
Cherenkov-Detektoren

Rune Dominik

26. Oktober 2018

Fakultät Physik

Inhalt

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Cherenkovkegel

Spektrum

Vergleichskriterien

Bauweisen

Grundsätze

Nicht fokusierende (Schwellwert-) Detektoren

Fokusierende (Differentielle-) Detektoren

Ring Imaging Cherenkov (RICH-) Detektoren

Ausleseelektronik

Gasgefüllte Detektoren

Photodetektoren

Experimentelle Herausforderungen

Geschichte

- 1910** M. Curie beobachtet blaues Licht in konzentrierter Radiumlösung
- 1926** L. Mallet zeigt das kontinuierliche Spektrum des Lichts
- 1934** Entdeckung durch P.A. Cherenkov und S.I. Wawilow bei Arbeiten für Cherenkovs Dissertation, anschließende extensive Studie.
- 1937** Theoretische Erklärung durch I.M. Frank und I.Y. Tamm
- 1947** Erster differentieller Detektor von R.H. Dicke, konzipiert von I.A. Getting
- 1951** Erster Schwellwertdetektor von J.V. Jelley
- 1958** Nobel Preis für Cherenkov, Frank und Tamm (je 1/3)
for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect.
- 1960** Erste Überlegungen zu RICH Detektoren durch A. Roberts
- 1962** Entwicklung des DISC Detektors durch R. Meunier et.al.
- 1977** Erster RICH Prototyp durch J. Seguinot und T. Ypsilantis

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Cherenkovkegel

Spektrum

Vergleichskriterien

Bauweisen

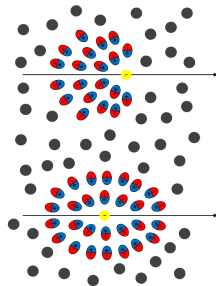
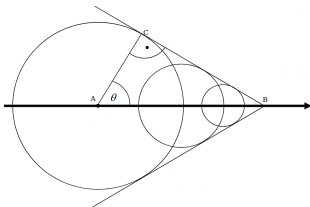
Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

Theoretische Grundlagen - Cherenkovkegel

- Geladene, lokal überlichtschnelle Teilchen emittieren Cherenkov-Photonen unter einem Winkel θ .
- Das Teilchen legt die Strecke $\overline{AB} = \beta c \Delta t$ zurück.
- Die Photonen legen die Strecke $\overline{AC} = (c/n) \Delta t$ zurück.
- Dies liefert

$$\cos \theta = \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \frac{c \Delta t}{n \beta c \Delta t} = \frac{1}{n \beta}. \quad (1)$$



Oben: $v > v_0 =: v_0$ **unten:** $v < v_0$.
Aus: D. Meyhöfer, Studium zur Spurrekonstruktion in großen Wasser-Cherenkov-Detektoren ([1]).

Ahaewandelt aus: B. Spaan, Vorlesung Kern- und Elementarteilchenphysik 2017/18.

Theoretische Grundlagen - Spektrum

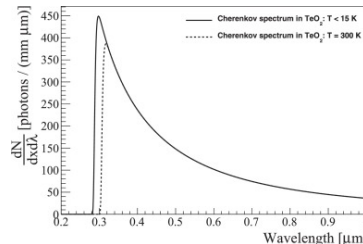
- Cherenkov-Spektrum gegeben durch die Frank-Tamm-Gleichung (FTG)

$$\frac{dN_{\text{ph}}}{dE} = \left(\frac{\alpha}{\hbar c}\right) Z^2 L \left[1 - \left(\frac{1}{n\beta}\right)^2\right] \quad (2)$$

- Für die Wellenlänge:

$$\frac{dN_{\text{ph}}}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} Z^2 L \left[1 - \left(\frac{1}{n\beta}\right)^2\right] \propto \frac{1}{\lambda^2} \quad (3)$$

- Kontinuierliches Spektrum
- Für $n = n(E)$: Spektrum steigt mit E , Maximum im UV
→Optimiere Detektoren auf Messung im UV Bereich



Aus: N. Casali, Model for the Cherenkov light emission of TeO2 cryogenic calorimeters ([2]).

Theoretische Grundlagen - Vergleichskriterien

- Detektor kann nicht perfekt arbeiten $\rightarrow N_{\text{gemessen}} = \epsilon N_{\text{ph}}$ mit energiegemittelter Detektoreffizienz

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} Q \cdot \tau \cdot \rho dE = \epsilon \Delta E \quad (4)$$

- Q : Quantenausbeute des eigentlichen Detektors
- τ, ρ : Transmissions- und Reflektionskoeffizient
- Integration für $n\beta = \text{const.}$ über den vom Detektor messbaren Energiebereich liefert

$$N_{\text{gemessen}} = N_0 Z^2 L \sin(\theta)^2 \quad (5)$$

mit der Detektorantwort

$$N_0 = \left(\frac{\alpha}{\hbar c} \right) \epsilon \Delta E \rightarrow \epsilon = \frac{N_{0, \text{mess.}}}{N_{0, \text{theo.}}} \quad (6)$$

ϵ bietet ein Vergleichskriterium.

