

Nukleon-Nukleon-Reaktionen

Eigenschaften des Nukleons

Formalismus zur Beschreibung der elastischen Streuung
(Optisches Modell, Streuphasen) und von Reaktionen

Zwei-Nukleonen-Problem (Streulängen, NN-Potential, NN-Reaktionen)

Reaktionen zwischen Nukleonen und leichten Kernen

1. Vorlesung, TU Dresden 08.04.2008

Dr. Daniel Bemmerer



**Forschungszentrum
Dresden** Rossendorf

Vorlesungen der Kern- und Teilchenphysik

Vorlesungen im Sommersemester 2008

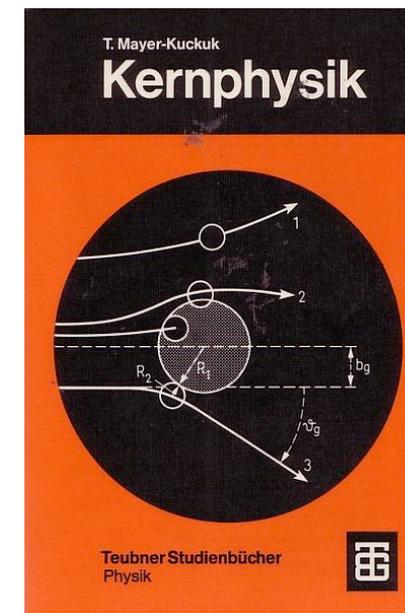
Kernphysik	Prof. H. Freiesleben, Prof. K. Zuber	Mittwoch, 2. DS (09:20-10:50) PHY/C213/H
Struktur der Materie I für Physiklehrer/innen	Prof. M. Kobel	Donnerstag, 2. DS (09:20-10:50) SE2/22
Atom- und Molekülphysik für Physiklehrer	Prof. H. Freiesleben, Prof. K. Zuber	Donnerstag, 2. DS (09:20-10:50) SE2/201H
Standardmodell der Teilchenphysik (Vertiefungsfach)	Prof. M. Kobel, Prof. D. Stöckinger	Dienstag, 2. DS (09:20-10:50) ASB/114U
Jenseits des Standardmodells: SUSY u.a. (Vertiefungsfach)	Prof. M. Kobel, Prof. D. Stöckinger	Mittwoch, 4. DS (13:00-14:30) PHY/C213/H
Detektoren und Beschleuniger (Vertiefungsfach)	Dr. F. Dohrmann / Dr. K. Brinmann	Dienstag, 5. DS (14:50-16:20) SE2/103/U
Astroteilchenphysik und Kosmologie (Vertiefungsfach)	Prof. B. Kämpfer	Dienstag, 7. DS / Donnerstag, 6.DS (unger. Woche) SE2/103/U
Wechselwirkung von Teilchen mit Materie (Vertiefungsfach)	Dr. J. Henniger	Mittwoch, 3. DS (11:10-12:40) ASB/328/H
Nukleon-Nukleon-Reaktionen (fakultativ)	Dr. D. Bemmerer	Dienstag, 3. DS (11:10-12:40) MER/03
Gruppen und Teilchen (fakultativ)	Dr. G. Plunien	Montag, 2. DS / Mittwoch, 1. DS SE2/22 / SE2/103

Vorlesung “Nukleon-Nukleon-Reaktionen”

Hörerkreis:	Studierende ab dem 3. Studienjahr
Voraussetzungen:	Vordiplom, Kernphysik und/oder Teilchenphysik, Quantenmechanik I
Stellung im Studienplan:	Fakultative Vorlesung, Kern- und Teilchenphysik
Zeit:	Dienstags, 3. Doppelstunde (11:10 -12:40), Raum MER/03
Webseite der Vorlesung:	http://www.fzd.de/db/Cms?pOid=26617
Vortragender:	<p>Daniel Bemmerer, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf Tel. 0351 / 260 3581, e-mail d.bemmerer@fzd.de</p> <p>1999 Dipl.-Phys. (TU Berlin) 2004 Dr. rer. nat. (TU Berlin) 2004-2006 INFN Padua/Italien 2006- Dresden Kernphysikalische Experimente für die Astrophysik in Dresden, Italien (Gran Sasso), Darmstadt (GSI)</p>

Literaturvorschläge

- T. Mayer-Kuckuck:
Kernphysik. Teubner Studienbuch. 7. Aufl. 2002
- B. Povh, Rith, Scholz, Zetsche:
Teilchen und Kerne. Springer. 7. Aufl. 2006
- G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger:
Kern- und Elementarteilchenphysik. Harri Deutsch, 2. Aufl. 1995
- Web-Ressourcen (bei den einzelnen Themen angegeben)



Webseite der Vorlesung:

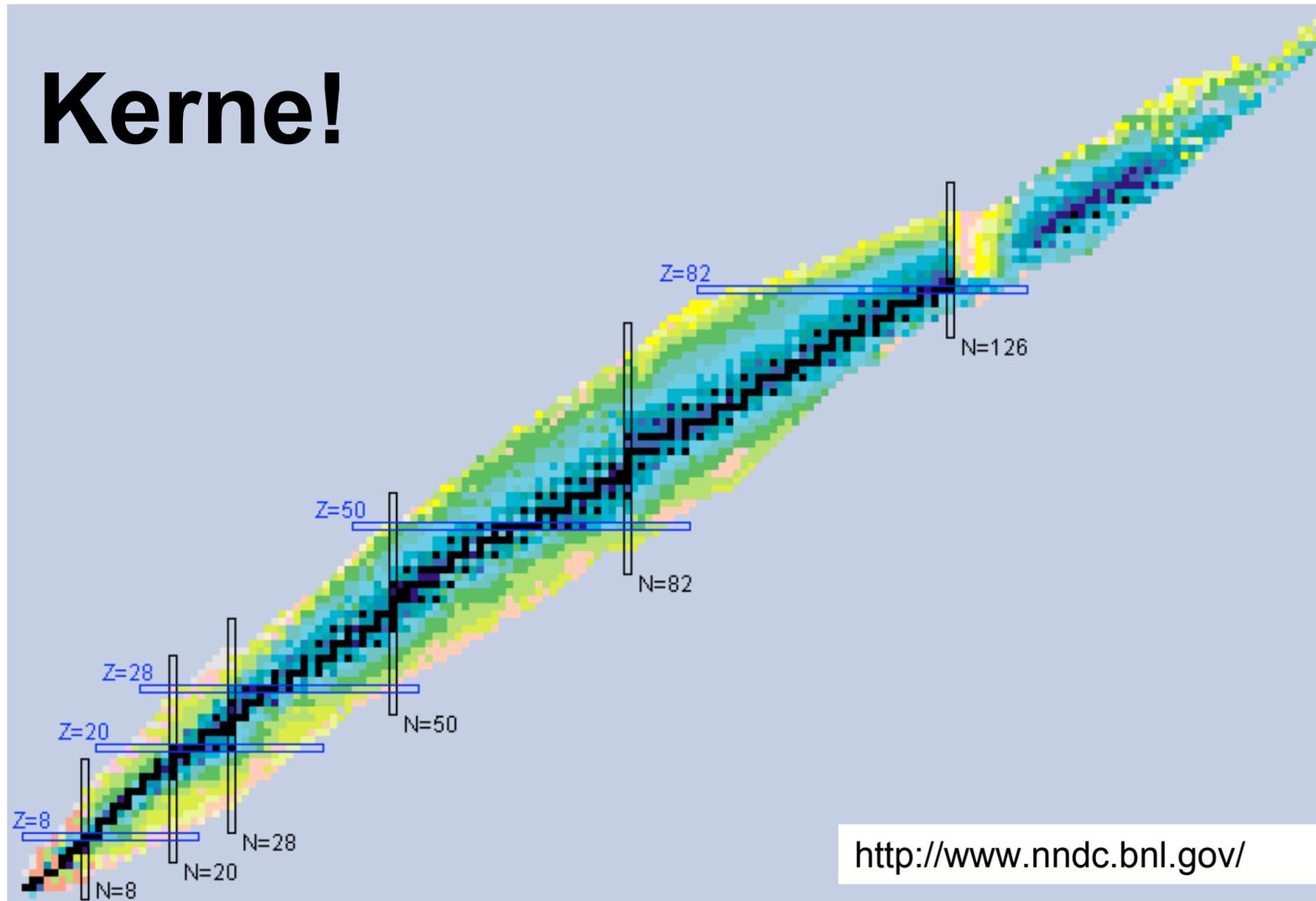
<http://www.fzd.de/db/Cms?pOid=26617>

Vier fundamentale Wechselwirkungen

<p>Starke Kernwechselwirkung</p> <p>Pionen, <i>Gluonen</i></p> <p>Reichweite \leq Kernradius</p>	<p>Schwache Kernwechselwirkung</p> <p>W^{\pm} - Boson, Z^0 - Boson</p> <p>Reichweite \leq Kernradius</p>
<p>Elektromagnetische Wechselwirkung</p> <p>Photonen</p> <p>Reichweite ∞</p>	<p>Gravitation</p> <p><i>Gravitonen</i></p> <p>Reichweite ∞</p>

Konsequenzen der starken Kernwechselwirkung (1)

