

# Reaktionstheorie für exotische Kerne

Stefan Typel  
GANIL Caen

Jahrestagung des Komitees für Hadronen- und Kernphysik

# Übersicht

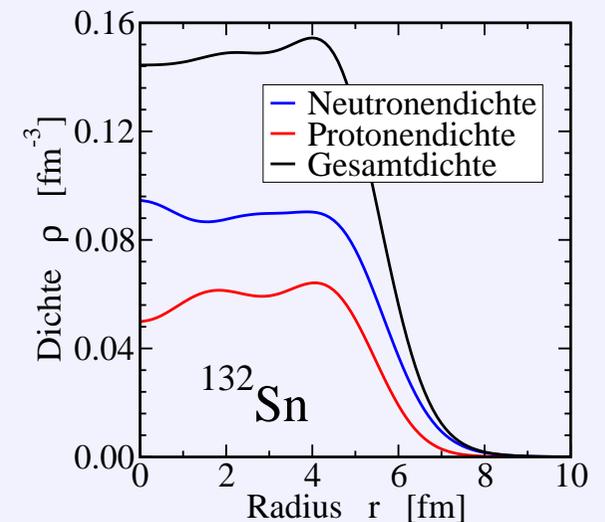
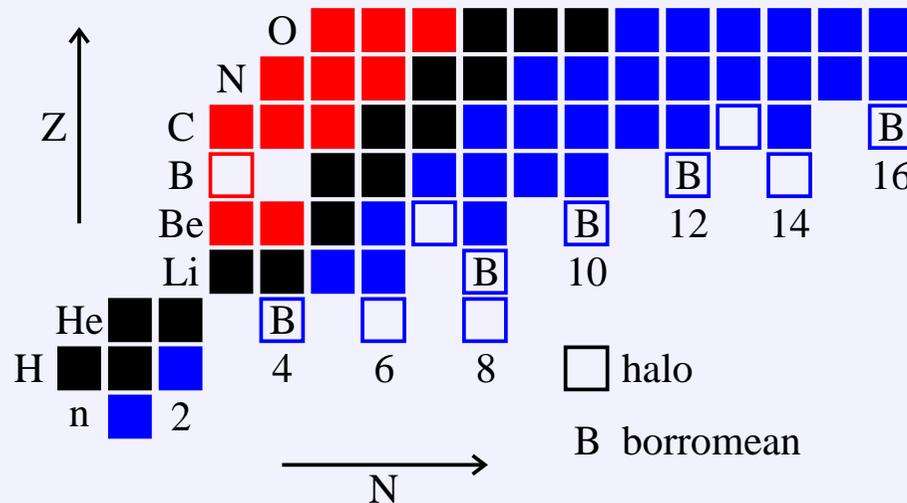
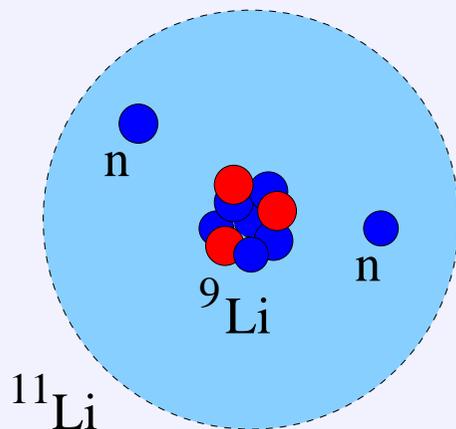
- **Was ist so besonders an exotischen Kernen?**  
Eigenschaften der Systeme
- **Was wollen wir wissen?**  
Ziele experimenteller Untersuchungen
- **Welche Anforderungen werden an die Theorie gestellt?**  
spezielle Bedingungen der Experimente,  
verschiedene Reaktionsmechanismen
- **Welche Herausforderungen gibt es?**  
Probleme, Methoden und Beispiele
- **Wie können wir zusammenarbeiten?**  
Kommunikation mit Strukturtheorie und Experiment

Ein weites Feld . . . Vollständigkeit weder angestrebt noch möglich

# Eigenschaften exotischer Kerne I

- schwach gebundene Systeme

- ausgedehnte Dichteverteilungen, **Skin/Halo-Effekte**
- Bedeutung von **Korrelationen** für Stabilität (z.B. Borromäische Kerne)
- besondere **Freiheitsgrade** (z.B. Core+Valenznukleonen, Clusterstrukturen, kollektive Anregungen, “Pygmy”-Resonanzen)
- starke Kopplung an Kontinuumszustände, **offene Quantensysteme**



# Eigenschaften exotischer Kerne II

- **stark Neutron/Proton-asymmetrische Systeme**

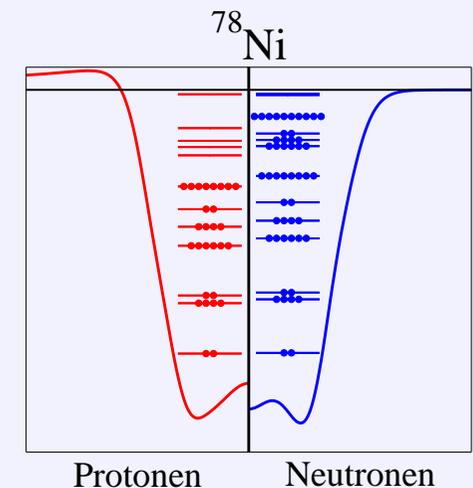
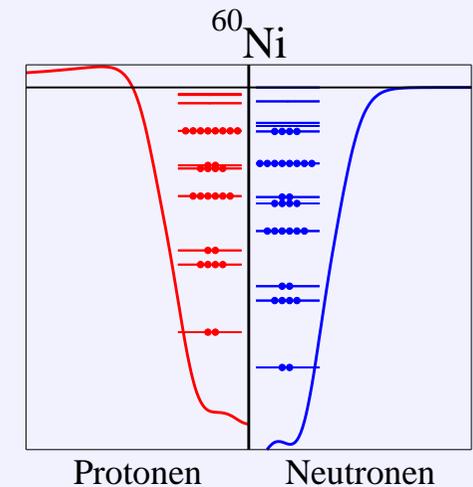
- **Isospinabhängigkeit** der nuklearen Wechselwirkung (z.B. Spin-Bahn-Wechselwirkung, Tensor-Wechselwirkung)
- Änderung der **Schalenstruktur** (neue magische Zahlen, “Islands of Inversion”)

