

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III

Vorlesung 16

MICHAEL FEINDT & THOMAS KUHR
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Kernkraft

Kernkraft



- Wechselwirkung zwischen farbneutralen Nukleonen
- Reichweite \approx Nukleongröße
- **Atomstruktur** \leftrightarrow elektromagnetische WW, Potential

Kernstruktur \leftrightarrow Kernkraft?

\leftrightarrow **QCD** \leftrightarrow

Vielteilchenphysik & starke WW
 \Rightarrow **quantitativ schwierig**



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

Was kann man untersuchen:

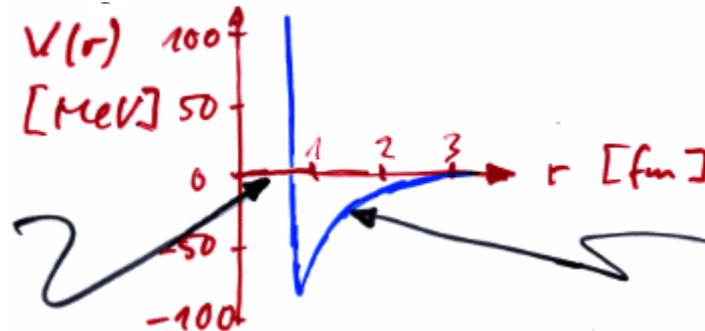
- Nukleon-Nukleon – Streuung, Partialwellenanalyse $\rightarrow V(r)$
- allg. Form des NN – Potentials, Transformationsverhalten und Symmetrie
- Deuteron $\leftrightarrow H_2$ d = einziger 2-Nukleon – gebundener Zustand
- Spin-Spin – Effekte und abstoßende Kraft
- Austauschkräfte auf Quarkniveau \leftrightarrow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

Nukleon-Nukleon – Potential

■ aus NN – Streuung bei niedrigen Energien

Spins:	$\uparrow\uparrow$	\Rightarrow	$J = 1$	} senkrecht zur Produktionsebene (Paritätserhaltung)
	$\uparrow\downarrow$	\Rightarrow	$J = 0, J = 1$	
Isospin:	pp	\Rightarrow	$I = 1$	
	pn	\Rightarrow	$I = 0, I = 1$	

abstoßender "Hard Core"
 $r < 0.8 \text{ fm}$



anziehendes Potential
weiter draußen...

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

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

Zentralpotential
Spin-Spin – WW
Tensorpotential
Spin-Bahn – WW

$J = 0$: 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 $\ell=0$ erwarte $\mu_d = \mu_p + \mu_n = (2.792 - 1.913) \mu_N = 0.879 \mu_N$: leichte Abweichung)
- **elektr. Quadrupolmoment** $Q = 0.282 \text{ e fm}^2$ (für $\ell=0$ erwarte $Q=0$ wg. Kugelsymmetrie)

\Rightarrow Deuteron – Wellenfunktion enthält **Beimischung von $\ell = 2$** (durch Tensor–WW) (ca 4% Wahrscheinlichkeit für D – Welle)

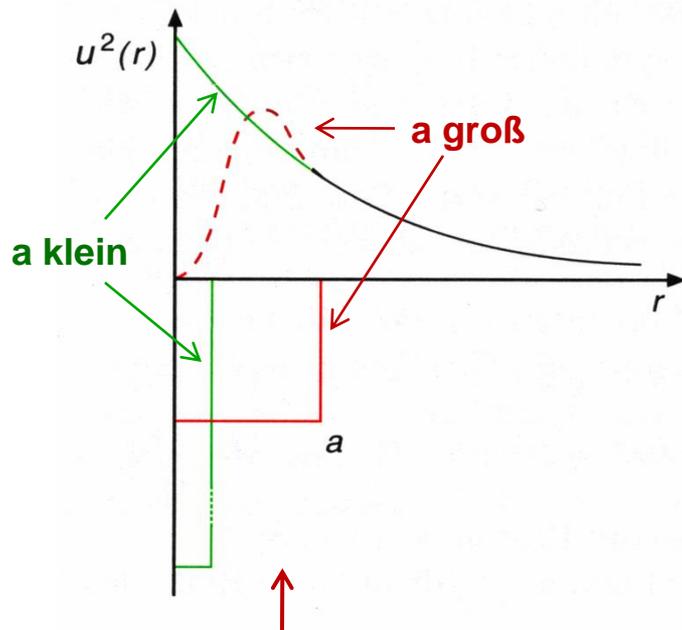
$$|\psi_d\rangle = 0.98 |{}^3S_1\rangle + 0.20 |{}^3D_1\rangle$$

Abschätzung: mittleres konstantes Potential innerhalb der Reichweite a
 $\Rightarrow Va^2 \approx 100 \text{ MeV fm}^2$ Kastenvolumen \Rightarrow Potentialtiefe ca. 50 MeV,
 aber Bindungsenergie nur 2.2 MeV \Rightarrow **relativ schwache effektive Anziehung ist gerade eben stark genug, Kerne zu binden**

