

16. Kernkraft



Wechselwirkung zwischen farbenutralen Nukleonen
Reichweite $\approx$ Nukleongröße

Atomstruktur $\leftrightarrow$ elektromagnetische WW; Potential

Kernstruktur $\leftrightarrow$ Kernkraft ?



QCD

Vieltäuschenphysik
& starke WW $\Rightarrow$
quantitativ schwierig

$\sim$ freie Nukleonen in Potentialtopf; Potential $\leftrightarrow$ **kollektive Effekte**

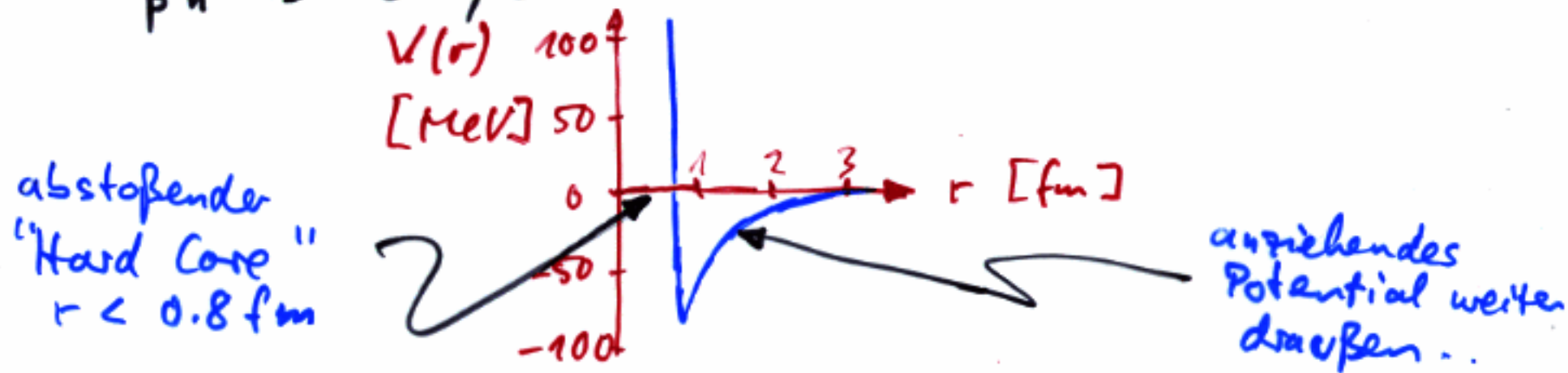
Was kann man untersuchen?

- Nukleon - Nukleon - Streuung, Partialwellenanalyse $\Rightarrow V(r)$
- allg. Form des NN-Potentials, Transformationsverhalten und Symmetrie
- Deuteron $\leftrightarrow$ H_2 $d =$ einziger 2 Nukleon-gebundener Zustand
- Spin-Spin-Effekte und abstoßende Kraft
- Austauschkräfte auf Quarkenebene $\leftrightarrow$ Mesonenaustausch
- Tröpfchen- oder Fermigas-, Schalenmodelle
(Nukleonen "markieren": Hyperkerne)

Nukleon-Nukleon-Potential aus N-N-Streuung bei niedrigen Energien

Spins: $\uparrow\uparrow \Rightarrow J=1$
 $\uparrow\downarrow \Rightarrow J=0, J=1$ } senkrecht zur Produktionssebene (Paritätserhaltung)

Isospin: $pp \Rightarrow I=1$
 $pn \Rightarrow I=0, I=1$



Potential: $V =$ skalare Größe, translations-, rotationsinvariant, symm. unter Teilchenaustausch, abhängig von $\vec{p}, \vec{L}, \vec{s}_1, \vec{s}_2$

$$\begin{aligned}
 V(r) = & V_0(r) && \text{Zentralpotential} \\
 & + V_{SS}(r) \frac{\vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2}{\hbar^2} && \text{Spin-Spin} \\
 & + V_T(r) \left[3 \frac{(\vec{s}_1 \cdot \vec{x})(\vec{s}_2 \cdot \vec{x})}{r^2} - \vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2 \right] / \hbar^2 && \text{Tensorpotential} \\
 & + V_{LS}(r) \cdot (\vec{s}_1 + \vec{s}_2) \cdot \vec{L} / \hbar^2 && \text{Spin-Bahn-Wechselwirkung} \\
 & + \text{Terme höherer Ordnung}
 \end{aligned}$$

$J=0$: pp, nn : anziehender Teil nicht stark genug für Bindung

$J=1$: V_0, V_T, V_{SS} gerade stark genug, um gebundenen Zustand zu bilden: Deuteron