- **instabile, kurzlebige Systeme**

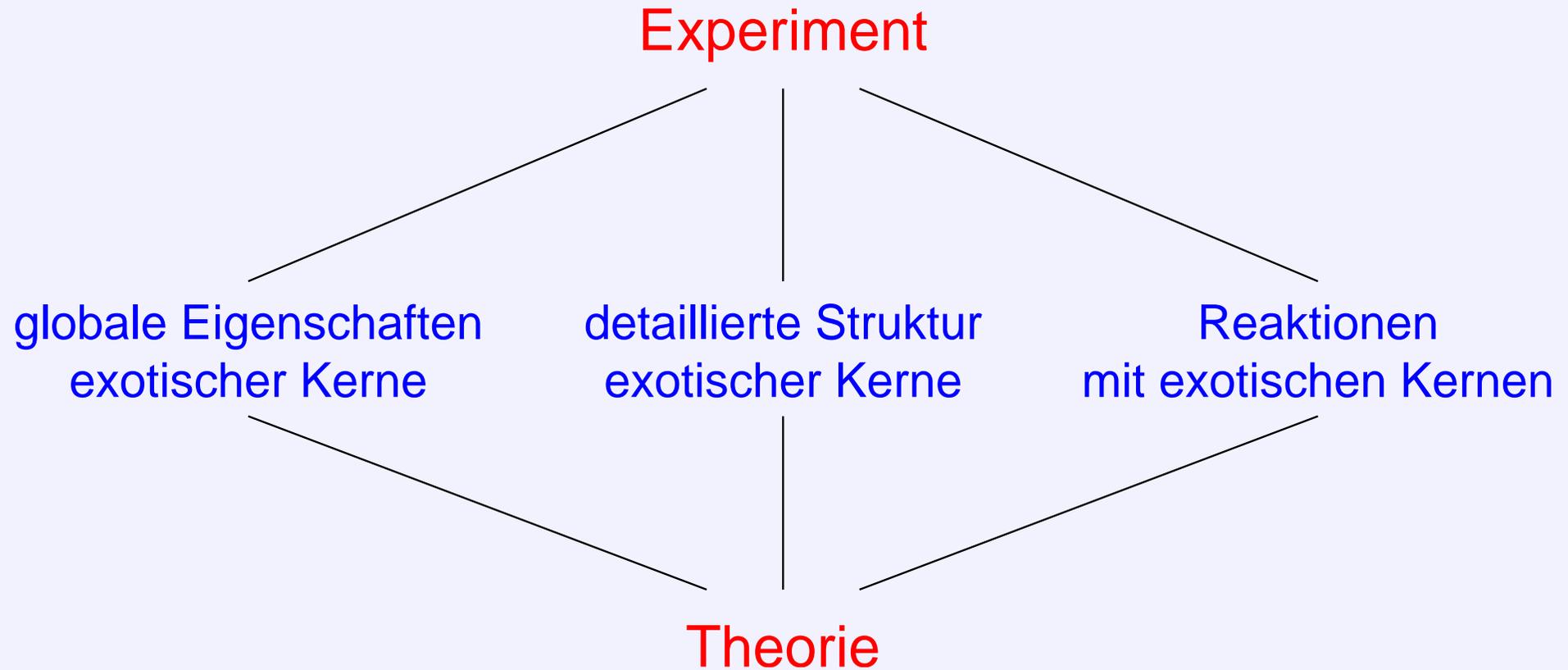
- keine Targets, geringe Anzahl, nur als **Ionenstrahl** verfügbar
- meist **hohen Energien** (einige 10 oder 100 MeV/Nukleon)

⇒ Auswahl geeigneter Reaktionen

⇒ spezielle Anforderungen an Struktur- und Reaktionstheorie



# Ziele der Untersuchungen



# Interessierende Größen und Methoden

- **globale Eigenschaften**

- Masse/Bindungsenergie  $\Rightarrow$  Massenspektroskopie
- Dichteverteilungen  $\Rightarrow$  elastische Elektronstreuung, inelastische Kernstreuung

keine oder  
einfache  
Reaktionstheorie

# Interessierende Größen und Methoden

- **globale Eigenschaften**

- Masse/Bindungsenergie  $\Rightarrow$  Massenspektroskopie
- Dichteverteilungen  $\Rightarrow$  elastische Elektronstreuung, inelastische Kernstreuung

keine oder  
einfache  
Reaktionstheorie

- **detaillierte Struktur von Grund- und angeregten Zuständen/Resonanzen**

- Energien, Quantenzahlen (Spin, Parität), Übergangsraten
- Korrelationen, Einteilchen- und Clusterstrukturen
- $\Rightarrow$  elektromagnetische/nukleare **Anregung**
- $\Rightarrow$  **Aufbruch**reaktionen (bei hohen Energien)
- $\Rightarrow$  **Transfer**reaktionen (bei niedrigen Energien)

# Interessierende Größen und Methoden

- **globale Eigenschaften**

- Masse/Bindungsenergie  $\Rightarrow$  Massenspektroskopie
- Dichteverteilungen  $\Rightarrow$  elastische Elektronstreuung, inelastische Kernstreuung

keine oder  
einfache  
Reaktionstheorie

- **detaillierte Struktur von Grund- und angeregten Zuständen/Resonanzen**

- Energien, Quantenzahlen (Spin, Parität), Übergangsraten
- Korrelationen, Einteilchen- und Clusterstrukturen
- $\Rightarrow$  elektromagnetische/nukleare **Anregung**
- $\Rightarrow$  **Aufbruch**reaktionen (bei hohen Energien)
- $\Rightarrow$  **Transfer**reaktionen (bei niedrigen Energien)

