

Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann
Humboldt-Universität zu Berlin
Sommersemester 2008

Termine

- Klausur
 - Prüfungsordnung sieht zweistündige Klausur vor
 - Termin: Donnerstag, 24.07.08
 - 9-11 Uhr s.t.
 - Raum: 2'101
 - Masterstudierende: 3 Wochen vor Beginn der Prüfungswoche anmelden (29.06.08)
- Terminkollision:
 - VL/Ü am Donnerstag, 22.05., fällt aus
 - Zusätzliche Termine für VL/Ü (8:00-11:15): 15.05., 29.05.

Teilchendetektoren

Einleitung

- Ziel: möglichst vollständige Vermessung der Produkte einer Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen
 - Energie und Impuls (möglichst) aller Sekundärteilchen
 - Teilchenidentifikation („ID“)
 - Detektor: Kombination aus spezialisierten Subdetektoren
- Literatur:
 - K. Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung (Teubner 2005) → stark aktualisierte 4. Auflage
 - C. Grupen: Teilchendetektoren (Spektrum 1993)

Nachzuweisende Teilchen

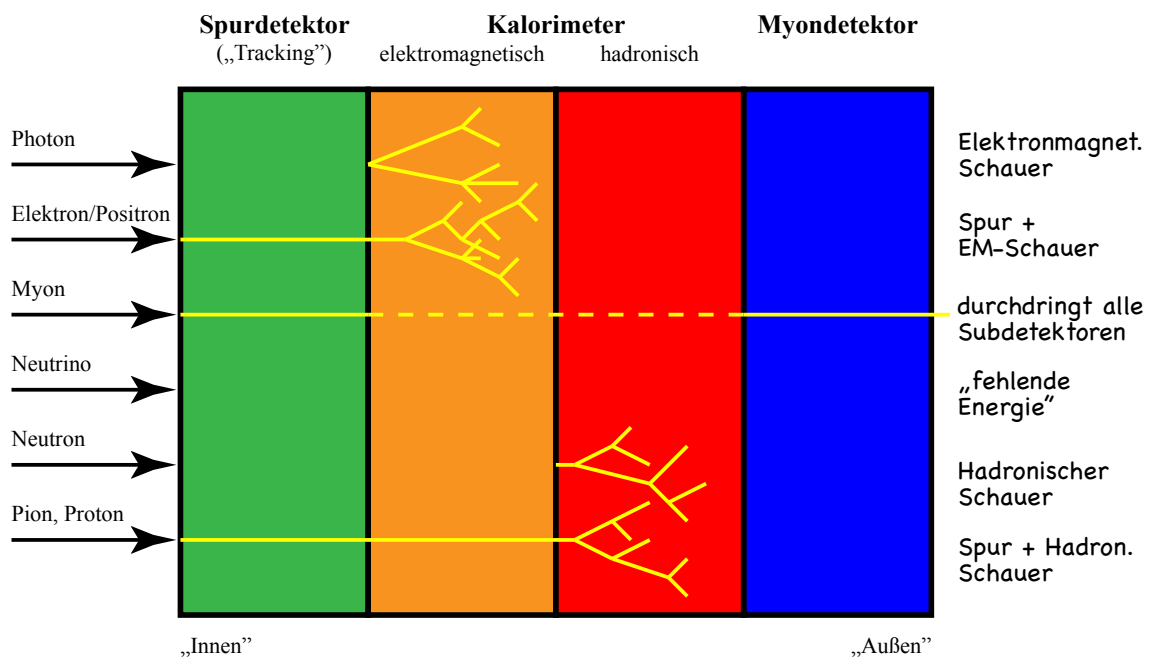
Teilchen, Symbol	Einordnung	Ruhemasse (MeV/c ²)	Elektrische Ladung (e)
Photon, γ	Lichtquant	0	0
Elektron, e^-	geladenes Lepton („leichtes Teilchen“)	0.511	-1
Positron, e^+	Antiteilchen des Elektrons	0.511	+1
Neutrino, ν	neutrales Lepton (3 Flavours)	$>0, <0.002$	0
Myon, μ^\pm	geladenes Lepton (etwa: schweres Elektron)	105.7	± 1
Pion, π^0, π^\pm	Meson („mittelschweres Teilchen“, Aufbau: Quark-Antiquark)	π^0 : 135.0 π^\pm : 139.6	0, ± 1
Proton, p	Baryon („schweres Teilchen“, Aufbau: 3 Quarks)	938.3	+1
Neutron, n	Baryon	939.6	0

