Teilchenphysik I

Übung 2: Mesonen und Baryonen

1 Anwesenheitsaufgaben

1.1 Natürliche Einheiten

1. In Teilchenbeschleunigern werden die Teilchen in kurze Bündel angeordnet. Betrachten Sie einen Pion-Beschleuniger, wo die Ladung von einem dieser Teilchenbündel 2×10^{-11} C beträgt! Wieviel wiegt ein solches Teilchenbündel?

2. Die Zerfallsbreite eines Teilchens Γ steht im Verhältnis zu seiner Lebensdauer wie folgt: $\tau = 1/\Gamma$. Wie lang lebt das ρ-Meson? Das ρ-Meson besteht aus u- und d-Quarks und gehört folglich zu den 'light unflavored mesons'.

1.2 PDG Booklets

Finden Sie folgende Informationen im PDG-Booklet:

1. Die Müonmasse.
2. Das Verzweigungsverhältnis des τ Leptons nach $K^- \, \nu_\tau$.
3. Der Wert der Feinstrukturkonstante.
4. Die Lebensdauer des Neutrons.
5. Wie ist der Spin des B^0 Mesons?
6. Aus welchen Quarks besteht das K^-?
7. Wie groß wird die Strahlenergie des Large Hadron Collider (LHC) sein?
8. Finden Sie die Definition der drei Mandelstam Variablen! Sie haben mit der Kinematik von Zwei-Körper-Reaktionen zu tun. Sie sind schon mit einer von ihnen vertraut (s), der Schwerpunktsenergie einer Reaktion.

1.3 Elementarteilchen und Wechselwirkungen

Versuchen Sie, möglichst viele der Fragen aus dem Gedächtnis zu beantworten!

1. Wie viele elementare Fermionen kennen Sie aus der Vorlesung? Nennen Sie ihre grundlegenden Eigenschaften: Spin, Masse, Ladung!

2. Erinnern Sie sich an die vier fundamentalen Wechselwirkungen und die zugehörigen Bosonen?

3. Welche Ladungen sind mit diesen Wechselwirkungen assoziiert? (Für die schwache Wechselwirkung müssen wir noch eine vollständige Antwort abwarten, bis die Vorlesung weiter fortgeschritten ist.)

4. Welche Fermionen werden durch welche Wechselwirkungen beeinflußt?

5. Mesonen sind gebundene Zustände, bestehend aus einem Quark und einem Anti-Quark. Versuchen Sie, ein neutrales Meson mit genau einem Strange (Anti-) Quark zu bilden! Man nennt sie (neutrale) Kaonen.

6. Was können Sie über Spin und Parität der neutralen Kaonen aussagen?

1.4 Die Wellenlänge eines Teilchens

Zur Beschreibung eines freien Teilchens, das ein Vakuum durchläuft, benutzen wir ebene Wellen mit einer de Broglie Wellenlänge gemäß

$$\lambda = \frac{2\,\pi}{p}$$

(Sie haben hier doch wohl keinen Faktor $\hbar$ erwartet, nicht wahr?)

1. Welche kinetische Energie muß ein Elektron haben, um Strukturen molekularer Größe auflösen zu können ($\approx 10^{-10}$ m)? Wie groß wäre die Energie eines Photons mit der selben Wellenlänge?

2. Wie viel Energie braucht man, um die Struktur eines Protons (Dimension $\approx 10^{-15}$ m) mit einem Elektronenstrahl auflösen zu können. Stellen Sie sich einen Tischtennisball (Masse 2.5 g) mit der selben kinetischen Energie vor! Wie groß sind seine Wellenlänge und Geschwindigkeit?

1.5 Die Entdeckung des Positrons

Das Positron wurde 1932 von Carl Anderson entdeckt. Er fotografierte kosmische Strahlen, die eine Nebelkammer durchliefen. Die Abbildung zeigt eines seiner frühen Fotos. Die Kammer befindet sich in einem homogenen Magnetfeld, das in die Bildebene hinein zeigt. Der horizontale Streifen in der Mitte ist eine 6 mm dicke Bleiplatte. Der Rest der Kammer ist mit Luft gefüllt.

1. Benutzen Sie die Spurkrümmung, um die Ladung des Teilchens und seine Flugrichtung in Beziehung zu setzen! Falls das Teilchen auf dem Bild positiv geladen ist, aus welcher Richtung ist es in die Kammer eingefallen, von oben nach unten oder von unten nach oben?

