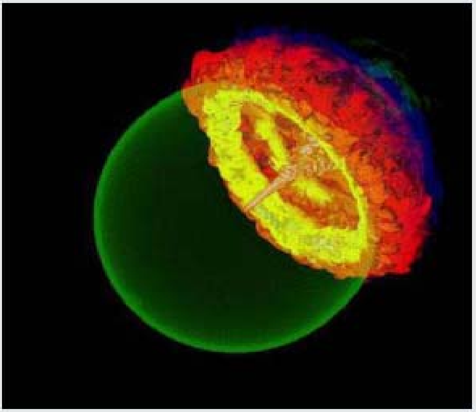
Kernkräfte und Kernmodelle:

- Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte
- Isospin

Großes Physikalisches Kolloquium
an der Universität zu Köln



Professor Dr. Michael Wiescher
University of Notre Dame, Notre Dame, and Joint Institute for Nuclear Astrophysics

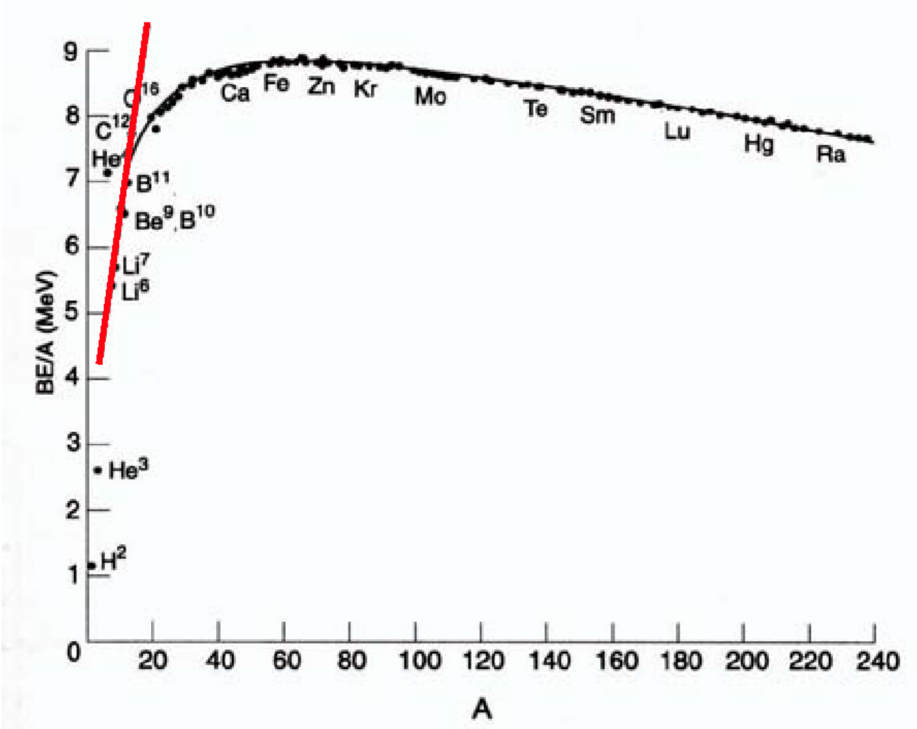
Nuclear Processes in Exploding Stars

Stellar explosions are the most violent natural events observed by man. We know two kind of stellar explosion events: Shock induced explosions of core collapsing massive stars known as type II supernovae, and accretion induced thermonuclear explosions such as type Ia supernovae, X-ray bursts, and novae in accreting binary systems. The type II supernova shock front causes rapid increase of density and temperature conditions in the stellar material initiating rapid neutron or gamma induced nucleosynthesis processes such as the r-process and the rp-process which define the heavy element abundance distribution in our universe. Thermonuclear stellar explosions on the other hand are driven by nuclear ignition of dense stellar material at highly electron degenerate conditions. I will provide a summary of the nucleosynthesis signatures of the rapid nucleosynthesis processes in stellar explosions and will highlight their impact on the production of heavy elements as observed in our galaxy.