rot: nach heutigem Wissen elementar Hadronen = Mesonen + Baryonen

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 4

5

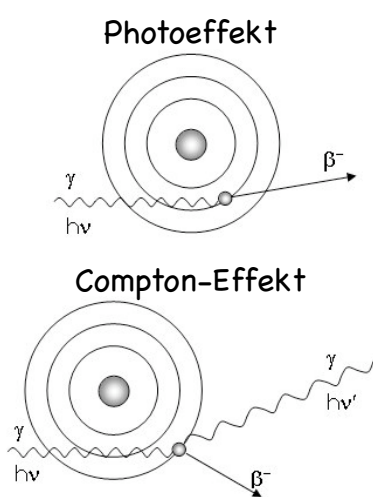
Prinzipieller Detektoraufbau



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 4

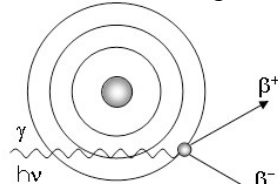
6

Wechselwirkung von Elementarteilchen mit Materie

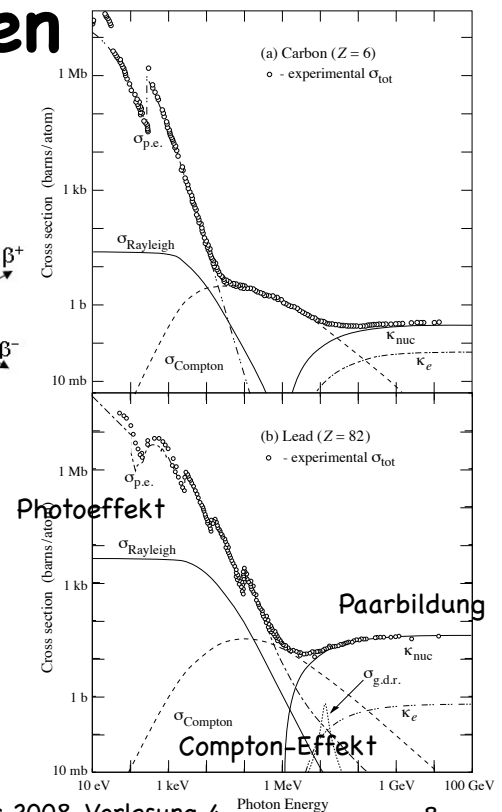


Photonen

Paarbildung

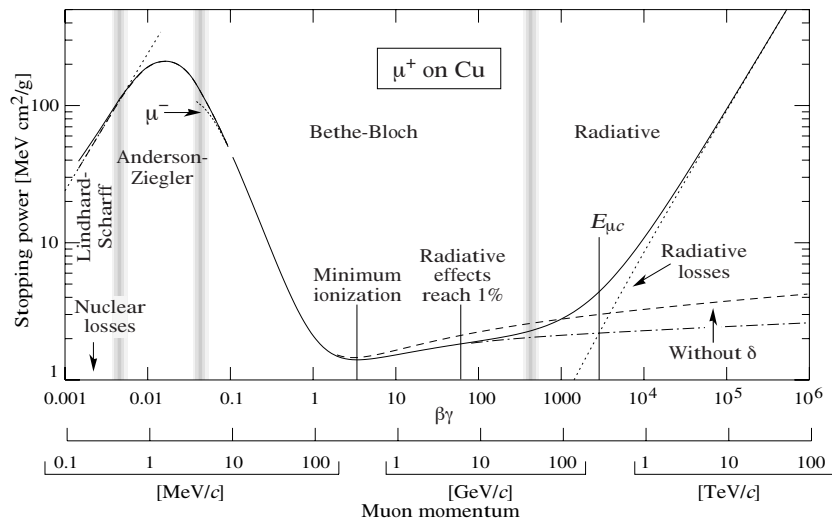


- Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts → Paarbildung dominiert für hohe Energien (Schwelle: $E_\gamma \geq 2 m_e c^2$)



Geladene Teilchen

- Energieverlust in Materie: Ionisation und Abstrahlung



- Hadronen: zusätzlich Kerneffekte (Anregung, Spaltung, Spallation von Neutronen, ...)