Theoretische Grundlagen - Auflösungsvermögen

Wichtige Größen: Auflösungsvermögen:

- Aus der Cherenkovgleichung (1) folgt mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_\beta = \frac{\tan \theta \sec \theta \sigma_\theta}{n} \quad (7)$$

damit

$$\frac{\sigma_\beta}{\beta} = \tan \theta \sigma_\theta \quad (8)$$

→ Diese Formel kann für verschiedene Detektortypen modifiziert werden

- Für einen Teilchenstrahl bekannten Impulses p ist der Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei Teilchen

$$\Delta\beta_{m_0 m_1} = \frac{m_1^2 - m_0^2}{2p^2} \quad (9)$$

→ Um die Teilchen unterscheiden zu können, muss $\sigma_\beta \leq \Delta\beta_{m_0 m_1}$ gelten

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Bauweisen

Grundsätze

Nicht fokusierende (Schwellwert-) Detektoren

Fokusierende (Differentielle-) Detektoren

Ring Imaging Cherenkov (RICH-) Detektoren

Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Bauweisen

Grundsätze

Nicht fokusierende (Schwellwert-) Detektoren

Fokusierende (Differentielle-) Detektoren

Ring Imaging Cherenkov (RICH-) Detektoren

Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

Bauweise - Grundsätze

Was den meisten (frühen) Detektoren gemein ist:

- Der hochrelativistische Teilchenstrahl tritt durch ein Fenster in einen Behälter ein.
- Der Behälter ist mit einem Radiatorgas gefüllt.
 - Auf den Behälter kann bei einem festen Radiator verzichtet werden
- Die entstehende Cherenkovstrahlung wird durch einen Spiegel auf den eigentlichen Detektor geleitet.
- Der Teilchenstrahl kann den Behälter auf der Rückseite wieder verlassen.
→ Konzeption des Detektors entscheidend für Anwendungsgebiet.

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Bauweisen

Grundsätze

Nicht fokusierende (Schwellwert-) Detektoren

Fokusierende (Differentielle-) Detektoren

Ring Imaging Cherenkov (RICH-) Detektoren

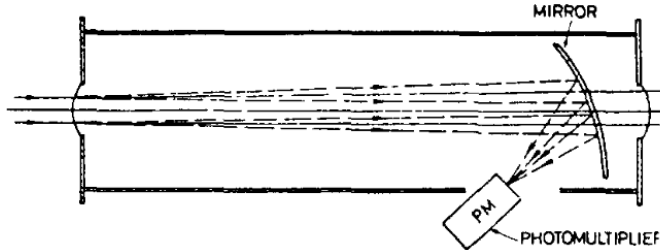
Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

Schwellwertdetektoren

Funktionsweise

- Die Cherenkovphotonen werden auf einen Photomultiplier (PM) gelenkt
- In einem Brennpunkt des (elliptischen) Spiegels liegt der Vertex, im anderen der PM.
- Aus der gemessenen Pulshöhe kann β rekonstruiert werden



Aus: T. Ypsilantis, J. Seguinot: Theory of ring imagin cherenkov Counters ([3]).

Schwellwertdetektoren - Auflösungsvermögen

Auflösungsvermögen

- Aus der Menge der gemessenen Photonen (5) folgt mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung

$$\sigma_N = 2N_0 Z^2 L \sin \theta \cos \theta \sigma_\theta \quad (10)$$

damit

$$\frac{\sigma_N}{N} = 2 \cot \theta \sigma_\theta \quad (11)$$

- Für ein Zählexperiment gilt

$$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (12)$$

- (11) und (12) in der Formel für das Auflösungsvermögen (8) gibt

$$R := \frac{\sigma_\beta}{\beta} = \frac{\tan(\theta)^2}{2\sqrt{N}}. \quad (13)$$

Diskussion

- Je mehr Photonen gemessen werden können, desto besser R
→Optimiere Lichtausbeute
- Je kleiner der Cherenkowwinkel ist, desto besser R
→Optimiere n (kleiner Winkel in Gasen aber gegeben)

Schwellwertdetektoren - Vor- und Nachteile

Vorteile

- Intrinsisch schnell
- Da keine fokussierenden Optiken vorhanden sind, kann ein großes Intervall $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$ beobachtet werden
- Keine Limitierung durch optische Abbildungsfehler

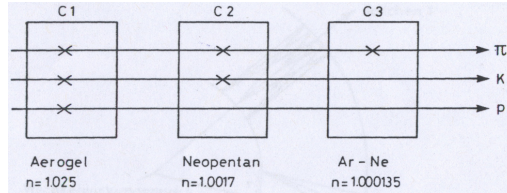
Nachteile

- Sehr lang, daher für Collider-Experimente ungeeignet
→ Für fixed-target Experimente ist die Länge nicht limitierend
- Auflösung geringer als bei anderen Bauweisen