Dienstag, 10.6.2008, 16:45

Hörsaal 3 der Physikalischen Institute Köln, Zülpicher Straße 77

Bindungsenergie



Bindungsenergien pro Nukleon B/A

• B/A ~ konstant ~ 8 MeV pro Nukleon

• Eigenschaft der Nukleon-Nukleon WW

In einem Kern mit A Nukleonen könnte jedes Nukleon könnte mit jedem anderen der (*A* - 1) Nukleonen wechselwirken. B/A würde dann mit A linear ansteigen. Dies ist jedoch nur bis *A*~10 der Fall. B/A ist für *A* > 10 fast konstant d.h. jedes Nukleon spürt nicht alle anderen Nukleonen im Kern. Ein Nukleon wechselwirkt nur mit seinen nächsten Nachbarn. Es kommt zu einer Sättigung der starken Kernkraft. Die Kernkräfte haben nur eine relativ kurze Reichweite, die nicht durch den gesamten Kern gehen, die Reichweite ist von der Größenordnung der Ausdehnung der Nukleonen (1 - 2*fm*).

Einführung Kernkräfte

Einige Konsequenzen über die Kernkräfte aus dem Stoff der Vorlesung
z.B. Bindungsenergien, Radien...

- Stark: stärker als die elektromagnetische-, schwache - oder Gravitationskraft

- Kurze Reichweite: Nukleonen erfahren die Wechselwirkung nur auf kurzen Distanzen (~2 fm) wenn sie anfangen sich zu überlappen.

- Anziehend: trotz Coulombwechselwirkung der Protonen

- Abstoßendes Zentrum: das Volumen ist proportional zu A,
Kerne kollabieren nicht zu ∞ Dichte.

- Sätttigung: B/A~constant;
im Kern wechselwirken die Nukleonen nur mit ihren nächsten Nachbarn

- Ladungsunabhängig: Kleinste Unterschiede zw. Protonen und Neutronen.
  - Bei kleinen Massen ist Symmetrie um N=Z vorhanden.
  - Ähnlichkeit der niedrigliegenden angeregten Zustände in Spiegelkernen.

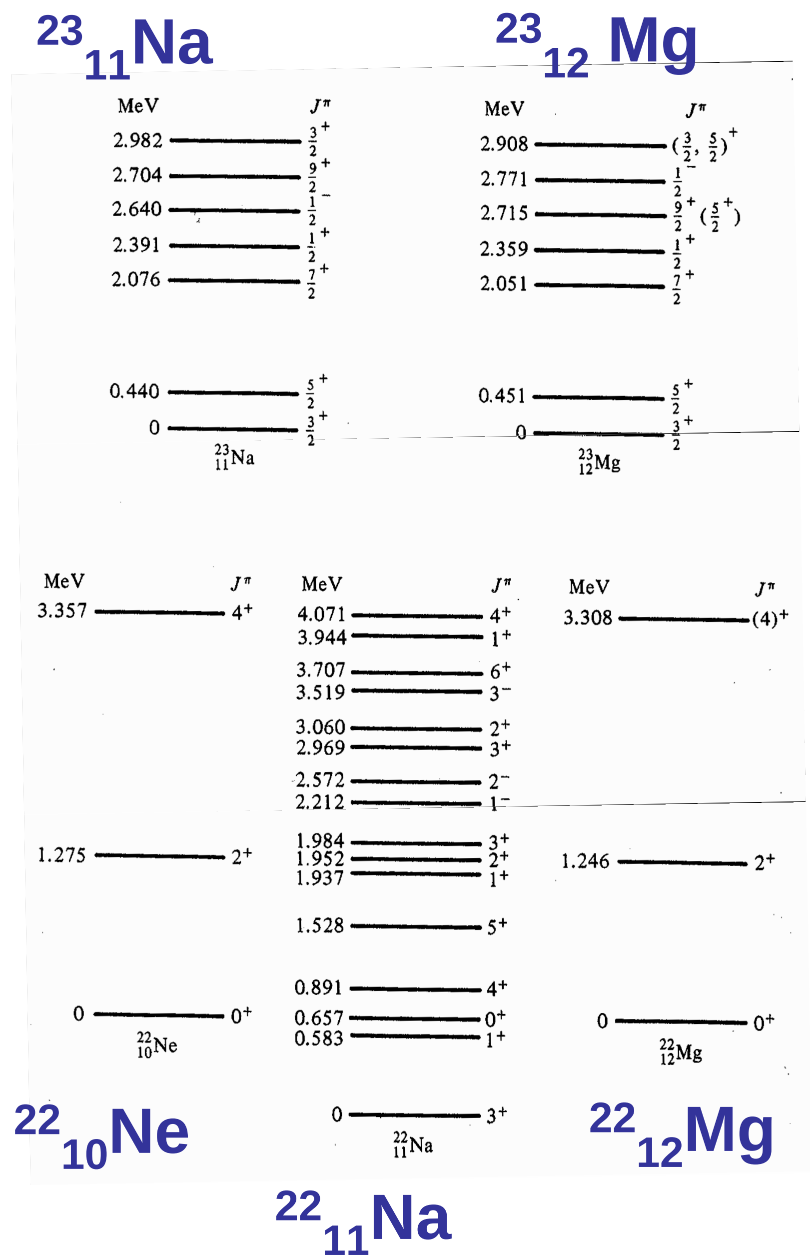
Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte

Neutronen und Protonen haben nicht nur fast die gleiche Masse, sondern sind auch in ihrer Kernwechselwirkung ähnlich.

Dies sieht man an ihren ähnlichen Bindungsenergien und, noch deutlicher, an den Energiezuständen der "Spiegelkerne".

Spiegelkerne sind Paare von Isobaren (gleiches A), bei denen die Protonenzahl des einen Nuklids gleich der Neutronenzahl des anderen ist.

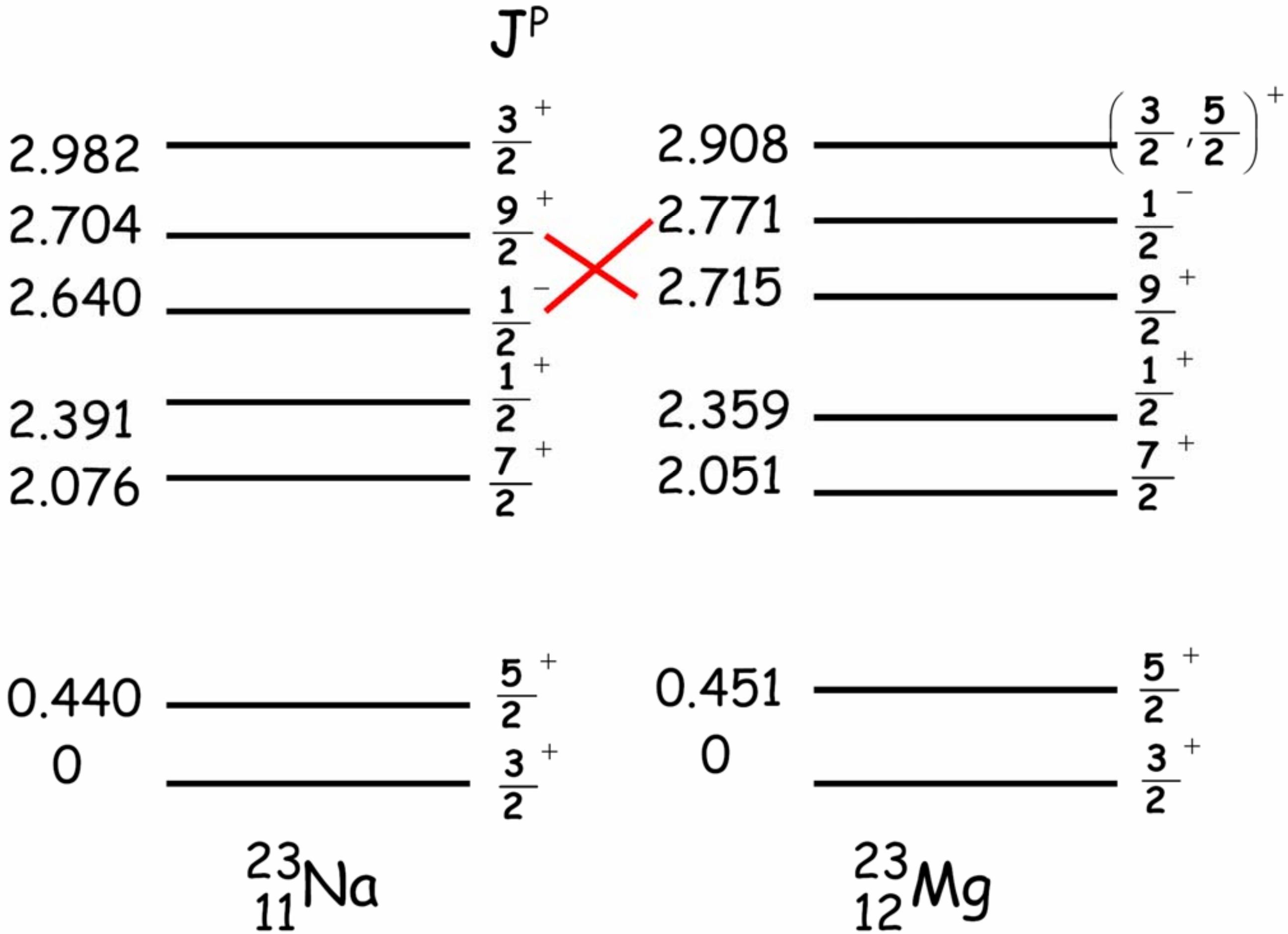
Beispiel:
Isobare Kerne mit A=22 und 23



Spiegelkerne

Ladungssymmetrie der Kernkräfte
p-p-Wechselwirkung = n-n-Wechselwirkung

Beispiel $({}^{23}_{11}Na,\ {}^{23}_{12}Mg)$



Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte, Isospin

Die Energiezustände der Spiegelkerne