Deuteron: (einfachster zusammengesetzter Kern, ${}^2_1\text{H}$; (pn))

Bindungsenergie $B = 2.225 \text{ MeV}$

Spin und Parität $J^P = 1^+$

Isospin $I = 0 \Rightarrow$ keine geb. pp, nn - Zustände

magn. Moment $\mu = 0.857 \mu_N$ (für $l=0$ erwartete $\mu_d = \mu_p + \mu_n$
 $= (2.792 - 1.913) \mu_N = 0.879 \mu_N$
(leichte Abweichung))

elektr. Quadrupolmoment $Q = 0.282 \text{ efm}^2$ (für $l=0$ erwartete $Q=0$
wg. Kugelsymmetrie)

$\Rightarrow$ Deuteron-Wellenfunktion enthält Beimischung von $l=2$
(durch Tensor-KW) (ca 4% Wahrscheinlichkeit für D-Welle):

$$|\psi_d\rangle = 0.98 \cdot |{}^3S_1\rangle + 0.20 |{}^3D_1\rangle$$

Abschätzung: mittleres konstantes Potential innerhalb der Reichweite $a \Rightarrow$
 $V_0 \approx 100 \text{ MeVfm}^3$ Kartenvolumen $\Rightarrow$ Potentialtiefe ca 50 MeV
aber Bindungsenergie nur 2.2 MeV $\Rightarrow$ relativ schwache effektive
Anziehung ist gerade eben stark genug, Kerne zu binden

Charakter der Kernkraft

- Abstoßung bei kleinen Abständen:

bei Molekülen eine Folge des Pauli-Prinzips

$$\text{hier: } \psi(2N) = \psi(6q)$$

antisymmetrisch unter Quark-Austausch

12 q im Grundzustand ($l=0$) möglich: 3 Farben $\cdot$ 2 Spins $\cdot$ 2 Isospins

Weil Farbe immer antisymmetrisch $\Rightarrow$ I, J-Anteil symmetrisch
Ortsanteil wg. $l=0$ symmetrisch

Hard-Core-Abstoßung durch starke $\vec{S}\vec{S}$ -WW:

6 q mit $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ bei $r \rightarrow 0$ haben hohe Energie ("Farbmagnetismus")

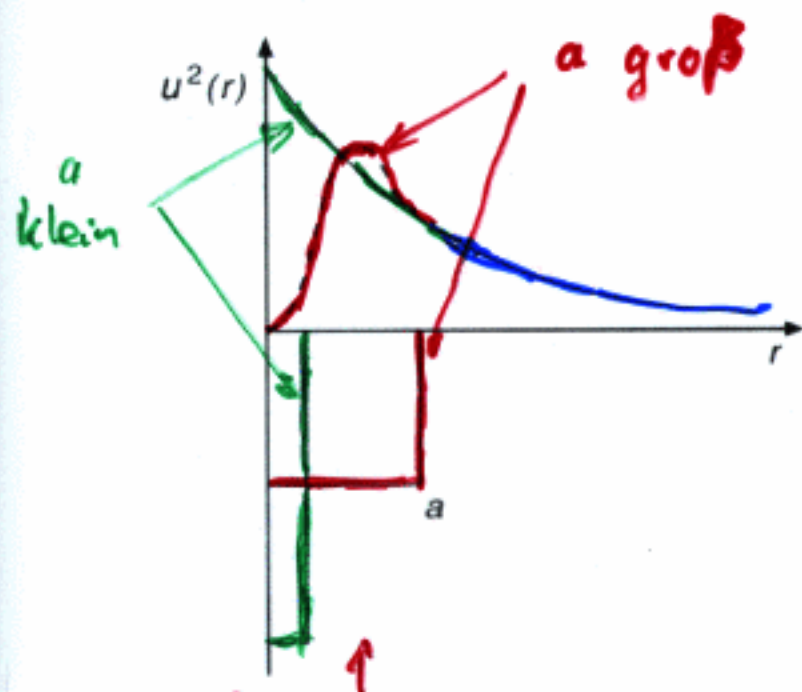
$\Rightarrow$ Anti-Parallel-Stellen nur möglich, wenn 2 q in $l=1$ -Zustand gehen $\Rightarrow$ das kostet auch Energie (vergleichbar viel)

Folge: Nullstelle von ψ_d bei $r = 0,4 \text{ fm}$

$\Rightarrow$ zusammen mit $V_{\vec{S}\vec{S}}$ $\Rightarrow$ starke, kurzreichweitige Abstoßung

