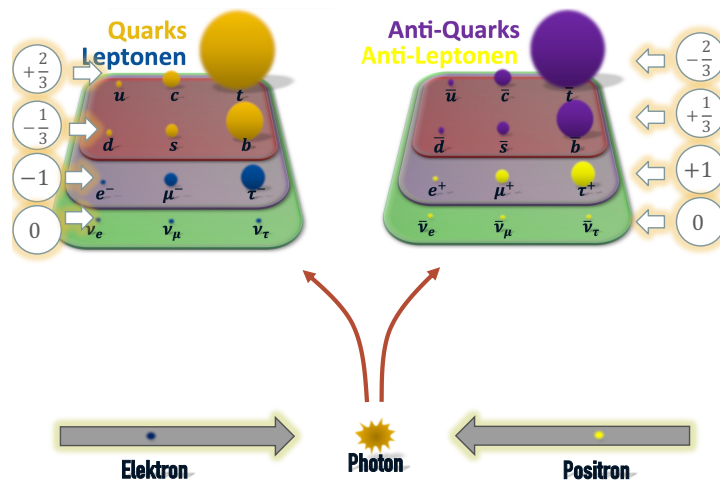


Was passiert bei e^+e^- Kollisionen? Quarkfarben und der R -Wert

Belle II Masterclass

Bei der Datenauswertung morgen möchten wir herausfinden, wie viele verschiedene Farbladungen es eigentlich gibt. Dafür lohnt es sich zu verstehen, was bei einer e^+e^- Kollision eigentlich genau passiert und welche Teilchen daraus wie häufig entstehen können.

Treffen sich Teilchen und Antiteilchen (wie in diesem Beispiel Elektron e^- und Positron e^+), „vernichten“ sie sich vollständig zu reiner Energie: Einem Photon. Dieses Photon wiederum kann die Energie nutzen, um aus dem Vakuum ein beliebiges Teilchen T sowie das Antiteilchen \bar{T} zu erzeugen, solange die Energie dafür reicht.



Häufigkeiten für verschiedene Teilchen

Das Photon ist das Kraftüberträger-Teilchen der elektromagnetischen Kraft. Dementsprechend koppelt es an alle Teilchen proportional zu deren elektrischer Ladung Q_T bzw. genauer, der el. Ladung quadriert:

$$\gamma \rightarrow T\bar{T} \text{ ist proportional zu } (Q_T)^2$$

Demzufolge kann man die Häufigkeit N , wie oft beispielsweise ein b -Quark / \bar{b} -Antiquark-Paar entsteht folgendermaßen berechnen:

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow b\bar{b}) = \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \cdot XY = \frac{1}{9} \cdot XY$$

XY ist hierbei ein konstanter Faktor, der bei allen Teilchen gleich und uns deswegen erst einmal egal ist.

Aufgabe a)

Der Beispielrechnung folgend, wie groß ist dementsprechend die Häufigkeit für die Entstehung folgender Teilchen-Antiteilchen-Paare:

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}) = \quad \cdot XY$$

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow s\bar{s}) = \quad \cdot XY$$

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-) = \quad \cdot XY$$

Aufgabe b)

Vielleicht erkennst Du bereits Regelmäßigkeiten. Die Häufigkeit welcher Teilchen-Antiteilchen-Paare kann alles folgendermaßen angegeben werden?

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow T\bar{T}) = \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot XY = \frac{4}{9} \cdot XY \quad T = \quad , \quad ,$$

Aufgabe c)

Ob ein Teilchen-Antiteilchen-Paar erzeugt wird, oder nicht, hängt davon ab, ob die Energie für dieses Teilchen ausreicht. Angenommen, man baut einen Teilchenbeschleuniger mit genug Energie, um u -, d - und s -Quarks (+ Antiquarks) zu erzeugen. Wie groß wäre die Häufigkeit der Quarkproduktion dann insgesamt?

Tipp: Vielleicht hilft Dir hier eine kleine Zwischenrechnung auf einem Schmierzettel.

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}) = \quad \cdot XY$$

Wie verändert sich das, wenn man die Energie erhöht, und jetzt auch die Erzeugung von c -Quarks möglich wird?

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}/c\bar{c}) = \quad \cdot XY$$

Teilchen ins richtige Verhältnis setzen

Dadurch, dass der konstante Faktor XY bei allen Teilchen in guter Näherung gleich ist, kürzt er sich wunderbar weg, wenn man sich Verhältnisse der Häufigkeit verschiedener Teilchenarten anschaut.

