Übungen Teilchenphysik für Fortgeschrittene SS 2010, Blatt 8

Ausgabe: 4.6.10, Abgabe: 11.6.10

1) Laufende QED-Kopplungskonstante (in der Übung)

a) Berechnen Sie, unter Benutzung der in der Vorlesung abgeleiteten vereinfachten Formel, den Wert der Feinstrukturkonstante bei der Skala $M_Z = 91$ GeV, unter Verwendung von $\alpha(m_e^2) = 1/137$. Vergleichen Sie dies mit dem gemessenen (und in einer vollständigen Rechnung auch vorhergesagten) Wert von ca. 1/128. Durch welche unzulässige Vereinfachung könnte der Unterschied qualitativ erklärt werden?

b) Schätzen Sie mit Hilfe der ursprünglichen Formel auch den Wert der Feinstrukturkonstanten bei der Planck-Skala $M_p \sim 10^{19}$ GeV ab.

c) Berechnen Sie umgekehrt die Skala, bei der die Feinstrukturkonstante formal unendlich wird, d.h. bei der die QED-Störungstheorie nicht mehr funktionieren kann (sogenannter Landau-Pol).

d) Vergleichen Sie die beiden Skalen. Begründen Sie damit, warum der Ansatz eines großen, aber nicht notwendigerweise unendlichen Abschneideparameters in der Herleitung dieser Formel (siehe Vorlesung) physikalisch sinnvoll ist.

e) Die Elektronmasse ist eine echter physikalischer Abschneideparameter für das Laufen der QED-Kopplungskonstante bei *kleinen* Energieskalen: $\alpha(0) \simeq \alpha(m_e^2)$. (Unterdrückung der e^+e^--Paarerzeugung, und damit der Vakuumpolarisation). Vergleichen Sie diesen Abschneideparameter mit der typischen Skala eines Prozesses in der Atomphysik. Was ergibt sich daraus für den Ansatz der Feinstruktur"konstanten" als Konstante?

f) Berechnen Sie den hypothetischen Wert der Elektronmasse, mit dem bei sehr großen Abständen die elektrostatische Abstoßung zwischen zwei Protonen in etwa kompensiert würde durch ihre gravitative Anziehung. Was schließen Sie daraus?

2) Beschleuniger und Speicherringe (6 Punkte)

a) Am Spear-II-Speicherring am SLAC wurden J/ψ-Teilchen (Masse 3.1 GeV) erzeugt durch Kollision von Positronen und Elektronen mit einer Strahlenergie von jeweils 1.55 GeV. Wie groß müsste die Positron-Strahlenergie sein, wenn man die J/ψ-Teilchen durch Beschuss von ruhenden Elektronen erzeugen wollte?

b) Für den Sp$\bar{\text{p}}$S-Speicherring wurde ein Antiproton-Strahl gebraucht. Antiprotonen wurden hergestellt durch den Beschuss eines festen Targets mit Protonen. Wie groß muss die Proton-Strahlenergie mindestens sein, um den Prozess

$$p + N \to p + N + p + \bar{p}$$

zu erlauben? (N=Nukleon). Vergleichen Sie dies mit der tatsächlich verwendeten Protonenergie von 26 GeV (PS).

c) Berechnen Sie die Schwerpunktsenergie des CERN Sp($\bar{\text{p}}$)S Beschleunigers/Speicherrings im Proton Fixed-Target und im Proton-Antiproton-Kollisionsmodus (Strahlenergie ca. 300 GeV). Wie wichtig war der Umbau vom Beschleuniger zum Speicherring für die Entdeckung von W und Z?

d) Der PETRA e^+e^--Speicherring am DESY hatte eine Schwerpunktsenergie von maximal 44 GeV bei einem Umfang von 2.3 km. Der LEP e^+e^--Speicherring am CERN eine maximale Schwerpunktsenergie von 209 GeV bei einem Umfang von 27 km. Die Energieverluste (Bremsstrahlung) pro Umdrehung von Elektronen aufgrund von radialer Ablenkung im Magnetfeld sind proportional zu $(E_S/m)^4/R$, wobei E_S die Strahlenergie, m die Elektronmasse, und R der Radius des Rings ist. Vergleichen Sie die relative Stärke der Beschleunigungselemente in den beiden Ringen, unter der Annahme, dass das Verhältnis von Beschleunigungs- zu Ablenkelementen in beiden Ringen gleich ist.

e) Herr G. würde gerne einen e^+e^--Collider mit einer Schwerpunktsenergie von 500 GeV - 1 TeV bauen. Wie groß müsste ein auf LEP-Technologie basierender Ring werden, um eine solche Schwerpunktsenergie zu erreichen? Vergleichen Sie dies mit der geplanten Länge des International Linear Colliders (ILC) (siehe Vorlesung). Welche Option ist realistischer?

f) Gibt es eine ähnliche Begrenzung auch für Proton-Speicherringe, wie z.B. den LHC? Wodurch könnte die Strahlenergie ansonsten limitiert sein? Berechnen Sie die Stärke des benötigten magnetischen Ablenkfeldes für den LHC (Benutzen Sie die Faustformel für Zusammenhang Impuls/Magnetfeld: p = 0.3 B[T] R[m] GeV).

3) Luminosität (4 Punkte)

Die Luminosität eines Speicherrings kann berechnet werden nach der Formel

$$L = fn\frac{N_1 N_2}{A}$$

wobei f die Umlauffrequenz des Beschleunigers ist, n die Anzahl der Bunche (Strahlpakete), N_1 und N_2 die Anzahl der Teilchen pro Bunch, und A die Querschnittsfläche des Strahls (unter der Annahme von vollständigem räumlichem Strahlüberlapp, aber nur im Zentrum des Detektors, d.h. Trennung der Strahlen im Rest des Rings). Die Ereignisrate dN/dt für ein bestimmten physikalischen Prozess ist dann gegeben durch

$$\frac{dN}{dt} = \sigma L,$$

wobei σ der Wirkungsquerschnitt für diesen Prozess ist.

Argumentieren Sie qualitativ (soweit relevant, unter Benennung der relevanten Parameter in der obigen Formel),

a) warum Proton-Proton-Speicherringe in der Regel eine höhere Luminosität haben als Proton-Antiproton-Speicherringe.

b) warum bei gleicher Ringgröße Proton-Proton-Speicherringe in der Regel eine höhere Luminosität haben als Elektron-Positron-Speicherringe (denken Sie auch an die Wechselwirkung der Teilchen innerhalb eines Bunches, und an die Strahl-Strahl-Wechselwirkung).

c) welche der folgenden Maßnahmen zur Erhöhung der Luminosität, z.B. am LHC, korreliert sind mit welchen der folgenden Maßnahmen zur Verbesserungen des Detektors, und welche nicht.

- i) Erhöhung der Anzahl der Teilchen pro Bunch bei fester Bunchgröße
- ii) Erhöhung der Anzahl der Bunche mit ansonsten gleichen Parametern
- iii) Erniedrigung des Strahlquerschnitts
- α) Verbesserte Vertex-Ortsauflösung des Detektors zur Trennung von simultanen Mehrfachwechselwirkungen.
- β) Verbesserte Zeitauflösung des Detektors zur Trennung von Wechselwirkungen von verschiedenen Bunchen.