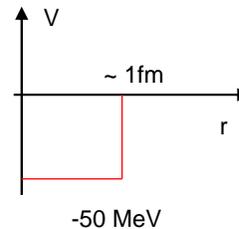


## X. Kernphysik

### 1. Nukleonen und Kernkraft

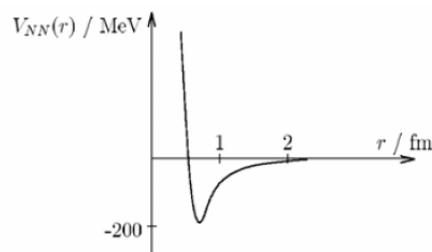
Kerne sind stark gebundene Systeme aus farbneutralen Nukleonen:

- Impuls der Nukleonen aufgrund Unschärferelationen relativ groß (s. später).  
→ Bild freier Nukleonen in einem effektiven Potential mit Reichweite von  $\sim 1$  fm  
  
→ Behandlung der Nukleonen als **(entartetes) Fermi-Gas**
- Aus Kerneigenschaften kann man nur schwer auf die Eigenschaften der Nukleon-Nukleon Wechselwirkung schließen.  
→ Zum Verständnis der NN-Wechselwirkung ist man auf Studium von 2-Nukleon-Systemen angewiesen: NN-Streuung / Deuteron



#### 1.1 Eigenschaften der Nukleon-Nukleon Wechselwirkung

- i. Kraft überwiegend anziehend, das sonst keine stabile



Potentialform aus Analyse von NN – Streudaten

- Abstoßung bei kleinen Abständen
- Anziehung bei  $r \sim 1$  fm
- kurzreichweitig

Sättigung: auch für schwere Kerne ist Bindungsenergie/Nukleon  $\approx$  konst.

- ii. Isospin-Invarianz der NN Kraft: gleiche Potenziale für nn, pp, np Streuung (nach Korrektur für e.m. WW). Spiegelkerne mit gleichen Energieniveaus.
- iii. NN Wechselwirkung ist stark **spinabhängig** und es existieren **nicht-zentrale Kräfte**. ➔ siehe Deuteron
- iv. Streuung polarisierter Nukleonen ergibt einen starken Spin-Bahnkopplungs-beitrag zum NN Potential

**Beispiel: Deuteron = gebundener np-Zustand**

Exp.:  $J^P = 1^+, \mu_D = 0.857 \mu_K$

Erinnerung  $\mu_K = \frac{e\hbar}{2M_p}$

$J = L + S_n + S_p$

Isospinzustände eines  
2 Nukleonen-Systems  
 $|I, I_3\rangle$

$I = 1$ Triplett	$I = 0$ Singulett
$ 1,1\rangle =  pp\rangle$	$ 0,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( np\rangle -  pn\rangle)$
$ 1,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( np\rangle +  pn\rangle)$	
$ 1,-1\rangle =  nn\rangle$	
Symmetr. $1 \leftrightarrow 2$	Antisymmetr. $1 \leftrightarrow 2$

Mögliche  
Spinzustände

$S = 1$ Triplett	$S = 0$ Singulett
$ 1,1\rangle =  \uparrow\uparrow\rangle$	$ 0,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( \downarrow\uparrow\rangle -  \uparrow\downarrow\rangle)$
$ 1,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( \downarrow\uparrow\rangle +  \uparrow\downarrow\rangle)$	
$ 1,-1\rangle =  \downarrow\downarrow\rangle$	
Symmetr. $1 \leftrightarrow 2$	Antisymmetr. $1 \leftrightarrow 2$

Gesamtwellenfunktion  $\psi = \phi_{Raum} \alpha_{Isospin} \chi_{Spin}$  muss antisymmetr. sein.