Schwellwertdetektoren - Anwendungsgebiete

- Nicht geeignet für Teilchenselektion
→ Akzeptanz ($\Delta\beta, \Delta\theta$) zu groß
- Gut geeignet für Teilchenidentifikation:
 - Impuls aus anderen Detektorteilen bekannt
 - Schwellwertmessung von β ausreichend, um mit Impuls für jeden Teilchentyp eine Likelihood anzugeben.
- Hintereinanderschaltung von Schwellwertdetektoren mit verschiedenem n möglich
→ Teilchenart aus Verhalten in den verschiedenen Detektoren bestimmbar

Schwellwertdetektoren - Anwendungsgebiete

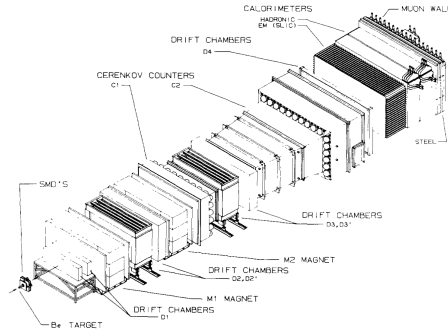


Aus: U. Schilling: Teilchendetektoren Cherenkov Detektoren ([4]).

- Experimente mit Schwellwertdetektoren
 - Fermilab Experiment E691 zur Charm Photoproduktion
 - Wassercherenkovexperimente wie Super-K und HAWC
 - IACT-Experimente (MAGIC, H.E.S.S., VERITAS, FACT)
 - IceCUBE

Schwellwertdetektoren - Beispiel Fermilat E691

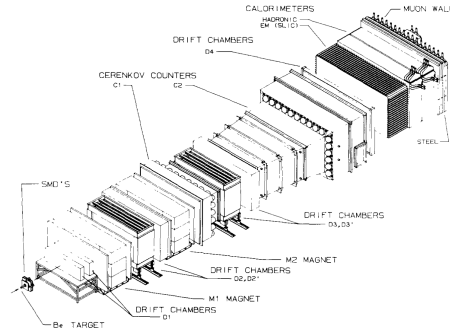
- Experiment zur Charm-Photoproduktion
- Zwei Schwellwertdetektoren - C1 und C2
 - C1 gefüllt mit CO_2 ($n = 1,0003089$) und 3,8 m lang.
 - C2 gefüllt mit CO_2 und He (20/80, $n = 1,0000901$) bei 6,6 m Länge.



Aus: D. Bartlett et.al.: Performance of the cherenkov counters in the FermiLab tagged photon Spectrometer facility ([5]).

Schwellwertdetektoren - Beispiel Fermilat E691

- Jedem Teilchen wird durch Vergleich mit Impulsbestimmung eine Likelihood, die gemessene Menge an Photonen zu erzeugen, zugeordnet
- Daraus wird eine Wahrscheinlichkeit für e , μ , π , K , und p bestimmt.
- Geringe Effizienz ($\epsilon = 3,6\%$ und $6,3\%$) aber hohe Auflösung ($R = 7,7 \cdot 10^{-5}$ und $2,3 \cdot 10^{-5}$).



Aus: D. Bartlett et.al.: Performance of the cherenkov counters in the FermiLab tagged photon Spectrometer facility ([5]).

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Bauweisen

Grundsätze

Nicht fokusierende (Schwellwert-) Detektoren

Fokusierende (Differentielle-) Detektoren

Ring Imaging Cherenkov (RICH-) Detektoren

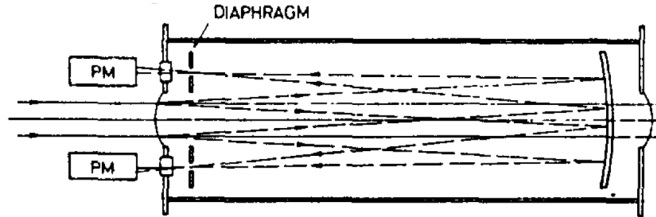
Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

Differentielle Detektoren

Funktionsweise

- Durch eine fokussierende Optik (bspw. eine Blende) werden die Photonen ausgewählt, die zu einem gewählten β korrespondieren.
- Durch geeignete Spiegelposition/-wahl geschieht dies mehrfach
→ Koinzidenzmessung einfach möglich
- Durch Auswahl der Blende und verschieben der Elemente zueinander kann ein Messbereich $\Delta\beta$ bzw. $\Delta\theta$ gewählt werden.
→ Dieser ist dennoch, verglichen mit einem Schwellwertdetektor, klein.



Aus: T. Ypsilantis, J. Seguinot: Theory of ring imagin cherenkov Counters ([3]).

