegeben: Signal $N \sim E \rightarrow$ Fluktuation $\sqrt{N} \sim \sqrt{E}$.

Hadronische Kalorimeter (Sampling Kalorimeter):

Typ. Skala der Schauerentwicklung λ_{WW} \rightarrow nötige Tiefe kann nur mit “nicht-aktiven” Absorber (z.B. Fe/U/...) erreicht werden.

d) Teilchenidentifikation:

p, π, K Erkennung:

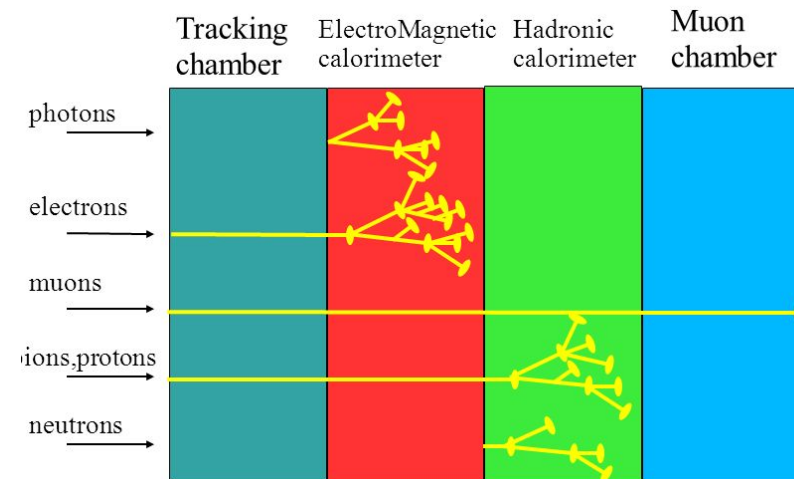
- dE/dx
- Cherenkov-Winkel
- Flugzeitmessung

Muon-Detektoren:

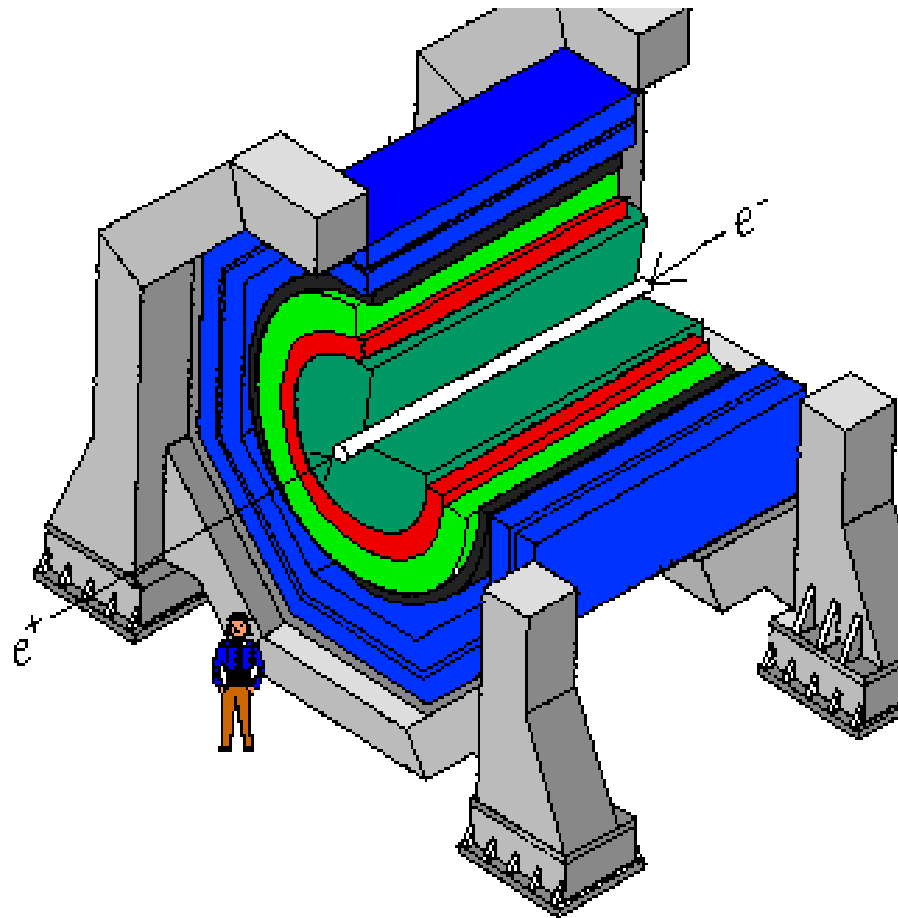
- Muon sind quasi stabil, d.h. sie zerfallen nicht im Detektor
- Muonen sind minimal ionisierend
- Muonen erzeugen keine e.m. oder hadronische Schauer



- Kalorimeter wirken wie Filter:
Bis auf Muonen werden Teilchen gestoppt

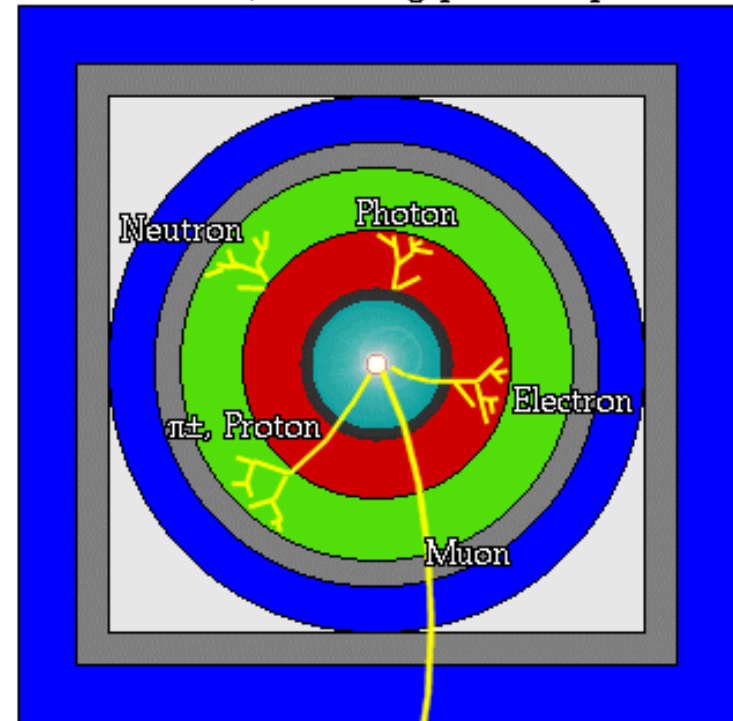


e) Zwiebelschalen-Aufbau



A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Hadronische Schauer fangen meist schon im ECAL an !

ATLAS Detektor

