

# Kerne und Teilchen

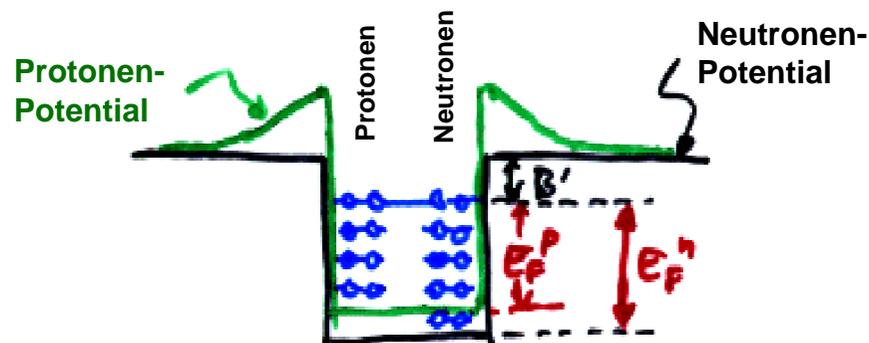
**Moderne Experimentalphysik III**  
**Vorlesung 17**

MICHAEL FEINDT  
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.

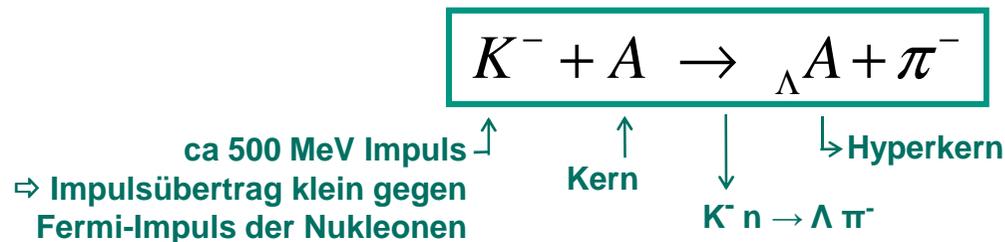
Fermi-Gas – Modell beschreibt auch **Neutronensterne!**

# Neutronensterne

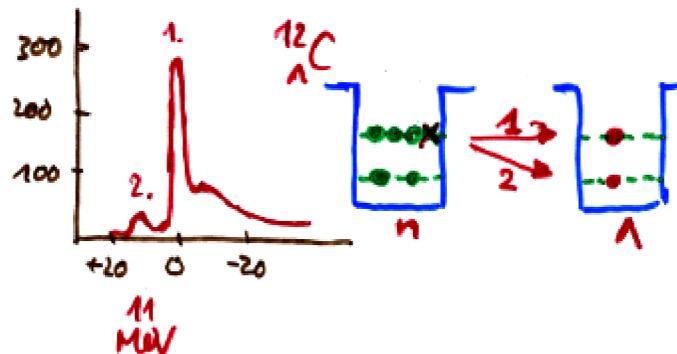
- Coulomb – Energie fehlt; zusätzlich Gravitation  $\Rightarrow$  **resultierende Dichte ca. 10x größer**
- Entstehung bei **Explosion einer Supernova**: ausgebranntes Zentrum eines Sterns, ca. 1–2 Sonnenmassen aus Eisen, bricht durch Gravitation zusammen
  - Hohe Dichte, Fermi – Energie der Elektronen steigt so hoch, dass inverser  $\beta$  – 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:  ${}^{56}_{26}\text{Fe} + 26e^- = 56n + 26\nu_e$
  - Implosion wird bei  $\rho=10^{18}$  kg/m<sup>2</sup> 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!**



