

Übungen zu Moderne Experimentalphysik III (Teilchen und Hadronen) Sommersemester 2020

Übungsblatt Nr. 2

Bearbeitung bis 11.05.2020

Aufgabe 1: Entdeckung der Antimaterie

(2+1+7+0=10 Punkte)

Carl David Anderson gelang mit der Entdeckung des Positrons in der kosmischen Strahlung der experimentelle Nachweis von Antimaterie. In Abb. 1 ist eine Nebelkammeraufnahme gezeigt, die Anderson im Jahr 1931 auf dem Mt. Wilson erstellt hat. Die Nebelkammer befindet sich in einem Magnetfeld von 1,5 T, dessen Feldlinien in die Papierebene hinein zeigen. Ein Teilchen der kosmischen Strahlung tritt in die Nebelkammer ein und hinterlässt eine gekrümmte Spur. Die Nebelkammer ist durch eine 6 mm dicke Bleiplatte in zwei Hälften aufgeteilt (horizontaler Streifen in Abb. 1).

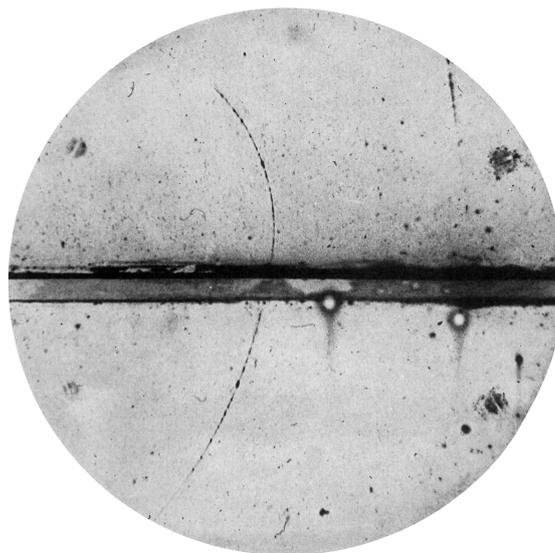


Abbildung 1: Nebelkammeraufnahme, entnommen aus [1].

- a) Begründen Sie, warum das Teilchen von unten in die Nebelkammer eintritt und nicht von oben. Welche Aussage über das Teilchen bezüglich seiner Eigenschaften können Sie bereits nur durch Betrachtung der Nebelkammeraufnahme treffen?
- b) Der Krümmungsradius der Teilchenbahn beträgt zunächst 15,5 cm. Nach Durchlaufen der Bleiplatte beträgt der Krümmungsradius der Bahn 5,3 cm. Schätzen Sie den Impuls des Teilchens vor und nach der Bleiplatte ab. Nutzen Sie bei der Rechnung, dass für den Krümmungsradius R (in m) der Bahn geladener Teilchen im Magnetfeld in guter Näherung gilt

$$R = \frac{p}{0,3qB}.$$

Dabei sind p der Impuls in GeV und q die Ladungszahl des Teilchens und B ist die senkrecht zu p zeigende magnetische Flussdichte in T.

- c) Beweisen Sie, dass das Teilchen ein Positron ist und nicht das im Jahr 1931 bereits bekannte Proton. Vergleichen Sie dazu den Energieverlust nach Durchlaufen einer 6 mm dicken Bleiplatte für ein Proton, ein Pion und ein Elektron. Der Energieverlust durch Ionisation kann für diese Aufgabe durch die in der Vorlesung hergeleitete Näherung der Bethe-Gleichung

$$-\frac{dE}{dX} = \underbrace{4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A}}_K z^2 \frac{1}{\beta^2} \ln \left(\frac{m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right)$$

bestimmt werden, wobei Sie bei der Rechnung zusätzlich annehmen können, dass der Energieverlust konstant ist. Warum ist dies hier zulässig? Der Vorfaktor beträgt $K = 1,3 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{Pb}}}$ und $I = 820 \text{ eV}$.

Der Energieverlust durch Bremsstrahlung ist gegeben durch

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

wobei die Strahlungslänge von Blei $X_0 = 0,56 \text{ cm} \cdot \rho_{\text{Pb}}$ beträgt.

- d) **Nur für aktiven Beitrag:** Lesen Sie die Originalpublikation [1] und fassen Sie die Details der Entdeckung in einer kurzen Präsentation zusammen. Gehen Sie dabei auch auf den experimentellen Aufbau ein und ziehen Sie ggf. andere Quellen in Betracht.

Aufgabe 2: RICH-Detektor bei LHCb

(3+4+3=10 Punkte)

Der LHCb-Detektor am LHC ist mit einem System aus “ring-imaging Cherenkov”-Detektoren (RICH-Detektoren) zur Teilchenidentifikation ausgestattet. In Abb. 2 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 Gruppen von Einträgen, die bei gleichem Impuls unterschiedlichen Winkeln entsprechen. Das aktive Medium, welches die Cherenkov-Strahlung aussendet, ist ein Perfluorbutan-Gas (C_4F_{10}), dessen Brechungsindex $n = 1,0014$ beträgt¹ [2].

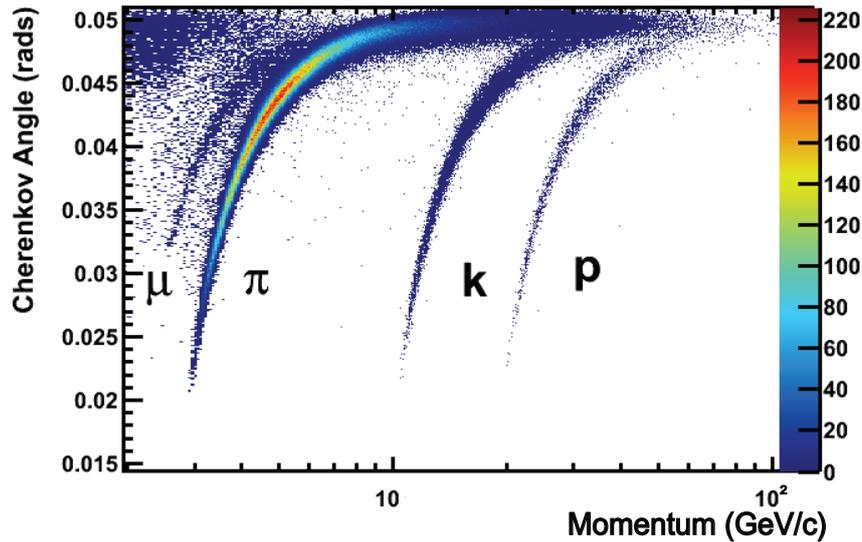


Abbildung 2: Rekonstruierter Cherenkov-Winkel als Funktion des Teilchenimpulses im RICH-Detektor des LHCb-Experiments. Die Farbskala gibt die Anzahl der detektierten Teilchen an. Entnommen aus [2].

- a) Cherenkov-Strahlung wird erst oberhalb einer für das Medium charakteristischen Geschwindigkeit emittiert. Dies kann bereits zur einfachen Teilchenidentifikation genutzt werden (“Schwellenzähler”). Verifizieren Sie die in Abb. 2 angegebene Teilchenbestimmung, indem Sie zeigen, dass die Impulse, ab denen Cherenkov-Strahlung emittiert wird, etwa $2,6 \text{ GeV}/c$ für Pionen, $9,3 \text{ GeV}/c$ für Kaonen und $17,7 \text{ GeV}/c$ für Protonen betragen (Myonen seien hier vernachlässigt). Handelt es sich hierbei um neutrale Pionen und Kaonen (π^0 und K^0) oder geladene (π^\pm und K^\pm)? Begründen Sie kurz Ihre Antwort.
- b) Wie aus Abb. 2 zu erkennen, kann man bei Kenntnis des Cherenkov-Winkels θ_C auch oberhalb der Schwellenimpulse die verschiedenen Teilchensorten unterscheiden. Experimentell wird der Cherenkov-Winkel 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 — deshalb “ring-imaging”.) Bestimmen Sie den Ringradius als Funktion von Teilchenmasse und -impuls. Stellen Sie den Radius als Funktion des Impulses für Pionen, Kaonen und Protonen zwischen 0 und $30 \text{ GeV}/c$ graphisch dar. Nehmen Sie dazu in

¹Bei 0° C , $101,325 \text{ kPa}$, 400 nm . Für die Aufgabe kann n als konstant angenommen werden.

einem vereinfachten Bild an, dass die Cherenkov-Strahlung nur an einer Stelle im aktiven Mediums ausgesendet wird². Der Detektor befindet sich in 50 cm Entfernung von dieser Stelle entlang der Flugrichtung des Teilchens.

- c) Im realen Detektor durchlaufen die Teilchen das aktive Medium auf einer Strecke der Länge L . Zeigen Sie, dass für die erwartete Gesamtzahl der dabei erzeugten Cherenkov-Photonen mit Wellenlängen zwischen λ_1 und λ_2 aus dem in der Vorlesung angegebenen, doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitt $\frac{dN_\gamma^2}{dE_\gamma dx}$ folgt

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

Nehmen Sie dabei an, dass n konstant ist und $\lambda_1 < \lambda_2$. Wie viele Photonen erzeugen ein Pion, ein Kaon und ein Proton mit Impulsen von 9,5 GeV/c im RICH-Detektor von LHCb, für den $L = 1$ m ist und der Cherenkov-Photonen zwischen $\lambda_1 = 200$ nm und $\lambda_2 = 600$ nm messen kann?

Aufgabe 3: LHCb-Experiment

(0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: In der vorherigen Aufgabe haben Sie sich bereits mit der Funktionsweise des RICH-Detektors am LHCb-Experiment vertraut gemacht. Beschreiben Sie in einem kurzen Vortrag den Aufbau und die Funktionsweise des kompletten LHCb-Experiments. Worin besteht der wesentliche Unterschied im Design des Detektors im Vergleich zum Detektor des CMS-Experiments, welchen Sie bereits in der Vorlesung kennen gelernt haben?

Literatur

- [1] C. D. Anderson, “The Positive Electron”, *Phys. Rev.* **43** (Mar, 1933) 491–494. doi:10.1103/PhysRev.43.491.
- [2] LHCb RICH Group Collaboration, “Performance of the LHCb RICH detector at the LHC”, *Eur. Phys. J.* **C73** (2013) 2431, arXiv:1211.6759. doi:10.1140/epjc/s10052-013-2431-9.

²Im 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.