Zustände in ^{23}Na und ^{23}Mg, ^{22}Ne und ^{22}Mg mit gleichen Quantenzahlen bilden Multipletts, deren Verschiebungen alleine durch die Coulombwechselwirkung erklärbar sind.

Wäre diese ‚abgeschaltet', würden die Spiegelkerne entartete Multipletts auf Grund der starken Wechselwirkung von nn und pp zeigen. Aber auch im Isobaren Kern ^{22}Na findet man, neben anderen Zuständen, solche, die zum gleichen Multiplett gehören.

Isospin

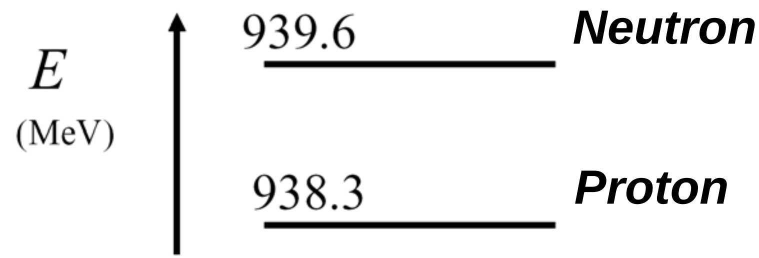
Heisenberg bemerkte diese Symmetrie der Wechselwirkung im pp-, np- und nn-System, und analog zur Beschreibung von Drehimpulsmultipletts in Atomen führte er für die Beschreibung der Proton-Neutron-Symmetrie eine Isotopen- oder Isospinquantenzahl I oder T ein.