- **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

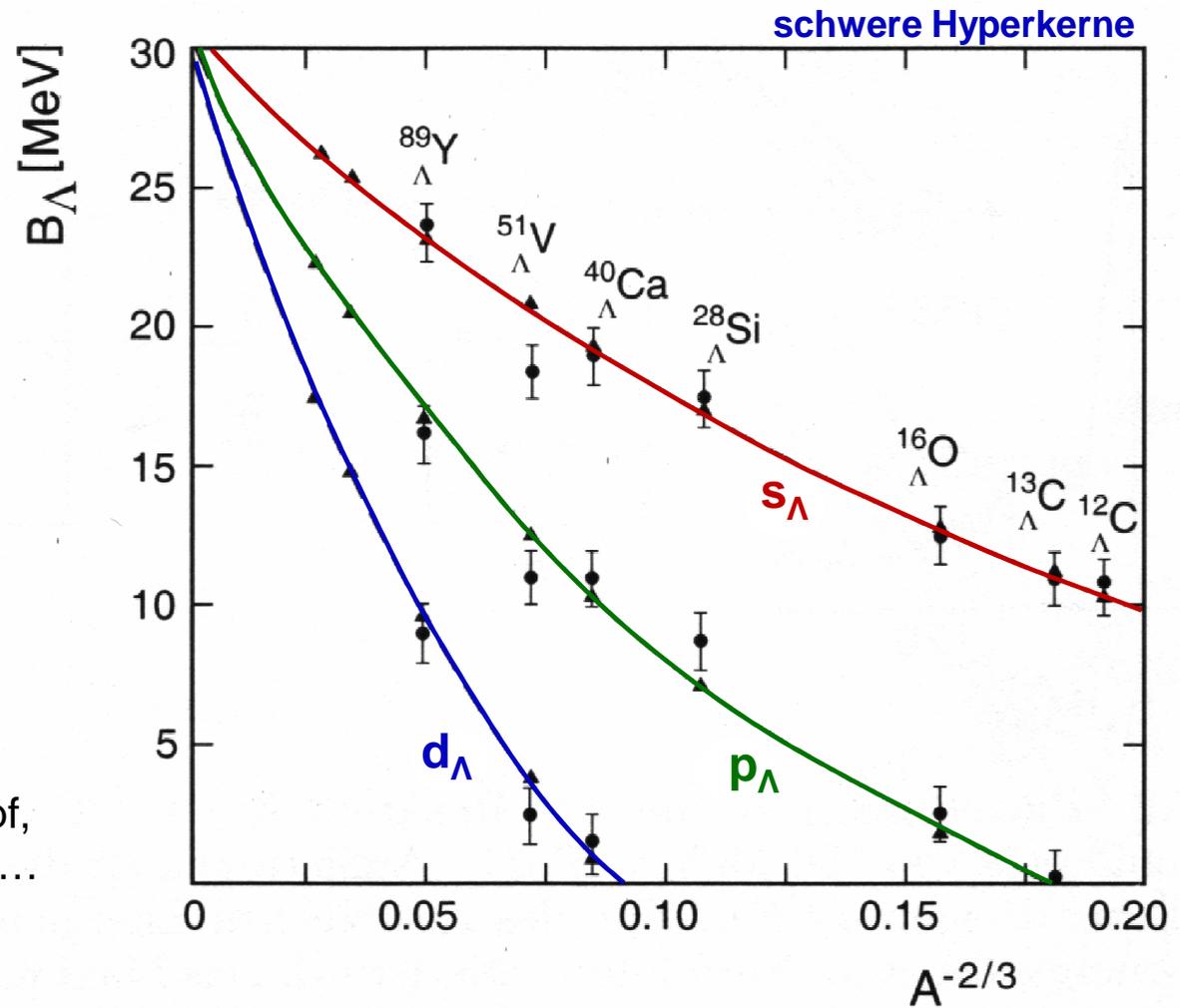


**Linien:**

- Fermi-Gas – Modell
- $\Lambda$  in Einteilchen s,p,d – Zuständen

**Messungen:**

in hervorragender  
Übereinstimmung mit Modell:  
 $\Lambda$  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  $\Lambda$  – Baryonen  
 ⇒ auch für Nukleonen gültig!
- Analog zum Atom: Elektronen im Zentralpotential des Kerns  
hier: Nukleonen im "**mean field**" aller Nukleonen

**Atom:** Schalenstruktur

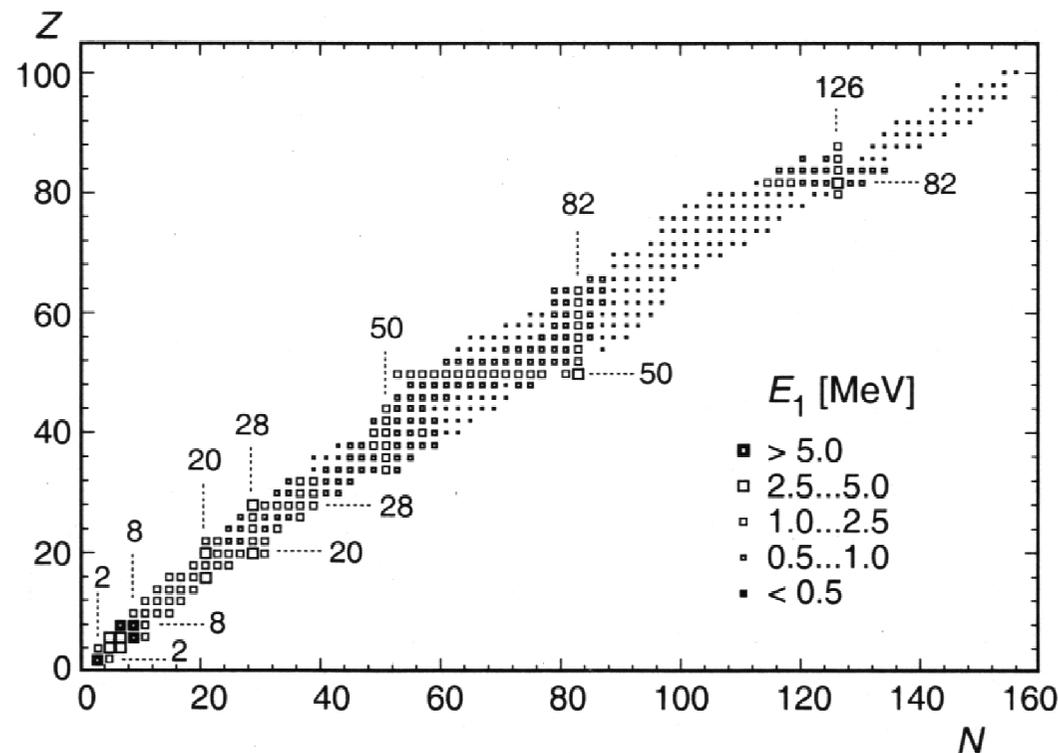
**Kern:** auch... besonders stabil sind Kerne mit