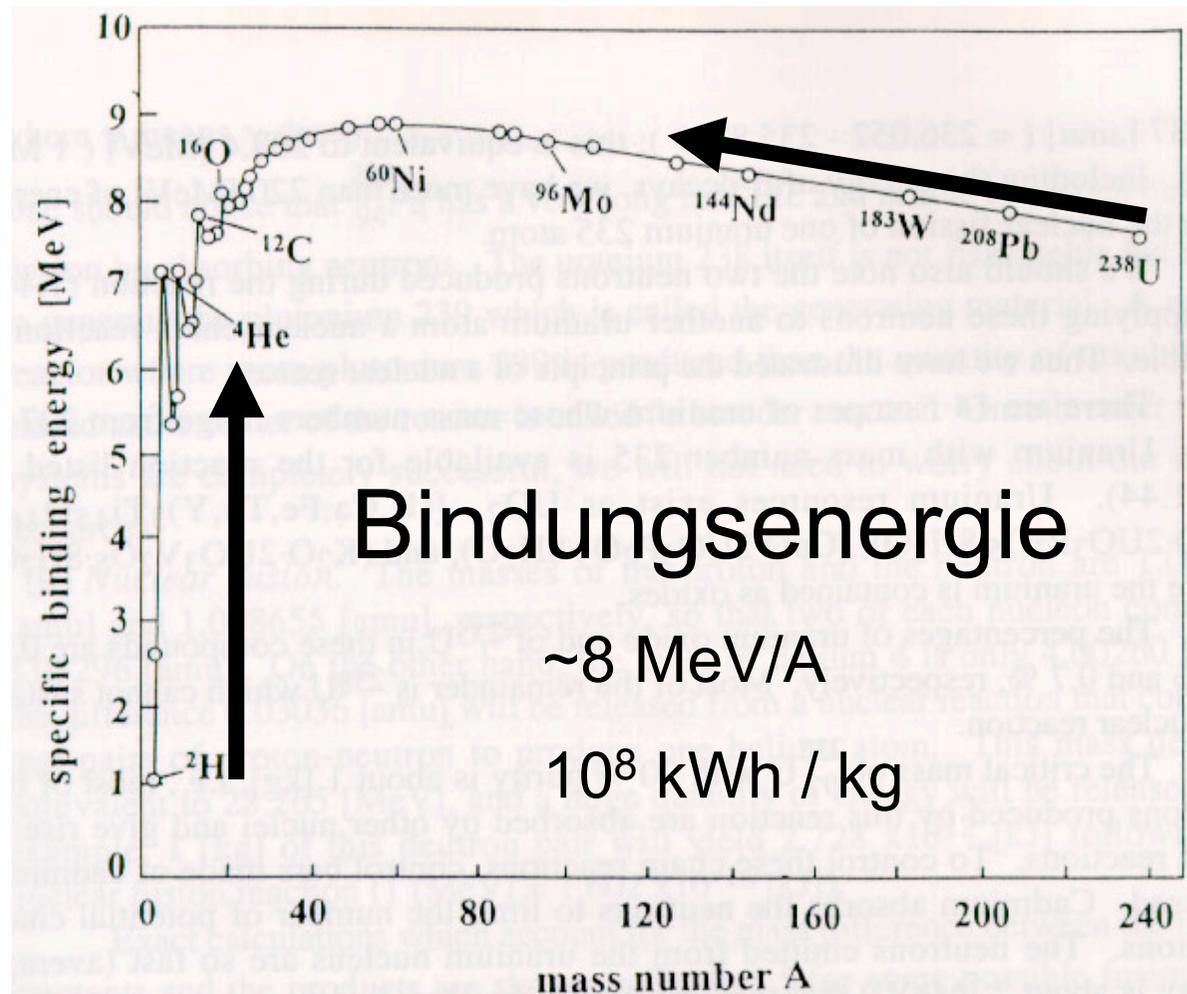
Kerne!



Sogenannte
Nuklidkarte:
Protonenzahl
über
Neutronenzahl

Linien:
sogenannte
Magische
Zahlen
(Kernschalen-
abschlüsse)

Konsequenzen der starken Kernwechselwirkung (2)