Kernkraft und Bindung

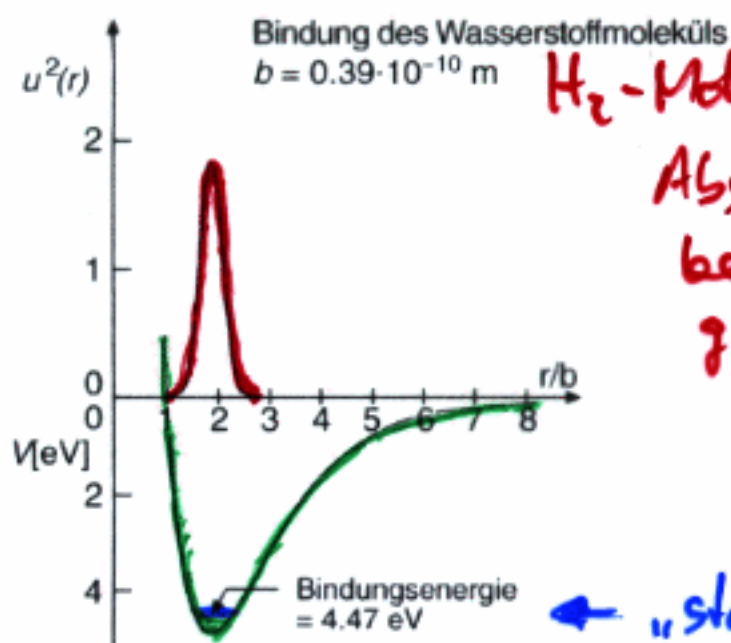
$W(r) = r^2 |\psi|^2$ radiale Aufenthaltswahrscheinlichkeit



Reichweite des anziehenden Potentials

$V \cdot a^2 = \text{const.}$

$\Rightarrow V \propto 50 \text{ MeV}$ effektive Tiefe



Bindung des Wasserstoffmoleküls

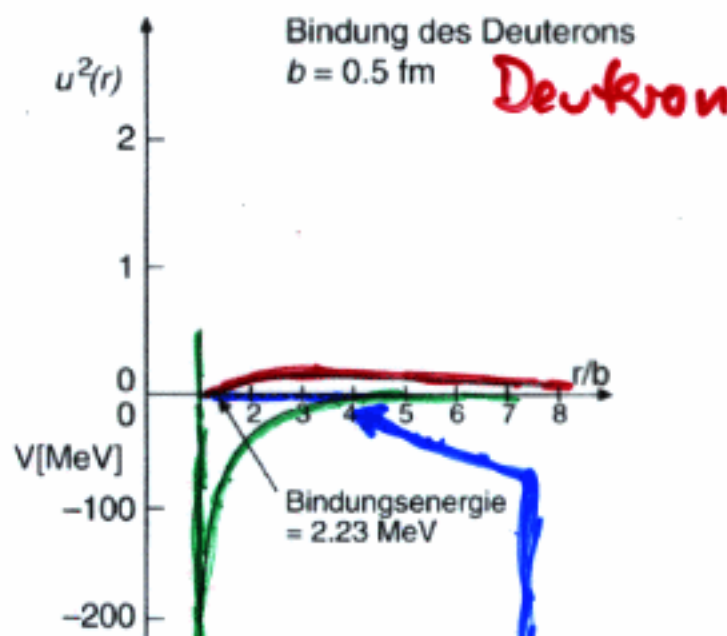
$b = 0.39 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

H_2 -Molekül

$b \approx 40 \text{ 000 fm}$

Abstand zwischen beiden H-Atomen gut definiert

„starke Bindung“
 $E_B \approx \text{Topftiefe} \Rightarrow E_{\text{kin}} \text{ klein}$



