

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2020 – 6. Vorlesung (Teil 1)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft



www.kit.edu



Auflösung Aufgabe 10

- Welche der folgenden Aussagen über Detektionstechniken sind korrekt?
 - A. Der Ort eines Teilchendurchgangs kann mit gasgefüllten oder Halbleiterdetektoren bestimmt werden.
 - B. Mit einem Halbleiterdetektor kann man die Energie eines Teilchens bestimmen.
 - C. Die Lichterzeugung in organischen und anorganischen Szintillatoren beruht auf denselben physikalischen Prozessen.
 - D. Szintillatoren erzeugen bei Teilchendurchgang sichtbares Licht, das mit einem Photodetektor nachgewiesen werden kann.
 - E. Zum Betrieb eines PMTs zum Photonennachweis benötigt man eine Betriebsspannung von > 1 kV











Kurze Wiederholung

- Dominante Prozesse für Wechselwirkung von Photonen in Materie Niedrige Energien (E_{γ} < 1 MeV): **photoelektrischer Effekt** \rightarrow Absorption

 - Mittlere Energien ($E_{\gamma} \approx 1 \text{ MeV}$): **Compton-Effekt** \rightarrow Energieverlust
 - Hohe Energien ($E_{\gamma} > 1$ MeV): **Paarbildung** \rightarrow Absorption
- Strahlungslänge Xo: charakteristisch für Bremsstrahlung (Energie auf 1/e abgefallen) und für Paarbildung (7/9 der mittleren freien Weglänge)
- **Elektromagnetische Schauer**: hochenergetische e[±] und γ bilden Kaskade aus Bremsstrahlung und Paarbildung (Heitler-Modell)
- Hadronischer Schauer: kompliziertes Zusammenspiel vieler kernphysikalischer Prozesse, charakteristische Skala für Ausdehnung: hadronische Wechselwirkungslänge λ



Kurze Wiederholung

- Gasgefüllte Detektoren:
 - Strahlenschutz (Ionisationsmessung), Ortsmessung (Driftkammer, TPC)
 - Primärionisation in Zählgas, Ladungsverstärkung durch Townsend-Lawine
- **Halbleiter**detektoren:
 - Ionisation: Elektron-Loch-Paare in Verarmungszone am pn-Übergang Ortsmessung (Spurdetektor) oder Energiemessung (Spektroskopie)

 - Szintillationsdetektoren:
 - Ionisation: Anregungen im Szintillatormaterial \rightarrow (sichtbares) Licht Nachweis mit Photodetektor, z. B. PMT, SiPM

 - Schneller Teilchenzähler und Energiemessung (Kalorimeter)







Detektorsysteme in der Teilchenphysik



Kapitel 3.7









Detektorsysteme am Collider





A COLUMN TWO IS NOT

Teilchennachweis:

Detektor = komplexes System aus mehreren Unterdetektoren, zwiebelschalenartig um Kollisionspunkt

Ablenkmagnet

bending magnet

Detektor detector

Sommersemester 2020

DESY





Teilchennachweis

Impulsmessung



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 6. Vorlesung



Energiemessung Kalorimeter Myondetektor elektromagnetisch hadronisch

Teilchenidentifikation

Sommersemester 2020

"Außen"





CMS – Compact Muon Solenoid

Myondetektor

CMS-Fakten:

***** 21 m lang, 15 m hoch

- ***** Gewicht: 14.000 Tonnen
- ***** 140 Millionen Elektronikkanäle

Kalorimeter





Spurdetektoren







Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 6. Vorlesung



Spur- und Vertexrekonstruktion

- Vermessung der Teilchenspuren: mehrlagiger Spurdetektor in homogenem Magnetfeld
- Elektronische Signal in jeder Detektorlage → Spurpunkte
- Spuranpassung:
 - Mustererkennung: liegen Spurpunkte auf gemeinsamer Helixbahn?
 - **Spurfit**: Anpassung der Helixparameter
- Vertexanpassung: zeigen mehrere Spuren auf gemeinsamen Ursprungsort ("Vertex")?