Isospin

Werner Heisenberg
1901-1976

Nobelpreis 1932

• Beobachtung: $m_n \sim m_p$
Nur kleiner Massenunterschied von 1.29 MeV



• Proton und Neutron koppeln gleich stark an starke Wechselwirkung

• Starke Wechselwirkung kann Proton/Neutron nicht unterscheiden

• Proton und Neutron sind für starke WW Zustände eines Teilchens
→ Nukleon

• Unterschied im Isospin I=1/2 mit zwei Zuständen: Proton Neutron

$$\text{Nukleon: } \mathrm{I} = \tfrac{1}{2} \begin{cases} \text{Proton: } & \mathrm{I}_3 = +\tfrac{1}{2} \\ \text{Neutron: } & \mathrm{I}_3 = -\tfrac{1}{2} \end{cases}$$

• Unterscheidung durch z.B. elektromagnetische WW möglich

• Starke Wechselwirkung: erhält Isospin!

Isospin

Isospin des Nukleons

Proton und Neutron sind zwei Zustände des Nukleons, die ein Dublett mit Isospin I=1/2 bilden. Die z- oder 3.-Komponente ist die Projektion auf die Quantisierungsachse.

$$\text{Nukleon: } I = \tfrac{1}{2} \begin{cases} \text{Proton}: & I_3 = +\tfrac{1}{2} \\ \text{Neutron}: & I_3 = -\tfrac{1}{2} \end{cases}$$

In Prozessen der starken Wechselwirkung verhalten sich Proton und Neutron gleich.

Der Isospin wird formal wie der quantenmechanische Drehimpuls mit den entsprechenden Kopplungsregeln behandelt.

Spin: $\vec{s} = \frac{1}{2},\ \langle s^2 \rangle = s(s+1),\ \langle s_z = m_s \rangle = \pm\frac{1}{2}$ z.B. Elektron spin up, down

Isospin: $\vec{I} = \frac{1}{2},\ \langle I^2 \rangle = I(I+1),\ \langle I_z = m_I \rangle = \pm\frac{1}{2}$

$\text{Proton}: \ m_I = +\frac{1}{2} \qquad \text{Neutron}: \ m_I = -\frac{1}{2}$ oder andere Konvention

Isospin

Isospinoperator : $\hat{I}, \hat{I}_z$ oder $\hat{T}, \hat{T}_z$

Proton : $|I, I_z\rangle = \left|\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\right\rangle = |\pi\rangle$ Neutron : $|I, I_z\rangle = \left|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right\rangle = |\nu\rangle$

$\hat{I}_z|\pi\rangle = \frac{1}{2}|\pi\rangle$ $\hat{I}_z|\nu\rangle = -\frac{1}{2}|\nu\rangle$

Isospin eines Kernes mit N, Z : $\hat{I}_z(N, Z) = \sum_{k=1}^{A} \hat{I}_z^{(k)} = \frac{1}{2}(Z - N)$

Isospin im Zwei – Nukleonen – System :

Eigenwerte : $I = 1, \quad I_z = -1, 0, 1$

symmetrische Wellenfunktionen :

$$\varphi_1^1 = \pi(1)\pi(2)$$

$$\varphi_0^1 = \frac{1}{\sqrt{2}}[\pi(1)\nu(2) + \nu(1)\pi(2)]$$

$$\varphi_{-1}^1 = \nu(1)\nu(2)$$

Eigenwerte : $I = 0, \quad I_z = 0$

antisymmetrische Wellenfunktion :

$$\varphi_0^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}[\pi(1)\nu(2) - \nu(1)\pi(2)]$$

Kerne:

${}^{14}_{6}C_8$: I_3=-1 ${}^{14}_{8}O_6$: I_3=+1 => I=1

${}^{14}_{7}N_7$: I_3= 0 => I=0,1

Naive Erwartung an Kern-Kern-Potential