Strahlungslänge

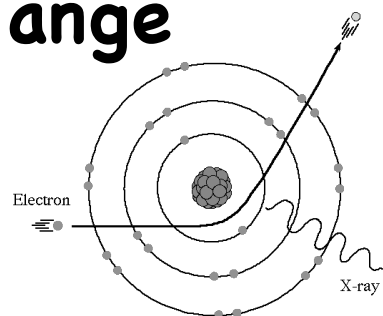
- Energieverlust von Elektronen/Photonen im Limit hoher Energien ($\gg 1$ MeV):

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0}$$

- Materialkonstante: Strahlungslänge X_0 (Massenbelegung = Länge mal Dichte)

- Elektronen: Strahlintensität auf $1/e$ reduziert (Haupteffekt: Bremsstrahlung)

- Photonen: ca. 50% Wahrscheinlichkeit für Paarbildung



Elektronen:
Bremsstrahlung

Material	X_0 (g/cm ²)
H ₂	61.3
Wasser	36.1
Aluminium	24.0
Eisen	13.8
Blei	6.4

Impuls- und Energiemessung

Prinzip der Impulsmessung

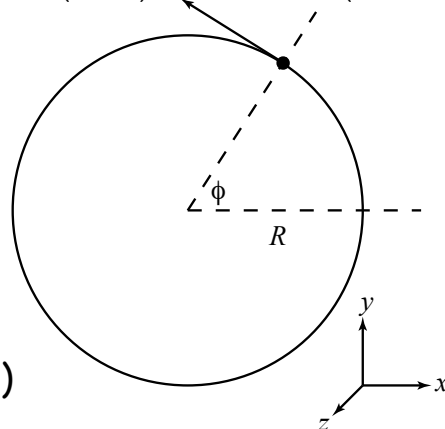
- Krümmungsradius im homogenen Magnetfeld einer Spule (engl.: solenoid) proportional zu p_T

$$\vec{F}_L = \frac{e}{m} \vec{p} \times \vec{B} = \frac{e}{m} \begin{pmatrix} -p_T \sin \phi \\ p_T \cos \phi \\ p_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} = \frac{eBp_T}{m} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{mit } \vec{p} = \begin{pmatrix} -p_T \sin \phi \\ p_T \cos \phi \\ p_z \end{pmatrix}$$

$$\vec{F}_Z = \frac{mv^2}{R} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{p_T^2}{mR} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{F}_L = \vec{F}_Z \quad \Rightarrow \quad R = \frac{p_T}{eB}$$

- Zahlenwerte: $p_T = 50 \text{ GeV}/c$,
 $B = 2 \text{ T} \rightarrow R = 83,4 \text{ m}$ (Übung)

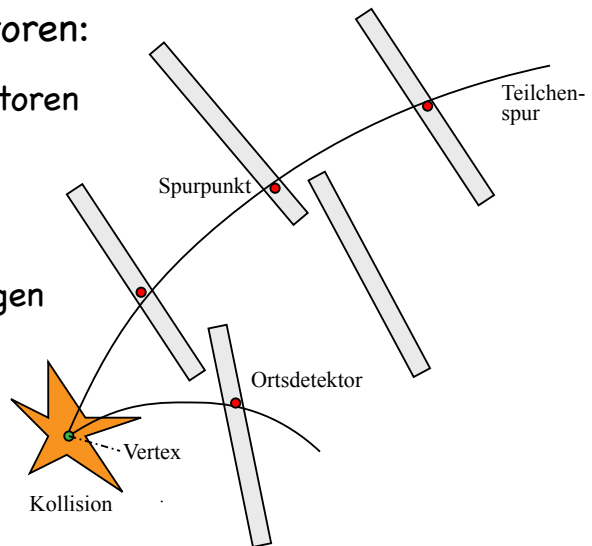


Spurrekonstruktion

- Bis ca. 1972: Blaskammer (fotografische Aufnahme)
→ zu langsam für MHz-Raten, mühsame Auswertung

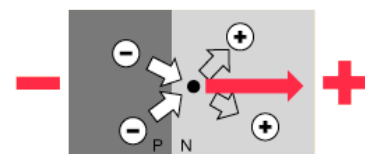
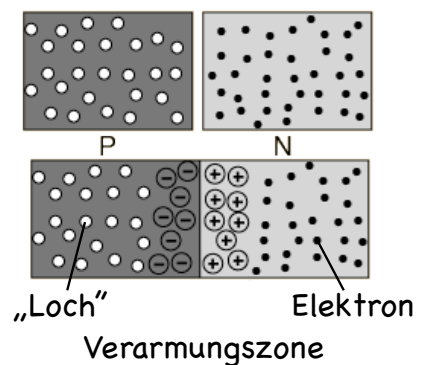
- Elektronische Spurdetektoren:

- Mehrere Lagen von Detektoren mit guter Ortsauflösung
- Rekonstruktion der Spur: Anpassung einer Helix an Spurpunkte in Detektorlagen
- Mehrere Spuren: Rekonstruktion des gemeinsamen Ursprungs („Vertex“)



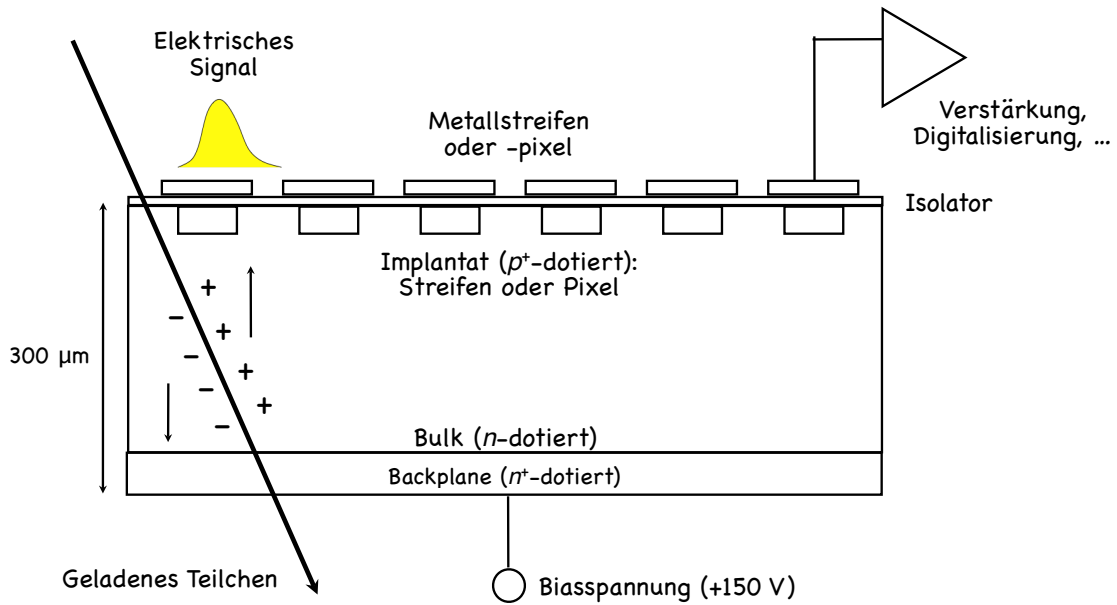
Beispiel: Siliziumdetektoren

- Funktionsprinzip:
 - pn-Übergang in dotiertem Halbleiter („Diode in Sperrrichtung“)
→ Bildung einer „Verarmungszone“ ohne freie Ladungsträger
 - Ionisierende Strahlung: Elektron-Loch-Paare → 3.6 eV pro Paar (Bandlücke in Silizium)
- Anwendung: „Vertexdetektor“
→ hohe Ortsauflösung nah an Ort der Wechselwirkung



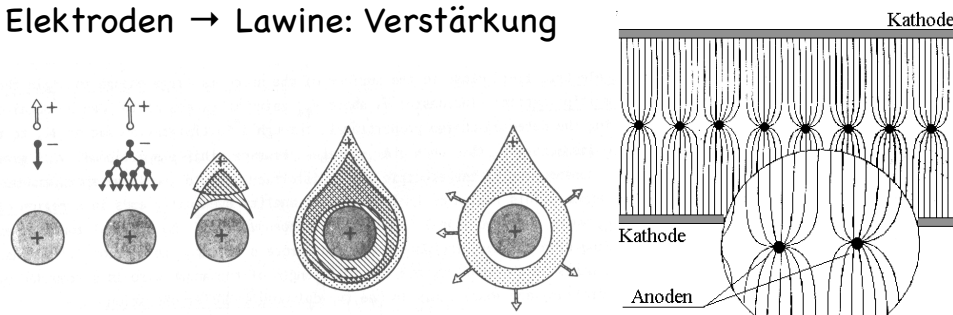
Anlegen einer „Biasspannung“ vergrößert Verarmungszone

