

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

12. Vorlesung, TU Dresden 01.07.2008

Dr. Daniel Bemmerer



**Forschungszentrum
Dresden** Rossendorf

1. Vorlesung, 08.04.2008

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

2. Vorlesung, 15.04.2008

- Kinematik relativistisch
- Das Deuteron

3. Vorlesung, 22.04.2008 (Prof. Grosse)

- Das Deuteron im elektromagnetischen Feld
- Reziprozitätssatz (*detailed balance theorem*)
- Synthese und Photodissoziation des Deuterons
- Astrophysikalisches: Bedeutung des Deuterons im Urknall

4. Vorlesung, 29.04.2008

- Rutherford-Streuung (klassisch)
- Optisches Modell, elastische Streuung

5. Vorlesung, 06.05.2008

- Rutherford-Streuung (quantenmechanisch)
- Resonanzen (Einführung)

6. Vorlesung, 20.05.2008

- Breit-Wigner-Formel

7. Vorlesung, 27.05.2008

- Exkurs: Abbremsung schneller Teilchen in Materie
- Messung von Resonanzparametern: Gamma- und Teilchenbreite

8. Vorlesung, 03.06.2008

- Drehimpulse und Winkelkorrelationen

9. Vorlesung, 10.06.2008 (Prof. Grosse)

- Dipol-Riesenresonanz

10. Vorlesung, 17.06.2008

- Direkte Reaktionen I: Phänomenologie, quantitative Beschreibung

11. Vorlesung, 24.06.2008

- Aus aktuellem Anlass: Halbwertszeiten von in Metallen eingebetteten Radionukliden

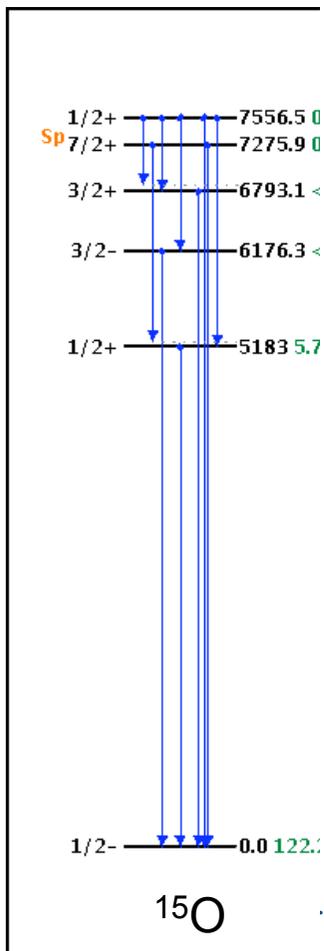
12. Vorlesung, heute

- Direkte Reaktionen II

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

Resonanter und direkter Reaktionsmechanismus

Resonant



Energieabhängigkeit von scharfen Spitzen ("Resonanzen") geprägt = Level im Compoundkern

Langsam ($\sim 10^{-15}$ s; Ausnahme Riesenresonanz)

Gesamter Targetkern beteiligt

Winkelverteilung bei Spin=0 - Teilchen isotrop

Parametrisierung durch Resonanzen (z.B. R-Matrix)

Direkt

Energieabhängigkeit kontinuierlich

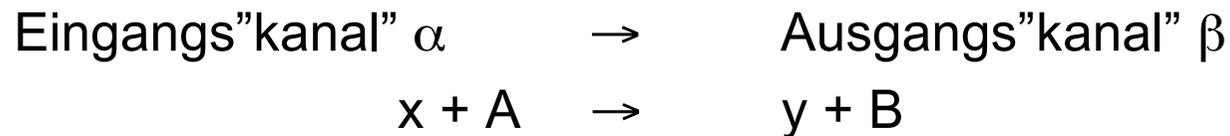
Schnell ($\sim 10^{-22}$ s)

Nur einzelne Nukleonen beteiligt

Winkelverteilung regelmäßig anisotrop

Beschreibung des Energieverlaufs durch DWBA = distorted wave Born approximation

Allgemeine Beschreibung einer Zweikörper-Reaktion



Literatur:
 Fröbrich/Lipperheide,
 Theory of Nuclear
 Reactions. Oxford 1996

$$k_a = \frac{m_A k_x - m_x k_A}{m_A + m_x} \quad \text{relativer Impuls}$$

$$\mu_a = \frac{m_x m_A}{m_A + m_x} \quad \text{reduzierte Masse}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\hbar^2 k_a^2}{2\mu_a} \quad \text{Energie}$$

$$|a\rangle = |a_x, l_x M_x; a_A, l_A M_A; k_A \rangle$$

Kanal-Zustand, mit inneren Zuständen $|a_x\rangle$ und $|a_A\rangle$ der Reaktionspartner