Aufgrund der gemessenen Parität  $P = +1$  folgt, dass Raumanteil ein symmetrischer  $L=0$  oder  $L=2$  Zustand ist, d.h. die erlaubten  $\alpha_{Isospin} \chi_{Spin}$  Kombinationen müssen antisymmetrisch sein:

Isospin  $I=1$  Zustände  $\times$  Spin  $S=0$  Zustand

Isospin  $I=0$  Zustand  $\times$  Spin  $S=1$  Zustände

**Experimentelle Beobachtung:**

1. Es gibt keine gebundenen pp od. nn Zustände ( $I=1 \Rightarrow$  Spin  $S=0$ )
2. Aus dem beobachteten magn. Moment schließt man, dass es sich bei Deuteron ebenfalls nicht um einen  $S=0$  sondern um einen  $S=1$  Zustand handelt:

Erwartung für  $S=1$  ( $L=0$ )  $|\vec{\mu}_D| = |\vec{\mu}_n + \vec{\mu}_p|$   
 $= |-1.91 + 2.79| \mu_K = 0.88 \mu_K$

(kleine Abweichung zum exp. Wert kann durch eine  $L=2$  Beimischung erklärt werden).

- Zusammenfassung:
1. S=1 Zustand ist stabil
  2. Gebundener NN Zustand mit S=0 nicht beobachtet
- Es gibt einen spinabhängigen Anteil der NN Kraft

Weiter findet man für das Deuteron ein elektrisches Quadrupolmoment (nur möglich wenn d nicht sphärisch symmetr.), was klar auf einen **nicht-zentralen Kraftbeitrag** hinweist.

**➔ Nukleon-Nukleon-Potenzial (phänomenologisch)**

Potenzial zwischen 2 Nukleonen 1 und 2 hat die folgende Form:

$$V_{NN} = V_C + \underbrace{V_{SS} \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2}_{\text{Spin-Spin}} + V_T + V_{LS} \cdot \vec{L} \frac{1}{2} (\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2)$$

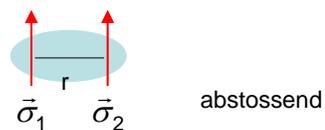
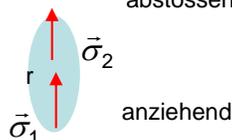
Gleiche Form wie magn. Dipol-Dipol WW bei elektromagn. WW

$V_T$  = Tensorbeitrag zur Beschreibung der nicht-zentralen Kraft:

$$V_T = V_T' [3(\vec{\sigma}_1 \hat{r})(\vec{\sigma}_2 \hat{r}) - \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2]$$

Anziehender Beitrag für S=1 groß genug um zu geb. NN zu führen

Tensorbeitrag aufgrund Dipol-Dipol WW:  
abstossend od. anziehend



## 1.2 Phänomenologische Modelle für Kernkraft

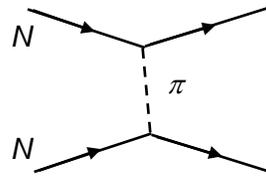
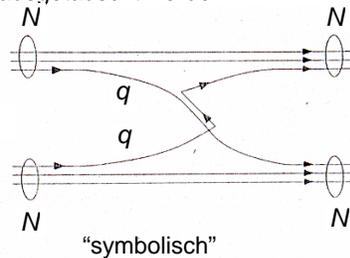
Eine Theorie der Kernkraft als WW zwischen Quarks und Gluonen gibt es bisher nicht. Problem ist nicht zuletzt die starke Kopplungskonstante  $\alpha_s$  und das Confinement der Quarks und Gluonen.

⇒ **Phänomenologische Modelle mit Ein- und Mehr-Pionenaustausch.**

### Pion-Austausch:

Ähnlich wie bei kovalenter Bindung führt ein Quarktausch zw. Nucleonen zu einem Bindungszustand ⇒ Confinement: möglich nur für kleine Abstände.

Neben Valenzquarks sind auch See-Quarks und See-Antiquarks im Nucleon vorhanden. In diesem Fall könnte ein farbneutrales Quark-Antiquark Paar (Pion) ausgetauscht werden.



### Yukawa Theorie

Austausch eines massiven Pions als Vermittler der Kernkraft wurde 1934 von Yukawa vorgeschlagen um die kurze Reichweite des Potentials zu erklären.

Propagator eines massiven Pions: 
$$\sim \frac{1}{Q^2 + m_\pi^2}$$

➔ Führt zu einem gedämpften Potenzial mit endlicher Reichweite: 
$$V(r) \sim \frac{1}{r} e^{-m_\pi r}$$

Compton-Wellenlänge von Teilchen  $\lambda = 1/m_\pi$  bestimmt die Reichweite der Kraft

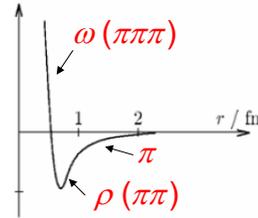
Aus der Reichweite der Kernkraft  $\sim 1$  fm hat Yukawa eine Masse des Austauscheteilchens von etwa 200 MeV vorhergesagt.