Magnet, Eisenjoch, Myondetektor

- Supraleitender **Solenoidmagnet**:
 - Magnet umfasst Spurdetektor und Kalorimeter
 - Homogenes axiales Magnetfeld mit B = 3,8 T
 - Zusammen mit Spurdetektor: Impulsbestimmung, relative Auflösung abhängig von B und Radius L $(\rightarrow Übung)$ Λn

$$rac{\Delta p}{p} \sim rac{1}{BL^2}$$

Rückflussjoch (Eisen):

- Myonen mit p < 100 GeV: n\u00e4herungsweise MIPs</p> → nur geringe Energiedeposition in Kalorimetern
- Eisen = Absorber für Hadronen
- Myonnachweis & Impulsmessung: gasgefüllten Detektoren (Driftröhren, CSC, RPC)





cms.web.cern.ch







CMS-Spurdetektor

- Innerer Spurdetektor: Silizium-Pixeldetektor 2D-Segmentierung: Pixelgröße 150×100 µm² 125 Millionen Auslesekanäle
- Außerer Spurdetektor: Silizium-Streifendetektor ID-Segmentierung: Mikrostreifen ab 10 cm × 80 µm
 - 10 Millionen Auslesekanäle
 - Impulsauflösung des Spurdetektors: $\frac{\Delta p}{D} \sim \frac{1}{BL^2}$
 - Großer Hebelarm L: 4–110 cm von Strahlachse Starkes Magnetfeld: B = 3,8 T



Modul des CMS-Pixeldetektors





Elektromagnetisches Kalorimeter

(engl.: electromagnetic calorimeter, ECAL)

- Ziel: Energiemessung und Teilchenidentifikation von elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen (e[±], γ , $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)
- Messmethode: Rekonstruktion des elektromagnetischen Schauers CMS: PbWO₄-Kristalle \rightarrow homogenes Kalorimeter: gleichzeitig Absorber und Szintillator
 - (PbWO₄: Strahlungslänge $X_0 = 7,39$ g/cm², Molière-Radius $R_M = 2,2$ cm) • Vollständige Absorption des Schauers: 23 cm Länge \rightarrow 25,8 X₀ Relative Energieauflösung dominiert von Fluktuationen in Zahl der Schauerteilchen und Photonennachweis:

 σ_{F}



$$\frac{1}{1}\sim \frac{1}{\sqrt{E}}$$





Hadronisches Kalorimeter (engl.: hadron(ic) calorimeter, HCAL)

- Ziel: Energiemessung von Hadronen (π^{\pm} , K[±], p, \overline{p} , n, ...) \rightarrow Rekonstruktion von **Jets** (= Bündel von Hadronen)
- Messmethode: Rekonstruktion des hadronischen Schauers
 - Typische Bauweise: Sampling-Kalorimeter → abwechseInde Lagen von Absorber/Szintillator
 - Beispiel CMS: Messingabsorber und Kacheln aus Plastikszintillator
 - Dicke im Zentralteil: ca. 120 cm \rightarrow ca. 6 hadronische Wechselwirkungslängen λ , Schauer (fast) vollständig enthalten



Szintillatorkacheln mit Faserauslese



JINST 3 (2008) S08004





Aufgabe 11

- Wie funktioniert ein Detektorsystem in der Teilchenphysik? A. Zunächst wird der Impuls der Teilchen bestimmt, dann ihre Energie. B. Zunächst wird die Energie der Teilchen bestimmt, dann ihr Impuls. C. Der Impuls neutraler Teilchen wird über die Krümmung der Teilchenspur im
- - Magnetfeld bestimmt.
 - D. Die Energie neutraler Teilchen wird über Schauerbildung in den Kalorimetern bestimmt.
 - E. Die Impulsauflösung wird mit hohen Teilchenenergien schlechter, die Energieauflösung dagegen besser.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS: https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv





Kurze Zusammenfassung

- Collider-Detektor: möglichst voller Raumwinkel instrumentiert
 - - **HCAL**: destruktive Energiemessung von Hadronen
 - **Zusätzlich Myondetektor:** Nachweis in gasgefüllten Detektoren außerhalb von Kalorimeter und Magnet



Zwiebelschalenartiger Aufbau (Beispiel: CMS-Detektor am CERN): **Spurdetektor**: Rekonstruktion von Teilchenspuren und Vertizes (Ort/Impuls) **ECAL**: destruktive Energiemessung von Elektronen/Positronen & Photonen







Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2020 – 6. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



Bildquelle: CMS



www.kit.edu



Auflösung Aufgabe 11

- Wie funktioniert ein Detektorsystem in der Teilchenphysik?
 - A. Zunächst wird der Impuls der Teilchen bestimmt, dann ihre Energie.
 - B. Zunächst wird die Energie der Teilchen bestimmt, dann ihr Impuls.
 - C. Der Impuls neutraler Teilchen wird über die Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld bestimmt.
 - D. Die Energie neutraler Teilchen wird über Schauerbildung in den Kalorimetern bestimmt.
 - E. Die Impulsauflösung wird mit hohen Teilchenenergien schlechter, die Energieauflösung dagegen besser.





Teilchenbeschleuniger



Kapitel 3.8



Ubersicht

- Startpunkt: Lorentzkraft: $F_{L} = q (E + v \times B)$
 - Beschleunigung geladener Teilchen: elektrisches Feld (parallel zur Bewegungsrichtung), Energiegewinn nur abhängig von Ladung q des **Teilchens S**₁

$$\Delta E = \int_{S_0} \mathbf{F}_L \cdot \mathbf{dS} = q \int_{S_0} \mathbf{E} \cdot \mathbf{dS} = q U$$

Ablenkung geladener Teilchen: Magnetfeld (senkrecht zur **Bewegungsrichtung**)

Beschleunigertypen:

- Elektrostatische Beschleunigung: Hochspannung
- Beschleunigung durch hochfrequente (HF-) Wechselspannung (engl.: radio frequency, RF), Bauformen: linear oder ringförmig







Elektrostatische Beschleuniger

Bandgenerator (Van de Graaff, 1929):



- Isolierendes Band aufgeladen (Reibung, äußere Spannungsquelle)
- Bürste streift Ladungen von Band ab, Sammlung auf Kugeloberfläche
- Maximale Energie: ca. **10 MeV**, limitiert durch elektrostatische Entladungen



hohle Metallkugel 2m Ø (einige Millionen Volt gegen Erde)



<u>www.spektrum.de</u>



Elektrostatische Beschleuniger

Cockcroft-Walton-Generator: (Cockcroft, Walton, 1932)



Eingang: Wechselspannung

- **Gleichrichterschaltung** mit Dioden und Kapazitäten → Hochspannung
- Maximale Energie: ca. 1 MeV, limitiert durch elektrostatische Entladungen



I: Ionenquelle









Linearbeschleuniger

- Grundidee HF-Wechselfelder: mehrfache Anwendung derselben Beschleunigungsspannung
 - Linearbeschleuniger (engl.: linear accelerator, LINAC) Wideröe-Beschleunigungsstruktur (Ising 1924, Wideröe 1928): Beschleunigung während "richtiger" HF-Polung,
- Abschirmung innerhalb der Driftröhren während "falscher" HF-Polung









Zyklotron

Erster Ringbeschleuniger: **Zyklotron** (Livingston, Lawrence, 1930) Beschleunigung: D-förmige Polschuhe ("DEEs") zur Beschleunigung mit Wechselspannung (HF-Sender mit fester Frequenz und Spannung) **Ablenkung**: konstantes homogenes Magnetfeld $B \rightarrow$ Spiralbahn mit

- anwachsendem Radius R
- Maximale Energie limitiert durch Baugröße und Magnetfeld, einige 10 MeV

Anwendung heute: z. B. Herstellung von Radioisotopen für Medizin, Fahrzeugbau, strahlenharte Materialien, ...





