

Teilchen- und Kernphysik WS 2018/19

M. Kobel, K. Danziger, L. Wüst, O. Novgorodowa

Übung 3, Ausgabe 25.10.2018

1 Anwesenheitsübung

1.1 Bragg Peak

Elektrisch geladene Teilchen, die ein Material durchqueren, ionisieren die Atome. Die erzeugte Ladungsmenge ist ein Maß dafür, wie groß der Energieverlust pro Wegstrecke (Spezifischer Energieverlust dE/dx nach Bethe-Bloch) ist.

1. Skizzieren Sie die Bethe-Bloch-Funktion des spezifischen Energieverlustes dE/dx als Funktion von $\beta\gamma$. Bei welchem Wert von $\beta\gamma$ liegt ungefähr das Minimum der Kurve?
2. Wie sieht während der Durchquerung eines Materials der jeweils momentane spezifische Energieverlust als Funktion der **Eindringtiefe** d im Material qualitativ aus:
 - (a) für ein Teilchen der Masse M bei unterschiedlichen Werten $(\beta\gamma)_1 = 3$ und $(\beta\gamma)_2 = 2$?
 - (b) für zwei Teilchen mit Massen $M_1 > M_2$, die mit dem gleichen Wert von $\beta\gamma = 1$ starten?

2 Hausaufgaben

2.1 Relativistische Fluglänge

BABAR ist ein Detektor am PEP-II Speicherring am **Stanford Linear Accelerator Center** SLAC in Kalifornien. Dort werden 9.00 GeV Elektronen mit 3.11 GeV Positronen zur Kollision gebracht. Für die folgende Rechnung sollen die Massen von Elektronen und Positronen vernachlässigt werden.

- (a) Berechnen Sie die Schwerpunktsenergie, die mit dieser Konfiguration erreicht wird. Das hier im Schwerpunktsystem nahezu in Ruhe produzierte Teilchen wird $\Upsilon(4S)$ genannt. Berechnen Sie $\beta\gamma$ dieses Teilchens im Laborsystem (möglichst ohne Verwendung von LORENTZ Transformationen).
- (b) Das $\Upsilon(4S)$ ist ein gebundener Zustand aus einem b-Quark und einem $\bar{b}$ -Antiquark, die sich im radial angeregten 4S Zustand befinden. In welcher Summary Table der "Particle Data Group" http://pdg.lbl.gov/2018/tables/contents_tables.html werden Sie es daher finden, und warum? Benutzen Sie seine Breite aus dieser Tabelle, um seine mittlere Lebensdauer zu berechnen. Wie weit wird es sich im Mittel im Laborsystem bewegen, bevor es zerfällt?
- (c) Das $\Upsilon(4S)$ zerfällt fast ausschließlich in ein Paar von B -Mesonen, und zwar zu ca. je 50% in $B^0\bar{B}^0$ bzw. B^+B^- . Berechnen Sie den Impuls der entstehenden B^0 -Mesonen im **Schwerpunktsystem** des $\Upsilon(4S)$.
- (e) Berechnen Sie mit Hilfe einer Lorentztransformation den minimalen bzw. maximalen Impuls, die die B -Mesonen im **Laborsystem** haben können. (Betrachten Sie dazu alle möglichen Zerfallsrichtungen im Schwerpunktsystem) Wie weit werden sie sich jeweils im Mittel im Laborsystem bewegen, bevor sie zerfallen? Wie weit hätten sie sich im Mittel im Schwerpunktsystem bewegt? Vergleichen Sie diese Distanzen mit der typischen Präzision von $100 \mu\text{m}$, mit der Detektoren den Zerfallsort von Teilchen aus den Spuren der Zerfallsprodukte bestimmen können.