Bindung des Deuterons

$b = 0.5 \text{ fm}$

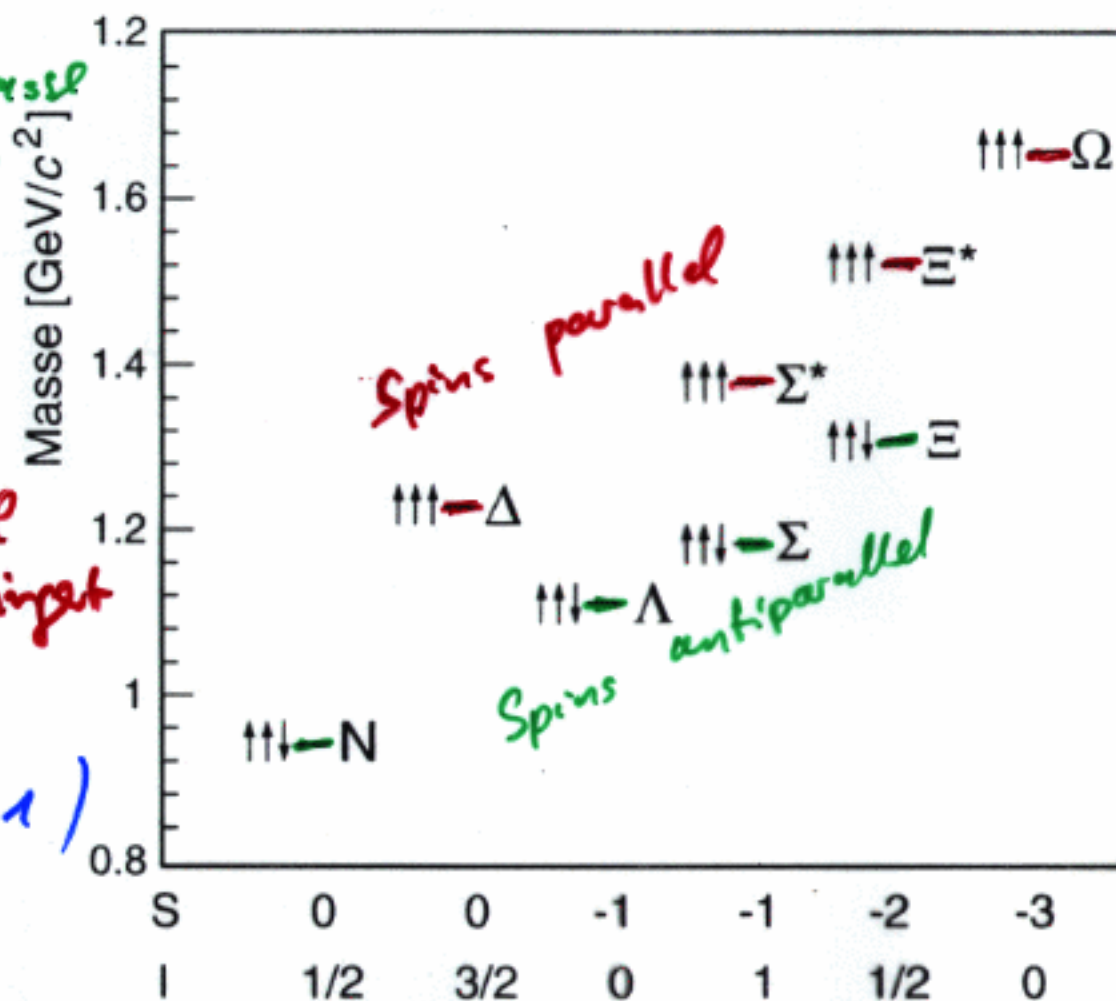
Deuteron

Abstandsverteilung zwischen p und n sehr breit: $\frac{\Delta R}{R} \times 100\%$

abstoßender Kern

gerade eben gebunden $E_B \ll \text{Topf-tiefe} \Rightarrow E_{\text{kin}} \text{ groß } 10^{-5}$

parallele Spins
 $\uparrow$
 größere Baryonmasse
 d.h. höhere Energie
 $\downarrow$
 in gebundenen
 Systemen kann
 Gesamtenergie
 durch antiparallele
 Ausrichtung verringert
 werden:
 (benötigt aber
 Anhebung auf $L=1$)



überlappende
 Nukleonen & 6 Quarks

a. b.
 $r=0$:
 Bei $r=0$:
 $P(b) = 8/9$
 bei größeren Abständen:
 $P(b) \rightarrow 0$
 $\Rightarrow$ energetisch günstiger
 $\Rightarrow$ Abstoßende Kern
 durch ~~Pauli-Prinzip~~
 Spin-Spin-
 Wechsel-
 wirkung

