

**Übungen zu  
Moderne Experimentalphysik III  
(Kerne und Teilchen)  
Sommersemester 2017**

---

**Übungsblatt Nr. 2**

Ausgabe: Di, 09.05.2017

Abgabe: Di, 16.05.2017 (13:30) Briefkasten Geb. 30.23

---

Name des Übungsgruppenleiters und Gruppenbuchstabe:

Namen der bearbeitenden Gruppe:

### Aufgabe 1: Entdeckung der Antimaterie

(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 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 Höhenstrahlung tritt von unten im Bild in die Nebelkammer ein und hinterlässt eine kreisförmige Spur. Die Nebelkammer ist durch eine 6 mm dicke Bleiplatte getrennt (horizontaler Streifen in Abb. 1). Der Krümmungsradius der Teilchenbahn beträgt zunächst 15.5 cm. Nach Durchlaufen dieser Bleiplatte beträgt der Krümmungsradius der Bahn 5.3 cm.

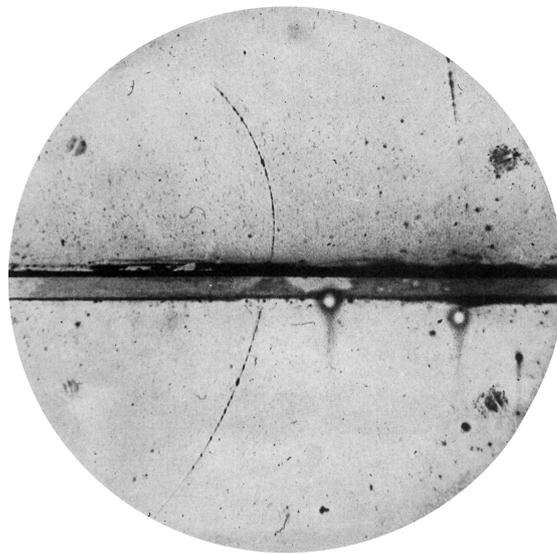


Abbildung 1: Nebelkammeraufnahme, entnommen aus [1].

- a) Schätzen Sie den Impuls des Teilchens vor und nach der Bleiplatte ab. Nutzen Sie bei der Rechnung, dass für den Krümmungsradius  $R$  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,  $B$  die senkrecht zu  $p$  zeigende magnetische Flussdichte in T, und  $R$  in m.

- b) Beweisen Sie, dass das Teilchen ein Positron ist. 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-Formel

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

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.

### **Aufgabe 2: RICH-Detektor bei LHCb** (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  $\theta_C$  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 ( $\text{C}_4\text{F}_{10}$ ), dessen Brechungsindex  $n = 1,0014$  beträgt<sup>1</sup> [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 GeV für Pionen, 9,3 GeV für Kaonen und 17,7 GeV für Protonen betragen (Myonen seien hier vernachlässigt).
- b) Wie aus Abb. 2 zu erkennen, kann man bei Kenntnis des Cherenkov-Winkels  $\theta_C$  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 GeV graphisch dar. Nehmen Sie dazu in

---

<sup>1</sup>Bei 0° C, 101,325 kPa, 400 nm. Für die Aufgabe kann  $n$  als konstant angenommen werden.

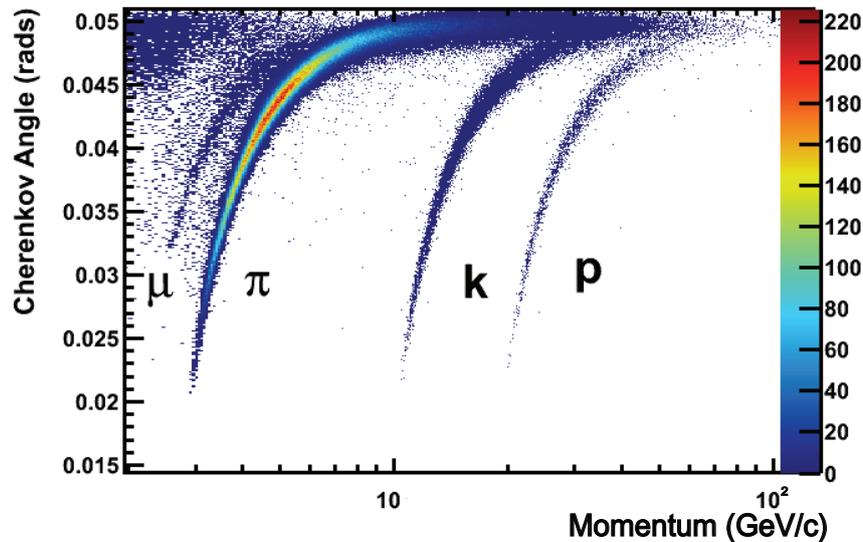


Abbildung 2: Rekonstruierter Cherenkov-Winkel als Funktion des Teilchenimpulses im RICH-Detektor des LHCb-Experiments. Die Farbskala gibt die Anzahl der detektierten Teilchen an. Entnommen aus [2].

einem vereinfachten Bild an, dass die Cherenkov-Strahlung nur an einer Stelle im aktiven Medium ausgesendet wird<sup>2</sup>. 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  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  aus dem in der Vorlesung angegebenen, doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitt  $\frac{dN_\gamma^2}{dE_\gamma dx}$  folgt

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

Nehmen Sie dabei an, dass  $n$  konstant ist und  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Wie viele Photonen erzeugen im Mittel ein Pion, ein Kaon und ein Proton mit 9,5 GeV Impuls 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?

## Literatur

- [1] C. D. Anderson, “The Positive Electron”, *Phys. Rev.* **43** (Mar, 1933) 491–494. doi:10.1103/PhysRev.43.491.

<sup>2</sup>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.

- [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](#).