Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Experimentelle Kernphysik

Prof. Dr. J. Blümer
Dr. J.R. Hörandel

Übungen zur Einführung in die Astroteilchenphysik — WS 2004/05
1. Aufgabenblatt

Aufgabe 1 Anzahl der Neutrinogenerationen

Am LEP–Speicherring bei CERN wurden Z^0-Bosonen bei der Annihilation von Elektronen und Positronen bei einer Schwerpunktsenergie von 91 GeV erzeugt, die dann in Fermionen zerfallen gemäß $e^-e^+ \to Z^0 \to f\bar{f}$. Verifizieren Sie mit den folgenden Meßergebnissen des OPAL-Experiments die Aussage, dass es genau drei Sorten leichter Neutrinos (mit $m_\nu < m_{Z^0}/2$) gibt. Die Vermessung der Resonanzkurve ergab $\sigma_{had}^{max} = 41.45 \pm 0.31\,\text{nb}$, $\Gamma_{had} = 1738 \pm 12\,\text{MeV}$, $\Gamma_l = 83.27 \pm 0.50\,\text{MeV}$, $M_Z = 91.182 \pm 0.009\,\text{GeV/c}^2$ und $\Gamma_\nu/\Gamma_l = 1.99$. Hier sind alle Quarkendzustände in einer Breite Γ_{had} zusammengefasst, und Γ_l ist die Zerfallsbreite des Z^0 in (einzelne) Leptonen. Die Resonanzkurve wird durch die, aus der Kernphysikvorlesung bekannte, Breit–Wigner–Formel beschrieben:

$$\sigma_{e^-e^+\to Z^0\to f\bar{f}}(s) = 12\pi(\hbar c)^2 \cdot \frac{\Gamma_e \cdot \Gamma_f}{(s - m_Z^2 c^4)^2 + m_Z^2 c^4 \Gamma_{tot}^2}$$

Diese beschreibt den Wirkungsquerschnitt als Funktion der Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$.

Leiten Sie den maximalen Wirkungsquerschnitt σ_{had}^{max} für hadronische Endzustände her. Leiten Sie eine Formel für die Anzahl der Neutrinosorten N_ν her und berechnen Sie N_ν. Schätzen Sie den Fehler von N_ν aus den Meßfehlern ab.

Hinweis: Die gesamte Breite Γ_{tot} des Z^0 läßt sich darstellen als

$$\Gamma_{tot} = \Gamma_{had} + 3\Gamma_l + N_\nu \Gamma_\nu$$

und es gilt $\hbar = 197$ MeV fm/c, $c = 1$ und $\Gamma_{tot} = \Gamma_Z$.

Aufgabe 2 Hochenergetische kosmische Strahlung

1. Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung läßt sich durch ein Potenzgesetz der Form
$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \begin{cases} \gamma = 2.7; & E < 10^{15}\ \text{eV} \\ \gamma = 3.0; & E > 10^{15}\ \text{eV} \end{cases}$$
beschreiben. Nehmen Sie bei einer Energie von 10^{12} eV einen Fluß von 4 Teilchen/m^2 s an und berechnen Sie den Fluß bei 10^{15} eV [1/m^{2}a] und bei 10^{18} eV [1/km^{2}a].

2. Protonen aus der kosmischen Höhenstrahlung wurden mit Energien bis zu 10^{20} eV gemessen. Berechnen Sie die Geschwindigkeit eines Tennisballs ($m = 80$ g) mit dieser kinetischen Energie.

bitte wenden!

Aufgabe 3 Energieverlust nach Bethe-Bloch

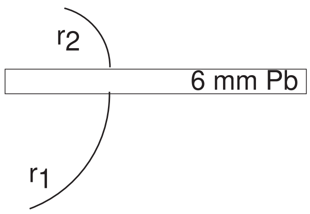
Protonen mit einer kinetischen Energie von 50 MeV treffen auf 1 g/cm^2 dicke Schichten aus Al bzw. Pb. Um welchen Faktor werden sie in welchem Material stärker abgebremst (d.h. verlieren mehr Energie)?

Hinweis: Man setze in der Bethe–Bloch–Formel $\langle E_B \rangle \approx 10 \cdot Z_2$ eV als mittlere Bindungsenergie der Targetelektronen an. Wie ändert sich das Ergebnis, wenn gleiche geometrische Schichtdicken verwendet werden? (Dichten: $\varrho_{\text{Al}} = 2.70$ g/cm^3, $\varrho_{\text{Pb}} = 11.34$ g/cm^3).

Hinweis: Die Bethe–Bloch–Formel ist gegeben durch

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{Z_1^2 e^4 n_e}{4\pi \cdot \epsilon_0 v^2 m_e} \cdot \left[\ln \frac{2 m_e v^2}{\langle E_B \rangle} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right]$$

Aufgabe 4 Entdeckung des Positrons



Durch Beobachtung von Teilchenspuren in einer Nebelkammer wurden 1933 Positronen in der sekundären kosmischen Strahlung von Carl D. Anderson erstmals nachgewiesen. Die Anordnung befand sich in einem homogenen Magnetfeld $B = 15000$ G. Es wurden zwei Teilchen mit den Bahnradien $r_1 = 13.3$ cm und $r_2 = 5.2$ cm beobachtet. Berechnen Sie die Energie beider Teilchen und verwenden Sie dabei, die in der Teilchenphysik übliche Einheit [MeV]. Nehmen Sie an, die Teilchen seien einfach geladen.

Aufgabe 5 Energieverlust von Elektronen in Blei

Der Energieverlust von Elektronen in Blei läßt sich durch den Ansatz

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$$

beschreiben, d.h. je einem Anteil von Ionisations- und Strahlungsverlusten. Skizzieren Sie qualitativ die Energieverluste durch Ionisation und durch Strahlungsverluste als Funktion des Lorentzfaktors $\gamma = E/m_e\, c^2$.

Was ist die physikalische Bedeutung der kritischen Energie E_{krit}?

Der spezifische Ionisationsverlust für minimalionisierende Teilchen beträgt $dE/dx_{min} = 1.123$ MeV/g cm^2. Die kritische Energie für Elektronen in Blei ist $E_{krit} = 6.9$ MeV. Für $E_e >> E_{krit}$ lassen sich die Strahlungsverluste durch den Ansatz

$$E_e(x) = E_e(0) \exp\left(-\frac{\rho\, x}{l_{rad}}\right)$$

beschreiben. Die Werte für Blei sind $\rho_{Pb} = 11.35$ g/cm^2 und $l_{rad} = 58$ kg/m^2.

Berechnen Sie den Energieverlust durch Ionisation und Strahlungsverluste eines Elektrons mit einer Energie von 60 MeV in 6 mm Blei und vergleichen Sie die erhaltenen Werte mit dem Energieverlust des Teilchens aus Aufgabe 4.

Informationen zu den Übungen: http://www-ik.fzk.de/~joerg/uebungen.html.