Siliziumdetektor: Aufbau



Vieldraht-Proportionalkammer

- Verallgemeinerung des Proportionalzählrohrs:
 - Teilchendurchgang: Ionisation in „Zählgas“ (z.B. Argon)
 - Elektrische Spannung: Elektronen und Ionen driften zu Elektroden → Lawine: Verstärkung

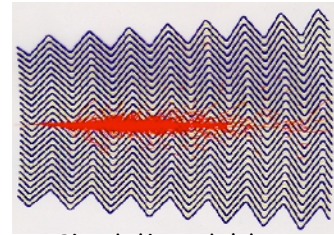


- Ortsauflösung: Messung der Ladungsverteilung pro Draht
- Variante: „Driftkammer“ → verbesserte Auflösung durch Messung der Driftzeit zur Elektrode

Prinzip der Energiemessung

- Nachweis mittels Kalorimeter („Wärmemesser“):

- Teilchen wechselwirkt mit Materie (große Dichte) → Ursprungsteilchen zerstört → Teilchenschauer
- Energie des Schauers proportional zu Energie des Ursprungsteilchens (aber: teils große Fluktuationen)



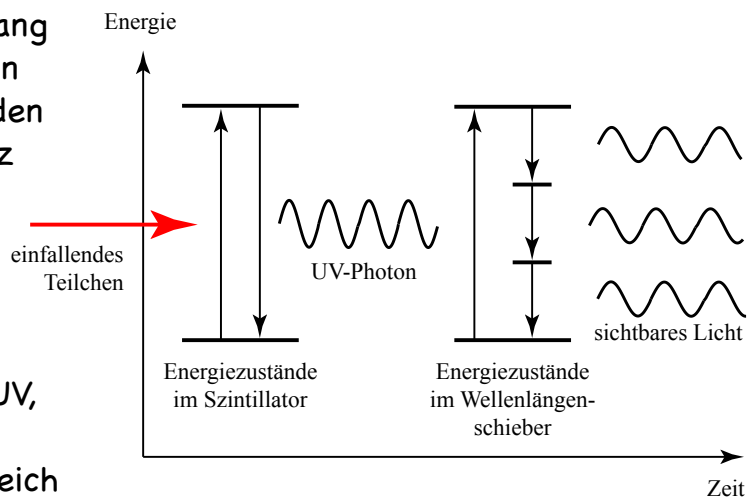
Simulation elektromagnetischer Schauer

- Elektromagnetisches Kalorimeter: für e^+ , e^- , γ
→ Ziel: Schauer möglichst vollständig absorbieren: $10-20 X_0$
- Hadronisches Kalorimeter: für π , K , p , n , ...
→ Kerneffekte: charakteristische Länge: nukleare Absorptionslänge λ (z. B. Schauer in Eisen: $\lambda \approx 10 X_0$)

Szintillatoren

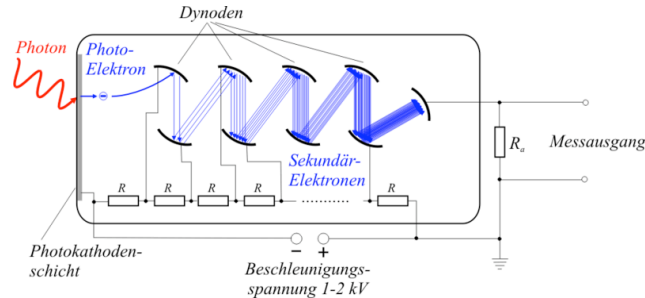
- Vermessung der Schauerenergie: Szintillationseffekt, z.B. in Plastiksintillator

- Teilchendurchgang
→ Anregung von Molekülzuständen
→ UV-Lichtblitz
- Wellenlängenschieber:
organisches Molekül mit Absorption im UV, Emission in sichtbarem Bereich



Lichtdetektion

- Lichtdetektion mit Sekundärelektronenvervielfacher (photomultiplier, PM): Photoeffekt und Verstärkung