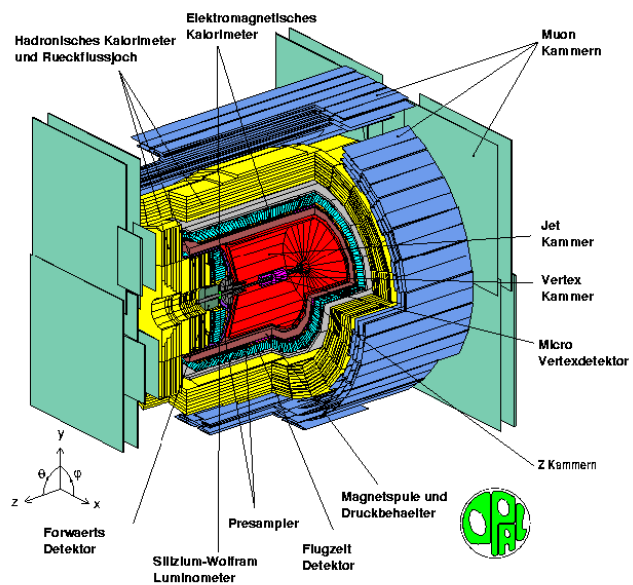
2.2 Messung der Luminosität am Kollider

Experimentell wird meist die Luminosität nicht aus den Strahlparametern berechnet, da dieses Verfahren oft viel zu ungenau wäre. Stattdessen leitet man diese Größe ab, indem man die Anzahl von Ereignissen eines sehr gut bekannten Referenzprozesses misst. Am **L**arge **E**lectron **P**ositron Collider LEP war dies die Rate sogenannter BHABHA Ereignisse, bei denen die Elektronen und Positronen über den Austausch eines Photons aneinander streuen. Deren Wirkungsquerschnitt ist theoretisch sehr gut bekannt und ist gegeben durch den Ausdruck:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{E_{\text{CM}}^2} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}},$$

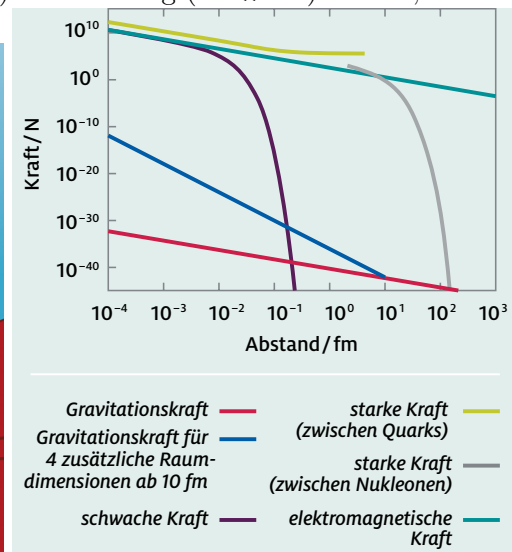
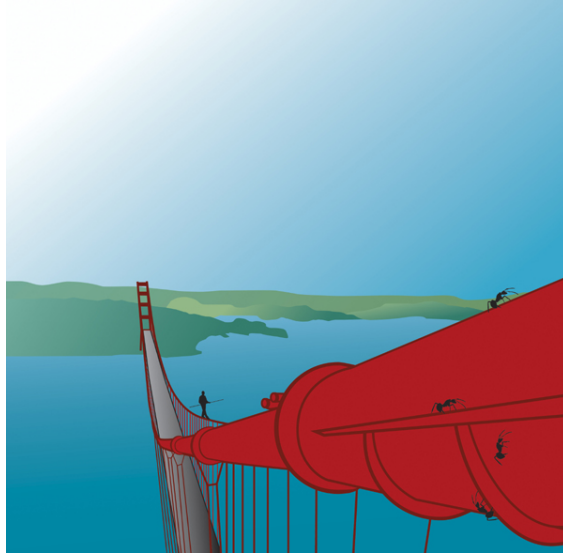
wobei $\alpha = 1/137$ der Kopplungsparameter der elektromagnetischen Wechselwirkung, und $E_{\text{CM}} = 90 \text{ GeV}$ die Schwerpunktsenergie ist.

