

Übungen zu Moderne Experimentalphysik II, Teil 2 (Kern- und Teilchenphysik) Wintersemester 2023/24

Übungsblatt Nr. 2

Bearbeitung bis 09.01.2024

Tutorium: 11.01.2024

Saalübung: 10.01.2024

Link zur ILIAS-Hauptseite:

https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=crs_2198626&client_id=produktiv

Aufgabe 1: Entdeckung der Antimaterie

- a) **(2 Punkte frei zu vergeben)** Das Experiment besteht aus einer kreisförmigen Nebelkammer, Durchmesser 14 cm und Dicke 1 cm, sowie einer Bleiplatte. Die ganze Apparatur befindet sich in einem Magnetfeld mit 1,5 T, dessen Feldlinien senkrecht zur Ebene der Nebelkammer stehen. Dadurch werden geladene Teilchen, welche sich in der Ebene der Nebelkammer bewegen durch das Magnetfeld auf gekrümmte Bahnen gezwungen. Interessante Ereignisse werden mithilfe einer fotografischen Platte aufgezeichnet. Als Teilchenquelle wird die kosmische Strahlung verwendet. Insgesamt umfasst der untersuchte Datensatz 1300 Aufnahmen von Spuren der kosmischen Strahlung mit insgesamt 600-700 Spuren von positiv geladenen Teilchen, wobei 15 Aufnahmen Spuren von positiv geladenen Teilchen zeigen, welche nicht von Protonen stammen können. Anhand der beobachteten Krümmungsradien und der Reichweite lassen sich andere Größen, wie z.B. Ladung und Masse, einschränken. Als Erzeugungsmechanismus der Positronen werden zwei Szenarien diskutiert. Zum einen die elektromagnetische Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den positiv geladenen Protonen, wodurch ein hochenergetisches Photon erzeugt wird. Dieses kann dann wiederum über Paarbildung ein Positron erzeugen. Als Alternative wird die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Neutronen diskutiert. Das Neutron wandelt sich hierbei um in ein Proton und Elektron oder ein hypothetisches negativ geladenes Proton und ein Positron. Darüber hinaus wird die Frage aufgeworfen ob das Neutron ein fundamentales Teilchen ist oder als Binärsystem von Proton und Elektron existiert, bzw. ob das Proton eigentlich aus einem Neutron und Positron besteht (zum damaligen Zeitpunkt war noch nichts über die Substruktur von Nukleonen bekannt).

- b) Der Krümmungsradius der Teilchenbahn ist größer in der unteren Hälfte der Nebelkammer im Vergleich zur oberen Hälfte, entsprechend ist der Impuls in der unteren Hälfte größer, also durchfliegt das Teilchen die Nebelkammer von unten nach oben, da das Teilchen innerhalb der Bleiplatte an Energie verliert. Aus der Krümmungsrichtung der Bahn und der Polung des Magnetfelds folgt, dass es sich um ein positiv geladenes Teilchen handelt **(1 Punkt)**.
- c) Die Impulse vor (p_i , mit $R_i = 0.155\text{ m}$) und hinter (p_f , mit $R_f = 0.053\text{ m}$) der Bleiplatte betragen

$$\begin{aligned} p_i &= 0.3 \cdot 0.155\text{ m} \cdot 1.5\text{ T} \\ &= 0.070\text{ GeV} \\ &= 70\text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_f &= 0.3 \cdot 0.053\text{ m} \cdot 1.5\text{ T} \\ &= 0.024\text{ GeV} \\ &= 24\text{ MeV} \end{aligned}$$

für ein Teilchen mit Ladungszahl $+1$. **(1 Punkt)**

- d) Mit $E = \sqrt{p^2 + m^2}$ sowie $\beta = p/E$ und $\gamma = E/m$ folgt aus Aufgabenteil c)

	m in MeV	E_i in MeV	E_f in MeV	β_i	γ_i
Proton	938	940.6	938.3	0.074	1.003
Pion	140	156.5	142.0	0.447	1.118
Elektron	0.511	70.0	24.0	> 0.999	137

Proton und Pion verlieren beim Durchlaufen der Bleiplatte ihre Energie vorwiegend durch Ionisation **(1 Punkt)**. Mit der in der Aufgabenstellung gegebenen Näherungsformel folgt zusammen mit der Linearisierungsannahme für den Energieverlust

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{dE}{dx} \cdot \Delta x = \frac{dE}{dX} \cdot \rho \cdot \Delta x \\ &= 1.3 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{Pb}}} \cdot \frac{1}{\beta^2} \ln \left(\frac{511\text{ keV}}{0.82\text{ keV}} \beta^2 \gamma^2 \right) \cdot \rho_{\text{Pb}} \cdot 0.6\text{ cm}. \quad \textbf{(1 Punkt)} \end{aligned}$$

(Man beachte, dass mit X die Massenbelegung und mit $x = X/\rho$ die Strecke bezeichnet ist.) Der Energieverlust beträgt für ein Proton $\Delta E = 176\text{ MeV}$ und für ein Pion $\Delta E = 19.7\text{ MeV}$. In beiden Fällen ist das nicht mit dem beobachteten Energieverlust kompatibel, die anfängliche Energie reicht bei weitem nicht aus, um die Platte zu durchdringen. **(1 Punkt)**

Bei Lösung durch Integration der Bethe-Gleichung ergibt sich, dass der größte Energieverlust am Ende der Wegstrecke auftritt, wenn $\beta \rightarrow 0$ ("Bragg-Peak"). Durch die Näherung des konstanten Energieverlusts, der mit β_i bestimmt wurde, haben wir den Energieverlust also sogar unterschätzt; die Schlussfolgerung bleibt also auch mit der Näherung dieselbe. **(1 Punkt)**

Ein 70 MeV Elektron verliert Energie hauptsächlich durch Bremsstrahlung, da 70 MeV weit über der kritischen Energie in Blei von ca. $E_C \approx \frac{610 \text{ MeV}}{Z+1.24} = 7.3 \text{ MeV}$ liegt (**1 Punkt**). Die Energie E_f nach Durchlaufen der Bleiplatte ergibt sich aus

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

zu

$$E_f(x) = E_i e^{-x \cdot \rho_{\text{Pb}} / X_0}$$

also

$$E_f = 70 \text{ MeV} e^{-0.6/0.56} = 24.0 \text{ MeV}$$

in guter Übereinstimmung mit der Messung. Somit muss es sich um ein Positron (Antielektron) handeln (**1 Punkt**).

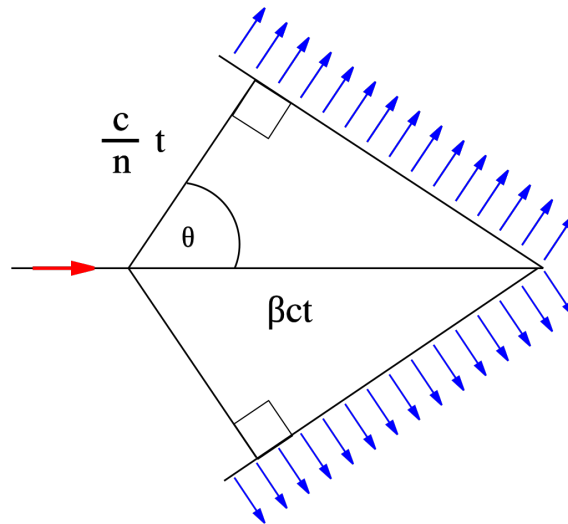


Abbildung 1: Skizze zur Erklärung des Cherenkov-Effekts (Quelle: Wikipedia)

Aufgabe 2: Cherenkov-Effekt

(1+2+2+3+2=10 Punkte)

Bewegen sich hochenergetische Teilchen durch ein Medium, so kann Cherenkov-Strahlung entstehen.

- a) Welche beiden Voraussetzungen müssen dazu insbesondere erfüllt sein? Begründen Sie jeweils kurz warum. (1 Punkt)
- Teilchen geladen, da sonst keine elektromagnetische Wechselwirkung stattfindet
 - Teilchen schneller als Lichtgeschwindigkeit in dem Medium, da sonst keine positive Interferenz zustande kommt
- b) Leiten Sie anhand einer Skizze den Öffnungswinkel des Cherenkov-Kegels in Abhängigkeit der Geschwindigkeit β des eintreffenden Teilchens und der optischen Dichte n des Mediums her.

(2 Punkte) Lichtwellen breiten sich kreisförmig in alle Richtungen aus. Wenn Teilchen schneller als Lichtgeschwindigkeit im Medium ist, ergibt sich Überlagerung in Form des Wellenbergs mit Ausbreitungsrichtung (blaue Pfeile in Abb. 1) senkrecht zum Wellenberg. In der Zeit t legt das Teilchen die Strecke βct , Licht hingegen die Strecke $\frac{ct}{n} < \beta ct$ zurück. Es ergibt sich folglich:

$$\cos \theta = \frac{ct}{n\beta ct} = \frac{1}{n\beta}. \quad (1)$$

- c) Beschreiben Sie kurz einen Versuchsaufbau, mithilfe dessen sich der Öffnungswinkel messen lässt. Fertigen Sie auch eine grobe Skizze an.
- (2 Punkte) Für die Messung wird offensichtlich ein Photonensensor irgendeiner Art benötigt. Zudem sollte in der Beschreibung oder Skizze erkennbar sein, wie die Richtungsinformation verarbeitet wird.

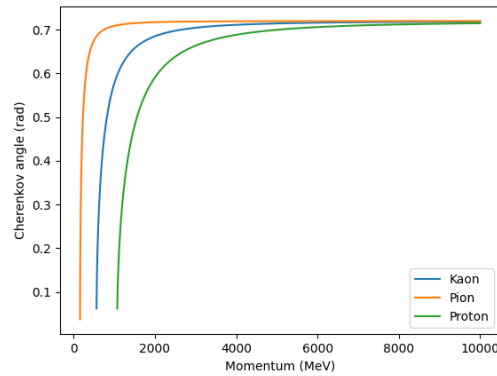


Abbildung 2: Theoretische Vorhersage des Zusammenhangs zwischen Cherenkov-Winkel und Impuls der Teilchen.

- d) Mit einem weiteren Detektor messen Sie zusätzlich zum Cherenkov-Winkel noch den Impulsbetrag der Teilchen. Erstellen Sie mithilfe des Computers eine Grafik, welche die theoretische Erwartung des Zusammenhangs zwischen Cherenkov-Winkel in Wasser ($n = 1,33$) und Impuls für Pionen, Kaonen und Protonen darstellt. **(3 Punkte)**
- e) Nach Umsetzung der von Ihnen gewählten Maßnahmen aus Aufgabenteil c) beträgt die Winkelauflösung $\sigma_\theta = 2 \text{ mrad}$. Betrachten Sie die Auflösung der Impulsmessung als vernachlässigbar. Bis zu welchem Impuls lassen sich die drei Teilchen aus dem vorherigen Aufgabenteil unterscheiden?
- (2 Punkte)** Es muss berechnet werden, ab welchem Impuls die Differenz zwischen den Winkeln von zwei der Teilchen kleiner als die Winkelauflösung wird. Siehe Python Code: 7989.29 MeV.