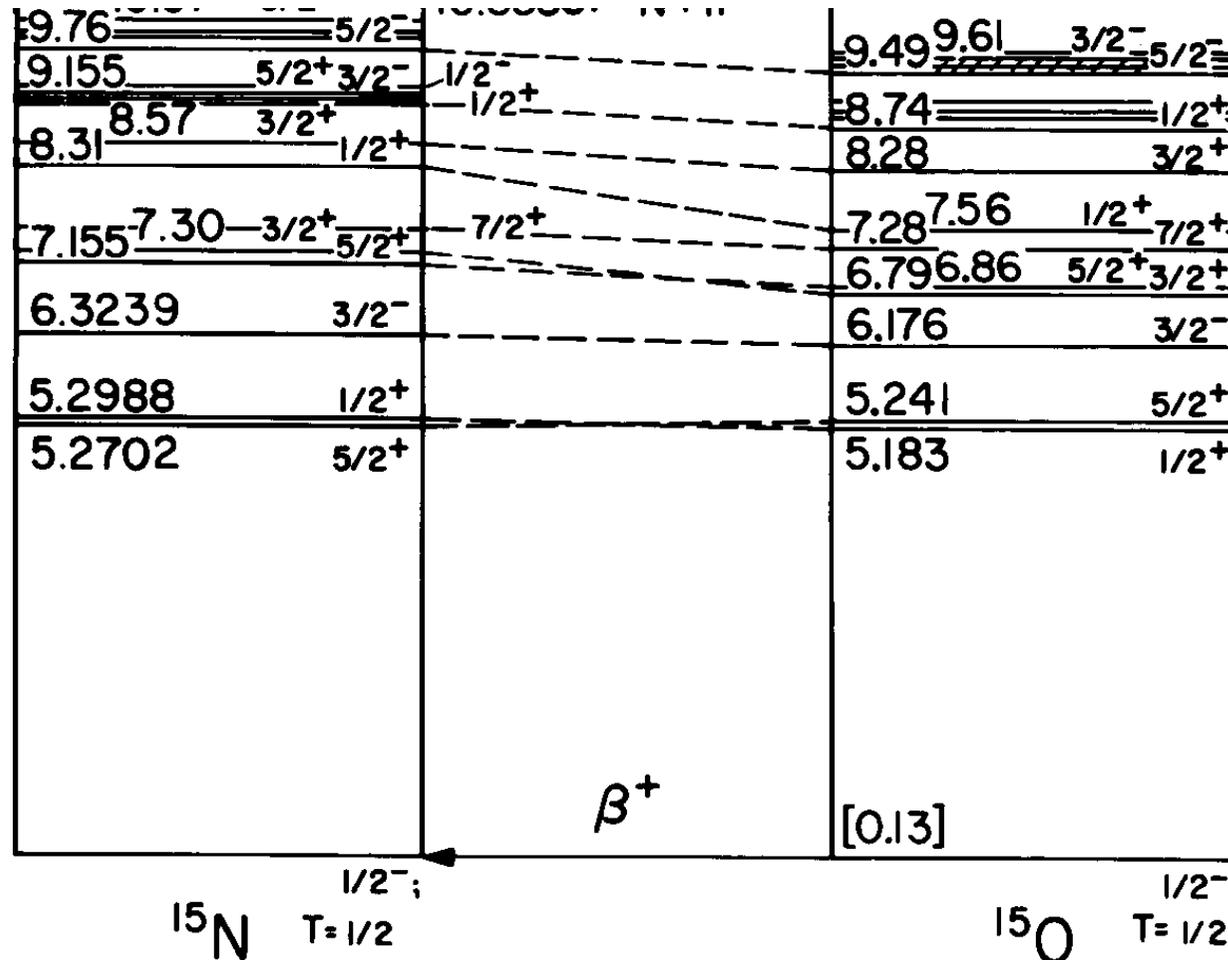
Kernspaltung

Kernfusion

Fig. 1.3. Specific binding energy vs mass number for the natural elements.

Ladungsunabhängigkeit der starken Kernwechselwirkung

Stickstoff-15
7 Protonen
8 Neutronen
Ladung 7



Sauerstoff-15
8 Protonen
7 Neutronen
Ladung 8

Energieniveaux im Kern, Kernmasse 15

<http://www.tunl.duke.edu/nucldata>

Einführung des Isospins T: Zwei Zustände eines Teilchens

Neutron und Proton \equiv zwei Eigenzustände eines Teilchens, des Nukleons.

Isospin-Duplett:

- Neutron: $T = 1/2, T_3 = -1/2$
- Proton: $T = 1/2, T_3 = +1/2$
- Isospinoperatoren τ^+, τ^- analog zu Elektronenspinoperatoren σ^+, σ^-

Isospin-Triplett: Pionen, $T = 1$

- $\pi^- : T_3 = -1$
- $\pi^0 : T_3 = 0$
- $\pi^+ : T_3 = +1$

Bei Kernen $T_3 = 1/2 (Z-N)$

Eigenschaften der Nukleonen (Proton und Neutron)