Man kann also viel über Teilchen lernen, indem man zählt, wie häufig ein bestimmter Prozess (wie z.B. $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$) abgelaufen ist, und dies mit der Zählung eines anderen Prozesses vergleicht.

Aufgabe d)

Was würdest Du für folgende Häufigkeits-Verhältnisse erwarten?

$$\frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u})}{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow s\bar{s})} = \frac{\cdot XY}{\cdot XY} =$$

$$\frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)}{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\cdot XY}{\cdot XY} =$$

Aufgabe e) Der R -Wert

Wir sind fast am Ziel. In Teilchendetektoren ist es meistens relativ leicht, Leptonen (also Elektronen e^\pm , Myonen μ^\pm und Tauonen τ^\pm) zu unterscheiden. Bei Quarks ist das schwieriger – man misst deswegen üblicherweise nur, wie viele Quarks (u, d, s, c, b oder t) überhaupt produziert wurden.

Angenommen, die Energie reicht aus, um u, d, s und c Quarks (sowie Leptonen) zu erzeugen - welches Verhältnis von Quarks zu Tauonen würdest Du erwarten?

Tipp: Hier helfen Dir Deine Ergebnisse aus Aufgabe a) und c).

$$\frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}/c\bar{c})}{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)} = \frac{\cdot XY}{\cdot XY} =$$

Um Fehlmessungen bei den Leptonen zu reduzieren, kann man auch das Verhältnis von Quarks zu Leptonen allgemein anschauen, wobei man über die verschiedenen Leptonen mittelt (Wie Du in Aufgabe d) gezeigt hast, entstehen Myonen und Tauonen ja gleich häufig.). Entsprechend kommt das Gleiche heraus, wenn man folgendes Verhältnis berechnet:

$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}/c\bar{c})}{\frac{1}{2} \cdot [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]} = \boxed{\text{Das Gleiche wie oben}}$$

Dieses Verhältnis nennt man den R -Wert.

Es wird **FARBIG!**

Wenn Du Dich bisher gefragt hast, was zur Hölle das alles mit der Anzahl an Quarkfarben zu tun hast, dann wirst Du nicht mehr länger auf die Folter gespannt.

Dafür musst Du zunächst einen Rückschlag verkraften: Du wurdest schamlos angelogen. Tatsächlich ist der Faktor XY bei der Häufigkeit der einzelnen Teilchen gar nicht immer gleich! Was Dir bisher völlig verschwiegen wurde ist nämlich Folgendes:

Auf Quarks und Antiquarks wirkt im Gegensatz zu Leptonen die **Starken Wechselwirkung**. Das ist genau die Kraft, die alle Quarks in Protonen und Neutronen zusammenhält, und dafür sorgt, dass auch alle Kernteilchen im Atomkern aneinander kleben.

Damit Teilchen an die Starke Kraft koppeln können, müssen sie „stark geladen“ sein – genauso hast Du in diesem Arbeitsblatt gelernt, dass die Kopplung mit der elektromagnetischen Kraft über die bekannte elektrische Ladung passiert.

Aus Gründen, die Du später noch erfahren wirst, nennt man die „starken“ Ladungen **Farben**. Während wir im Elektromagnetischen bereits wissen, dass es zwei verschiedene Arten von Ladung gibt (nämlich positive und negative, die aber verschieden stark sein können), stimmt das für die starke Ladung nicht unbedingt. Genau das ist das Thema von heute und morgen:

Wie viele verschiedene starke Ladungen bzw. Farben gibt es eigentlich, oder anders:

Aufgabe f) Wie viele Farben hat ein Quark?

Die elektromagnetische Kraft sieht keine starken Ladungen, sie ist also „farbenblind“. Das heißt, Quarks können in jeder möglichen Farbe entstehen, und jede Farbe entsteht gleich häufig. Entsprechend wächst ihre Häufigkeit mit der Anzahl der Quarkfarben N_F , die existieren:

$$N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q}) = N_F \cdot (Q_q)^2 \cdot XY$$

Wie würde sich dementsprechend das in Aufgabe e) berechnete Verhältnis bzw der R -Wert ändern, wenn es fünf verschiedene Quarkfarben gäbe?

$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}/c\bar{c})}{\frac{1}{2} \cdot [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]} = \frac{\cdot XY}{\cdot XY} =$$

Und wie groß wäre der R -Wert, wenn es drei verschiedenen Quarkfarben gäbe?

$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}/c\bar{c})}{\frac{1}{2} \cdot [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]} = \frac{\cdot XY}{\cdot XY} =$$