K. Wille: Physik der Beschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Springer (1996)





Zyklotronfrequenz

Ansatz: Lorentzkraft = Zentripetalkraft **Zyklotronfrequenz** (relativistisch):

$$\omega = \frac{qB}{\gamma m}$$

Zyklotronradius des Teilchens:

$$R = \frac{\beta \gamma mc}{qB} = \frac{p}{qB}$$

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 6. Vorlesung



E. Lawrence und das erste Zyklotron



http://newscenter.lbl.gov





Herleitung: Zyklotronfrequenz

- klaminsch, $\vec{\tau}_{L} = 2 \epsilon u fripetal kraft$ $~ Beträge: <math>qvB = m \frac{v^{2}}{r}$ \Rightarrow Zyklofron frequenz: $\omega = \frac{\sqrt{2}}{r} = \frac{\sqrt{2}}{m}$ (unabhängig von Impuls)
- relationstisch: $\vec{F}_{L} = \frac{d\vec{\rho}}{dt} = \frac{d}{dt} (\chi m \vec{v})$ $=) \ \omega = \frac{q \cdot B}{Y \cdot m}$





- Zyhlobronvadius:
$$R = \frac{\beta c}{\omega} = \frac{\beta \gamma mc}{9^{\circ}B} = \frac{7}{91}$$

Bymc = $\frac{Pc}{E} \cdot \frac{E}{mc^{2}} \cdot mc$ =
- Zahlenweste: Proton mit $p = 30 \text{ GeV/c}, B$
-> $R[m] = \frac{p[\text{GeV/c}] \cdot \Lambda \partial^{9} eV/c}{9[e] \cdot \Lambda e^{V} \sqrt{B[T] \cdot 1} \frac{V^{s}}{m}}$
 $\approx \frac{p[\text{GeV/c}]}{0,3 \cdot q[e] \cdot B[T]} = \Lambda \partial D$













Zyklotron vs. Synchrotron

Zyklotron

festes Magnetfeld → anwachsender Radius der Teilchenbahn

ein großer Dipolmagnet

Beschleunigung durch HF zwischen **D-Polschuhen**

Limitierungen: Baugröße, Stärke des Magnetfelds



Synchrotron



viele kleine Dipol- und Quadrupolmagnete entlang Teilchenbahn

Beschleunigung (und Ausgleich von Strahlungsverlusten) durch HF in **Hohlraumresonatoren**

Limitierung für Protonen: **Magnetfeld** Limitierung für Elektronen: Bremsstrahlung → **Synchrotronstrahlung**









Synchrotron: Magnete



- Homogenes Feld: Ablenkung der Teilchen auf Sollbahn
- **Normalleitender** Elektromagnet: *B* ≤ 1 T
- **Supraleitender** Magnet (heute: NbTi): *B* ≤ 8 T
- Quadrupolmagnete:
 - Feld abhängig von Gradient der Feldstärke
 - Wirkung: fokussierend in einer Richtung, defokussierend in der anderen
 - Mehrere Quadrupolmagneten mit alternierenden Feldgradienten: fokussierend in beide Richtung

Schema Quadrupolmagnet



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 6. Vorlesung



Dipolmagnete:

Korrekturmagnete höherer Ordnung





LHC-Dipolmagnete



Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 6. Vorlesung



Helium-II-Gefäß

Supraleitende Stromschiene

Eisenjoch

Nichtmagnetische Manschette

Vakuumröhre

Strahlungsabschirmung

Der **15 Meter lange** LHC-Kryodipol







Synchrotron: Hohlraumresonatoren



Hohlraumresonatoren (auch: Kavitäten, engl.: cavity) • HF-Einkopplung (200 MHz bis 3 GHz) \rightarrow Anregung von TM₀₁-Mode Bauweise: normalleitend (z. B. Kupfer) oder supraleitend (Cu + Nb, Nb)



Supraleitende TESLA-Kavität



V. Kain







Speicherringe und Collider

- **Speicherring**:
 - Synchrotron ausgelegt auf lange Aufrechterhaltung von Teilchenstrahlen
 - HF: Teilchenstrahlen bildet **Pakete**
 - (engl.: bunches)
 - **Collider**: Kollision gegenläufiger Teilchenstrahlen