Differentielle Detektoren - Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen ist durch Abbildungsfehler beschränkt

- Chromatisch: Der Brechungsindex des Radiatorgases ist Wellenlängenabhängig

$$\sigma_{\theta \text{ chrom}} \approx \frac{\theta}{2\nu} \left(1 + \frac{1}{\gamma^2 \theta^2} \right) \quad (14)$$

wobei ν die Dispersion des Mediums repräsentiert

- Koma: Schräg zur optischen Achse des Spiegels einfallende Strahlen werden als Punkt mit "Schweif" abgebildet

$$\sigma_{\theta \text{ coma}} \approx \theta^3 \quad (15)$$

- Für kleine Winkel (Gasdetektoren) gilt $\sigma_{\theta \text{ coma}} < \sigma_{\theta \text{ chrom}}$

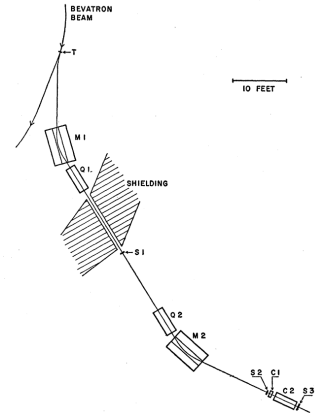
Differentielle Detektoren- Anwendungsgebiete

- Nicht geeignet für Teilchenidentifikation
→ Akzeptanz ($\Delta\beta, \Delta\theta$) zu klein
- Gut geeignet für Teilchenselektion
→ Bei bekannten Beschleunigerparametern: Detektor kann auf gesuchtes Teilchen "eingestellt werden"
- Experimente mit einfachen differentiellen Detektoren selten
 - Abbildungsfehler wurden früh korrigiert: DISC-Detektoren

Differentielle Detektoren - Beispiel Antiprotonendetekung

Anti-Protonendetektion am Bevatron 1955

- Zwei Cherenkovdetektoren C1 (Schwellwert) und C2 (Differentiell)
- Magneten filtern richtige Ladung
- (Anti-) Protonenimpuls auf 1,19 GeV/c berechnet
→ $\beta = 0,78$
- Ionisationsverlust reduziert auf $\beta = 0,765$
- C2 auf Bereich $0,75 \leq \beta \leq 0,78$ eingestellt
- Auflösung von $R = 0,011$ erreicht

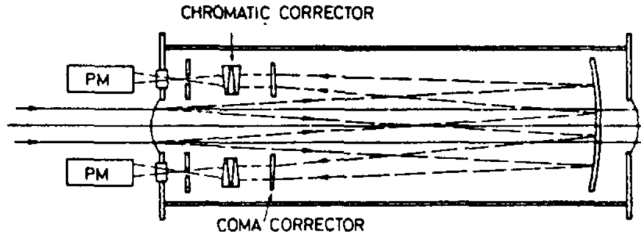


Aus: O. Chamberlain et. al: Detection of Antiprotons ([6]).

Differentielle Detektoren - DISC Design

Funktionsweise

- DISC - Differential Isochronous Self-Collimating
- 1962 von Meunier et.al. konzipiert
- Abwandlung des differentiellen Detektors
 - Einführen von Optiken, die Abbildungsfehler korrigieren
 - Auflösungsvermögen steigt
- Genutzt u.a. am CERN Hyperonbeam



Aus: T. Ypsilantis, J. Seguinot: Theory of ring imagin cherenkov Counters ([3]).

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Bauweisen

Grundsätze

Nicht fokusierende (Schwellwert-) Detektoren

Fokusierende (Differentielle-) Detektoren

Ring Imaging Cherenkov (RICH-) Detektoren

Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

RICH-Detektoren - Funktionsweise

- Im Gegensatz zu den früheren Bauweisen wird der Cherenkovkegel hier direkt auf einen Ring abgebildet
- Radiator und Ausleseelektronik sind getrennt
- Rekonstruktion des Cherenkovwinkels möglich, wenn
 - Ringradius bekannt
 - z-Koordinate des Rings bekannt
 - Detektoraufbau bekannt

RICH-Detektoren - Auflösungsvermögen

Auflösungsvermögen

- RICH Detektor misst nicht Einzellphotonen, sondern ganzen Ring
→ Bestimme mittleres Auflösungsvermögen
- Aus der Formel für das Auflösungsvermögen (8) folgt mit dem Standardabweichungsschätzer

$$\hat{\sigma}_N = \frac{\sigma_N}{\sqrt{N}} \quad (16)$$

für die mittlere Auflösung

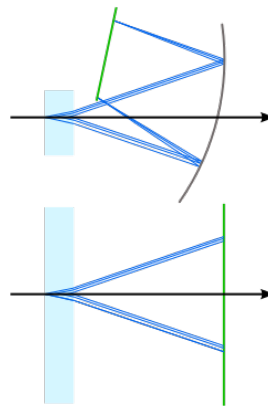
$$R = \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)_1 = \frac{\tan \theta \sigma_\theta}{\sqrt{N}}. \quad (17)$$

Diskussion

- Auflösungsvermögen des RICH-Designs um Faktor $\tan \theta / (2\sigma_\theta)$ besser als bei Schwellwertdetektor
- Bessere Lichtausbeute und kleinerer Winkel erzeugen wieder bessere Auflösung