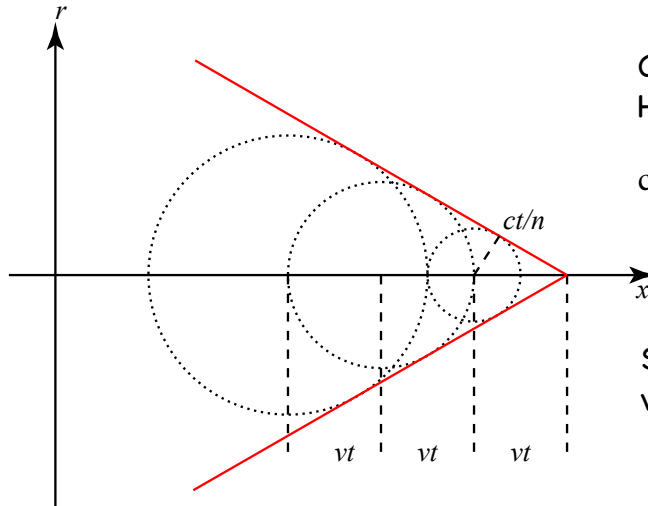
- Homogenes Kalorimeter: Szintillator absorbiert Schauer, z.B. NaI(Tl), Bleiglass (alternativ: Ionisation in flüssigen Edelgasen, z.B. Argon)
- Samplingkalorimeter: Schichten aus massivem Absorber (z. B. Eisen, Blei) und Plastikszintillator

Kapitel 5.3

Teilchenidentifikation

Cherenkov-Effekt

- Geladene Teilchen mit $v > c/n$ (n Brechungsindex des Mediums) emittieren „Cherenkov-Strahlung“ (vergleichbar mit Mach-Kegel bei Überschallflugzeug)



Cherenkov-Winkel mittels Huygens'schem Prinzip:

$$\cos \theta_c = \frac{ct/n}{vt} = \frac{1}{\beta n}$$

Schwelle für Emission von Cherenkov-Strahlung:

$$\theta_c = 0 \Rightarrow \beta = \frac{1}{n}$$

Anwendungen

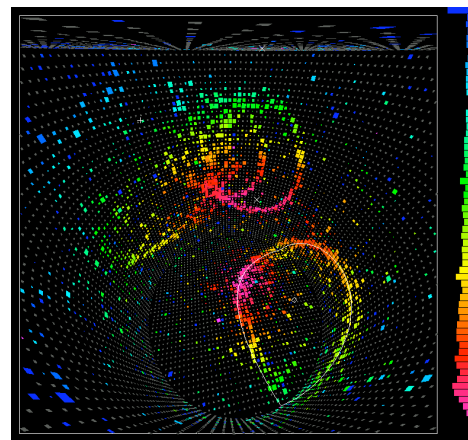
- Schwellenzähler: Geschickte Wahl des Radiator-Materials zur Unterscheidung z.B. von 10 GeV/c Pionen und Protonen

$$n_p = \frac{1}{\beta_p} = \frac{E_p}{p_p} = 1.0044$$

$$n_\pi = \frac{1}{\beta_\pi} = \frac{E_\pi}{p_\pi} = 1.0001$$

→ z. B. Freon 14: $n = 1.0005$ (FCKW, nicht mehr verwendet)

