



Hadronenspektroskopie

Hadronen und ihre Eigenschaften

University of Bonn

11. April 2025

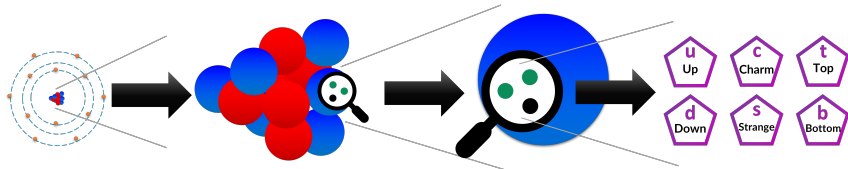
Dekonstruktion

Atom

Atomkern

Nukleon

Quarks



10^{-10} m

10^{-14} m

10^{-15} m

$< 10^{-18}$ m

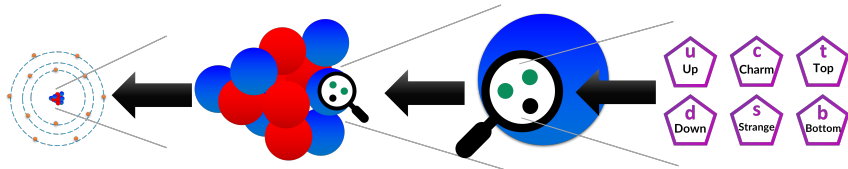
Rekonstruktion

Atom

Atomkern

Hadronen

Quarks



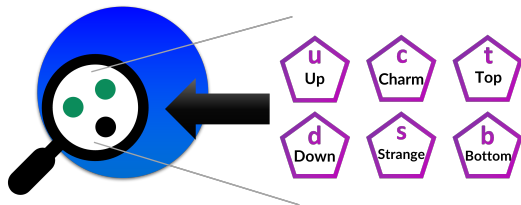
10^{-10} m

10^{-14} m

10^{-15} m

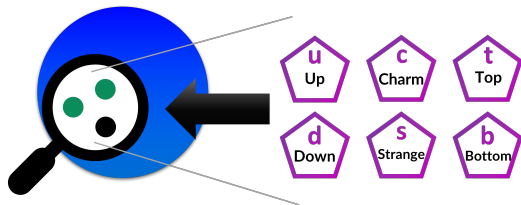
$< 10^{-18}$ m

Wie baut man Teilchen?



- Unter welchen Bedingungen halten Quarks zu Teilchen zusammen?
- Kann Materie mit Antimaterie binden?

Wie baut man Teilchen?



- Unter welchen Bedingungen halten Quarks zu Teilchen zusammen?
 - Kann Materie mit Antimaterie binden?
- 👉 Ihr seid dran!

Aufgabe:

Bauen Sie aus Quarks und Antiquarks abgeschlossene Teilchen.

Wie heißen Sie und unter welchen Bedingungen halten Quarks zu einem Teilchen zusammen?

Gibt es Auffälligkeiten?

Aufgabe:

Bauen Sie aus Quarks und Antiquarks abgeschlossene Teilchen.

Wie heißen Sie und unter welchen Bedingungen halten Quarks zu einem Teilchen zusammen?

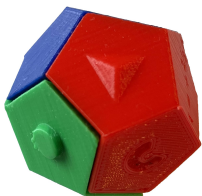
Gibt es Auffälligkeiten?

Schreibe auf das Arbeitsblatt!

Aus wie vielen Quarks kann man stabile Teilchen bauen?

Hadronen II

Aus wie vielen Quarks kann man stabile Teilchen bauen?



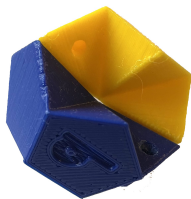
Baryon

qqq



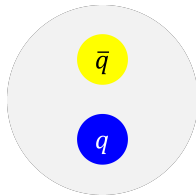
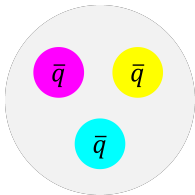
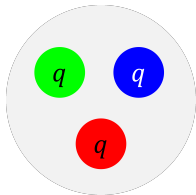
Antibaryon

$\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

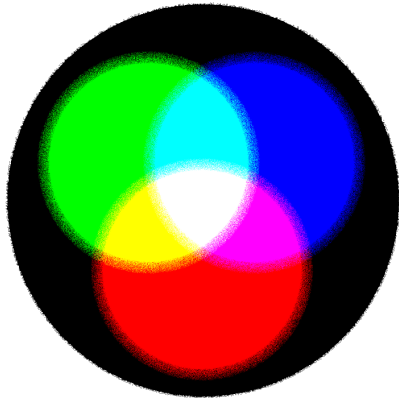


Meson

$q\bar{q}$



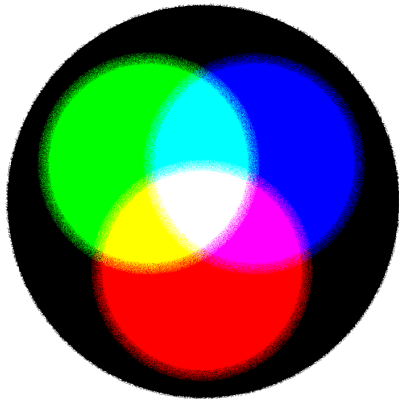
Farbladungen



$$\text{Baryon} = \uparrow + \swarrow + \searrow = \vec{0}$$

$$\text{Meson} = \begin{cases} \uparrow + \downarrow = \vec{0} \\ \swarrow + \searrow = \vec{0} \\ \swarrow + \nearrow = \vec{0} \end{cases}$$

Farbladungen

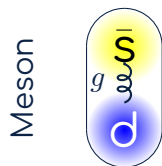


$$\text{Baryon} = \uparrow + \swarrow + \searrow = \vec{0}$$

$$\text{Meson} = \begin{cases} \uparrow + \downarrow = \vec{0} \\ \swarrow + \searrow = \vec{0} \\ \swarrow + \nearrow = \vec{0} \end{cases}$$

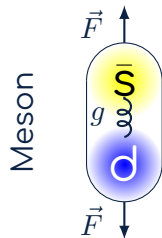
Hadronen sind
farbneutral.

Können wir einzelne Quarks beobachten?



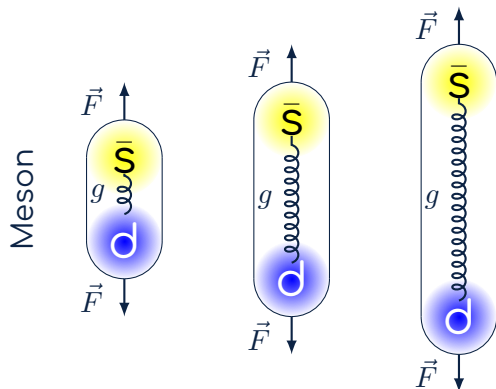
Wir bauen uns ein solches Meson

Confinement



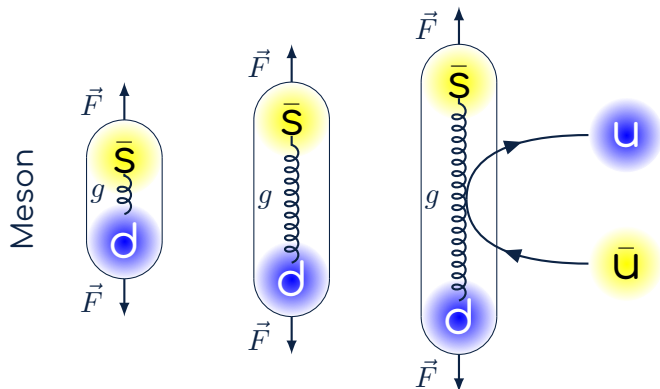
An einem Meson wird gezogen.

Confinement



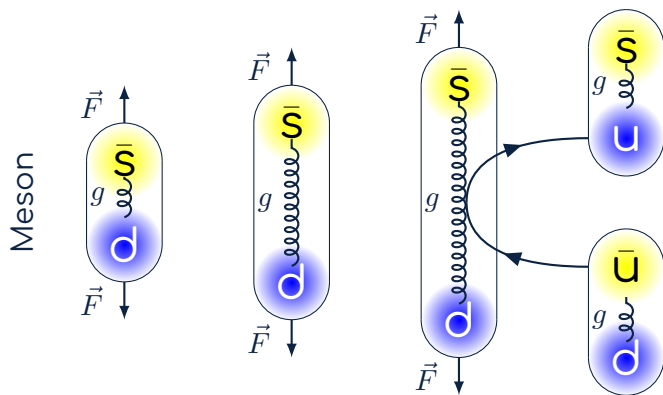
An einem Meson wird gezogen, wann fliegt es auseinander?