RICH-Detektoren - Unterscheidung

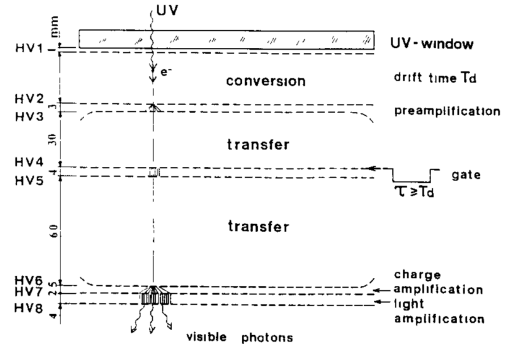
- Grobunterscheidung in fokussierend (oben) und proximity-imaging (unten)
- Viele Ansätze zur Abbildung der Ringe, historisch im weitesten 3 Gruppen:
 - Multi-Step Avalanche Chambers (MSAC, "Lawinenkammern")
 - Time-Projection-Chambers (TPC, Driftkammern)
 - Detection of internally reflected Cherenkov light (DIRC)



Bildrechte: Klaus Foehl

RICH-Detektoren - MSACs

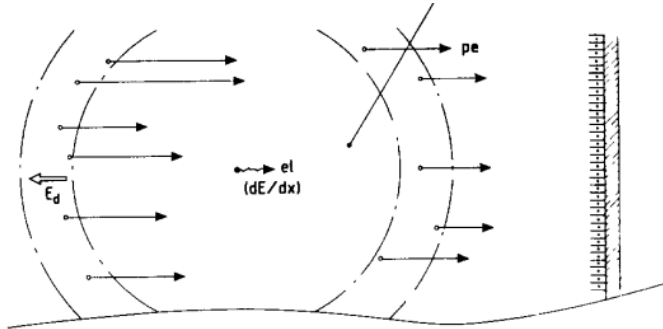
- Ein (UV)-Cherenkovphoton tritt durch Fenster ein und wird in ein Photoelektron (PE) umgewandelt
- Erzeugung von Sekundärelektronen an Drähten
 - Messung durch Vieldrahtkammern und Anoden-Pads (letzte sind relativ modern)
 - Messung i.A. schnell, aber aufwändig
- Mittels Photoeffekt werden viele sichtbare Photonen erzeugt
 - Messung durch CCD-Chips
 - Messung i.A. langsam



Aus: J. Seguinot, T. Ypsilantis: A historical survey of ring imaging Cherenkov counters ([7]).

RICH-Detektoren - TPCs

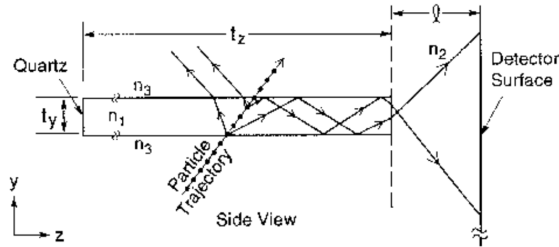
- (UV)-Cherenkovphotonen treten durch Fenster ein und werden in PEs umgewandelt
- PEs werden beschleunigt
- Aufgrund von Stößen mit dem Driftvolumen stellt sich eine konstante Geschwindigkeit ein
- Messung mit Vieldrahtkammer oder Zählrohren
→ Messung i.A. langsam, dafür relativ einfache Konstruktion



Aus: J. Seguinot, T. Ypsilantis: A historical survey of ring imaging Cherenkov counters ([7]).

RICH-Detektoren - DIRCs

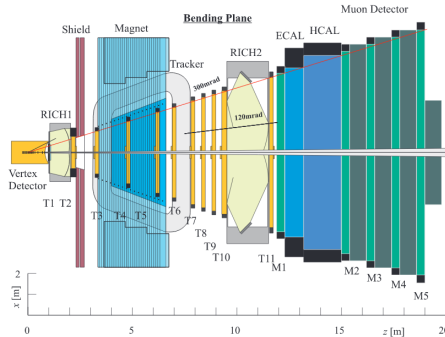
- Cherenkovlicht entsteht in einem Radiatorrohr
- Interne Weiterleitung durch Reflexion
→ Winkelerhaltend
- Aufweitung in einem Expansionsvolumen (hier n_2), danach Messung (bspw. durch Photomultiplier)
- Verwendung bspw. bei PANDA, π/K -Separation bis 4 GeV und $R = 4 \cdot 10^{-5}$, zukünftige DIRCs bis 6 GeV



Bildrechte: SLAC [8].

