

Moderne Experimentalphysik III (Teilchenphysik) (SS 18)

<http://ekpwww.physik.uni-karlsruhe.de/~rwolf/teaching/ss18-teilchen.html>

Übungsblatt 4

Name des Übungsgruppenleiters und Gruppenbuchstabe:

Namen der bearbeitenden Gruppe:

Aufgabe 8: Ring Imaging Cherenkov Detektor bei LHCb

(10 Punkte)

Der LHCb-Detektor ist mit einem System aus *ring-imaging* Cherenkov-Detektoren (RICH) zur Teilchenidentifikation ausgestattet. In Abbildung 1 ist für eine große Anzahl detektierter Teilchen der rekonstruierte Cherenkov-Winkel, θ_C , in Abhängigkeit des Teilchenimpulses gezeigt. Der Impuls wurde dabei mit anderen LHCb-Detektorsystemen bestimmt. Deutlich zu erkennen sind verschiedene Häufungen von Einträgen, die bei gleichem Impuls unterschiedlichen Winkeln entsprechen. Das aktive Medium, das die Cherenkov-Strahlung aussendet, ist ein Perfluorbutan-Gas (C_4F_{10}), dessen Brechungsindex (bei $0^\circ C$ und $101,325 \text{ kPa}$) $n = 1,0014$ beträgt. Für diese Aufgabe können sie n als konstant annehmen.

a)

Cherenkov-Strahlung wird für geladene Teilchen erst oberhalb einer für das Medium charakteristischen Geschwindigkeit emittiert. Dies kann, mit einem sog. Schwellenzähler, bereits zur einfachen Teilchenidentifikation genutzt werden. Verifizieren Sie die in Abbildung 1 angegebene Teilchenbestimmung, indem Sie zeigen, dass die Impulse, ab denen Cherenkov-Strahlung emittiert wird, etwa $2,6 \text{ GeV}$ für Pionen, $9,3 \text{ GeV}$ für Kaonen und $17,7 \text{ GeV}$ für Protonen betragen. (Die Myonen können Sie für die Lösung der Aufgabe ignorieren.)

b)

Wie aus Abbildung 1 zu erkennen ist, kann man bei Kenntnis von θ_C auch oberhalb der Schwellenimpulse die verschiedenen Teilchensorten unterscheiden. Experimentell wird θ_C bestimmt, indem man das emittierte Cherenkov-Licht mit einem Photodetektor, der in Flugrichtung des Teilchens angeordnet ist, misst und den Radius des Cherenkov-Lichtkegels bestimmt. (Das Licht trifft in einem Ring auf den Detektor, daher der Name: *ring-imaging*.) Stellen Sie den Radius als Funktion des Impulses für Pionen, Kaonen und Protonen zwischen 0 und 30 GeV graphisch dar. Nehmen Sie dazu vereinfachend an, dass die Cherenkov-Strahlung nur an einer Stelle im aktiven Medium ausgesendet wird. Der Detektor befinde sich in 50 cm Entfernung von dieser Stelle entlang der Flugrichtung des Teilchens. Im realen Detektor erreicht man durch geschickt angeordnete Spiegel, dass das Cherenkov-Licht stets auf denselben Ring projiziert wird während sich das Teilchen durch das aktive Medium bewegt.

c)

Im realen LHCb RICH-Detektor durchlaufen die Teilchen das aktive Medium auf einer Strecke der Länge $L = 1 \text{ m}$. Das von diesen Teilchen emittierte Cherenkov-Licht wird in einem Wellenlängenbereich von $\lambda_1 = 200 \text{ nm}$ bis $\lambda_2 = 600 \text{ nm}$ nachgewiesen. Zeigen Sie: Aus dem in der Vorlesung angegebenen¹, doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitt

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

folgt für die erwartete Gesamtzahl der dabei erzeugten Cherenkov-Photonen im angegebenen Wellenlängenbereich:

$$N_\gamma = 2\pi \alpha z^2 L \sin^2 \theta_C \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right).$$

Wie viele Photonen erzeugt ein Pion, Kaon, oder Proton mit einem Impuls von jeweils $9,5 \text{ GeV}$ im angegebenen Wellenlängenbereich im RICH-Detektor von LHCb?

