

Physik Vb (Teilchen- und Astrophysik) Musterlösung zu Übung (Probeklausur 2. Teil), Aufgabe 1

Wodurch wird die maximal erreichbare Schwerpunktsenergie limitiert

i. beim LEP?

ii. beim LHC?

Die Elektronen und Positronen bei LEP erleiden massive Energieverluste durch Synchrotronstrahlung, da deren Abstrahlrate proportional to $(E/m)^4$ ist. Bei der Maximalenergie werden diese Verluste durch die Beschleunigungsspannung gerade noch ausgeglichen. Bei LHC ist die maximal erreichbare Strahlenergie durch das Magnetfeld der Ablenkmagnete für einen festen Tunnelradius begrenzt. Dieses Magnetfeld hängt wiederum von dem kritischen Strom durch die supraleitenden Ablenkspulen ab.

Diskutieren Sie Vor- und Nachteile von Fixed Target Experimenten im Vergleich zu Colliding Beams.

Bei Colliding Beams kann man viel höhere Schwerpunktsenergien erreichen als bei Fixed Target Experimenten, allerdings sind sie technisch deutlich aufwändiger zu realisieren. (Vorlesung 02, Seite 8)

Erläutern Sie, warum ein Strahl von Kohlenstoff-Ionen für die Bestrahlungstherapie von Tumorpatienten besonders geeignet ist.

Man macht sich die Tatsache zunutze, dass der Energieverlust pro Wegstrecke eines geladenen Teilchens am Ende seiner Flugbahn stark ansteigt, wegen $-dE/dx \propto 1/\beta^2$. Damit wird der Großteil der Teilchenenergie in einem kleinen Bereich deponiert und kann dort gezielt Tumorgewebe zerstören, während sich die Energiedeposition entlang des Strahls ansonsten in Grenzen hält. (Stichwort *Bragg-Peak*.) Die Reichweite des Strahls wird über seine Anfangsenergie gesteuert. Da der Energieverlust mit z^2 ansteigt, sind schwerere Ionen für dieses Prinzip noch besser geeignet als Protonen. Dort ist der Bragg-Peak besonders ausgeprägt. (Vorlesung 04, Seite 11)

Was versteht man unter der Strahlungslänge eines Materials?

Die Strahlungslänge X_0 ist die Strecke, nach der die Energie eines Elektrons durch Bremsstrahlung auf $1/e$ ihres Anfangswerts abgefallen ist (Vorlesung 04, Seite 15). Gleichzeitig ist sie $7/9$ der mittleren freien Weglänge für Paarbildung eines hochenergetischen Photons.

Welcher Prozess des Energieverlusts von Photonen dominiert bei einer Photonenergie von

i. 1 keV

ii. 1 MeV

iii. 1 GeV

typischerweise?

Photoeffekt – Compton-Streuung – Paarbildung (Vorlesung 05, Seite 23)

Welche Effekte bestimmen die relative Impulsauflösung σ_p/p eines Magnetspektrometers und wie lässt sich diese als Funktion von p parameterisieren?

Die Vielfachstreuung führt zu einem konstanten Beitrag zu σ_p/p , der bei kleinen Impulsen dominiert. Bei großen Impulsen dominiert die Ortsauflösung der Detektorelemente. Dieser Effekt führt zu einem Term, der linear mit dem Impuls p wächst. Insgesamt ergibt sich

$$\frac{\sigma_p}{p} = a \oplus bp,$$

wobei $x \oplus y = \sqrt{x^2 + y^2}$ die quadratische Summe bezeichnet. (Vorlesung 04, Seite 23)

Wie lässt sich die relative Energieauflösung σ_E/E eines elektromagnetischen Kalorimeters als Funktion von E parameterisieren?

Die Teilchenzahl im Schauer N ist proportional zu der Energie E des einfallenden Teilchens. Ihre Fluktuationen unterliegen einer Poissonstatistik, folglich ist die Energieauflösung $\sigma_E \propto \sqrt{N}$. Dazu kommen Unsicherheiten durch die Kalibration, $\sigma_E/E = \text{const.}$ Für die relative Energieauflösung folgt

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus c.$$

Manchmal tritt noch ein zusätzlicher Term $\sigma_E/E \propto 1/E$ durch das Rauschen der Signalelektronik auf. (Vorlesung 05, Seite 25)

Beschreiben Sie, wie man die Lebensdauer eines extrem kurzlebigen Teilchens ($\tau \sim 1 \cdot 10^{-24} \text{ s}$) experimentell bestimmen kann.

Nach der Heisenbergschen Unschärferelation $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ kann ein instabiles Teilchen keine scharf definierte Energie bzw. Masse haben. Es ergibt sich eine Resonanz im Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung des Teilchens, die durch die Breit-Wigner-Formel beschrieben wird. Die Lebensdauer des Teilchens kann dann aus der Breit der Resonanz bestimmt werden. (Vorlesung 06, Seite 19)

Erläutern Sie, warum Prof. Faissner et al. für ihre Entdeckung des neutralen schwachen Stroms einen (Anti)-Myonenneutrinostrahl verwenden mussten und nicht etwa einen (Anti-)Elektronenneutrinostrahl verwenden konnten.

Bei der zur Entdeckung verwendeten Reaktion tauschen ein (Anti-)Myonenneutrino und ein Elektron ein Z -Boson aus, wodurch es zu einem Impulsübertrag auf das Elektron kommt. Ein (Anti-)Elektronenneutrinostrahl könnte auch über einen geladenen schwachen Strom, d.h. den Austausch eines W -Bosons mit dem Elektron wechselwirken. Außerdem tritt bei einem Elektronenneutrinostrahl die Untergrundreaktion $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ auf, wenn das Proton mit geringer Energie erzeugt wird

oder durch Kerneinfang verloren geht.

Warum zerfallen Pionen bevorzugt in Myonen, obwohl der Zerfall in ein Elektron den viel größeren Phasenraum hat?

Der Pionzerfall $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ ist helizitätsunterdrückt (Details siehe Vorlesung 11, Seite 9).

Sie empfangen eine mittels elektromagnetischer Wellen übertragene Nachricht einer außerirdischen Zivilisation. Welche Frage könnten Sie Ihrem Gesprächspartner stellen um herauszufinden, ob er in einer Galaxie aus Materie oder aus Antimaterie wohnt?

Man kann z.B. Asymmetrien der Zerfallsbreiten von B -Mesonen ($B^0 = \bar{b}d$, $\bar{B}^0 = b\bar{d}$) verwenden, in denen sich die CP -Verletzung der schwachen Wechselwirkung widerspiegelt:

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow K^+\pi^-) - \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^-\pi^+)}{\Gamma(B^0 \rightarrow K^+\pi^-) + \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^-\pi^+)} = 0,083 \pm 0,004.$$

Wenn also in dem System der neutralen B -Mesonen der Zerfall nach $K\pi$ schneller in der Variante stattfindet, bei der das Kaon dieselbe Ladung hat wie die Atomkerne, dann lebt er in einer Galaxie aus „normaler“ Materie.

Welche Aussagen folgen aus dem CPT -Theorem für Masse, Lebensdauer, Ladung und magnetisches Moment eines Antiteilchens im Vergleich zu dem zugehörigen Teilchen?

Man kann zeigen, dass aus dem CPT -Theorem folgt, dass Teilchen und Antiteilchen exakt gleiche Masse und Lebensdauer sowie entgegengesetzt gleiche Ladung und magnetisches Moment haben.