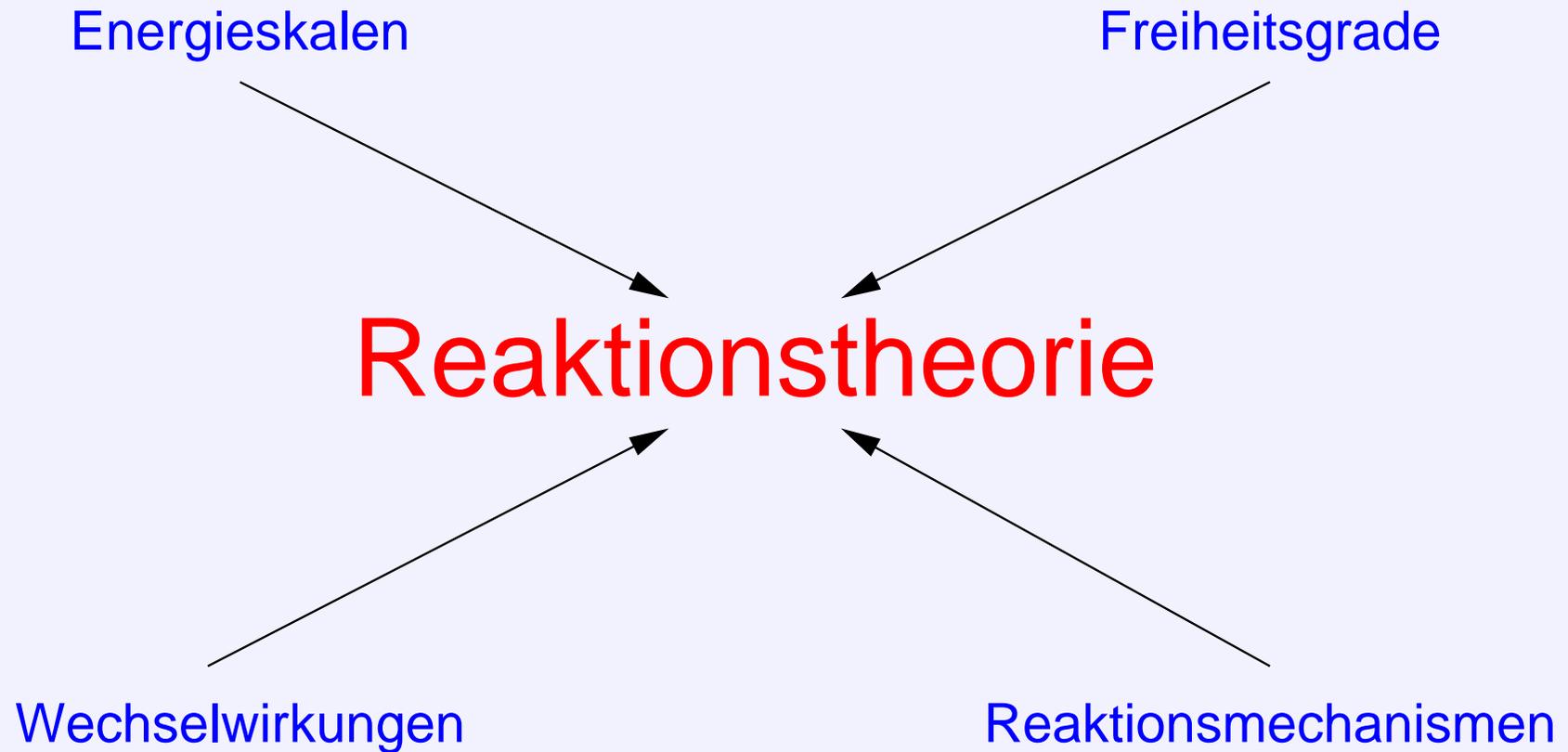
meist  
komplexe  
Reaktionstheorie

- **Wirkungsquerschnitte von Reaktionen**

- astrophysikalisch relevante Prozesse
- $\Rightarrow$  indirekte Methoden unter Verwendung **direkter Reaktionen** (Coulombdissoziation, Methode des trojanischen Pferdes)
- Erzeugung von exotischen Kernen  $\Rightarrow$  **Fragmentations**reaktionen
- **Fusion** von Kernen  $\Rightarrow$  Compoundkern-Reaktionen

verschiedene  
Reaktions-  
mechanismen

# Spezielle Einflussfaktoren

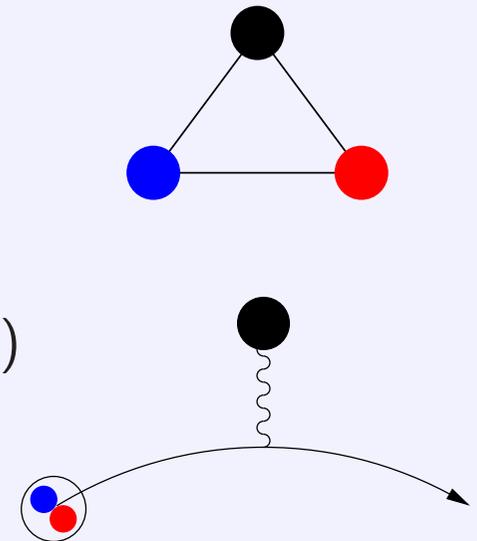


# Energieskalen

- System des exotischen Kerns: Kernstruktur  
⇒ einige keV bis mehrere MeV
- Projektil-Target-System: Kinematik der Reaktion/des Experiments  
⇒ einige keV/Nukleon bis über 1 GeV/Nukleon

# Energieskalen

- System des exotischen Kerns: Kernstruktur  
⇒ einige keV bis mehrere MeV
  - Projektil-Target-System: Kinematik der Reaktion/des Experiments  
⇒ einige keV/Nukleon bis über 1 GeV/Nukleon
  - Konsequenzen:
    - ähnliche Energien:  
einheitliche Beschreibung von Projektil+Target System,  
Bindungs- und Streuzustände  
(Resonanzen und nichtresonantes Kontinuum)  
in einem Modell (z.B. Drei-Teilchen-Modelle)
    - verschiedene Energien:  
Faktorisierung in Projektilbeschreibung (= exotischer Kern)  
und Projektil-Target-Relativbewegung (z.T. klassisch),  
Hybridmodelle (z.B. für direkte Reaktionen)
- ⇒ sehr **verschiedene theoretische Ansätze**



# Freiheitsgrade

- **Kernstruktur:** verschiedene Ansätze
  - Einteilchenzustände im Mittelfeld
  - Core + Valenznukleonen
  - Clusterstrukturen
  - kollektive Freiheitsgrade
- in praktisch verwendeten Reaktionstheorien:  
meist **einfache Einteilchen-/Potentialmodelle**

diverse, komplexe  
Strukturmodelle  
(z.T. nur für  
gebundene Zustände)

# Freiheitsgrade

- **Kernstruktur:** verschiedene Ansätze

- Einteilchenzustände im Mittelfeld
- Core + Valenznukleonen
- Clusterstrukturen
- kollektive Freiheitsgrade

diverse, komplexe  
Strukturmodelle  
(z.T. nur für  
gebundene Zustände)

- in praktisch verwendeten Reaktionstheorien:  
meist **einfache Einteilchen-/Potentialmodelle**

## **Abbildung zwischen den Beschreibungen?**

- traditionelle Methode: **spektroskopische Faktoren**  
(Quantifizierung des Einteilchenbeitrages an Vielteilchen-Zuständen)

Konzept für exotische Kerne geeignet?