- Rekonstruktion von Cherenkov-Ringen → Messung des Cherenkov-Winkels



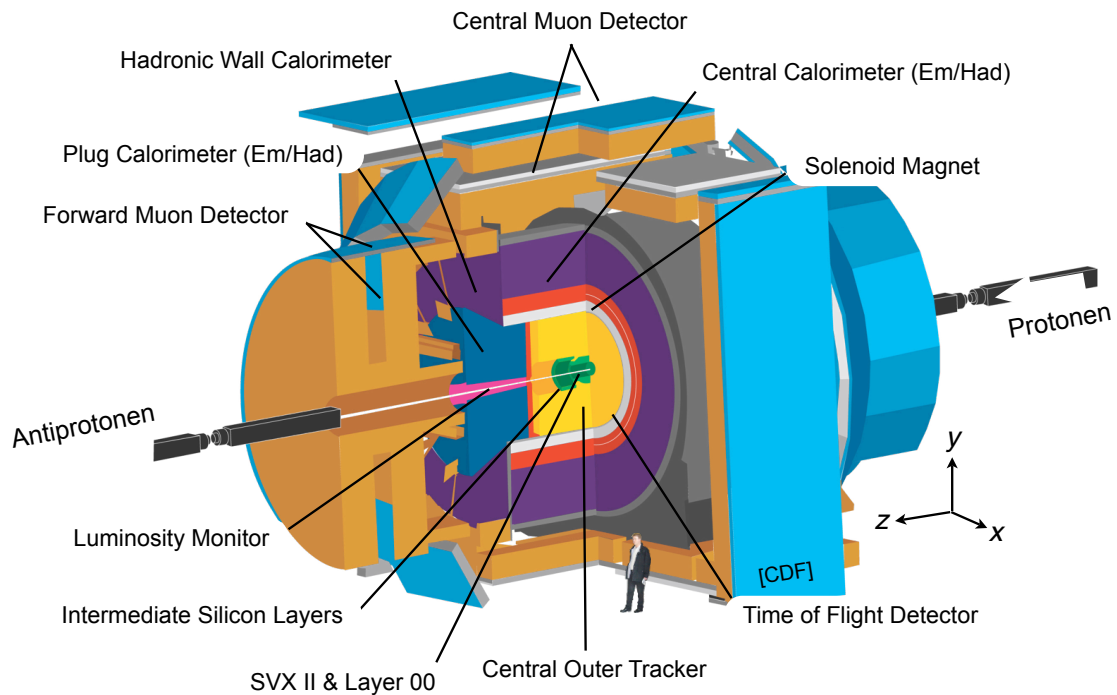
Cherenkov-Ringe in Super-Kamiokande

Moderne Teilchendetektoren an Speicherringen

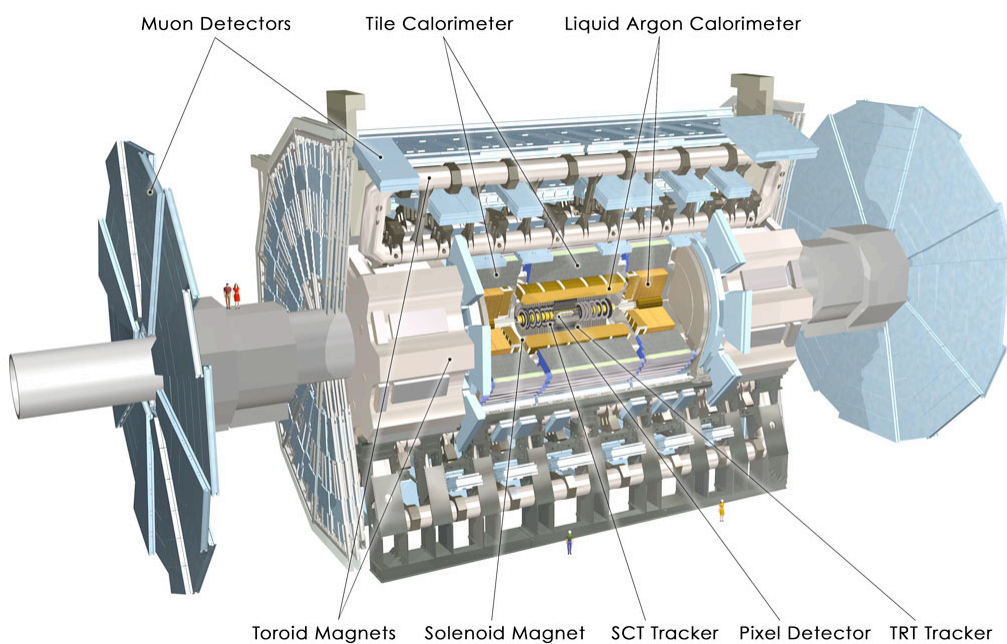
Grundprinzip

- Prinzipieller Aufbau ähnlich:
 - Detektoren zwiebelschalenartig um Kollisionspunkt
 - Vertexdetektor - Spurfindung - Kalorimetrie - Myon-ID
 - Möglichst gute Abdeckung des gesamten Raumwinkels („ 4π -Detektor“)
- Technologische Herausforderung:
 - CDF-II (2001): $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$, 1 Million Auslesekanäle
 - ATLAS (2008): $25 \times 25 \times 40 \text{ m}^3$, 100 Millionen Auslesekanäle
 - Gleichzeitig: Präzision der Spurfindung ca. $10 \text{ }\mu\text{m}$

Beispiel: CDF-Experiment



Beispiel: ATLAS-Experiment



Themen für Übung

- Positronenemissionstomographie (PET)
- Triggersysteme oder: Wie fischt man die 1000 interessantesten Kollisionen aus mehreren Millionen?