RICH-Detektoren - Beispiel: LHCb-RICH1

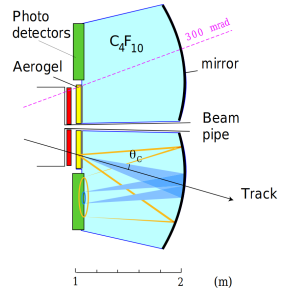
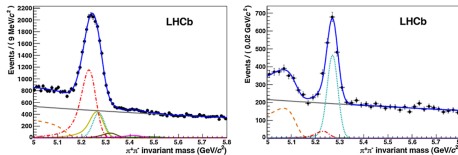
- Einer von zwei LHCb RICH-Detektoren zur Untergrundreduzierung
 - Beispiel: $B_d^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - Möglicher Untergrund: $B_d^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$, $B_s^0 \rightarrow \pi^+ + K^-$, $B_s^0 \rightarrow K^+ + K^-$
→ Filtere Kaonen



Aus: The LHCb Collaboration: RICH Technical Design Report ([9]).

RICH-Detektoren - Beispiel: LHCb-RICH1

- Deckt kompletten LHCb Winkelbereich bei begrenztem Platzangebot ab
 - Winkelbereich horizontal \times vertikal = 300 mrad \times 250 mrad
 - $L \times B \times H \approx 1 \text{ m} \times 2,4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$
- 2 Radiatoren: Aerogel ($n = 1,03$) und C_4F_{10} ($n = 1,0014$) $\rightarrow \pi K$ Separation bis 50 GeV/c möglich
- Messung über PAD-HPDs (Hybrid Photo-Dioden, 98 Pixel)

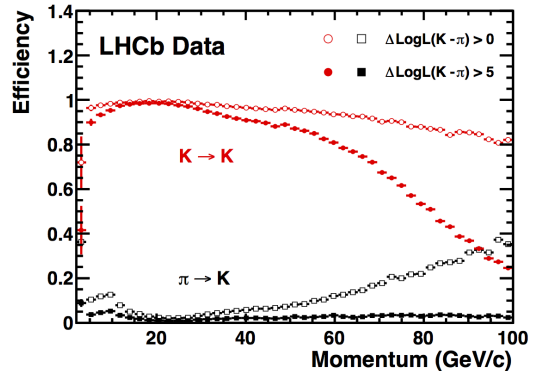
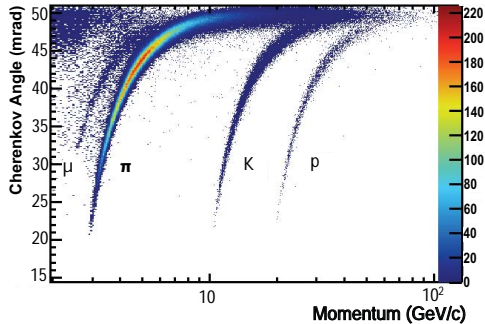


Aus: The LHCb Collaboration: RICH Technical Design Report ([9]).

Links: Vor RICH, Rechts: Nach RICH Informationen, Signal in blau

Aus: The LHCb Collaboration: Performance of the LHCb RICH detector at the LHC ([10]).

RICH-Detektoren - Beispiel: LHCb-RICH1



Beide Grafiken aus: The LHCb Collaboration: LHCb Detector Performance [11]

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

Bauweisen

Ausleseelektronik

Gasgefüllte Detektoren

Photodetektoren

Experimentelle Herausforderungen

Gasgefüllte Detektoren - Vieldrahtkammern

- Beliebte, sehr genaue, Sensorart
- Viele dünne Drähte nebeneinander, die auf positiver Hochspannung liegen
- Trifft ein Elektron einen Draht: Messbarer Impuls entsteht
- Mehrere Möglichkeiten, Eintreffpunkt entlang des Drahtes zu bestimmen:
 - Impulsabnahme an beiden Drahtenden → Verhältnis der Zeitinformation bietet Eintreffpunkt entlang des Drahtes
 - Mehrere zueinander gedrehte Drahtlagen übereinander → Bestimme Schnittpunkt der getroffenen Drähte
- Erweiterung auf 3D-Messung leicht möglich
 - Mehrere Lagen Drähte übereinander
 - Driftkammern

Gasgefüllte Detektoren - Driftkammern

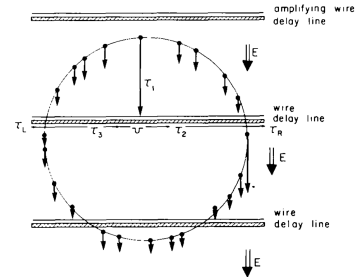
- Einfache, intrinsisch 3 Dimensionale Messmethode
- Teilchen driften bei $v_{\text{drift}} = \text{const.}$ in Zeit τ_1 durch das Medium
- Teilchen treffen auf Draht und lösen Impuls aus
- Die Drähte sind an eine Verzögerungsleitung gekoppelt
 - Signallaufzeit zwischen den Enden bekannt (τ_D)
 - Impuls läuft in Zeit τ_2 und τ_3 nach rechts/links
 - Messe an beiden Seiten Ankunftszeit (τ_R und τ_L)
- Löse das Gleichungssystem

$$\tau_2 + \tau_3 = \tau_D \quad (18)$$

$$\tau_1 + \tau_2 = \tau_R \quad (19)$$

$$\tau_1 + \tau_3 = \tau_L \quad (20)$$

→ Aus Geschwindigkeit und Laufzeitverhältnis 3D
Rekonstruktion möglich



Aus: J. Seguinot, T. Ypsilantis: Photo-ionisation and Cherenkov ring imaging ([12]).