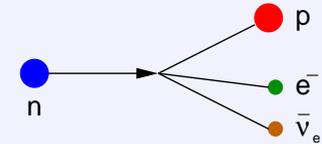
(Anwendung für Kontinuumszustände, relevante Freiheitsgrade,  
Berücksichtigung von Korrelationen in Reaktionstheorie)

# Wechselwirkungen I

- **Mittel zur Untersuchung** exotischer Kerne in Reaktionen

- **schwache Wechselwirkung:**

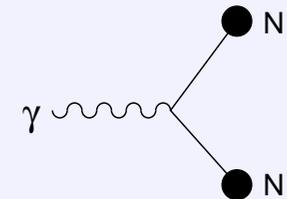
nur relevant für Zerfall



- **elektromagnetische Wechselwirkung:**

wohl bekannt, viel benutzt

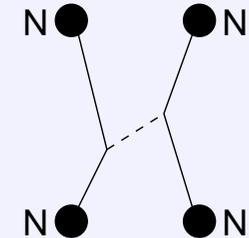
Anwendung: z.B. Coulombanregung/-aufbruchreaktionen  
(Effekte höherer Ordnung? Multiphoton-Austausch?)



- **starke Wechselwirkung:**

verschiedene Möglichkeiten der Beschreibung,  
z.T. selbst Ziel der Untersuchungen

Anwendung: z.B. direkte Reaktionen  
(nuklearer Aufbruch, Transfer)



# Wechselwirkungen II

- nukleare Wechselwirkung in Kernstrukturmodellen
  - mikroskopisch/“ab initio”  $\leftrightarrow$  effektiv  $\leftrightarrow$  phänomenologisch
  - explizite Darstellung  $\leftrightarrow$  Matrixelemente in spezieller Basis (z.B. Schalenmodell, Harmonischer Oszillator)

# Wechselwirkungen II

- nukleare Wechselwirkung in Kernstrukturmodellen
  - mikroskopisch/ “ab initio”  $\leftrightarrow$  effektiv  $\leftrightarrow$  phänomenologisch
  - explizite Darstellung  $\leftrightarrow$  Matrixelemente in spezieller Basis (z.B. Schalenmodell, Harmonischer Oszillator)
- nukleare Wechselwirkung in Reaktionsmodellen:  
meist optische Potentiale (nicht eindeutig)
  - systematische phänomenologische Potentiale (nur für leichte stabile Kerne, Beschränkung in Energie)
  - Faltungspotentiale mit effektiven NN-Wechselwirkungen (Isospinabhängigkeit? Energieabhängigkeit?)
  - Imaginärteil  $\Rightarrow$  Absorption  
Berücksichtigung von nicht explizit behandelten Kanälen (wichtig bei schwach gebundenen Systemen, Veränderung der optischen Potentiale bei vollständigeren Modellen? )

# Wechselwirkungen II

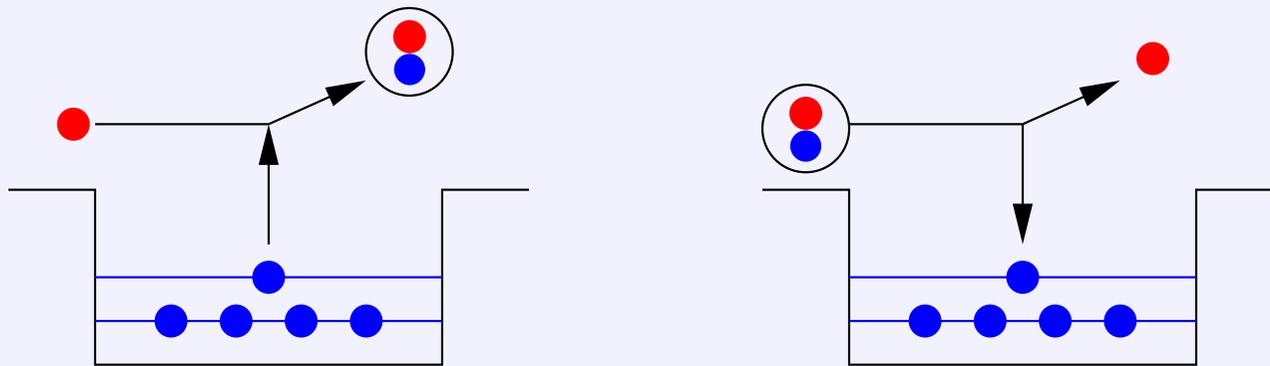
- nukleare Wechselwirkung **in Kernstrukturmodellen**
  - mikroskopisch/ “ab initio”  $\leftrightarrow$  effektiv  $\leftrightarrow$  phänomenologisch
  - explizite Darstellung  $\leftrightarrow$  Matrixelemente in spezieller Basis (z.B Schalenmodell, Harmonischer Oszillator)
- nukleare Wechselwirkung **in Reaktionsmodellen**:  
meist **optische Potentiale** (nicht eindeutig)
  - systematische phänomenologische Potentiale (nur für leichte stabile Kerne, Beschränkung in Energie)
  - Faltungspotentiale mit effektiven NN-Wechselwirkungen (Isospinabhängigkeit? Energieabhängigkeit?)
  - Imaginärteil  $\Rightarrow$  Absorption  
Berücksichtigung von nicht explizit behandelten Kanälen (wichtig bei schwach gebundenen Systemen, Veränderung der optischen Potentiale bei vollständigeren Modellen? )

**Zusammenhang? Konsistenz der Beschreibung?**

# Reaktionsmechanismen

## große Vielfalt

- Fragmentation, Fusion,  $\beta$ -Zerfall, elektromagnetische Übergänge, . . .  
⇒ hier nicht weiter betrachtet
- **direkte Reaktionen**: z.B. Transfer (Pickup, Stripping/Knockout)