Freier Hamiltonian für einen Reaktionskanal a

$$H_\alpha = \underbrace{-\frac{\hbar^2}{2\mu_\alpha} \nabla_\alpha^2}_{T_\alpha} + \underbrace{h_x + h_A}_{h_\alpha}$$

$$\epsilon_a = \epsilon_x + \epsilon_A \quad \text{innere Energie des Kanals a}$$

$$(H_\alpha - E_a) |a\rangle = 0$$

Freie zeitabhängige Schrödingergleichung:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Phi_a(t)\rangle = H_\alpha |\Phi_a(t)\rangle$$

Bis hierher immer ohne Wechselwirkung zwischen x und A.

Verzerrter Kanalzustand (distorted wave) im Eingangskanal

Wechselwirkung von x und A durch ein Verzerrungspotenzial $U_\alpha(r_\alpha)$:

$$H_\alpha^U = H_\alpha + U_\alpha = T_\alpha + h_\alpha + U_\alpha \quad \text{Hamiltonian, um } U_\alpha \text{ erweitert}$$

Nun der Schritt zum gesamten Hamiltonian:

$$H = T_\alpha + h_\alpha + V_\alpha = H_\alpha + V_\alpha = H_\beta + V_\beta$$

Gesucht ist nun eine Lösung der zeitabhängigen Vielkörper-Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi_a(t)\rangle = H |\psi_a(t)\rangle$$

Der Møller-Operator $\Omega_\alpha^{(+)}$

$$\Omega_\alpha^{(+)} = \frac{\eta}{\hbar} \int_{-\infty}^0 d\tau \exp\left(\frac{\eta}{\hbar} \tau\right) \exp\left(\frac{i}{\hbar} H \tau\right) \exp\left(-\frac{i}{\hbar} H_\alpha \tau\right)$$

Der volle, wechselwirkende stationäre Reaktionszustand ist dann

$$|a^+\rangle = \Omega_\alpha^{(+)} |a\rangle$$

Lösung der stationären Schrödingergleichung

$$(H - E_a) |a^+\rangle = 0$$

Verzerrter Kanalzustand (distorted wave) im Ausgangskanal β

$$\begin{aligned}
 H_{\beta}^U &= H_{\beta} + U_{\beta} &= T_{\beta} + h_{\beta} + U_{\beta} \\
 H &= T_{\beta} + h_{\beta} + U_{\beta} + V_{\beta} - U_{\beta} &= H_{\beta}^U + W_{\beta}
 \end{aligned}$$

W_{β} = Restwechselwirkung

Stationäre Eigenzustände von H_{β}^U :

$$H_{\beta}^U |b^{U+}\rangle = E_b |b^{U+}\rangle$$

Voller, zeitumgekehrter Zustand lässt sich dann ausdrücken als

$$|b^{-}\rangle = |b^{U-}\rangle + \frac{1}{E_b - H - i\eta} W_{\beta}^{adj} |b^{U-}\rangle$$

Zwei-Potenzial-Formel von Gell-Mann und Goldberger

$$T_{ba} = \langle b^{U-} | U_{\beta} | a \rangle \delta_{ba} + \langle b^{U-} | W_{\beta} | a^+ \rangle$$