Confinement



Aus Energie des Starken Feldes bildet sich $u\bar{u}$ -Paar.

Confinement



Quarks kommen nie einzeln vor, Hadronen sind farbneutral.

Welche elektrischen Ladungen können Hadronen haben?

Elektrische Ladungen

Welche elektrischen Ladungen können Hadronen haben?

$$\text{Baryon} \quad q_B/e \in \{-1, 0, 1, 2\}$$

$$\text{Anti-Baryon} \quad q_{\bar{B}}/e \in \{-2, -1, 0, 1\}$$

$$\text{Meson} \quad q_M/e \in \{-1, 0, 1\}$$

Warum bindet das Top-Quark nicht?

Top-Quark

Es gilt:

$$m \propto 1/\tau$$

Top-Quark

Es gilt:

$$m \propto 1/\tau$$

☞ Erinnerung:



$$m_{up} = 2.2 \text{ MeV}/c^2$$
$$m_{top} = 174 \text{ GeV}/c^2$$



Top-Quark

Es gilt:

$$m \propto 1/\tau$$

☞ Erinnerung:



$$m_{up} = 2.2 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{top} = 174 \text{ GeV}/c^2$$

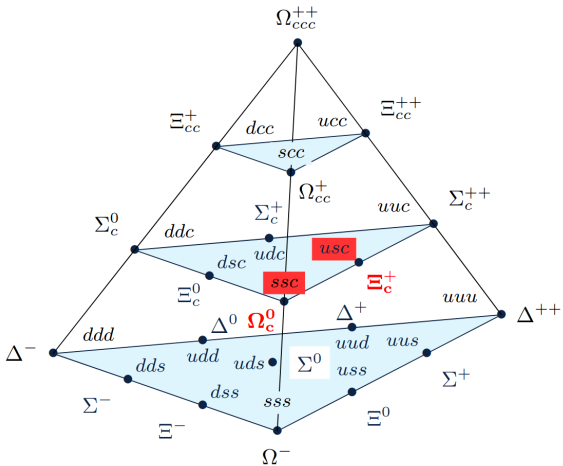


Ein Hadron mit Top-Flavour braucht länger um sich zu formieren als das Top-Quark zerfällt.



Wie können Hadronen geordnet werden?

Ordnungssystem Baryonen



Hadronenspektroskopie

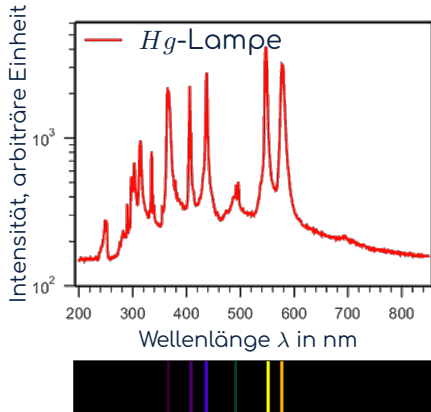
Aber was ist **Spektroskopie**?!

☞ Kennt jemand den Begriff?

Spektroskopie

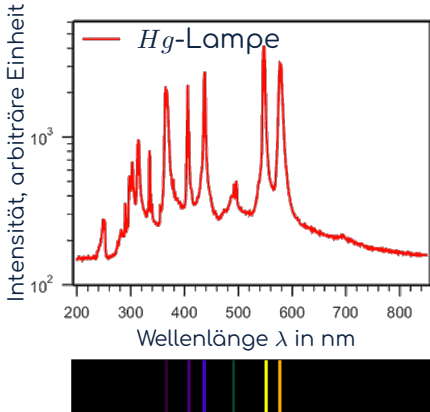


Atomare Spektren

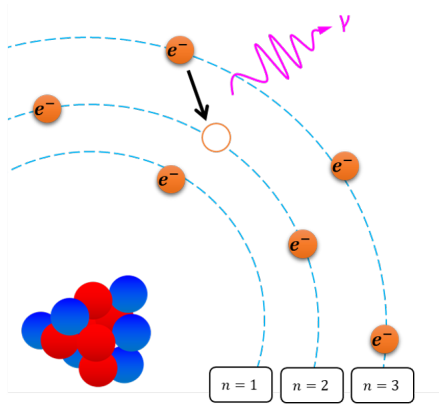


$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

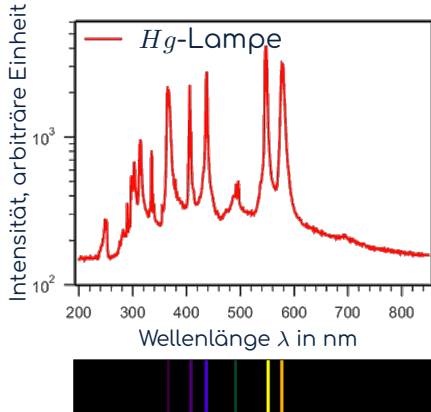
Atomare Spektren



$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



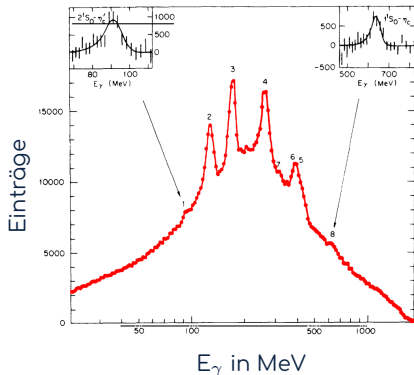
Atomare Spektren



- Anregungen bei Atomen
- Anregungen bei Hadronen

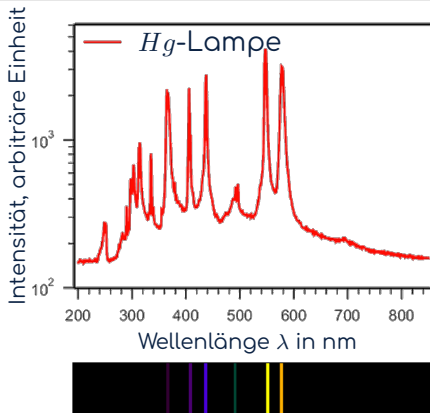
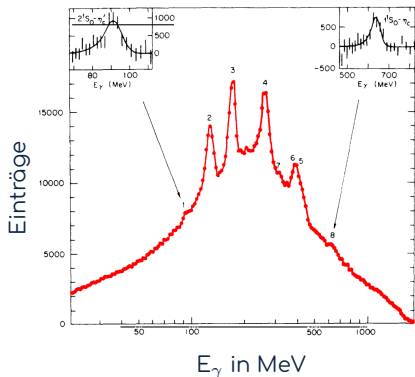
$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Charmonium Spektrum ($c\bar{c}$)



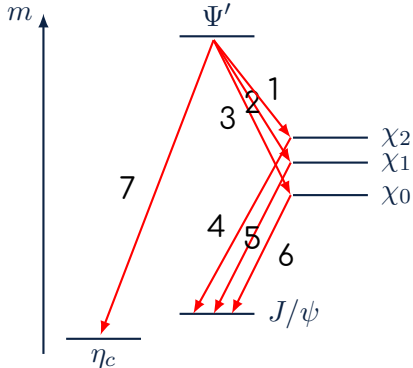
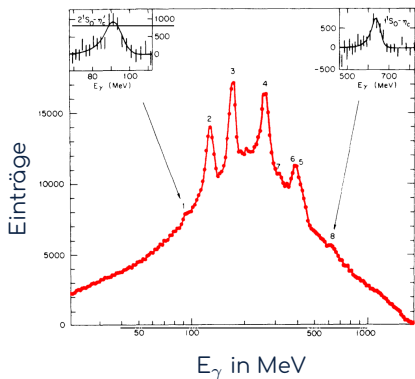
- Anregungen bei Atomen
- Anregungen bei Hadronen

Vergleich: Spektrum von Atomen und Hadronen

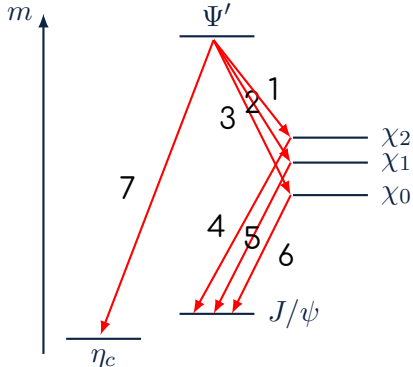
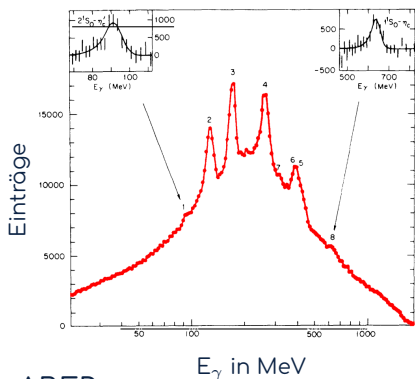


Hadronen: Angeregte Zustände haben unterschiedliche Massen

Zustände im Charmoniumspektrum ($c\bar{c}$)



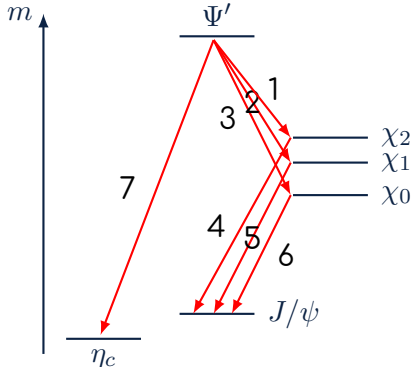
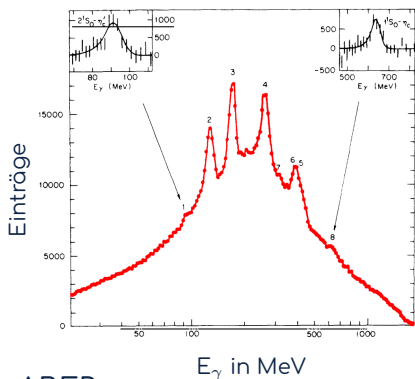
Zustände im Charmoniumspektrum ($c\bar{c}$)



ABER:

- Spektrum von $c\bar{c}$ ist sehr gut zu modellieren
- Oft sind Spektren von Hadronen kompliziert und unbekannt!

Zustände im Charmoniumspektrum ($c\bar{c}$)



ABER:

- Spektrum von $c\bar{c}$ ist sehr gut zu modellieren
- Oft sind Spektren von Hadronen kompliziert und unbekannt!

👉 Unsere Aufgabe heute Nachmittag!

Das Wichtigste

- Aus Quarks können Hadronen (Baryonen und Mesonen) gebaut werden
- Hadronen sind farbneutral, Quarks tragen Farbe
- Quarks können nie alleine beobachtet werden
- Das Top-Quark ist zu schwer um Hadronen zu bilden
- Ω_c^0 (ssc) und Ξ_c^+ (usc)
- Hadronen können angeregt werden → Masseunterschiede
- ☞ Wir können über Spektroskopie Informationen über die Natur von Materie erfahren!

Referenzen

- Janzen, A. Ultraschnelle Elektronenbeugung an Oberflächen (2009)
- Königsmann, K. Radiative decays in the Ψ family. Physics Reports 139(5)(1986), 243-291.
- Workman, R.L. et al. (PDG), Prog. Theor. Exp. Phys. (2022), 219
- `schaette.de`. `schaette.de/ratgeber/tiergesundheit/rinder/rinder-was-koennen-wir-fuer-abwehrstarke-kaelber-tun`
- `meinhaushalt.at` (2009). `meinhaushalt.at/4182-zunge-schalen-kochen/`
- Airbus. `aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320/a321xlr\images`
- Hegelrast 2019. CC BY-SA
`https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coloured_flames_of_methanol_solutions_of_metal_salts_and_compounds.jpg`



Die Spektren der meisten Hadronen sind kompliziert und schwer modellierbar.