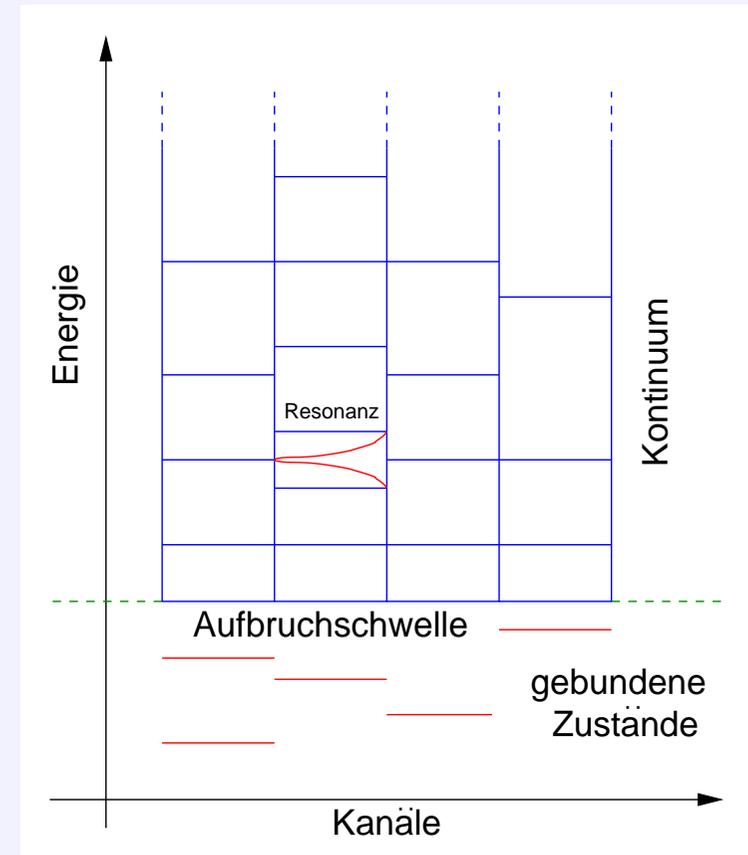
- ⇒ wohlbekanntere experimentelle Technik
- ⇒ liefert detaillierte Information über einzelne Kernzustände
- ⇒ weitentwickelte Reaktionstheorie, traditionelle Beschreibung:  
Bornsche Näherung mit verzerrten Wellen (DWBA)

Sind **Veränderungen** in Beschreibung bei exotischen Kernen **notwendig**?

# Direkte Reaktionen mit exotischen Kernen

**DWBA:** zeitunabhängige Störungstheorie

- **Projektilsystem** (exotischer Kern):  
Berücksichtigung von gebundenen und ungebundenen Zuständen in verschiedenen Fragmentierungen
  - **Projektil-Target Bewegung:**  
Partialwellenentwicklung in voller quantenmechanische Beschreibung
- ⇒ gekoppelten Kanalrechnung mit diskretisiertem Kontinuum (CDCC)



# Direkte Reaktionen mit exotischen Kernen

**DWBA:** zeitunabhängige Störungstheorie

- **Projektilsystem** (exotischer Kern): Berücksichtigung von gebundenen und ungebundenen Zuständen in verschiedenen Fragmentierungen
- **Projektil-Target Bewegung:** Partialwellenentwicklung in voller quantenmechanische Beschreibung

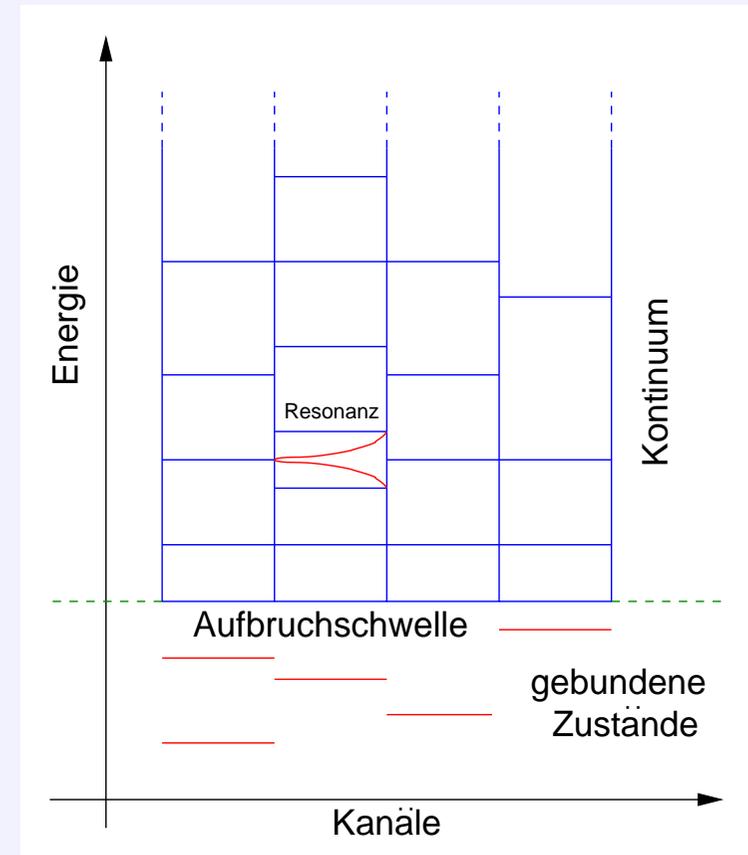
⇒ gekoppelten Kanalrechnung mit diskretisiertem Kontinuum (CDCC)

**Probleme:**

- nur bei kleinen Projektil-Energien durchführbar
- Kontinuumszustände gut repräsentiert?
- geeignete optische Potentiale?

