

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III

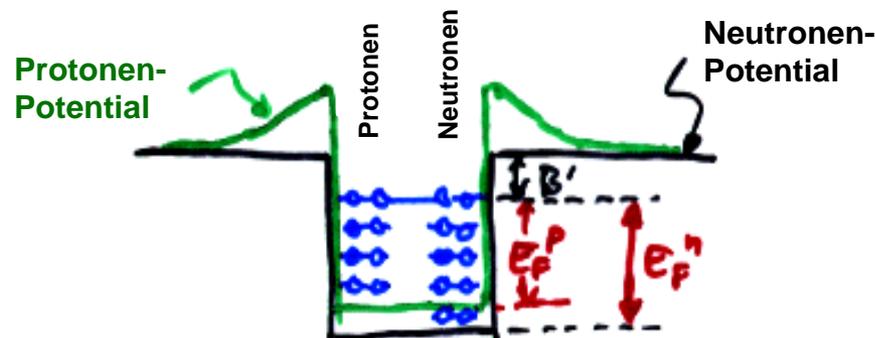
Vorlesung 17

MICHAEL FEINDT & THOMAS KUHR
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Aufbau der Kerne (1)

Das Fermigasmodell

- Nukleonen bewegen sich mit ca. 250 MeV/c quasi-frei im Kern
 - schwache Bindung: mittlerer Abstand zwischen Nukleonen \gg Radius des hard core
- ⇒ Kerne als **entartetes Fermigas**



Fermi – Impuls	$p_F \approx 250 \text{ MeV}$
Fermi – Energie	$E_F = p_F^2/2m \approx 33 \text{ MeV}$
Bindungsenergie	$B/A \approx 7\text{-}8 \text{ MeV}$

⇒ Fermi-Gas – Modell beschreibt **Volumen-, Coulomb- und Asymmetrie-Term** der Weizsäcker – Massenformel.

Fermi-Gas – Modell beschreibt auch **Neutronensterne!**

Neutronensterne

- Coulomb – Energie fehlt; zusätzlich Gravitation \Rightarrow **resultierende Dichte ca. 10x größer**
- Entstehung bei **Explosion einer Supernova**: ausgebranntes Zentrum eines Sterns, ca. 1–2 Sonnenmassen aus Eisen, bricht durch Gravitation zusammen
 - Hohe Dichte, Fermi – Energie der Elektronen steigt so hoch, dass inverser β – Zerfall stattfindet: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$. Umkehrreaktion $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ durch Pauli – Prinzip verboten. Nach und nach werden also alle p in n umgewandelt, die Coulomb – Barriere verschwindet: ${}_{26}^{56}\text{Fe} + 26e^- = 56n + 26\nu_e$
 - Implosion wird bei $\rho=10^{18}$ kg/m² durch Fermidruck der Neutronen gestoppt. Wenn Masse > 2 Sonnenmassen ist die Gravitation so stark, dass auch dieser nicht standhält \rightarrow SCHWARZES LOCH
- **Typischer Radius** eines Neutronensterns: 10 km
Innerer Kern: entartete Neutronen – Flüssigkeit
 ca. **1 km dicke Kruste** aus Atomen im festen Aggregatzustand
- Realistisches Modell: im Kernzentrum so hohe Dichten, dass sich die "hard cores" der Neutronen berühren \Rightarrow $\frac{1}{2}$ Fermidruck, $\frac{1}{2} \vec{s}\vec{s}$ – Abstoßung

Hyperkerne

- Ersetze einzelne Nukleonen durch **Hyperonen** (Baryonen mit Strangeness)
- Hyperon ist von p und n unterscheidbar und unterliegt daher nicht dem Pauli – Prinzip \Rightarrow **Ein-Teilchen – Spektroskopie machbar!**



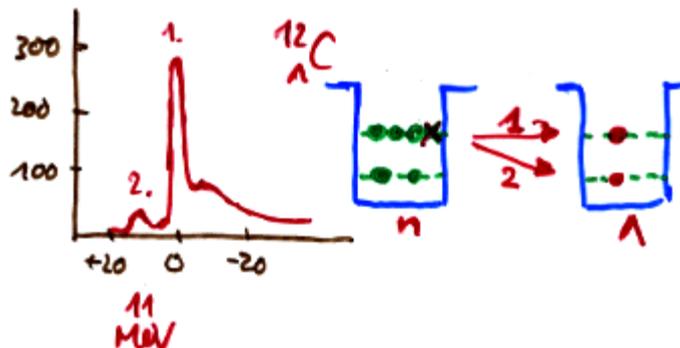
ca 500 MeV Impuls \uparrow
 \Rightarrow Impulsübertrag klein gegen Fermi-Impuls der Nukleonen

\uparrow Kern

\downarrow $K^- n \rightarrow \Lambda \pi^-$

\hookrightarrow Hyperkern

- **Energiebilanz:** $B_{\Lambda} = B_n + E_{\pi} - E_K + (M_{\Lambda} - M_n) + \text{Rückstoß}$



1.) bleibt auf höherem Niveau
 2.) fällt auf Grundzustandsniveau
 (ist nicht durch Pauli – Prinzip verboten!)