¹Siehe z.B. Vorlesung-06 Seite 9

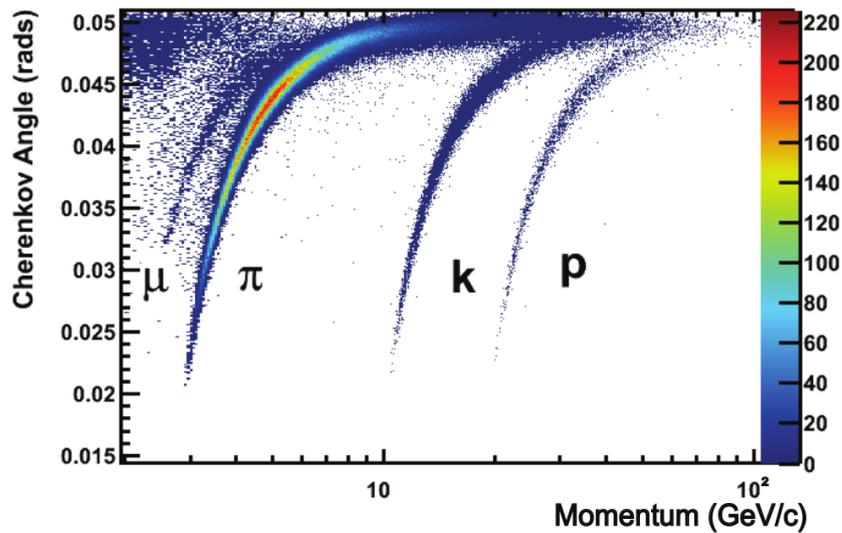


Abbildung 1: Rekonstruierter Cherenkov-Winkel, θ_C , als Funktion des Teilchenimpulses im RICH-Detektor des LHCb-Experiments [1]. Die Farbskala gibt die Anzahl der detektierten Teilchen an.

Aufgabe 9: Kalorimeter

(3 Punkte)

Die Energieauflösung, σ_E , eines Kalorimeters ist definiert als die Standardabweichung der gemessenen Energien bei vielen Einzelmessungen. Man kann sie z.B. in Teststrahlbauten erhalten, bei denen man baugleiche Kalorimeterzellen beliebig oft mit einzelnen Teilchen bekannter Energie beschießt und die Antwort (*response*) des Kalorimeters bestimmt.

a)

Beschreiben Sie, wie die Energiemessung in einem elektromagnetischen Kalorimeter abläuft, und welche Fluktuationen der Anzahl der dabei erzeugten Teilchen in einem, wie oben erwähnten Teststrahlaufbau, Einfluß auf die Energiemessung der einfallenden Teilchen nehmen. Motivieren Sie dann, warum der funktionale Zusammenhang zwischen der relativen Energieauflösung eines elektromagnetischen Kalorimeters und der Energie des einfallenden Teilchens als

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{A}{\sqrt{E}}$$

angenommen werden kann, wobei E die Energie des einfallenden Teilchens und A eine detektor-spezifische Konstante ist.

b)

Ermitteln Sie die kritische Energie, E_c , von flüssigem Argon, Blei und Wolfram aus den Tabellen der PDG. Für welches Kalorimetermaterial würden Sie die bessere (stochastische) Energieauflösung erwarten, Einkristalle aus Bleiwolframat (PbWO_4) oder flüssiges Argon?