Kernkraft und Bindung

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

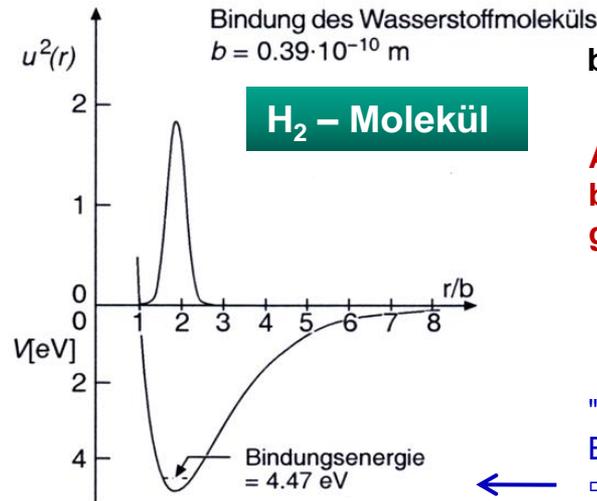
radiale Aufenthaltswahrscheinlichkeit



Reichweite des anziehenden Potentials

$$V \cdot a^2 = \text{konst}$$

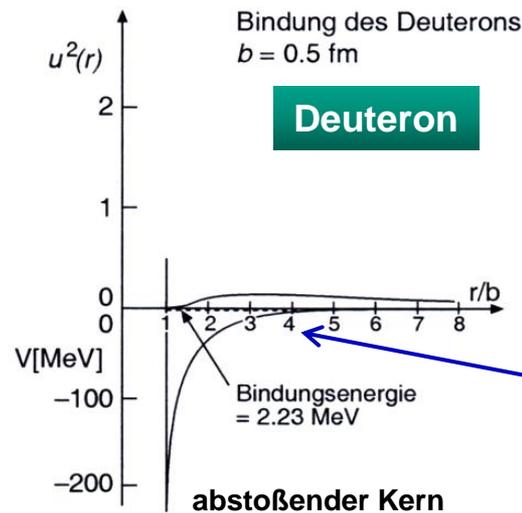
⇒ $V \approx 50 \text{ MeV}$ effektive Tiefe



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

Abstand zwischen beiden H – Atomen gut definiert

"starke Bindung"
 $E_B \approx \text{Topftiefe}$
 ⇒ E_{kin} klein



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

gerade eben gebunden
 $E_B \ll \text{Topftiefe}$
 ⇒ E_{kin} groß

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

Charakter der Kernkraft

Abstoßung bei kleinen Abständen

- bei Molekülen eine Folge des Pauli - Prinzips
 - hier: $\psi(2N) = \psi(6q)$ antisymm. unter Quark – Austausch
 - 12q im Grundzustand ($\ell=0$) möglich: 3 Farben · 2 Spins · 2 Isospins
 - weil Farbe immer antisymmetrisch \Rightarrow I, J – Anteil symmetrisch
 - Ortsanteil wg. $\ell=0$ symmetrisch
 - Hard-Core – Abstoßung durch starke $\vec{S}\vec{S}$ - WW
 - 6q mit $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ bei $r \rightarrow 0$ haben hohe Energie ("Farbmagnetismus")
 - \Rightarrow Anti-Parallel-Stellen nur möglich, wenn 2q in $\ell=1$ – Zustand gehen
 - \Rightarrow das kostet auch Energie (vergleichbar viel)
- Folge: Nullstellen von ψ_d bei $r = 0.4$ fm
- \Rightarrow zusammen mit V_{SS}
 - \Rightarrow starke, kurzreichweitige Abstoßung

Massenspektrum

parallele Spins

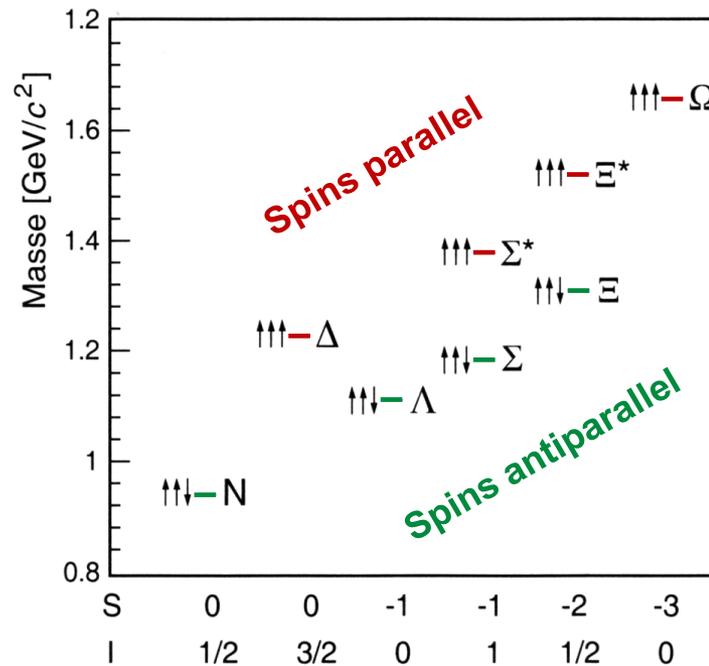


größere Baryonmasse
d.h. höhere Energie



in gebundenen Systemen kann Gesamtenergie durch antiparallele Ausrichtung verringert werden:

(benötigt aber Anhebung auf $\ell=1$)



Überlappende Nukleonen:
6 Quarks



Bei $r=0$:

$$P(b) = 8/9$$

bei größeren Abständen

$$P(b) \rightarrow 0$$

- ⇒ energetisch günstiger
- ⇒ abstoßender Kern durch Spin-Spin – WW

Abbildung 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 $J^P = 1/2^+$.

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

anziehende Kraft

analog zu Atomphysik:

Ionenbindung?

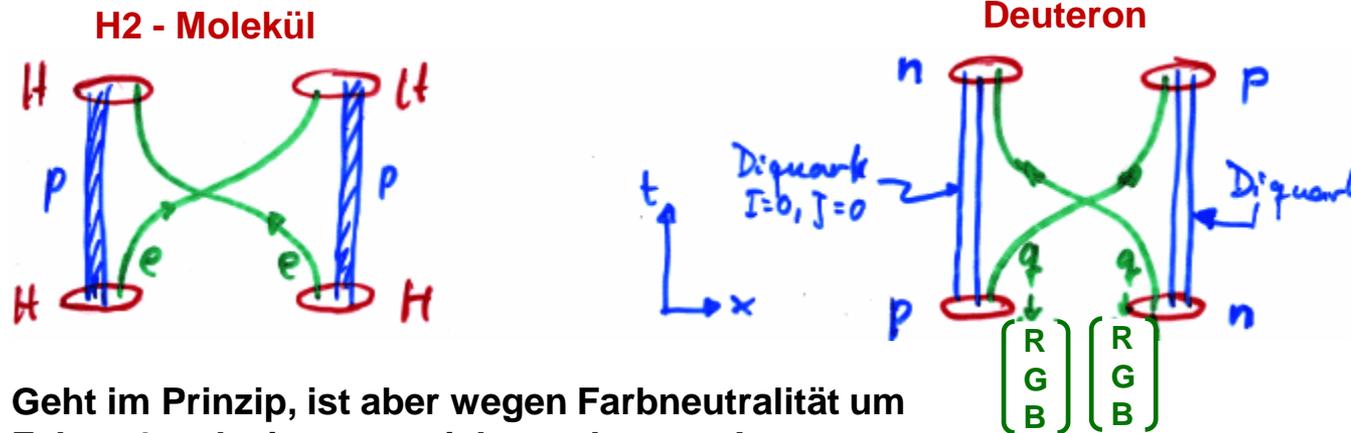
Nein, Confinement – Kräfte zu groß

van-der-Waals – Kraft?

Dipol-Dipol – WW? Nein, 2-Gluonen – Austausch bei kleinen Abständen zu schwach, bei großen Abständen durch Confinement verboten. Nur farbneutrale Objekte erlaubt.

Kovalente Bindung?

Quark – Austausch?

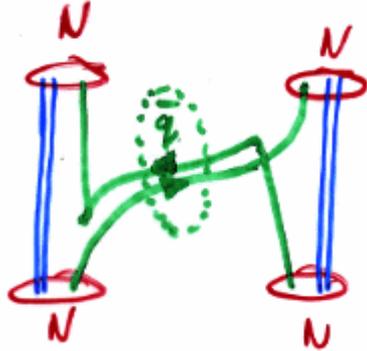


Geht im Prinzip, ist aber wegen Farbneutralität um Faktor 3 reduziert \Rightarrow nicht stark genug!

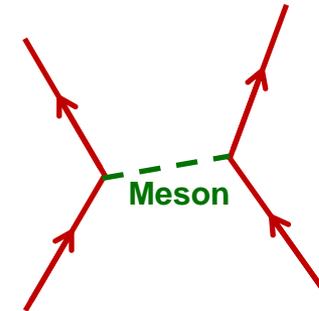
Aber: im Nukleon gibt es auch See – Antiquarks ...

anziehende Kraft

Besser: ein Quark läuft rückwärts in der Zeit \Leftrightarrow $q\bar{q}$ – Austausch



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



Austausch von (massiven) Mesonen: **Yukawa - Potential**

$$\begin{aligned}
 V(r) &= g \cdot \frac{e^{-\frac{mc}{\hbar}r}}{r} \\
 &= g \cdot \frac{e^{-\frac{r}{R}}}{r} \quad \text{mit } R = \frac{\hbar c}{m c^2}
 \end{aligned}$$

exponentiell abklingend
große Masse \Leftrightarrow kleine Reichweite

Hadron-Hadron – Wechselwirkungen sind gut durch Meson – Austausch beschreibbar. Je nach Quantenzahlen:

π – Austausch
 ρ, ω, \dots – Austausch

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