Bindungsenergie in Hyperkernen

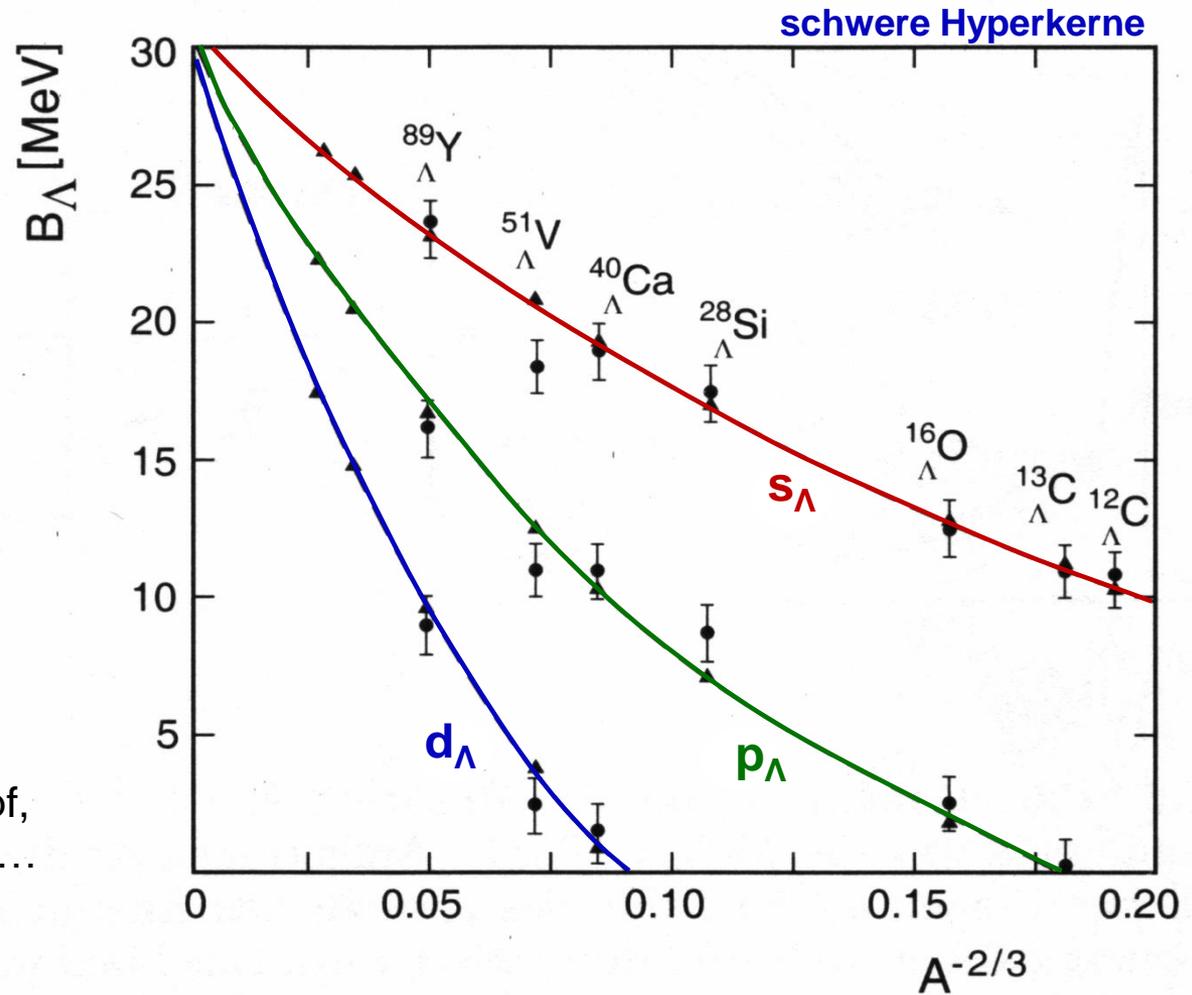


Linien:

- Fermi-Gas – Modell
- Λ in Einteilchen s,p,d – Zuständen

Messungen:

in hervorragender
 Übereinstimmung mit Modell:
 Λ bewegt sich wie ein freies
 Teilchen in einem Potentialtopf,
 obwohl Kern dicht gepackt ist...



Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

Das Schalenmodell

- Hyperkerne: definierte Energieniveaus für Λ – Baryonen
 ⇒ auch für Nukleonen gültig!
- Analog zum Atom: Elektronen im Zentralpotential des Kerns
hier: Nukleonen im "**mean field**" aller Nukleonen

Atom: Schalenstruktur

Kern: auch... besonders stabil sind Kerne mit

Z oder N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 "magische Zahlen"

Doppelt magische Kerne:

4	He ₂
2	
16	O ₈
8	
40	Ca ₂₀
20	
48	Ca ₂₈
20	
208	Pb ₁₂₆
82	

Doppelt magische Kerne

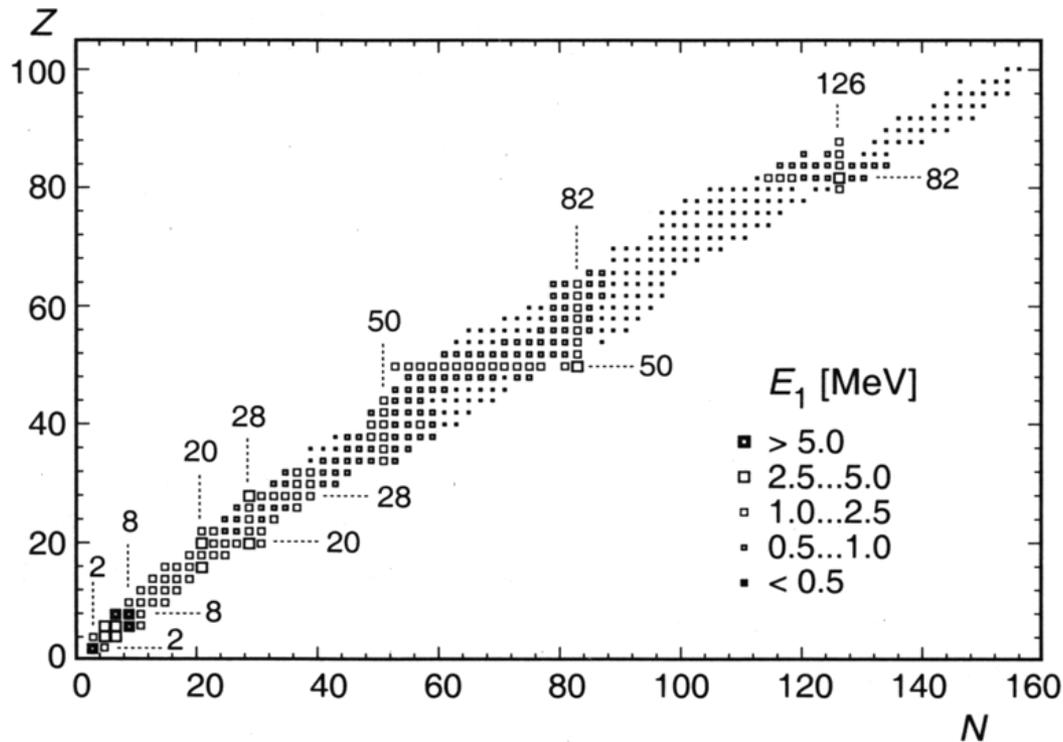


Abbildung 17.6. Energie E_1 des ersten angeregten Zustands in gg-Kernen. In Kernen mit „magischer“ Protonen- oder Neutronenzahl ist diese Anregungsenergie besonders groß. Die angeregten Zustände haben üblicherweise die Quantenzahlen $J^P = 2^+$. Ausnahmen sind die ersten angeregten Zustände in ${}^4_2\text{He}_2$, ${}^{16}_8\text{O}_8$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$, ${}^{72}_{32}\text{Ge}_{40}$ und ${}^{90}_{40}\text{Zr}_{50}$ (0^+) sowie in ${}^{132}_{50}\text{Sn}_{82}$ und ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ (3^-) und in ${}^{14}_6\text{C}_8$ und ${}^{14}_8\text{O}_6$ (1^-). Weiter entfernt von den „magischen“ Zahlen wird E_1 klein, mit fallender Tendenz, je schwerer der Kern wird (Daten aus [Le78]).