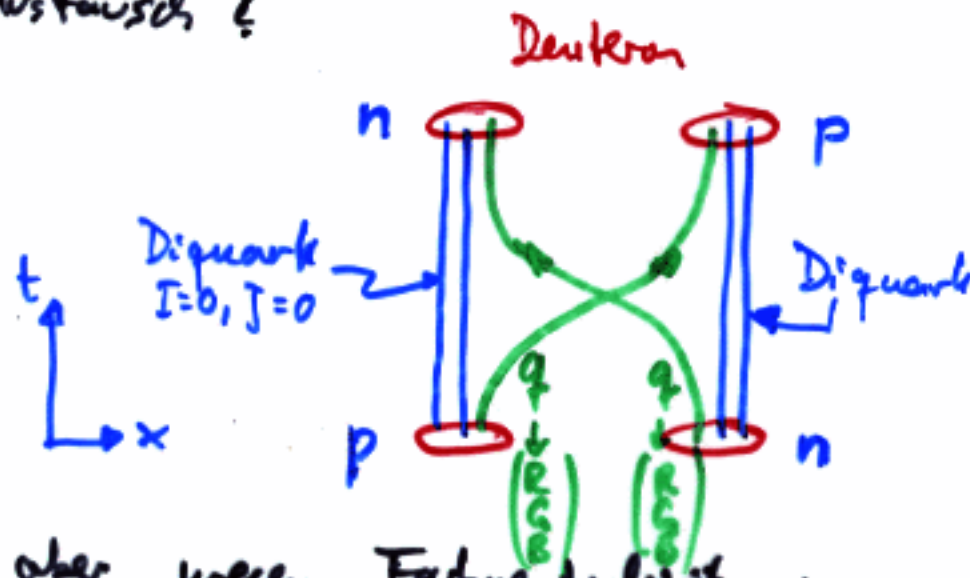
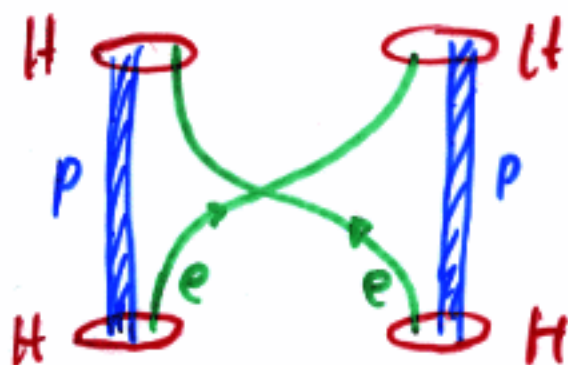
Abb. 15.5. Massenspektrum der Baryonen des Dekupletts und des Oktetts, aufgetragen gegen Strangeness S und Isospin I . Die Pfeile beschreiben den Drehimpuls J des Baryons. Die Baryonen des Dekupletts mit $J^P = 3/2^+$ haben deutlich größere Massen als ihre Partner aus dem Oktett mit $J^P = 1/2^+$.

anziehende Kraft: analog zu Atomphysik

Ionenbindung? Nein, Confinement-Kräfte zu groß

van-der-Waals-Kraft? Dipol-Dipol-WW? Nein, 2-Gluonen-Austausch bei kleinen Abständen zu schwach, bei großen Abständen durch Confinement verboten. Nur farbeneutrale Objekte erlaubt.

Kovalente Bindung? H_2 -Molekül Quark-Austausch?

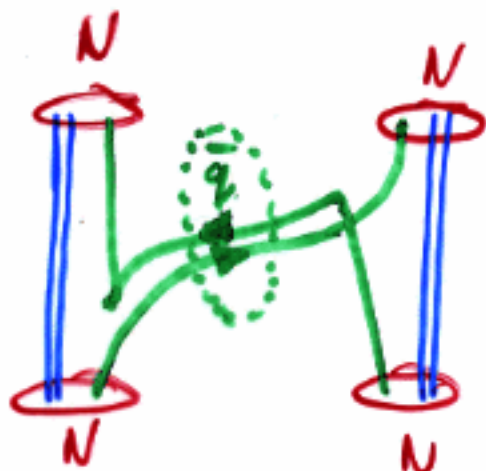


Gelut im Prinzip, ist aber wegen Farbeneutralität um Faktor 3 reduziert $\rightarrow$ nicht stark genug!

Aber: Im Nukleon gibt es auch See-Quarks...

Besser:

ein Quark läuft
rückwärts in der
Zeit $\Rightarrow$
 $q\bar{q}$ -Austausch



$q\bar{q}$ -Austausch
entspricht
Meson-
Austausch!



Austausch von (massiven)

Mesonen:

Yukawa-Potential:

$$V(r) = g \cdot \frac{e^{-\frac{mc}{\hbar} r}}{r}$$

$$= g \cdot \frac{e^{-r/R}}{r} \quad \text{mit } R = \frac{\hbar c}{mc^2}$$

exponentiell abklingend
große Masse $\Rightarrow$ kleine
Reichweite

Hadron-Hadron-Wechselwirkungen sind gut durch

Meson-Austausch beschreibbar. Je nach Quantenzahlen:

π -Austausch

$$\Rightarrow R = \frac{\hbar c}{mc^2} = \frac{197 \text{ MeV fm}}{140 \text{ MeV}} \approx 1.4 \text{ fm}$$

$\rho, \omega, \dots$ Austausch