- OPAL besaß ein dediziertes Kalorimeter (genannt Luminositätsmonitor) um diese BHABHA Ereignisse zu zählen. Dieses befand sich 2.46 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt und überdeckte kreisförmig um die Strahlachse einem Radius von 72 mm bis 132 mm. Wie groß ist der Wirkungsquerschnitt der für BHABHA-Ereignisse im Raumwinkelbereich dieses Detektors vorhergesagt wird?
- Während eines Jahres wurden 840 000 BHABHA Ereignisse im Luminositätsmonitor aufgezeichnet. Im selben Zeitraum wurden auch 17 128 Ereignisse vom Typ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ im OPAL Hauptdetektor aufgezeichnet, wobei wir hier annehmen wollen, dass beide Prozesse im jeweiligen Raumwinkelbereich mit einer Effizienz von 100% nachgewiesen werden konnten. Der für den Myon Nachweis benutzte Hauptdetektor von OPAL besaß eine um den Faktor 12500 größere Fläche als der Luminositätsmonitor. Er konnte damit 92% aller produzierten Myonpaare nachweisen. Wie groß ist der totale Wirkungsquerschnitt für die Produktion von μ Paaren bei LEP und wie groß ist seine statistische Unsicherheit?
- Wie groß war die mittlere Luminosität von LEP umgerechnet auf eine tatsächliche Betriebszeit von vier Monaten während des oben betrachteten Jahres? Geben Sie diese Luminosität in $1/(\text{pb} \cdot \text{Tag})$ und in $1/(\text{cm}^2\text{s})$ an. Geben sie auch die über das gesamte Jahr integrierte Luminosität in pb^{-1} an.
- Nehmen Sie an, dass Sie den inneren Radius des Luminositätsmonitors 'nur' mit einer Genauigkeit von 1 mm kennen. Welchen Einfluss hat diese "systematische Unsicherheit" auf die Genauigkeit der Ergebnisse von (b)?



2.3 Zusätzliche Raumdimensionen

Eine mögliche Erklärung für die gegenüber allen anderen Wechselwirkungen außerordentliche Schwäche der Gravitation ist die Hypothese der Existenz n zusätzlicher Raumdimensionen, in denen das Universum aber nur eine winzige („aufgerollte“) Ausdehnung ($R \ll \text{nm}$) besitzt, und in die nur die gravitative Wechselwirkung eindringen kann.



Im linken Bild aus www.weltmaschine.de/physik/extra_dimensionen würde der Seiltänzer auf der Hängebrücke sich nur in 1 Dimension bewegen können, während den Ameisen 2 Dimensionen zur Verfügung stehen (wenn sie herunterfallen, haben allerdings beide 3 Dimensionen zur Verfügung ;-).

- Wie lautet das Newtonsche Kraftgesetz der Gravitation in 3 Dimensionen, ausgedrückt durch die Planck-Länge ℓ_P , statt durch die Gravitationskonstante $G = \hbar c/M_P^2$? ($\hbar c$ darf hier explizit beibehalten werden, wenn Sie möchten, können Sie aber auch $\hbar c = 1$ setzen.)
- Erklären Sie in einem Bild mit Feldlinien, warum eine Kraft schwächer wirkt, wenn sie zusätzliche Raumdimensionen zur Verfügung hat.
- Welche r -Abhängigkeit besitzt ein Kraftgesetz einer Wechselwirkung mit n zusätzlichen Raumdimensionen und warum? Formulieren Sie ein solches Kraftgesetz mit n zusätzlichen Dimensionen, ausgedrückt durch eine neue Planck-Länge $\tilde{\ell}_P$. (Tipp: stellen Sie sicher, dass die Dimension der Kraft stimmt).
- Stellen Sie eine Beziehung zwischen ℓ_P , der „alten“, und $\tilde{\ell}_P$, der „neuen“ Planck-Länge auf (Tipp: Betrachten Sie dazu das rechte Bild (Quelle: Abb. 12 im Band 1 von Netzwerk Teilchenwelt), in der gestrichelt die Gravitationskraft für $n=4$ zusätzliche Raumdimensionen unterhalb $R=10$ fm eingezeichnet ist.)
- Prinzipiell könnte es in Teilchenkollisionen möglich sein, winzige schwarze Löcher zu erzeugen, wenn man die Schwerpunktsenergie E der beiden Teilchen auf Bereiche kleiner als $\tilde{\ell}_P$ konzentrieren kann. Beim LHC am CERN ist eine räumliche Energiekonzentration auf ca. 10^{-19}m gut erreichbar. Wie groß $\tilde{\ell}_P$ ist, hängt sowohl von der Zahl n der zusätzlichen Dimensionen, als auch von ihrer Ausdehnung R ab. Wenn z.B. alle zusätzlichen Raumdimensionen eine Ausdehnung von $R = 0,01\text{nm}$ hätten, wie viele zusätzliche Dimensionen wären nötig, um $\tilde{\ell}_P > 10^{-19}\text{m}$ zu erreichen und damit die Erzeugung von kleinen schwarzen Löchern am LHC zu ermöglichen?