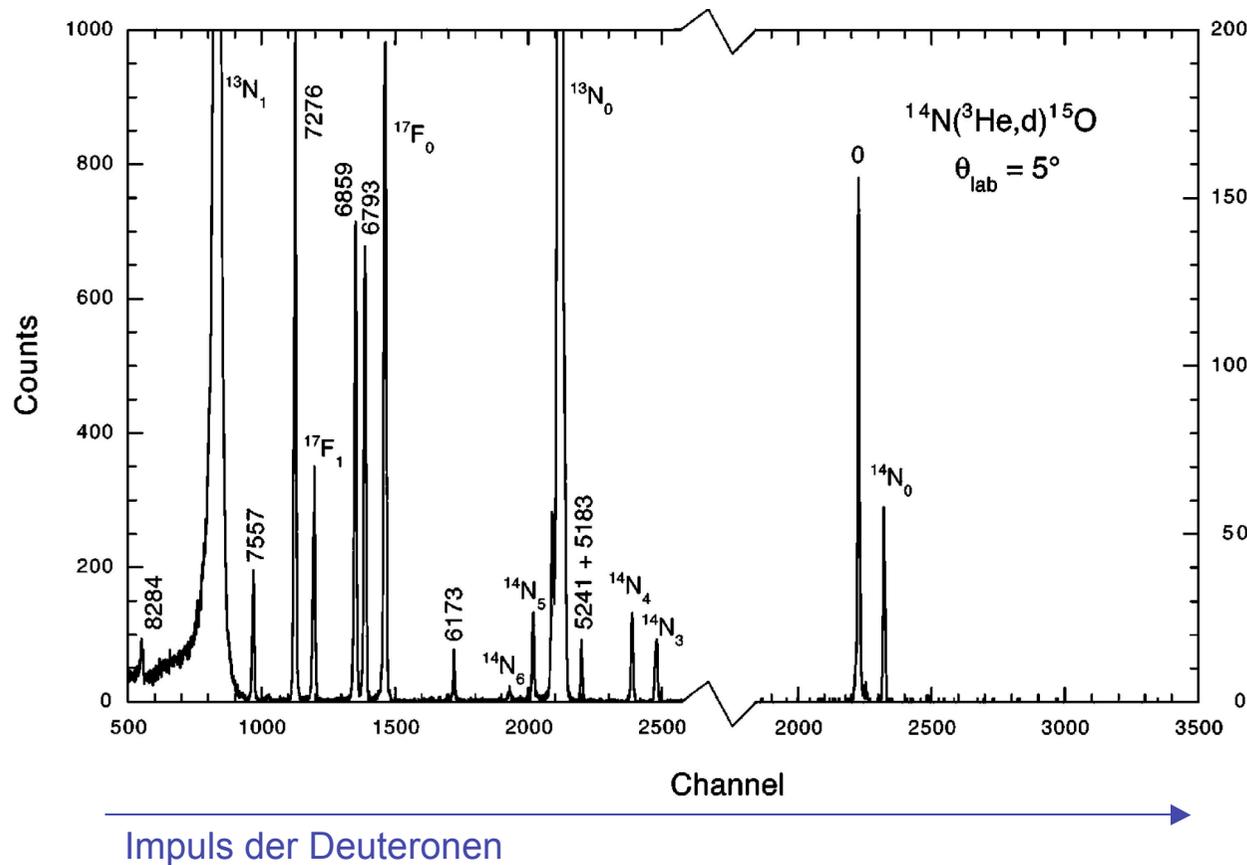
U_{β} : Verzerrendes Potenzial

W_{β} : Restwechselwirkung

Nähere nun $| a^+ \rangle$ durch $| a^{U+} \rangle$, Eingangskanal und Ausgangskanal verschieden:

$$T_{ba}^{DWBA} = \langle b^{U-} | W_{\beta} | a^{U+} \rangle$$

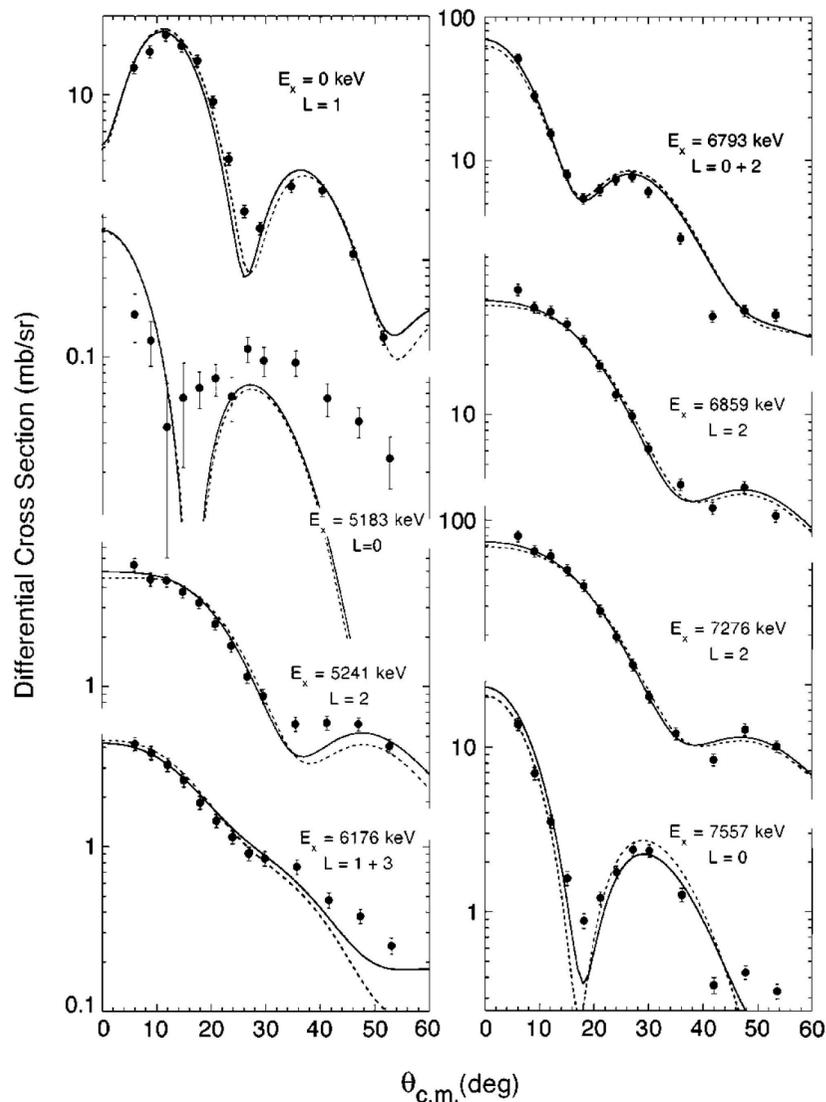
Energiespektrum einer direkten Reaktion (bei einem Winkel): Stripping (${}^3\text{He},d$)



- Einfang mit direktem Mechanismus in diverse angeregte Zustände des Compoundkerns ${}^{15}\text{O}$
- Erstellen des Energieniveauschemas

Bertone et al., Phys. Rev. C 66, 055804 (2002)

Winkelverteilung einer direkten Reaktion, Stripping $^{14}\text{N}(^3\text{He},d)^{15}\text{O}$



- Winkelverteilung zeigt ein starkes Maximum bei 0° (Vorwärtsrichtung)
- Spin- und Paritätsmessung (mittels Winkelkorrelationen, 8. VL)
- Vergleich mit DWBA-Rechnungen mit verschiedenen Potenzialformen
- Beschreibung des Einfangs in verschiedene Endzustände desselben Kerns

Bertone et al., Phys. Rev. C 66, 055804 (2002)

1. Vorlesung, 08.04.2008

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

2. Vorlesung, 15.04.2008

- Kinematik relativistisch
- Das Deuteron

3. Vorlesung, 22.04.2008 (Prof. Grosse)

- Das Deuteron im elektromagnetischen Feld
- Reziprozitätssatz (*detailed balance theorem*)
- Synthese und Photodissoziation des Deuterons
- Astrophysikalisches: Bedeutung des Deuterons im Urknall

4. Vorlesung, 29.04.2008

- Rutherford-Streuung (klassisch)
- Optisches Modell, elastische Streuung

5. Vorlesung, 06.05.2008

- Rutherford-Streuung (quantenmechanisch)
- Resonanzen (Einführung)

6. Vorlesung, 20.05.2008

- Breit-Wigner-Formel

7. Vorlesung, 27.05.2008

- Exkurs: Abbremsung schneller Teilchen in Materie
- Messung von Resonanzparametern: Gamma- und Teilchenbreite

8. Vorlesung, 03.06.2008

- Drehimpulse und Winkelkorrelationen

9. Vorlesung, 10.06.2008 (Prof. Grosse)

- Dipol-Riesenresonanz

10. Vorlesung, 17.06.2008

- Direkte Reaktionen I: Phänomenologie, quantitative Beschreibung

11. Vorlesung, 24.06.2008

- Aus aktuellem Anlass: Halbwertszeiten von in Metallen eingebetteten Radionukliden

12. Vorlesung, heute

- Direkte Reaktionen II

13. Vorlesung, nächste Woche

- Nukleon-Nukleon-Potenzial

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