- Masse:
Massenspektrometrie

- Lebensdauer τ und
Halbwertszeit $t_{1/2}$

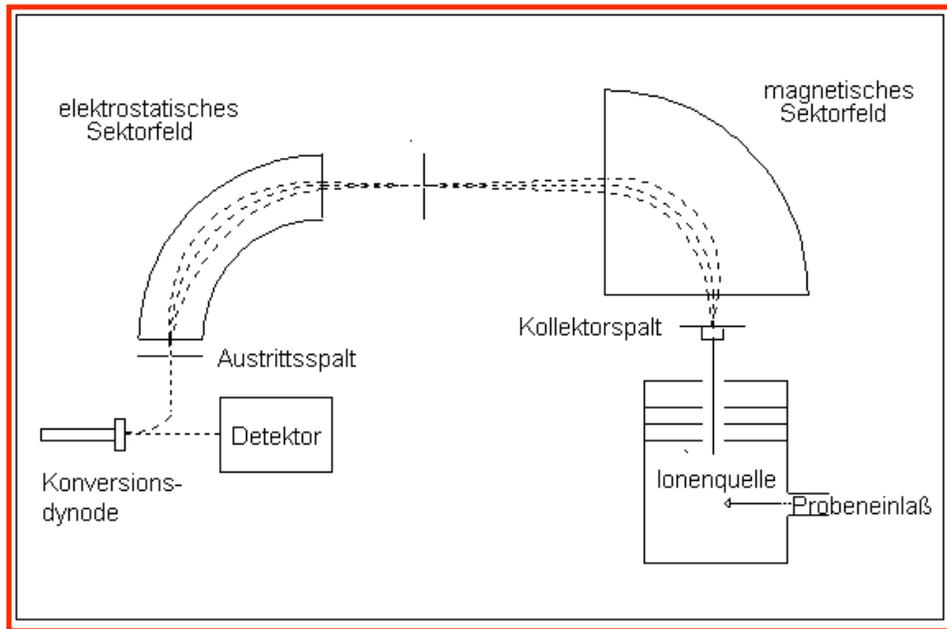
$$t_{1/2} = \tau \ln 2$$

Heisenberg: $\Delta E = \frac{\hbar}{\tau}$

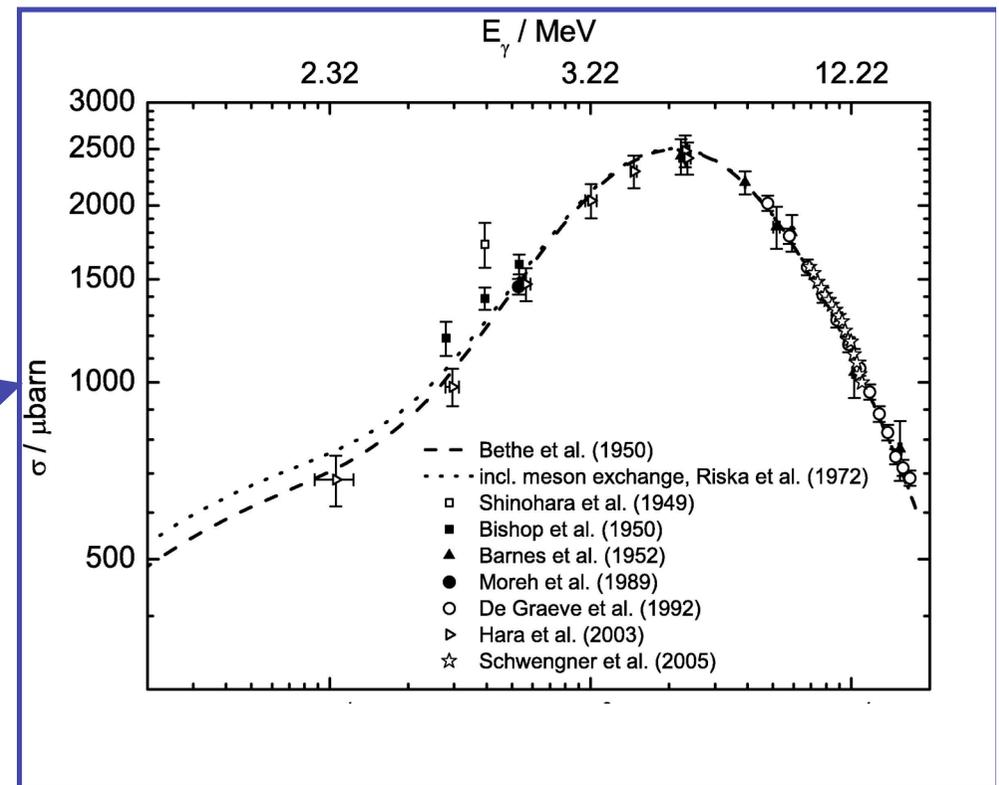
- Spin: Streuexperimente

	p	n
Masse	938.3 MeV/c ²	939.6 MeV/c ²
Ladung	+1	0
Spin	1/2	1/2
Isospin	1/2	1/2
Halbwertszeit	>10 ²⁹ a	614 s (frei) >10 ²⁹ a (im Kern)

Masse des Protons: Massenspektrometrie von $^1\text{H}^+$



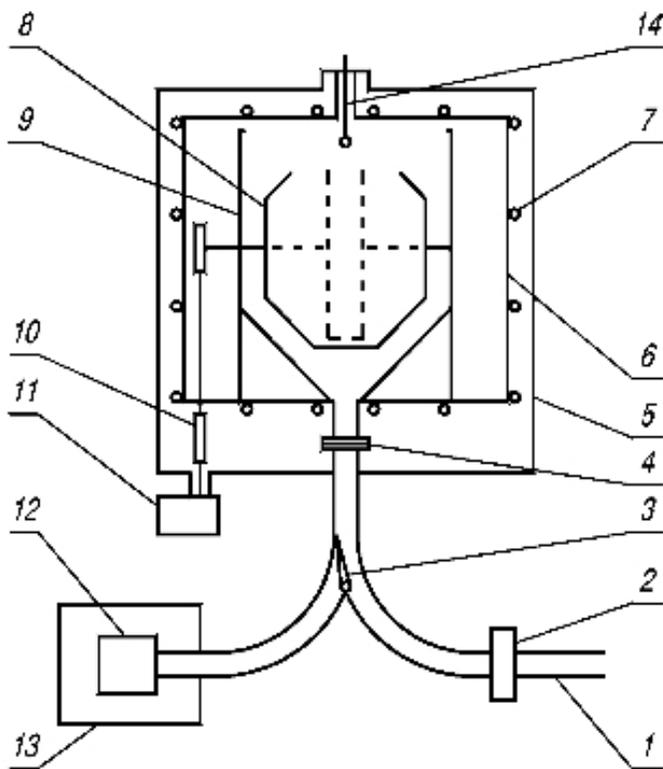
Masse des Neutrons: Photo- dissoziation des Deuterons ^2H $E_\gamma^{\text{min}} = 2.22 \text{ MeV}$