Aufgabe 10: Spurdetektor

(7 Punkte)

Die Ortsauflösung, σ_x , eines Spurdetektors ist definiert als die Standardabweichung der gemessenen Position x nach vielen Einzelmessungen. Man kann sie z.B. aus Teleskopmessungen erhalten, bei denen man die zu testende Spurdetektorlage zwischen zwei bekannten Spurdetektorsystemen montiert. Mit Hilfe der bekannten Spurdetektoren bestimmt man den erwarteten

Durchstoßpunkt der geladenen Teilchen, mit denen man den Aufbau bestrahlt und misst dann das Antwortverhalten der zu testenden Detektorlage.

a)

In einer Vieldraht-Proportionalkammer seien die Anodendrähte parallel im Abstand d voneinander gespannt. Zeigen Sie, dass dann, unter der Annahme, dass die Messungen $\{x_i\}$ der erwarteten Durchstoßpunkte gleichverteilt sind, die Ortsauflösung in Richtung x , senkrecht zu den Drähten, gegeben ist durch

$$\sigma_x = \frac{d}{\sqrt{12}}.$$

b)

Nehmen Sie das folgende Szenario an: ein Spurdetektor befindet sich in einem homogenen Magnetfeld der Stärke B (gemessen in T), dessen Feldlinien parallel zur Achse des Detektors verlaufen. Der Detektor besteht aus mehreren Lagen, die es erlauben die Krümmung der Spur zu vermessen. Der Radius (Abstand vom Wechselwirkungspunkt) der äußersten Lage beträgt L (gemessen in m). Der Detektor wird nun von einem Teilchen mit Transversalimpuls p_T (senkrecht zu den Magnetfeldlinien, und gemessen in GeV), wie in Abbildung 2 skizziert, durchflogen. Die Größe s in Abbildung 2 bezeichnet die Sagitta der Kreisbahn, mit Radius $R \gg L$, die der Teilchentrajektorie einbeschrieben ist. Zeigen Sie, dass unter dieser Annahme ($R \gg L$) zwischen s , L und R der Zusammenhang

$$s = \frac{L^2}{8R}$$

besteht. Verwenden Sie dieses Ergebnis, um zu zeigen, dass für die relative Transversalimpulsauflösung der folgende Zusammenhang gilt:

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{8\sigma_x}{0,3BL^2} \cdot p_T.$$

Literatur

- [1] LHCb RICH Group Collaboration, “Performance of the LHCb RICH detector at the LHC”, Eur. Phys. J. C **73** (2013), 2431.
doi:10.1140/epjc/s10052-013-2431-9.

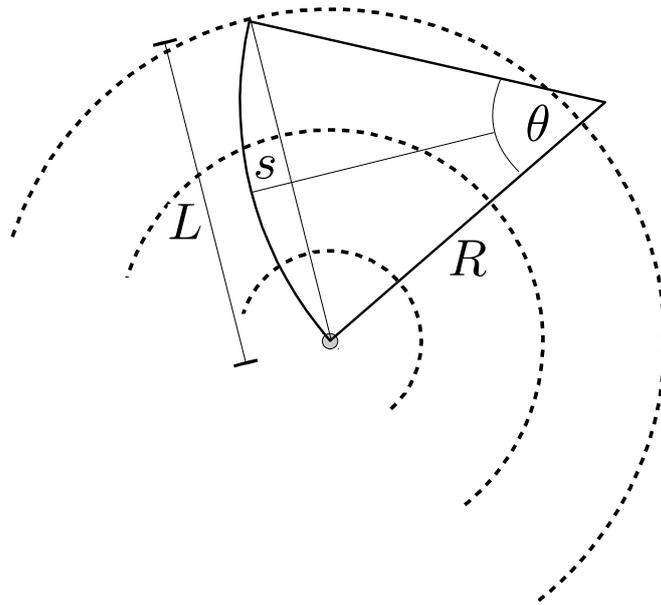


Abbildung 2: Illustration der in **Aufgabe 10** beschriebenen Anordnung. Die gestrichelten konzentrischen Kreissektoren stellen die Lagen des Spurdetektors dar. Der graue Punkt in ihrem gemeinsamen Ursprung entspricht dem gedachten Wechselwirkungspunkt. Die gedachten Magnetfeldlinien verlaufen in die Zeichenebene. Die der rekonstruierten Teilchenspur eingeschriebene Kreisbahn (mit Radius R) ist vom Wechselwirkungspunkt bis zur letzten Lage des Spurdetektors (im Abstand L vom Wechselwirkungspunkt) eingezeichnet. Die Sagitta dieser Kreisbahn ist mit s bezeichnet.