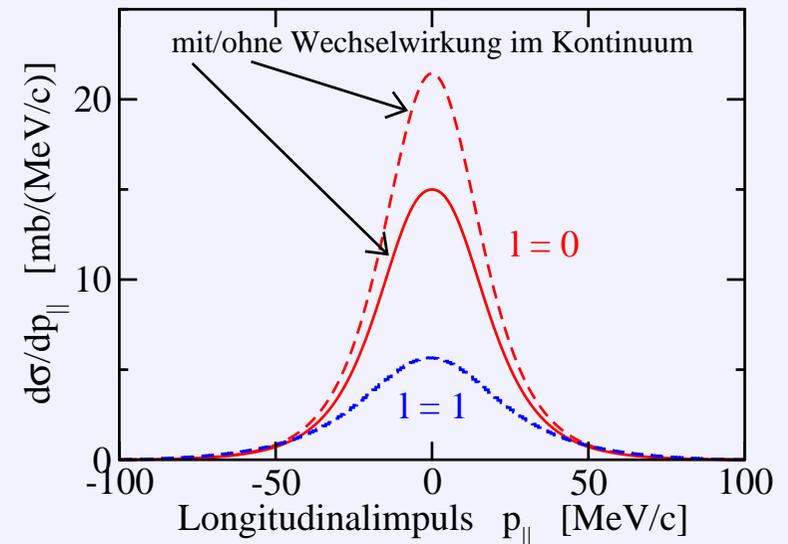
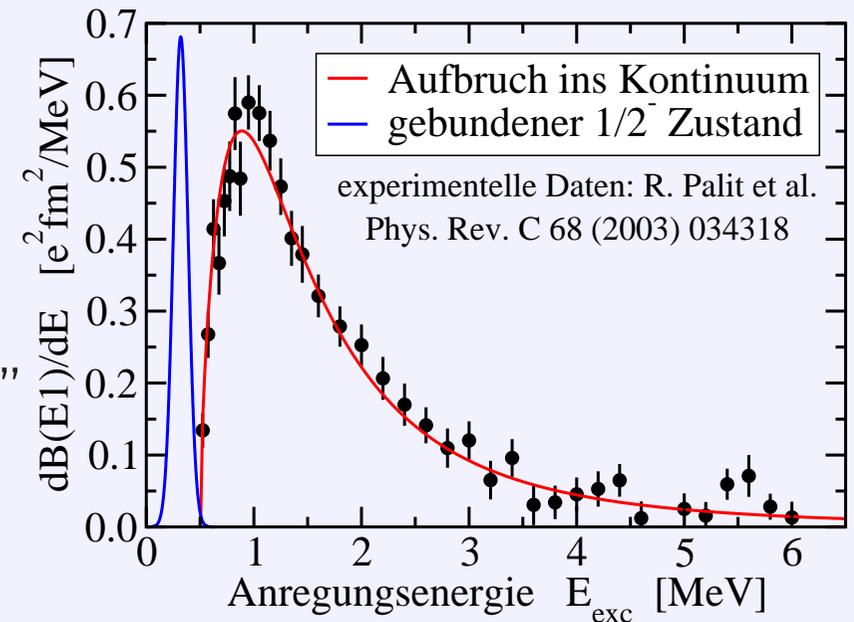
**Alternativen?**

- zeitabhängige Beschreibung mit Wellenpaketen
- semiklassische Methoden



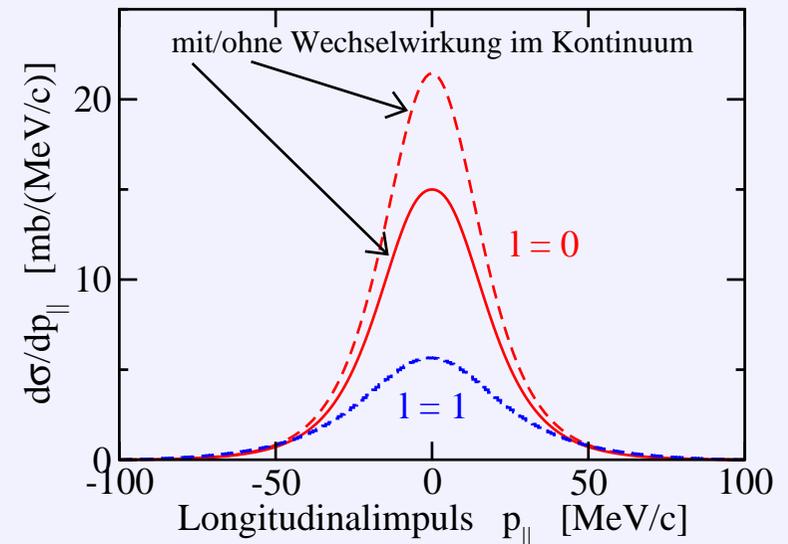
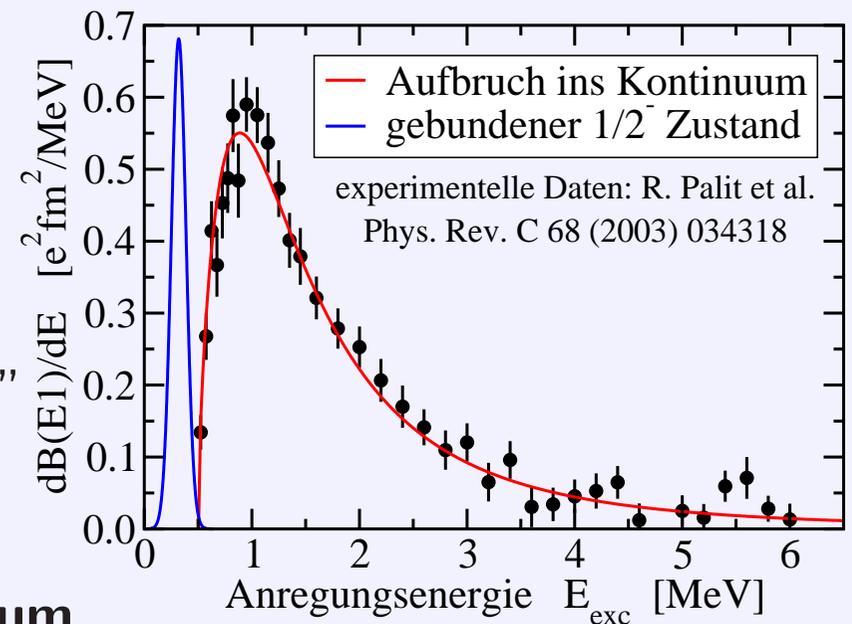
# Coulombaufbruch von $^{11}\text{Be}$

- Neutron-Halo-Kern mit  $\frac{1}{2}^+$  Grundzustand ( $l = 0$ ), Separationsenergie  $S_n = 0.504$  MeV  
 $\Rightarrow$  schmale Impulsverteilung bei Aufbruch
- **GSI Experiment:** 520 A MeV  $^{11}\text{Be}$  Sekundär-Strahl  
 $\Rightarrow$  exklusive Wirkungsquerschnitte, Analyse mit "direktem Coulombaufbruch-Modell"  
 $\Rightarrow$  spektroskopischer Faktor für  $\nu 2s_{1/2} \otimes ^{10}\text{Be}(0^+)$  Konfiguration im Grundzustand:  $C^2S = 0.61(5)$



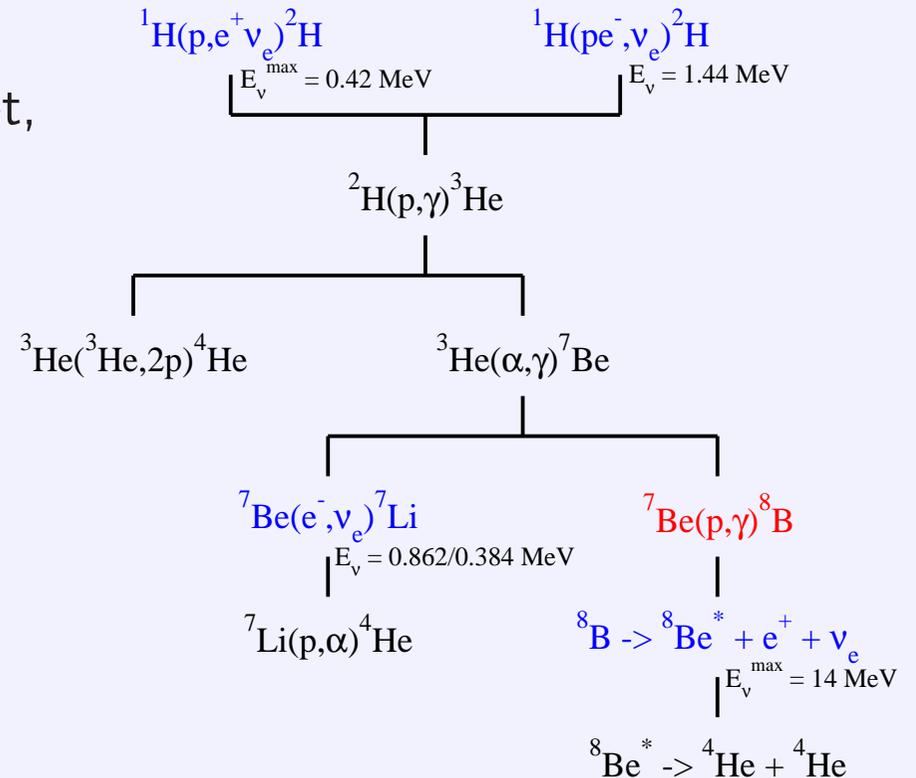
# Coulombaufbruch von $^{11}\text{Be}$

- Neutron-Halo-Kern mit  $\frac{1}{2}^+$  Grundzustand ( $l = 0$ ), Separationsenergie  $S_n = 0.504$  MeV  
 $\Rightarrow$  schmale Impulsverteilung bei Aufbruch
- **GSI Experiment:** 520 A MeV  $^{11}\text{Be}$  Sekundär-Strahl  
 $\Rightarrow$  exklusive Wirkungsquerschnitte, Analyse mit "direktem Coulombaufbruch-Modell"  
 $\Rightarrow$  spektroskopischer Faktor für  $\nu 2s_{1/2} \otimes ^{10}\text{Be}(0^+)$  Konfiguration im Grundzustand:  $C^2S = 0.61(5)$
- **Kopplung von Bindungszuständen und Kontinuum**
  - große Streulänge in  $p_{1/2}$  Streukanal,  $n\text{-}^{11}\text{Be}$  Wechselwirkung im Kontinuum wichtig
  - Effekt des schwach gebundenen  $\frac{1}{2}^-$  Zustandes 0.184 MeV unterhalb der Aufbruchschwelle
  - Reduktion des Aufbruchwirkungsquerschnittes  
 $\Rightarrow$  spektroskopischer Faktor  $C^2S = 0.70(2)$   
 (S. Typel, G. Baur, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 142502)



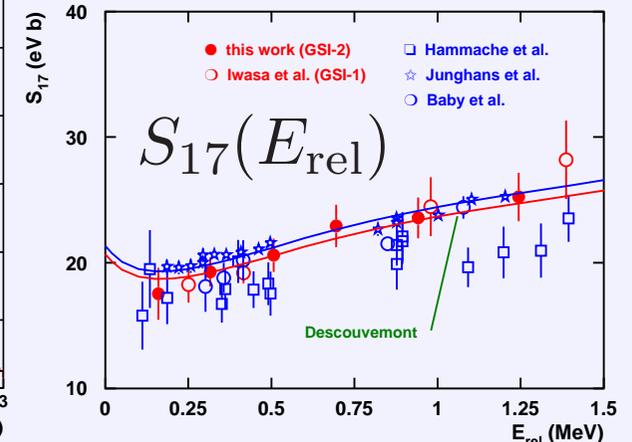
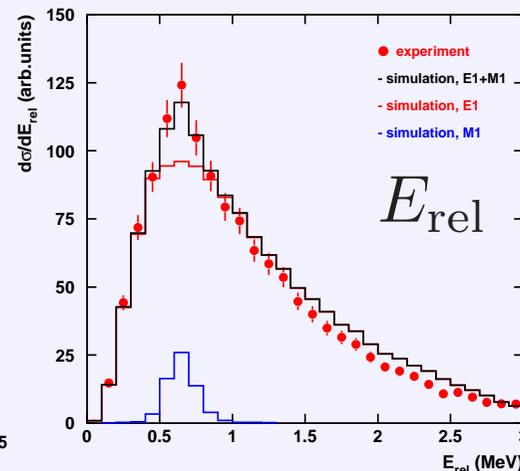
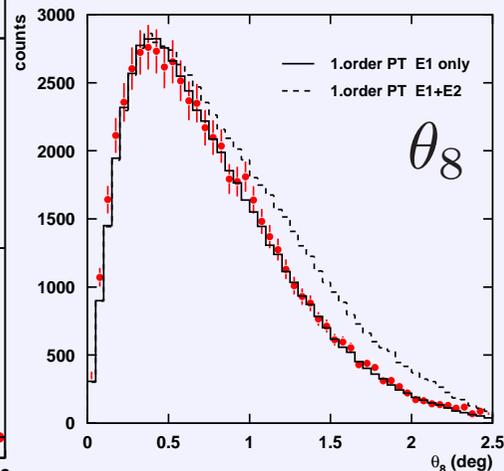
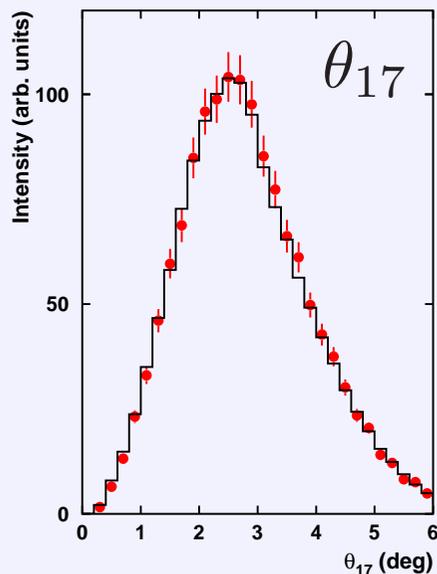
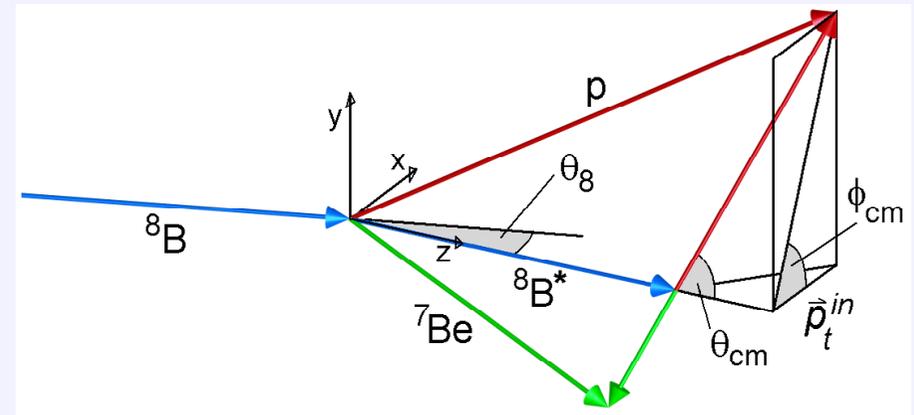
# Coulombaufbruch von ${}^8\text{B}$