$$m_n = m_d + 2.22 \text{ MeV} - m_p$$

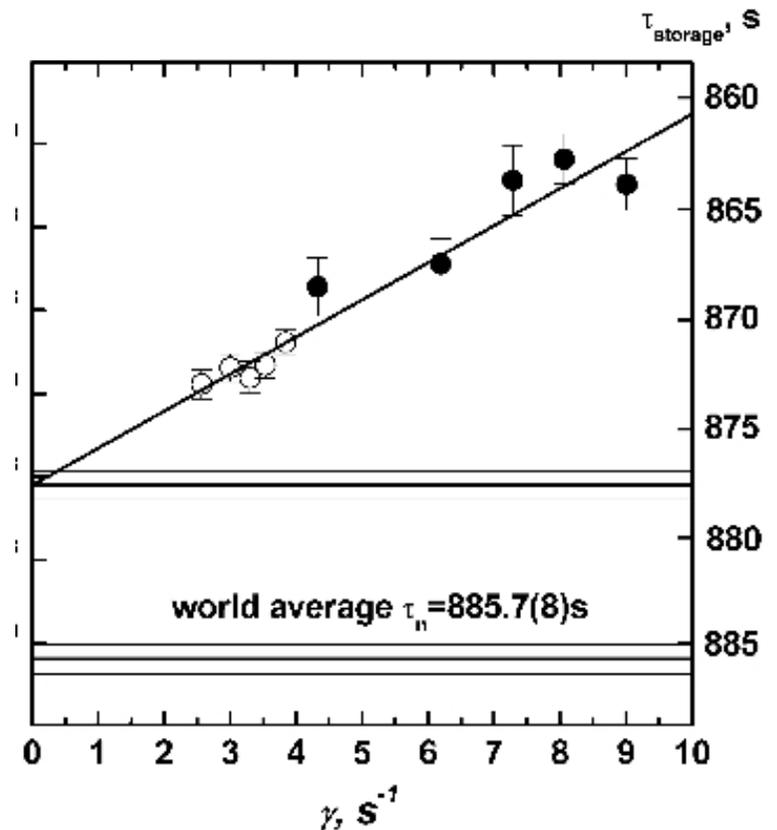
Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

$$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2 > 938.3 \text{ MeV}/c^2 + 0.5 \text{ MeV}/c^2 = m_p + m_e$$



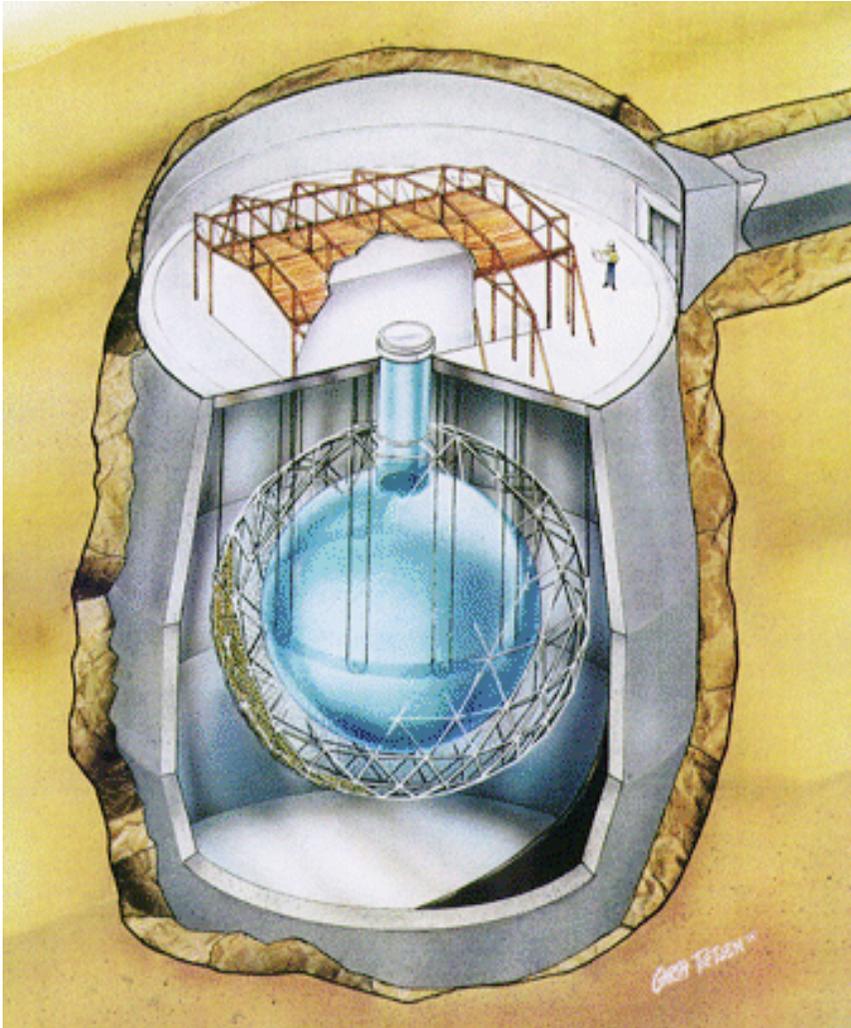
$$t_{1/2} = \tau_n \ln 2$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{storage}}} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{\text{loss}}}$$



A. Serebrov et al., Physics Letters B (2005), <http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0408009>

Lebensdauer von gebundenem Neutron und Proton: Experiment



SNO-Detektor, Sudbury/Kanada, 2000 m unter Tage

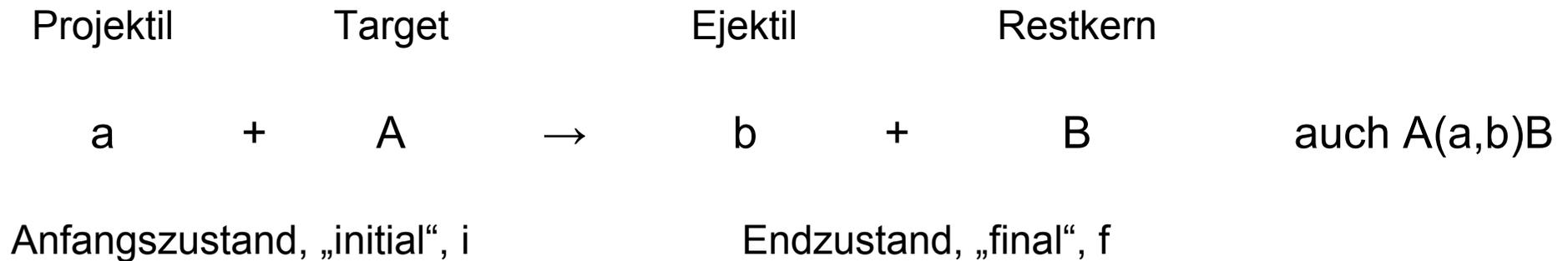
1000 t D₂O (schweres Wasser)

Gesucht wird nach γ -Strahlen aus dem Zerfall angeregter Zustände von ¹⁵N und ¹⁵O (entstanden aus dem Zerfall eines Neutrons oder Protons in ¹⁶O)

$\tau > 10^{29}$ a

<http://www.sno.phy.queensu.ca/>

Streuexperimente: Zweikörper-Kernreaktionen



a, A, b, B: Kurzform für beteiligte Kerne, z.B. ^{208}Pb
 Abkürzung für leichte Teilchen **p, d, t, α**

Es gelten Energie- und Impulserhaltung.

K.-T. Brinkmann

Zweikörper-Kinematik, nicht relativistisch



Teilchen a trifft Teilchen A und reagiert; es werden die Teilchen b und B erzeugt

Erhaltungssätze:

- Energieerhaltung

$$E_{IN} = E_{OUT}$$

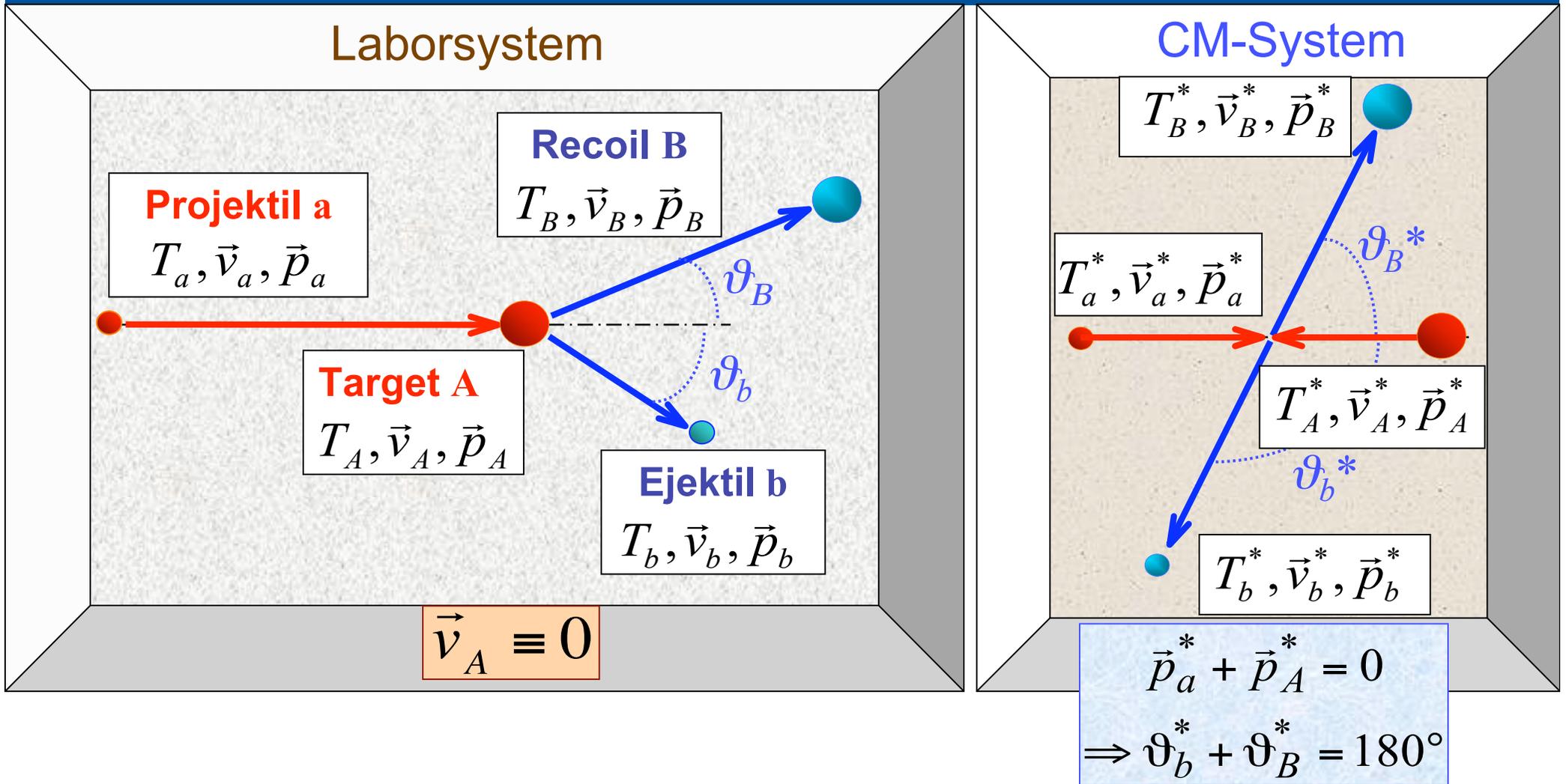
$$\begin{aligned} \Rightarrow T_a + T_A + (m_a + m_A)c^2 &= T_b + T_B + (m_b + m_B)c^2 \\ \Rightarrow T_a + T_A + (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2 &= T_b + T_B \\ &\stackrel{def}{=} T_a + T_A + Q \end{aligned}$$