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

Doppelt magische Kerne:

4	2	He <sub>2</sub>
16	8	O <sub>8</sub>
40	20	Ca <sub>20</sub>
48	20	Ca <sub>28</sub>
208	82	Pb <sub>126</sub>

# 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

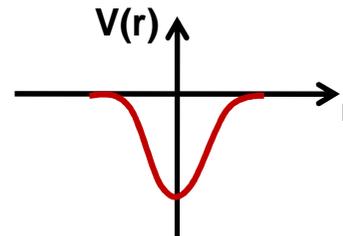
Energie: unabhängig von  
 $m = [-\ell, \dots, +\ell]$

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**



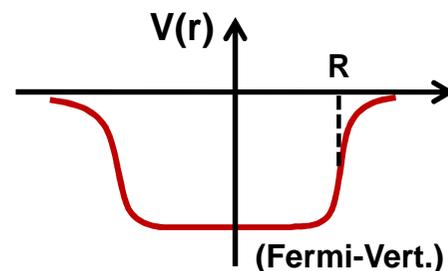
$$E = (N_x + N_y + N_z + 3/2) \cdot \hbar \omega$$

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

für schwere Kerne:

**Woods-Saxon – Potential**

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



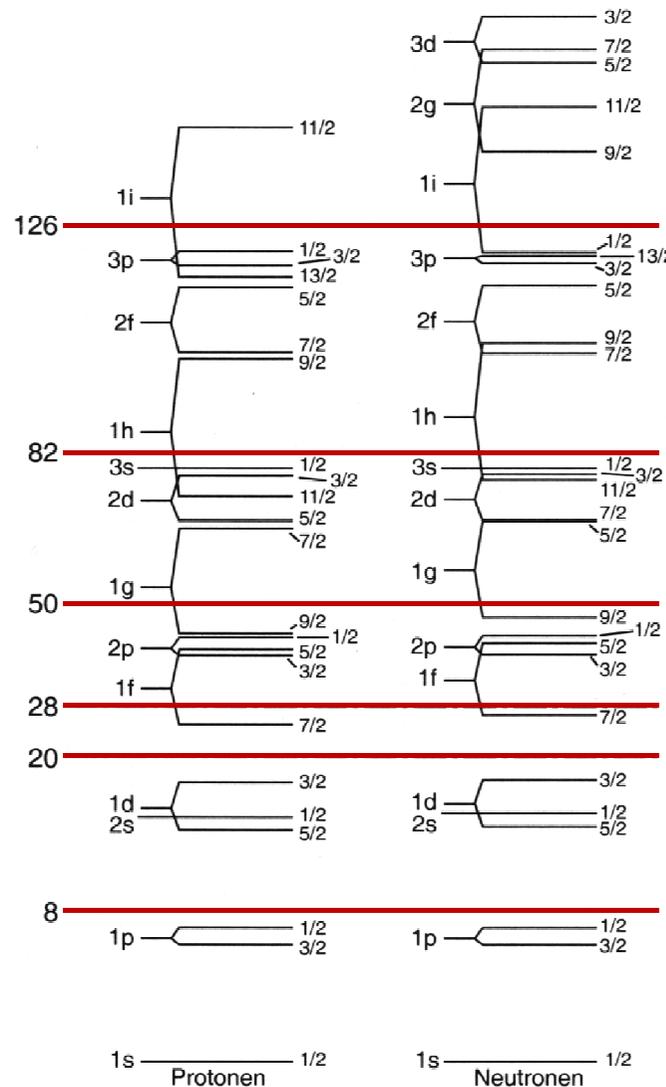
**n-ℓ - Entartung aufgehoben:**

- 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  $\mu$  von diesem gegeben. **Fehlt gerade eines, verhält es sich wie ein "Loch"**.

Quelle: Povh, Teilchen und Kerne