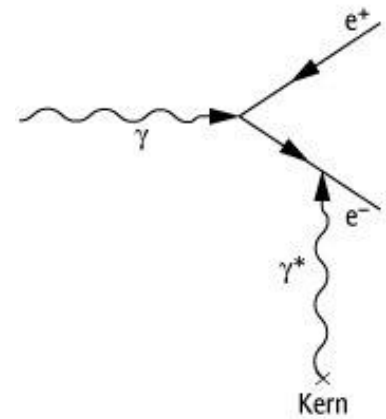
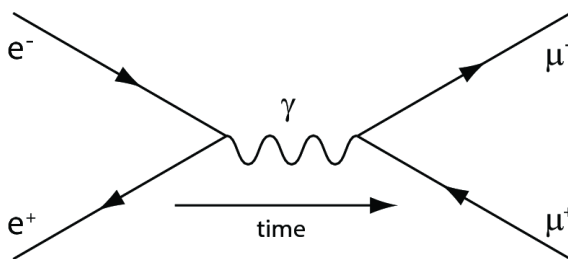


## Häufigkeitsverteilung bei Paarerzeugungsprozessen

**Paarbildung, Paarerzeugung**, allgemein die Umwandlung eines Botenteilchens einer Wechselwirkung in ein Materie-Teilchen und das entsprechenden<sup>1</sup> **Antiteilchen**. Im ursprünglichen historischen Sinn die Umwandlung eines **Photons** der elektromagnetischen Wechselwirkung in ein Elektron ( $e^-$ )-Positron ( $e^+$ )-Paar. Paarbildung umfasst aber auch z.B. die Bildung von Myon-Paaren ( $\mu^+\mu^-$ , über elektromagnetische oder schwache Wechselwirkung) und Quark-Antiquark-Paaren über elektromagnetische, schwache, oder **starke Wechselwirkung**. Wenn die Ruhe-Energie des Botenteilchens die doppelte **Ruheenergie** des erzeugten Teilchens überschreitet, ist Paarbildung spontan möglich (z.B.  $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ ). Wenn nicht, wird für die Energie-Impulserhaltung ein zweites Botenteilchen benötigt (z.B. aus dem elektrischen Feld eines Kernes, siehe Abb. rechts), was wir im Folgenden jedoch nicht weiter betrachten werden.



Stattdessen kann auch das Botenteilchen selbst „virtuell“ sein, also eine innere Linie in einem Feynmandiagramm. Dann ist wie im Prozess im linken Bild z.B. die Bildung eines Myon-Paares möglich,



wenn die Schwerpunktsenergie der vorangegangenen Paarvernichtung, und damit die Energie des Photons, mindestens doppelt so groß ist, wie die Ruheenergie eines Myons (also mindestens  $2 \times 106 \text{ MeV}$ ). Die Wahrscheinlichkeiten verschiedener Paarerzeugungen lassen sich theoretisch vorhersagen, und experimentell vergleichen.

Eine für die Teilchenphysik sehr wichtige Größe ist das Verhältnis  $R = \frac{P(\gamma \mapsto \text{Quark} + \text{Antiquark})}{P(\gamma \mapsto \text{Myon} + \text{Antimyon})}$  der Wahrscheinlichkeit der Erzeugung von Quark-Antiquark-Paaren ( $u \bar{u}, d \bar{d}, s \bar{s}$ , usw.) im Vergleich zur Wahrscheinlichkeit der Paarerzeugung eines Myon-Antimyon-Paares ( $\mu^- \mu^+$ ) über die elektromagnetische Wechselwirkung, also aus einem virtuellen Photon.

### Aufgabenstellung:

1. Schlagen Sie die Ruheenergie der Quarks nach (berücksichtigen Sie, dass zusammen mit jedem Quark immer eine „Gluonwolke“ einer Masse von  $320 \text{ MeV}$  erzeugt werden muss<sup>2</sup>) und begründen Sie, welche Quark-Antiquark-Paarbildungen unterhalb einer Photonenenergie von  $0,8 \text{ GeV}$  vorkommen können.

Es werden nun die oben genannten Prozesse bei einer Energie unterhalb von  $0,8 \text{ GeV}$  verglichen. Hierbei treten in der Wahrscheinlichkeit für einen Prozess als Faktor das Produkt des Kopplungsparameters  $\alpha_\gamma = \frac{1}{137}$  und der beteiligten Ladungen auf

$$P(\gamma \mapsto \text{Myon} + \text{Antimyon}): P \sim \alpha_\gamma \cdot Z_{\mu^+} \cdot Z_{\mu^-}$$

<sup>1</sup> Das „entsprechende“ Antiteilchen muss dabei Ladungserhaltung berücksichtigen. Trägt das Botenteilchen selber Ladung, dann müssen Paare aus unterschiedlichen Teilchen entstehen, z.B. ein Elektron und ein Anti-Neutrino  $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  wegen der elektrischen und schwachen Ladung  $Z = I = -1$  des  $W^-$ , oder ein **rotes** und **anti-grünes** Down-Quark  $g \rightarrow d^+ + \bar{d}^-$  wegen der starken Ladung der Gluonen.

<sup>2</sup> Die so genannte „Konstituentenmasse“ von Quarks ist  $320 \text{ MeV}/c^2$  größer als die „nackte“ Quark-Masse.

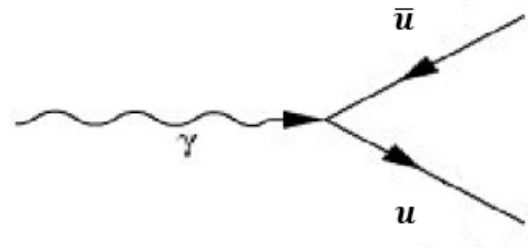
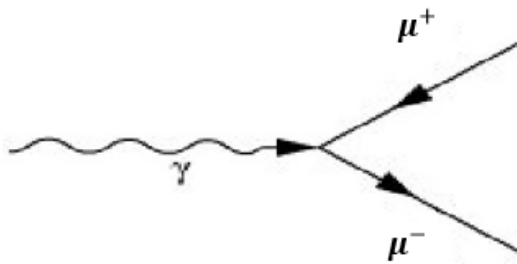
Die Wahrscheinlichkeit für den gesamten Prozesszweig ergibt sich aus der Addition aller möglichen Prozesse

$P(\gamma \mapsto \text{Quark} + \text{Antiquark})$ :

$P \sim \alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{u}} \cdot Z_u$  (up - Quark, rot) +  $\alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{u}} \cdot Z_u$  (up - Quark, grün) +  $\alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{u}} \cdot Z_u$  (up - Quark, blau)  
 +  $\alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{d}} \cdot Z_d$  (down - Quark, rot) +  $\alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{d}} \cdot Z_d$  (down - Quark, grün) +  $\alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{d}} \cdot Z_d$  (down - Quark, blau)

$\mapsto \alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{u}} \cdot Z_u \cdot 3$  (up - Quark) +  $\alpha_\gamma \cdot Z_{\bar{d}} \cdot Z_d \cdot 3$  (down - Quark)

$$R \frac{P(\gamma \mapsto \text{Quark} + \text{Antiquark})}{P(\gamma \mapsto \text{Myon} + \text{Antimyon})} = \frac{\frac{1}{137} \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) \cdot \left(+\frac{2}{3}\right) \cdot 3 + \frac{1}{137} \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot \left(+\frac{1}{3}\right) \cdot 3}{\frac{1}{137} \cdot (+1) \cdot (-1)} = \frac{\left(-\frac{2}{3}\right) \cdot \left(+\frac{2}{3}\right) \cdot 3 + \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot \left(+\frac{1}{3}\right) \cdot 3}{(+1) \cdot (-1)} = \frac{\left(-\frac{4}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right)}{-1} = \frac{\left(-\frac{5}{3}\right)}{-1} = \frac{5}{3}$$



2. Oberhalb einer Photonenenergie von 1 GeV bis unterhalb von 3 GeV kann genau noch ein weiteres Quark-Antiquark-Paar gebildet werden. Um welches Quark-Antiquark-Paar handelt es sich?
3. Berechnen Sie das Verhältnis der Paarerzeugung eines Quark-Antiquark-Paares Myon-Antimyon-Paares zur Erzeugung oberhalb einer Energie von 1 GeV

Zeichenvorlage:

