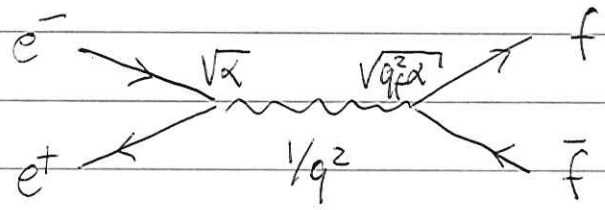
Experimentelle Evidenz für 3 Farben:

mehrere Observable, z.B. Wirkungsquerschnitt e^+e^--Annihilation in Fermionenpaar



$$\sigma_{e^+e^- \to \mu^+\mu^-} = \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{3s}$$

mit $\sqrt{s} = q^2$ ← c.m. Energie des e^+e^--Paars, $q_f = \pm 1$ für Myon

$$\sigma_{e^+e^- \to u\bar{u}} = \frac{4}{9}\,\frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{3s}$$ ohne Farbe

bzw. $= 3 \cdot \frac{4}{9} \cdot \ldots$ mit 3 Farben

$$\sigma_{e^+e^- \to q\bar{q}} = 3 \cdot \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{3s} \sum_f q_f^2$$

und das Verhältnis

$$R = \frac{\sigma_{e^+e^- \to \text{Hadronen}}}{\sigma_{e^+e^- \to \mu^+\mu^-}} = 3 \sum_f q_f^2$$

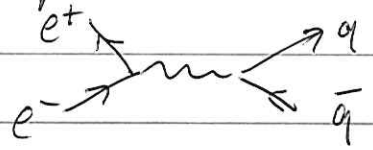
erwarte als Funktion von s Stufen in $R(s)$, je nachdem welche Quarkflavors energetisch produziert werden können.

- unterhalb K^+K^--Schwelle ($2.494\ \text{GeV} \gtrsim \sqrt{s}$) $R = 3\left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9}\right) = \frac{5}{3}$ ($\uparrow_u$ $\uparrow_d$)
- oberhalb K^+K^-- und unterhalb $D\bar{D}$-Schwelle (D: Meson mit c-Quark, $\sqrt{s} \lesssim 3729\ \text{MeV}$) $R = 3\left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}\right) = 2$
- oberhalb $D\bar{D}$- und unterhalb $B\bar{B}$-Schwelle (B: Meson mit b-quark, $\sqrt{s} \lesssim 10.6\ \text{GeV}$) $R = 3\left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9}\right) = \frac{10}{3}$
- oberhalb $B\bar{B}$-Schwelle $R = \frac{11}{3}$

→ Fig. 7-4

Jets

Was passiert mit den Quarks, die in Prozessen wie $e^+ e^- \to q\bar{q}$ gebildet werden? Sie hadronisieren als Jets



q und $\bar{q}$ bewegen sich mit hohem Impuls auseinander, es bildet sich zwischen ihnen ein "Colorstring", der abreisst und wenn q und $\bar{q}$ an den Enden bildet, sobald genügend Energie als pot. Energie im String gespeichert ist die kleinen Stringstücke werden Mesonen (und wenige Baryonen), die in Spray von Teilchen ≡ Jet experimentell nachgewiesen werden.

⇒ Fig. 7-4a

Topquark wurde über Jets entdeckt
CDF und DØ Experimente am Tevatron in Fermilab
$p + \bar{p}$ bei $\sqrt{s} = 1.8$ TeV

$$p + \bar{p} \to t + \bar{t} + X \qquad W \to l + \nu_l \text{ oder } q + \bar{q}$$
$$\hookrightarrow \bar{b} + W^-$$
$$\hookrightarrow b + W^+ \qquad 2\,b\text{-Jets} + \text{u.U. } 2 \text{ o. } 4 \text{ Jets vom } W$$

- b-Jets kann man identifizieren, da "displaced Vertex" wegen schwachen Zerfall eines B-Mesons $c\tau \simeq 460\,\mu m$ vergrößert durch Lorentzfaktor γ
- Rekonstruktion der inv. Masse d. t und d. $\bar{t}$ Zerfallsprodukte → Topquark Masse

⇒ Fig 7-4b

Zurück zur Konstruktion einer gesamten Baryon-Wellenfunktion mit definierten Symmetrieeigenschaften bezüglich Vertauschung von 2 Quarks:
benötige z.B. sym. Spin-Flavor Wellenfunktion
wenn Ψ_r sym. (bei $L=0$, s-Welle) und φ_c antisym.
(Proton, Neutron, ...)
Kopple zunächst 2 Quarks zu Zustand definierter Symmetrie und addiere 3. Quark
Beispiel: Proton (und, Spin $S=1/2$, $L=0$)

Spin: $\uparrow\uparrow$, $\frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow+\downarrow\uparrow)$, $\downarrow\downarrow$ sym. Triplett } $S=1$ bzw.
oder $\frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow-\downarrow\uparrow)$ antisym. Singulett } $S=0$

Flavor: $I=0,1$ für u und d-Quark ($I_3=+1/2, -1/2$ gekoppelt zu $I_3=0$)

wähle jeweils antisym. Singulett für 2 Quarks
$(u\uparrow d\downarrow - u\downarrow d\uparrow - d\uparrow u\downarrow + d\downarrow u\uparrow)\, u\uparrow$
kopple 3. Quark

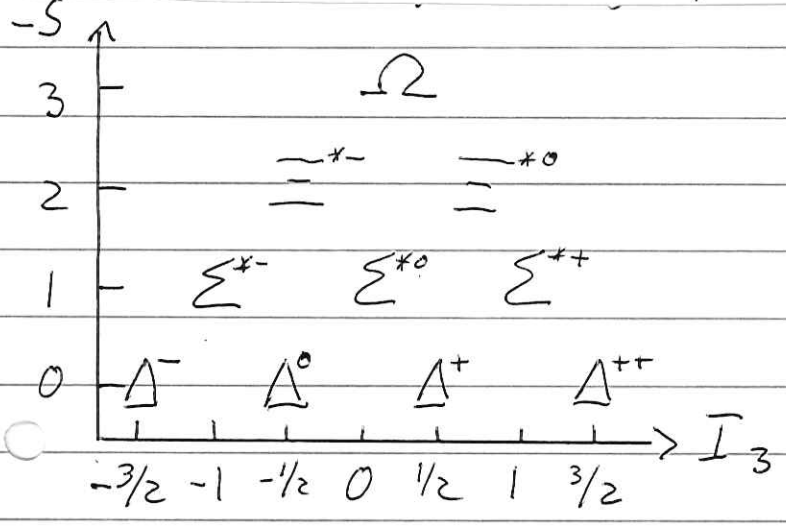
Symmetrisierung durch zyklische Permutationen (insgesamt 12)

Baryon-Multipletts: energetisch am niedrigsten
$L=0$ $S=1/2$ $\sim$ Oktett ⇒ Fig. 7-5

- warum fehlen die Ecken
$I_3=3/2, S=0$ $I_3=-3/2, S=0$ $I_3=0, S=-3$? (3 ident. Quarks)
kann keine sym. Spin-Flavor Wellenfunktion mit $S=1/2$ bilden
für $L=0$, $S=3/2$ funktioniert es!
- warum 2 uds-Zustände? für Zustand mit Quarkinhalt uds ist $I_3=0$, kann Teil eines sym. Tripletts mit $I=1$ ($I_3=+1,0,-1$ sein) → $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$ als uus, uds, dds

oder ein antisym. Singulett $I=0, I_3=0 \rightsquigarrow \Lambda$ mit uds

$L=0$ $S=3/2 \rightsquigarrow$ 1 Dekuplett ⇒ Fig. 7-6



	m (MeV/c²)
Ω	1672
Ξ*	1533
Σ*	1385
Δ	≈1232

→ parallele Spins "kosten" ca 300 MeV im Vgl. zu TTV

Magnetisches Moment des Protons / Neutrons im Konstituenten-Quarkmodell

für die einzelnen Valenzquarks gilt

$\langle \mu_s \rangle = g_s \mu_0 m_s$ mit $g_s = 2$ für punktförmige Quarks

$m_s = 1/2$ und Magneton $\mu_{u,d} = \frac{Q_{u,d} \cdot \hbar c}{2 m_{u,d} c^2}$

durch geeignete Kopplung der Spins der 3 Quarks im Nukleon kann das magnetische Moment durch eine Summe über die Beiträge einzelner u- und d-Quarks (mit entsprechenden Gewichten) ausgedrückt werden.

wenn man im Magneton für die u- und d-Quarks zusätzlich zu den Ladungen $+\frac{2}{3}e$ und $-\frac{1}{3}e$ eine sogenannte "Konstituentenmasse" $m_{u,d} \approx 0.34$ GeV einsetzt, können die anomalen magnetischen Momente des Nukleons in diesem additiven Quarkmodell gut beschrieben werden.

7.3 Quarkonia

Schwere Quarks (c und b) bilden mit ihren jeweiligen Antiquarks im Potential der starken WW Wasserstoff- oder Positronium-ähnliche Zustände "Cornell-Potential"

$$V = -\frac{4}{3}\frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr \qquad k = \mathcal{O}(1\,\mathrm{GeV/fm})$$

in reinem Coulombpotential → Bohrradius a

$$a = \frac{3\hbar c}{4\mu c^2 \alpha_s}$$ mit reduzierter Masse $\mu = m_{c,b}/2$

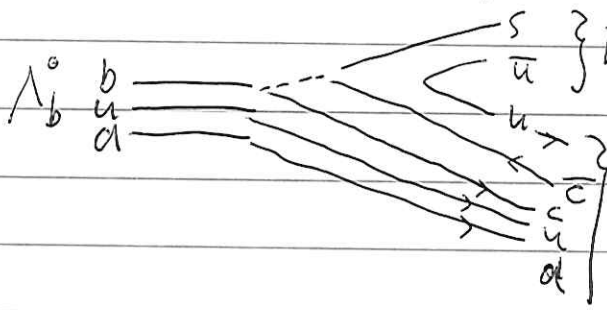
mit $m_c c^2 \simeq 1.3\,\mathrm{GeV}$ und $\alpha_s = 0.3 \rightarrow a = 0.7\,\mathrm{fm}$
im Cornellpotential ist Radius des 1s-Zustands etwa 0.3 fm

Charm- und Beauty-Quarks wurden über 1S-Zustand entdeckt, mit Quantenzahlen des Photons, also $J^{PC} = 1^-$
im spektroskopischen Normenblatt ist
J/ψ ein 1^3S_1-Zustand ⟹ (vgl. 7-7)
es gibt alle anderen Zustände analog zu Positronium, allerdings ist Feinstrukturaufspaltung viel größer!

7.4 Ungewöhnliche Quark-Gluon-Materie

- Quark-Gluon Plasma: bei sehr hoher Temperatur gibt es einen Zustand, in dem Confinement aufgehoben ist und Quarks und Gluonen sich ähnlich wie Elektronen und Ionen in einem Plasma bewegen
"QGP" existierte im frühen Universum (ns bis 10 µs)
im Labor: produziert in hochenergetischen Kern-Kern-Kollisionen z. B. am LHC

- Pentaquarks: 2015 wurden von LHCb 2 Zustände entdeckt im Zerfall von Λ_b^0 (Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 072001)



P_c^+ zerfällt stark nach $J/\psi + p$
daher Quarkinhalt ($c\bar{c}$ und)

$m = 4380 \pm 30$ MeV $\Gamma = 205$ MeV

4450 ± 3 MeV 39 MeV

Könnte dies auch ein J/ψ-p-Molekül sein?

- Tetraquarks: von BELLE 2013 und LHCb 2014 ein Zustand gefunden in $\bar{B}^0 \to \psi' + K^- + \pi^+$

$Z(4430)^+ \to \psi' \pi^+$ $J^\pi = 1^+$

$(c\bar{c}u\bar{d})$ starker Zerfall, $\Gamma = 45$ MeV

auch hier Frage nach Molekül

- Gluebälle: da Gluonen Farbladung tragen, sind gebundene Zustände aus Gluonen (und Seequarks) theoretisch vorhergesagt (F. Close "Orbilde aus reiner Kernkraft") bisher 1394 Publikationen (allein 14 in 2016), aber noch kein Zustand eindeutig identifiziert.

Neutral, kein Flavor, aus 2 Gluonen möglich

für $S=0$, 2 L gerade für $S=1$ L ungerade