Das Pion wurde 1947 mit Masse von  $\sim 140$  MeV entdeckt und mit dem Yukawa-Austauschteilchen identifiziert.

$1\pi$ -Austausch erklärt Abfall des Potentials für  $R > 1$  fm beschreibt aber nicht Potentialmulde bei  $\sim 1$  fm oder abstoßenden Kern.

Eigenschaften können aber in Modellen mit Mehr-Pionen-Austausch (Vektorresonanzen) erklärt werden:

$2\pi$  ( $\rho$  Resonanz) Austausch  $\rightarrow$  Potentialmulde  
 $3\pi$  ( $\omega$  Resonanz) Austausch  $\rightarrow$  Abstoßung



Konzeptionell kann die Kernkraft zwar auf die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen zurückgeführt werden. Für die Beschreibung muss aber auf phänomenologische Modelle zurückgegriffen werden.

2 Klassen von Kernmodellen:

- Einteilchenmodelle: Nukleonen sind unabhängig voneinander in einem Potentialtopf:  
**Fermi-Modell, Schalenmodell**
- Modelle starker WW: Nukleonen koppeln stark aneinander:  
**Tröpfchenmodell, (Kollektivmodelle)**

## 2. Eigenschaften von Kernen

### 2.1 Nomenklatur und Definitionen

Kerne mit gleicher Massenzahl A: Isobare  
 Kerne mit gleicher Kernladung Z: Isotope  
 Kerne mit gleicher Neutronenzahl N: Isotone

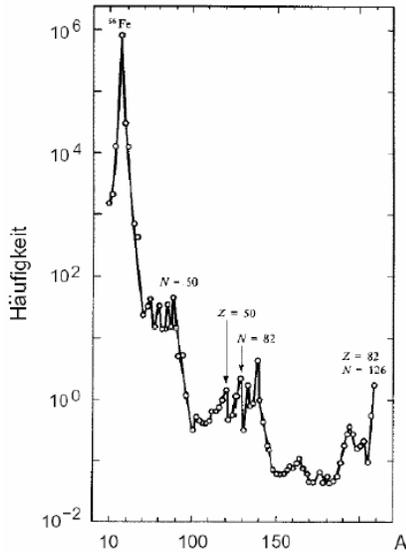


Kernmasse:  $m(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - \underbrace{B(A, Z)}_{\text{Kernbindungsenergie}}$

Atommasse:  $m_A(A, Z) = m(A, Z) + Zm_e - \text{Elektronbindung}$

Atomare Masseneinheit:  $1 u = \frac{m_A(^{12}\text{C})}{12} = 931.49 \text{ MeV}$

## 2.2 Isopenhäufigkeit

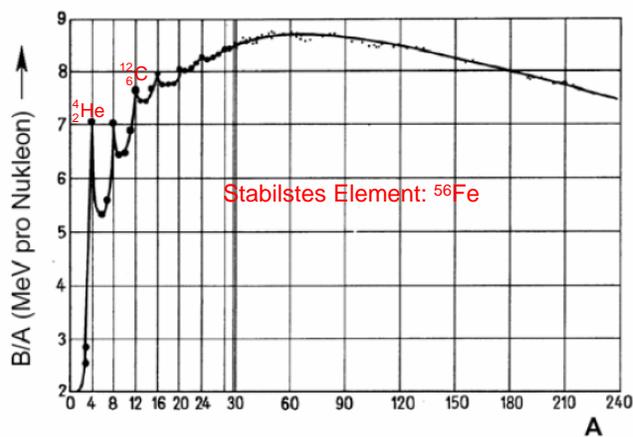


Massenbestimmung mittels  
Massenspektroskopie

Isotope mit "magischen" Neutronen /  
Protonen Zahlen besonders häufig:  
2, 8, 20, 28, 50, 82, 128

## 2.3 Bindungsenergie für verschiedene Kerne

$$B/A = (Zm_p + Nm_n - m(A,Z)) / A$$



Q-Wert:  $Q = m(A,Z) - m(A-A', Z-Z') - m(A', Z') > 0$   
damit Reaktion möglich.