Bildquelle: CERN







Luminosität am Collider

- Erinnerung: (instantane) Luminosität → Eigenschaften der Teilchenstrahlen $L = J \cdot N_t = \Phi \cdot n_t \cdot d \quad \rightarrow \quad \frac{dN_{\text{streu}}}{dt} = L \cdot \sigma_{\text{tot}}$
 - Luminosität als Funktion der Strahlparameter am Collider:

$$L = f \cdot N_b$$

$$Umlauf_{frequenz}_{und Zahl}$$

$$Varther frequenz \\ Varther frequenz \\ Vart$$



Beispiel: Strahlparameter am LHC 2018 $f = 11245 \text{ s}^{-1}$ $N_b = 2556$ $N_1 = N_2 = 1, 1.10^{11}$ $\sigma_x = \sigma_y = 12 \ \mu m$ $\rightarrow L = 2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$





Weltkarte Teilchenbeschleuniger











SLAC National Accelerator Laboratory



Stanford-linear-accelerator-usgs-ortho-kaminski-5900.jpg, gemeinfrei

- Standort: Menlo Park, Kalifornien, USA
- Beschleuniger für Elektronen und Positronen: Linearbeschleuniger (3,2 km Länge, seit 1966)

 - Heute: Sychrotronstrahlungsquellen







e⁺e⁻-Collider: SPEAR (1972), PEP (1980), SLC (1989), PEP-II (1999)





Fermi National Accelerator Laboratory



Standort: Batavia, Illinois, USA Neutrinostrahlen: NuMI (seit 2005), LBNF (im Aufbau)



Proton-Antiproton-Collider Tevatron (1987–2011): $\sqrt{s} = 1,8 - 1,96$ TeV













ELERATOR RESEARCH ORGANIZATION

kek.jp

Standort: Tsukuba, Japan • e⁺e⁻-Collider: **TRISTAN (1986) KEKB** (1999) SuperKEKB (seit 2016) J-PARC: Proton-**Beschleuniger mit** hoher Intensität (z. B. Neutrinophysik)



Deutsches Elektronen-Synchrotron



S





- e⁺e⁻-Collider: DORIS (1974), PETRA (1979)
- e[±]p-Collider: HERA (1992 - 2007)
- Heute: Synchrotronstrahlungsquellen PETRA III (seit 2010), XFEL (seit 2017)













Aufgabe 12

Wie sind moderne Teilchenbeschleuniger aufgebaut?

- A. Alle physikalisch interessanten Energiebereiche können mit der Bauform Zyklotron erreicht werden.
- B. Ein Speicherring wird oft aus einer Kette von Vorbeschleunigern gespeist, die Endenergie wird in einem Synchrotron erreicht.
- C. Ein Speicherring wird oft aus einer Kette von Vorbeschleunigern gespeist, die Endenergie wird in einem LINAC erreicht.
- D. Die mit einem LINAC erreichbare Endenergie ist proportional zur Länge der Beschleunigungsstruktur.
- E. In einem Synchrotron werden Magnetfelder zur Beschleunigung und Ablenkung der Teilchenstrahlen verwendet.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:



https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold 1080516&client id=produktiv



Kurze Zusammenfasssung

- Beschleunigertypen:
 - Elektrostatische Beschleuniger: van-de-Graaff, Cockcroft-Walton
 - Hochfrequenz-Beschleuniger: LINAC, Zyklotron, Synchrotron
- Elemente des Synchrotrons:
 - Ablenkung: Dipolmagnete, Fokussierung: Quadrupolmagnete
 - Beschleunigung: Hohlraumresonatoren
- Collider für die Teilchenphysik:
 - Kollision von Teilchenpaketen (Speicherring oder LINAC)
 - Leistungszahl: (instantane) Luminosität
 - Weitere Details: Spezialvorlesung Beschleunigerphysik