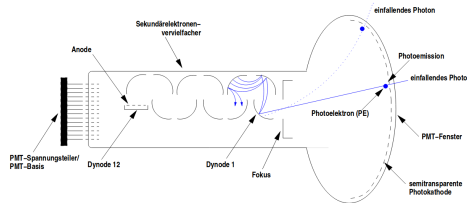
Photodetektoren - Photomultipliertubes (PMTs)

Funktionsweise

- Photonen treten durch Glasfenster in Vakuumröhre ein und erzeugen dabei Photoelektronen aus der Photokathode
- PEs werden durch Hochspannung auf Dynode fokussiert, Produktion von Sekundärelektronen
- Vorgang wird mehrfach wiederholt, Sekundärelektronen werden an Anode gemessen

Vor- und Nachteile

- + Rauscharm und für niedrige Intensitäten geeignet (Einzellphotonenmessung)
- + Produktion eines stark Verstärkten (Faktor $10^5 - 10^7$), elektrischen Signals
- Temperatur und Magnetfeldempfindlich, geringe Quantenausbeute (25 %) bei hohem Preis



Aus: T. Schmidt: Aufbau und Funktionsnachweis eines optischen Moduls mit optisch-analoger Pulsübertragung für den AMANDA-II- und ICECUBE-Detektor ([13]).

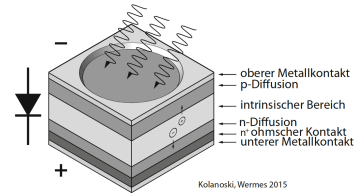
Photodetektoren - Photodioden (PDs)

Funktionsweise

- Aufbau aus p-Dotiertem Halbleiter (Anode) und n-Dotiertem Halbleiter (Kathode)
- Zwischen den Schichten: Ladungsträgerfreie Verarmungszone
- Photon erzeugt in Verarmungszone e/h-Paare
 - Elektronen diffundieren zu n-Dotierten Kathode,
 - Löcher zur p-Dotierten Anode
→ Photostrom entsteht

Vor- und Nachteile

- + Geringer Preis, sehr kompakt
- + Magnetfeld und Temperaturunempfindlich
- + Hohe Quantenausbeute (75 %) über großen Wellenlängenbereich
- Unempfindlich auf kleine Intensitäten, hohes Rauschen durch Verstärkung



Aus: H. Kolanoski und N. Wermes: Teilchendetektoren ([14]).

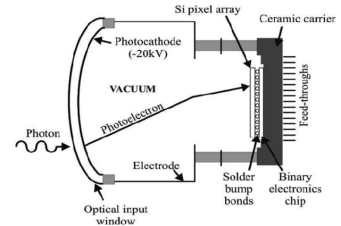
Photodetektoren - Hybride Photodetektoren (HPDs)

Funktionsweise

- Idee: Verbesserung des bewährten PMT Designs
- Ersetze Dynoden des PMTs durch Si-Pixeldetektor
- Signalverstärkung durch Beschleunigung der PEs
- PEs erzeugen e/h-Paare im Silizium, Messung wie bei Photodioden

Vor- und Nachteile

- + Mittleres Preissegment, weniger kompakt als PD, kompakter als PMT
- + Magnetfeld und Temperaturunempfindlich
- + Auf Einzellphotonen sensibel, dennoch weniger starke Verstärkung als PMT
- Geringe Quantenausbeute (25 %)



Aus: H. Kolanski und N. Wermes: Teilchendetektoren ([14]).

Einleitung und Geschichte

Theoretische Grundlagen

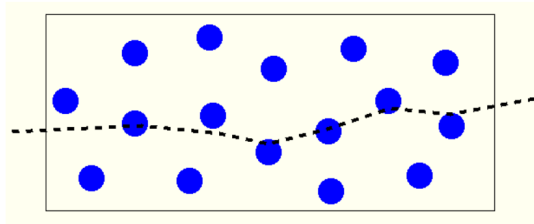
Bauweisen

Ausleseelektronik

Experimentelle Herausforderungen

Experimentelle Herausforderungen

- Neben optischen Fehlerquellen (Koma, chromatische Abberation, etc.) viele weitere Fehlerquellen
- Mehrfachstreuung
 - Teilchen streuen an Radiatormedium
 - Teilchenbahn wird verändert, es wird ein anderer Cherenkovwinkel gemessen
→ Keine scharfen Ringe



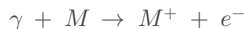
Aus: Universität Innsbruck: Mehrfachstreuung ([15]).