$$\text{also: } Q = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2$$

- Impulserhaltung

$$\vec{p}_{IN} = \vec{p}_{OUT}$$

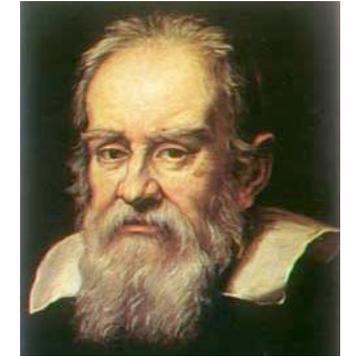
$$\Rightarrow \vec{p}_a + \vec{p}_A = \vec{p}_b + \vec{p}_B$$



Galilei-Transformation
 Bestimmung der Geschwindigkeit des
 Schwerpunktes (Center of Mass)
 im Laborsystem

K.-T. Brinkmann

Galilei-Transformation



$$\vec{r}_S = \frac{m_A \vec{r}_A}{m_a + m_A} + \frac{m_a \vec{r}_a}{m_a + m_A}, \text{ zeitliche Ableitung}$$

$$\Rightarrow \dot{\vec{r}}_S = \frac{m_A \vec{v}_A}{m_a + m_A} + \frac{m_a \vec{v}_a}{m_a + m_A} = \vec{v}_S = \frac{\vec{p}_a + \vec{p}_A}{m_a + m_A}$$

Schwerpunktsgeschwindigkeit

$$\vec{v}_S = \frac{\vec{p}_a + \vec{p}_A}{m_a + m_A} \xrightarrow{\text{ruhendes Target}} \vec{v}_S = \frac{m_a \vec{v}_a}{m_a + m_A} = \frac{\mu}{m_A} \vec{v}_a$$

mit der reduzierten Masse $\mu = \frac{m_a m_A}{m_a + m_A}$

Energie des Schwerpunkts

$$T_s = \frac{1}{2}(m_a + m_A)v_s^2 = \frac{m_a}{m_a + m_A}T_a = \frac{\mu}{m_A}T_a$$

Die Energie des Schwerpunkts steht für die Reaktion nicht zur Verfügung.

LS und **CMS** unterscheiden sich nur durch eine konstante Geschwindigkeit \vec{v}_s (**Inertialsysteme**).

Im Schwerpunktsystem verfügbare Energie

$$T_a^* + T_A^* = \frac{1}{2}m_a v_a^{*2} + \frac{1}{2}m_A v_A^{*2} = \frac{m_A}{m_a + m_A}T_a = \frac{1}{2}\mu v_{rel}^2$$

$$\text{da } \vec{v}_a^* = \vec{v}_a - \vec{v}_s = \frac{m_A}{m_a + m_A}\vec{v}_a \quad ; \quad \vec{v}_A^* = -\vec{v}_s = \frac{-m_a}{m_a + m_A}\vec{v}_a$$

Schwellen-Energie T_a^{MIN} und Q-Wert Q

$$\begin{aligned}
 \vec{p}_a^* + \vec{p}_A^* &= \vec{p}_b^* + \vec{p}_B^* = 0 & (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2 + T_a^* + T_A^* &= T_b^* + T_B^* \\
 \Rightarrow \vec{p}_b^{*2} &= \vec{p}_B^{*2} & \Rightarrow T_a^* + T_A^* + Q &= T_b^* + T_B^* \\
 \Rightarrow m_b T_b^* &= m_B T_B^* & &= T_b^* + (m_b/m_B)T_b^*
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{T_b^*}{T_a^*} = \frac{m_A}{m_a + m_A} \frac{m_B}{m_b + m_B} \left(1 + \frac{m_a + m_A}{m_A} \frac{Q}{T_a^*} \right) \geq 0$$

$$\Rightarrow \left(1 + \frac{m_a + m_A}{m_A} \frac{Q}{T_a^*} \right) \geq 0 \Rightarrow T_a^{\text{MIN}} = -\frac{m_a + m_A}{m_A} Q$$

$Q > 0$: Exotherm $Q = 0$: Elastisch $Q < 0$: Endotherm

1. Vorlesung

- Starke Wechselwirkung
- Ladungsunabhängigkeit, Einführung des Isospins
- Eigenschaften der Nukleonen: Masse und Lebensdauer
- Kinematik nichtrelativistisch

2. Vorlesung, nächste Woche:

- Kinematik relativistisch
- Das Deuteron