2. Wie konnte Anderson sicher sein, daß es sich nicht um ein Elektron handelte?
   Tip: Welchen Effekt sollte die Bleiplatte erwartungsgemäß auf ein Teilchen haben?

3. Aus dem Bild kann man den Radius r der Spur des Positrons in einer der beiden Kammerhälften bestimmen. Berechnen Sie seinen Impuls in Abhängigkeit von r und dem magnetischen Feld B! Schätzen Sie den Impuls oberhalb und unterhalb der Bleiplatte ab unter Benutzung der Größe des magnetischen Feldes (15 kG) und Ihrer Abschätzung von r!

1.6 Meson-Multiplett

Unter den experimentell gefundenen Mesonen befinden sich 9 relativ leichte Mesonen mit Spin 0. Drei von ihnen (π^+, π^0, π^-) haben eine Masse von etwa 140 MeV und verhalten sich unter der starken Wechselwirkung gleich. Vier weitere ($\mathrm{K}^+, \mathrm{K}^-, \mathrm{K}^0, \bar{\mathrm{K}^0}$) sind etwa 500 MeV schwer und zeichnen sich durch eine relativ lange Lebensdauer als *strange*-Teilchen aus. Schließlich gibt es noch die neutralen η^0(550 MeV) und $\eta^{0'}(960 MeV)$.

- Versuchen sie, diese Mesonen aus u-, d- und s-Quarks sowie deren Antiquarks aufzubauen.

- Warum unterscheidet sich die beobachtete Masse dieser Mesonen von der Summe der Massen der sie aufbauenden Quarks?

Quark	Konstituentenmasse
u	3 MeV
d	6 MeV
s	480 MeV
c	1650 MeV
b	4700 MeV
t	180000 MeV

2 Hausaufgaben

2.1 Natürliche Einheiten

1. Berechnen Sie die Feinstrukturkonstante α in SI-Einheiten:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\,\epsilon_0\,\hbar c}$$

Warum ist diese Übung "sinnlos"?
Geben Sie die elektrische Elementarladung in natürlichen Einheiten an. (1 Punkt)

2.2 Das Baryonen-Dekuplett

1. Mitglieder des Baryonen-Dekupletts zerfallen nach ungefähr $10^{-23}\,s$ in ein Baryon vom Baryonen-Oktett und ein Meson vom Pseudo-Skalaren-Mesonen-Oktett, z.B. $\Delta^{++} \to p + \pi^+$. Geben Sie alle Zerfallsmoden dieser Form (Baryon (spin $\frac{3}{2}$) $\to$ Baryon (spin $\frac{1}{2}$) + pseudoskalares Meson) für das Δ^-, Σ^{*+} und Ξ^{*-} an. Vergessen Sie nicht, dass diese Zerfälle alle Ladung und Strangeness erhalten mussen, da sie der Lebensdauer nach starke Zerfälle sein müssen. (3 Punkte)

2. Welche von den oben angegebenen Zerfallsmoden sind kinematisch nicht erlaubt? (2 Punkte)

3. Geben sie die dynamisch erlaubten Zerfallsmoden dieser Form (Baryon (spin $\frac{3}{2}$) $\to$ Baryon (spin $\frac{1}{2}$) + pseudoskalare Meson) an, jetzt aber für das Ω^-. Die Lebensdauer vom Ω^- ist $8,22 \pm 0,12 \times 10^{-11}\,s$. Warum lebt das Ω^- so viel länger als die anderen Mitglieder des Baryonen-Dekupletts? (1 Punkt)

2.3 Collider Kinematik

1. **Large Electron-Positron Collider (LEP)**
Ein Elektron stößt frontal mit einem Positron zusammen; beide haben einen Impuls von 45.6 GeV. Wie groß ist die Schwerpunktsenergie dieser Kollision? Berechnen Sie Energie und Impuls der Müonen, die durch die Reaktion $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ in einem solchen Collider entstehen!
(1 Punkt)

2. **Hadron-Elektron-Ring-Anlage (HERA)**
Berechnen Sie die Schwerpunktsenergie des Elektron-Proton-Colliders HERA! Die Strahlenergien sind 27.5 GeV für den Elektronenstrahl und 820 GeV für den Protonenstrahl (die Elektronenmasse ist vernachlässigbar und die Protonenmasse beträgt $m_p = 938$ MeV).

   Stellen Sie sich vor, Sie versuchen die selbe Schwerpunktsenergie in einem fixed target Experiment zu erreichen, indem Sie einen Elektronenstrahl auf Protonen in Ruhelage schießen! Welche Energie müßte der Elektronenstrahl haben? (2 Punkte)