- Proton-Halo-Kern mit  $2^+$  Grundzustand ( $l = 1$ ), Separationsenergie  $S_p = 0.137$  MeV
- GSI Experimente (I/II):  
254 A MeV  ${}^8\text{B}$  Sekundär-Strahl auf Pb-Target, Aufbruch in Proton und  ${}^7\text{Be}$ 
  - Ziel: Bestimmung des Einfangwirkungsquerschnittes der  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  Reaktion, wichtig für hochenergetischen Neutrino-Fluss im solaren Wasserstoff-Brennen  
⇒ Astro-/Teilchenphysik
  - indirekte Coulombaufbruch-Methode  
⇒ unabhängig von direkten Messungen
  - Detektion aller Fragmente, vollständige Kinematik, gute Statistik
  - Analyse mit voller Coulombaufbruchtheorie



# Coulombaufbruch von $^8\text{B}$

- vollständige Beschreibung der Reaktion
  - Beiträge verschiedener Multipole
  - nukleare Absorption am Target
  - diverse exklusive Wirkungsquerschnitte
- ⇒ Reaktionsmechanismus gut verstanden



⇒ astrophysikalischer S-Faktor:  $S_{17}(0) = 20.6 \pm 0.8(\text{stat.}) \pm 1.2(\text{syst.}) \text{ eV b}$   
 (F. Schümann et al., Phys. Rev. C 73 (2006) 015806)  
 konsistent mit präzisesten direkten Messungen

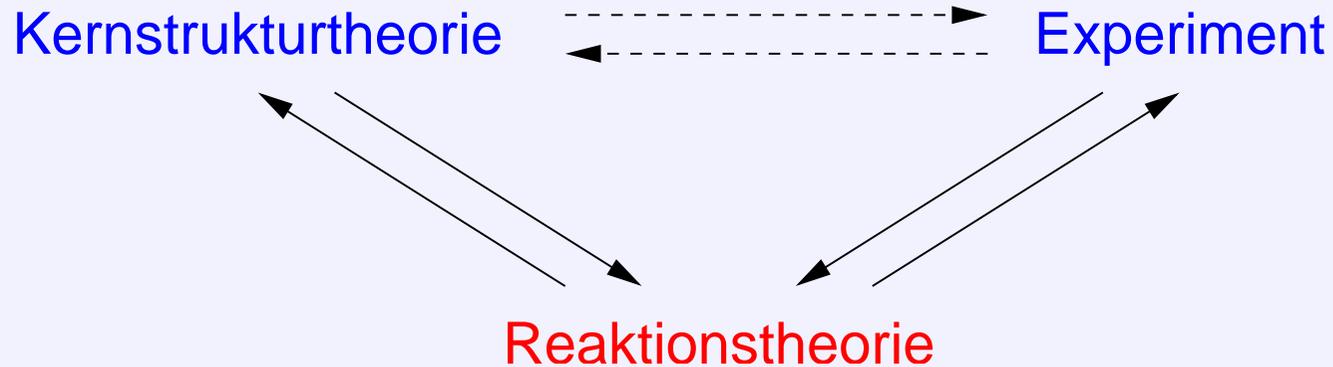
- **Reaktionstheorie** ↔ **Strukturtheorie**

- Entwicklung geeigneter Strukturmodelle für exotische Kerne
  - Berücksichtigung von Kontinuumszuständen
  - korrekte Asymptotik der Wellenfunktionen
  - relevante Korrelationen
- geeignete Übertragung dieser Modelle auf die Reaktionstheorie
- Konsistenz der verwendeten Wechselwirkungen

- **Reaktionstheorie** ↔ **Experiment**

- Bereitstellung der theoretischen Ergebnisse in geeigneter Form
  - ⇒ Simulation, Planung von Experimenten
- quantitative Auswertung von Experimenten mit voll entwickelter Reaktionstheorie
- gleichzeitige Beschreibung verschiedener Beobachtungsgrößen
- Messung ergänzender Wirkungsquerschnitte (z.B. elastische Streuung)

# Zusammenfassung



- viele offene Fragen
- Anpassung bekannter Methoden auf spezielle Bedingungen
- Entwicklung neuer Verfahren
- direkte Zusammenarbeit mit Strukturtheorie und Experiment

**Reaktionstheorie unverzichtbar für detailliertes Verständnis exotischer Kerne**