Experimentelle Herausforderungen

- Feedback Photoelektronen
 - Treten auf, wenn Gasdetektoren genutzt werden
 - Anregungsemissionen von Radiatorgaskomponenten (bspw. C) haben ausreichend Energie um das Detektorgas (bspw. TMAE) zu ionisieren
 - Zusätzliche, diffuse Signale
- Mangelhafte Abstimmung von Materialien aufeinander
- Schief einfliegende Teilchen
 - Cherenkovwinkel müssen geometrisch korrigiert werden
- Zum Teil sehr viel Elektronik
 - Rauscharme Bauteile ausgesprochen wichtig, Rauschsignal muss schwächer als Einzellphotonensignal sein

Experimentelle Herausforderungen

- Meist werden nur wenige Photonen gemessen (typische Größenordnung: 10 bis 20 pro Ring)
→ Optimieren der Photonenausbeute wichtig
 - Nutze spezielle Detektorgase, deren Moleküle M einen hohen Querschnitt für



Prozesse haben (bspw. TMAE und TEA)

- Längere Radiatoren (oft Problematisch)
- Großer Brechungsindex des Radiatormaterials (oft Problematisch)
- Messmethoden mit (interner) Verstärkung nutzen → Typisch 15 Photonen pro Ring, ausreichend zur Rekonstruktion

Literaturverzeichnis I

- [1] David J. Meyhöfer. *Studium zur Spurrekonstruktion in großen Wasser-Cherenkov-Detektoren*. http://www.neutrino.uni-hamburg.de/sites/site_neutrino/content/e60876/e101065/e140762/infoboxContent232858/Bachelorarbeit-David-Meyhoefer.pdf. Aufgerufen: 17. Oktober 2018. 2014.
- [2] N. Casali. "Model for the Cherenkov light emission of TeO₂ cryogenic calorimeters". In: *Astroparticle Physics* 91 (2017), S. 44–50. ISSN: 0927-6505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.03.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650517300828>.
- [3] T. Ypsilantis und J. Seguinot. "Theory of ring imaging Cherenkov counters". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 343.1 (1994), S. 30–51. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90532-0](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90532-0). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294905320>.
- [4] Ulrich Schilling. *Teilchenidentifizierung Cherenkov-Detektoren*. https://www.ep1.rub.de/lehre/veranstaltungen/ss14/semexp/vortraege/USchilling_Cherenkov_SS14.pdf. Aufgerufen: 24. Oktober 2018. 2014.
- [5] D. Bartlett et.al. "Performance of the cherenkov counters in the FermiLab tagged photon Spectrometer facility". In: *Nuclear Instruments and Methodes in Physics Research* 260 (1987), S. 55–75. URL: https://ac.els-cdn.com/0168900287903871/1-s2.0-0168900287903871-main.pdf?_tid=9525492e-05ef-4bed-9bb5-51d26b816f6f&acdnat=1539855042_d9705627ecbca2c6a1daeb5b087fc9d3.

Literaturverzeichnis II

- [6] Owen Chamberlain et al. "Observation of Antiprotons". In: *Phys. Rev.* 100 (3 Nov. 1955), S. 947–950. DOI: 10.1103/PhysRev.100.947. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.100.947>.
- [7] J. Seguinot und T. Ypsilantis. "A historical survey of ring imaging Cherenkov counters". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 343.1 (1994), S. 1–29. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90531-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90531-2). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294905312>.
- [8] SLAC. *Particle ID at the SLAC asymmetric B-factory, PEP-II*. <https://www.slac.stanford.edu/BFR00T/www/Detector/DIRC/PID.html>. Aufgerufen: 21. Oktober 2018. 2001.
- [9] The LHCb Collaboration. *RICH Technical Design Report*. <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/rich/pdf/richtdr.pdf>. Aufgerufen: 21. Oktober 2018. 2000.
- [10] The LHCb RICH Collaboration et al. "Performance of the LHCb RICH detector at the LHC". In: *The European Physical Journal C* 73.5 (Mai 2013), S. 2431. ISSN: 1434-6052. DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2431-9. URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2431-9>.
- [11] LHCb collaboration et al. "LHCb Detector Performance". In: (2014). DOI: 10.1142/S0217751X15300227. eprint: [arXiv:1412.6352](https://arxiv.org/abs/1412.6352).
- [12] J. Seguinot und T. Ypsilantis. "Photo-ionization and Cherenkov ring imaging". In: *Nuclear Instruments and Methods* 142.3 (1977), S. 377–391. ISSN: 0029-554X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(77\)90671-1](https://doi.org/10.1016/0029-554X(77)90671-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X77906711>.

Literaturverzeichnis III

- [13] Torsten Schmidt. "Aufbau und Funktionsnachweis eines optischen Moduls mit optisch-analoger Pulsübertragung für den AMANDA-II- und ICECUBE-Detektor". Diss. Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I, 2002. doi: <http://dx.doi.org/10.18452/14910>.
- [14] H. Kolanski und N. Wermes. *Teilchendetektoren*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45350-6>.
- [15] Universität Innsbruck. *Mehrfachstreuung*.
<http://physik.uibk.ac.at/hephy/streuung/vielfach/mehrfach.html>. Aufgerufen: 24. Oktober 2018.