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

Eigenzustände im Kernpotential

$$\psi_{nlm}(\vec{r}) = R_{nl}(r) \cdot Y_l^m(\theta, \varphi)$$

Zahl der Knoten +1

Bahndrehimpuls

Energie: unabhängig von
 $m = [-\ell, \dots, +\ell]$

Parität: $(-1)^\ell$

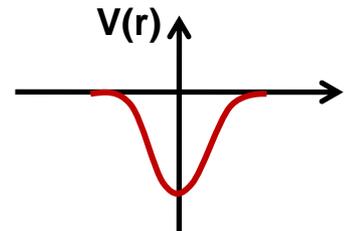
- Eigenzustände: $n - \ell$ – Niveaus $2 \cdot (2\ell + 1)$ -fach entartet.

- Potentiale:

($A \leq 7$)

für leichte Kerne: Gauß-förmig

⇒ **harmonischer Oszillator**



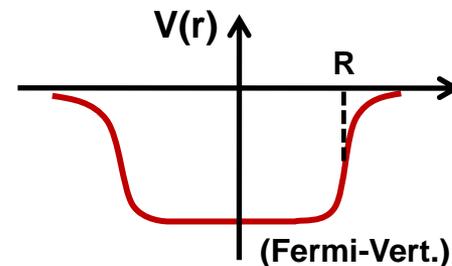
$$E = (N_x + N_y + N_z + 3/2) \cdot \hbar\omega$$

$$N = 2(n-1) + \ell$$

für schwere Kerne:

Woods-Saxon – Potential

$$V_{\text{Zentral}}(r) = \frac{-V_0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$



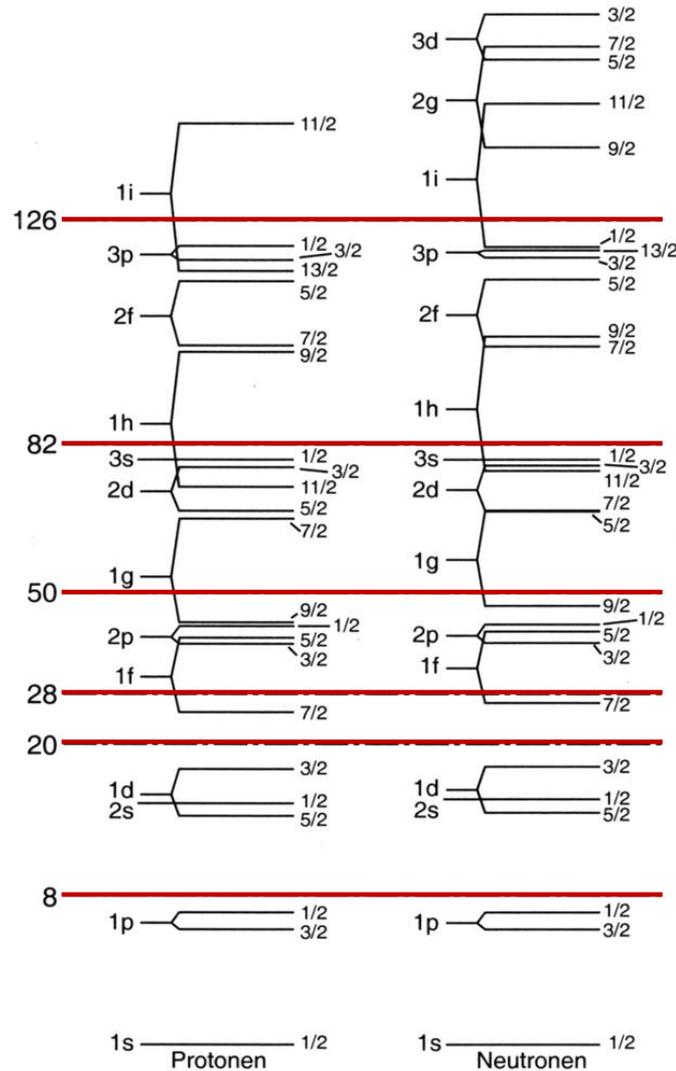
$n - \ell$ - Entartung aufgehoben:

- kann die ersten 3 magischen Zahlen (2, 8, 20) erklären.

- inkl. Spin-Bahn – WW können alle magischen Zahlen erklärt werden...

Magische Zahlen in Einteilchenenergieniveaus

Magische Zahlen:
besonders großer
Abstand zum
nächsten
Anregungszustand



Kerne mit magischen Zahlen haben **magn. Moment $\mu=0$** (weil Nukleonen in abgeschlossener Schale zu $J=0$ koppeln).

Hat man ein **zusätzliches Nukleon (Leuchtnukleon)**, ist μ von diesem gegeben. **Fehlt gerade eines**, verhält es sich wie ein "**Loch**".

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne