

Moderne Experimente der Kernphysik II

- Aktuelle Fragestellungen der Kernstrukturphysik -

Prof. Dr. Reiner Krücken
Physik Department E12

Raum 2003

Tel. 12433

E-mail: reiner.kruecken@ph.tum.de

Ein Blick zurück

Wesentliche Punkte des letzten Semesters

Rückblick

- **Grundzustandseigenschaften von Kernen**
 - Massen, Radien, elektromagnetische Momente, Spin
- **Eigenschaften der NN-Wechselwirkung**
 - Deuteron
 - Fermi Gas Modell
- **Schalenmodell**
 - Mittleres Potential und resultierende Einteilchenzustände
 - Restwechselwirkung und deren Konsequenzen
 - Transfer-Reaktionen zum Studium von Schalenmodellzuständen
- **Kollektive Anregungen**
 - Rotation und Vibrationszustände
 - Elektromagnetische Übergänge
 - Messung von Lebensdauern
 - Verschiedene Deformationen (Quadrupol, Oktupol, Triaxial)
- **„Erweiterungen des Schalenmodells“**
 - deformiertes Schalenmodell / Nilsson Modell
 - Schalenkorrekturen / Strutinsky Methode
 - Einteilchenzustände im rotierenden Potential / Cranking Modell

Rückblick 2 – Experimentelle Methoden

- **Massenmessungen**
 - Bindungsenergien, Separationsenergien
- **Dichteverteilungen**
 - Radian
- **Transferreaktionen: Energien, Winkelverteilungen, Wirkungsquerschnitte**
 - Einteilchenenergien, Drehimpuls, Spektroskopische Faktoren
- **Gammaspektroskopie inkl. Winkelverteilung, Polarisation**
 - Energien angeregter Zustände, Drehimpuls, Spin, Matrixelemente
- **Coulomb-Anregung: Wirkungsquerschnitte**
 - elektromagnetische Momente
- **g-Faktor Messung**
 - magnetisches Moment
- **Lebensdauer messung**
 - Quadrupolmoment u.a.

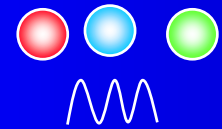
Zielsetzung für dieses Semester

- Anwendung und Test der bisher gelernten Konzepte
- Exemplarische Besprechung aktueller Fragestellungen und Experimente
- Erweiterung des Horizonts
 - Wo funktionieren die bisher gelernten Konzepte nicht?
 - Wo sind die Grenzen der bisherigen Ansätze?
 - Was sind die fundamentalen Fragestellungen der Kernstrukturphysik?
 - Welche modernen experimentellen Methoden werden verwendet?
 - Was sind die zukünftigen Entwicklungen?

Inhalt

- **Einführung**
- **Beschreibung der leichtesten Kerne ($A < 10$)**
- **Produktion kurzlebiger radioaktiver Ionenstrahlen**
- **Halo Kerne und Phänomene in schwach gebundenen Systemen**
- **$N=Z$ Kerne**
- **Cluster-Struktur von Kernen**
- **Kerne an der Protonenabbruchkante**
- **rp- und r-Prozess**
- **Symmetrien und Phasenübergänge in Kernen**
- **Formkoexistenz und Isomerismus**
- **Superschwere Elemente**
- **Elektromagnetische Response**
- **Hyperkerne**
- **Exotika (tief gebundenen pionische Zustände, etc.)**

Hierarchie der starken Wechselwirkung



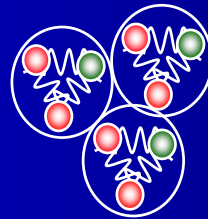
Quarks,
Gluonen

Protonen,
Neutronen



QCD

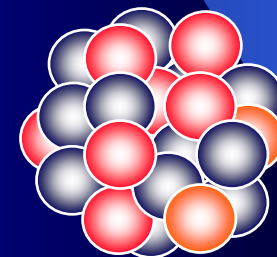
Leichte Kerne
($A \leq 12$)



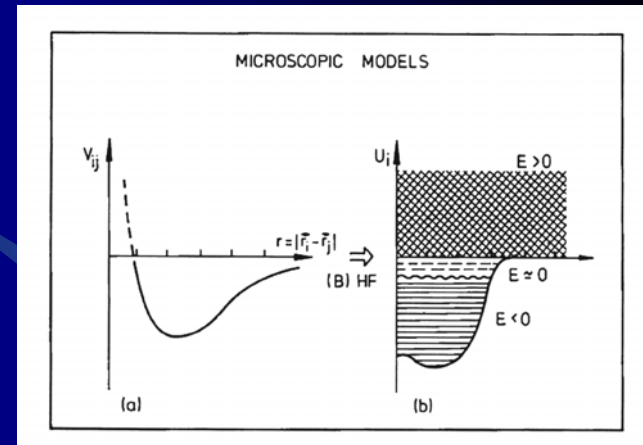
Nukleon-Nukleon
Wechselwirkung
(ab-initio Modelle)

?

Schwere Kerne



Effektive
Nukleon-Nukleon
Wechselwirkung



Die Natur der effektiven Nukleon-Nukleon

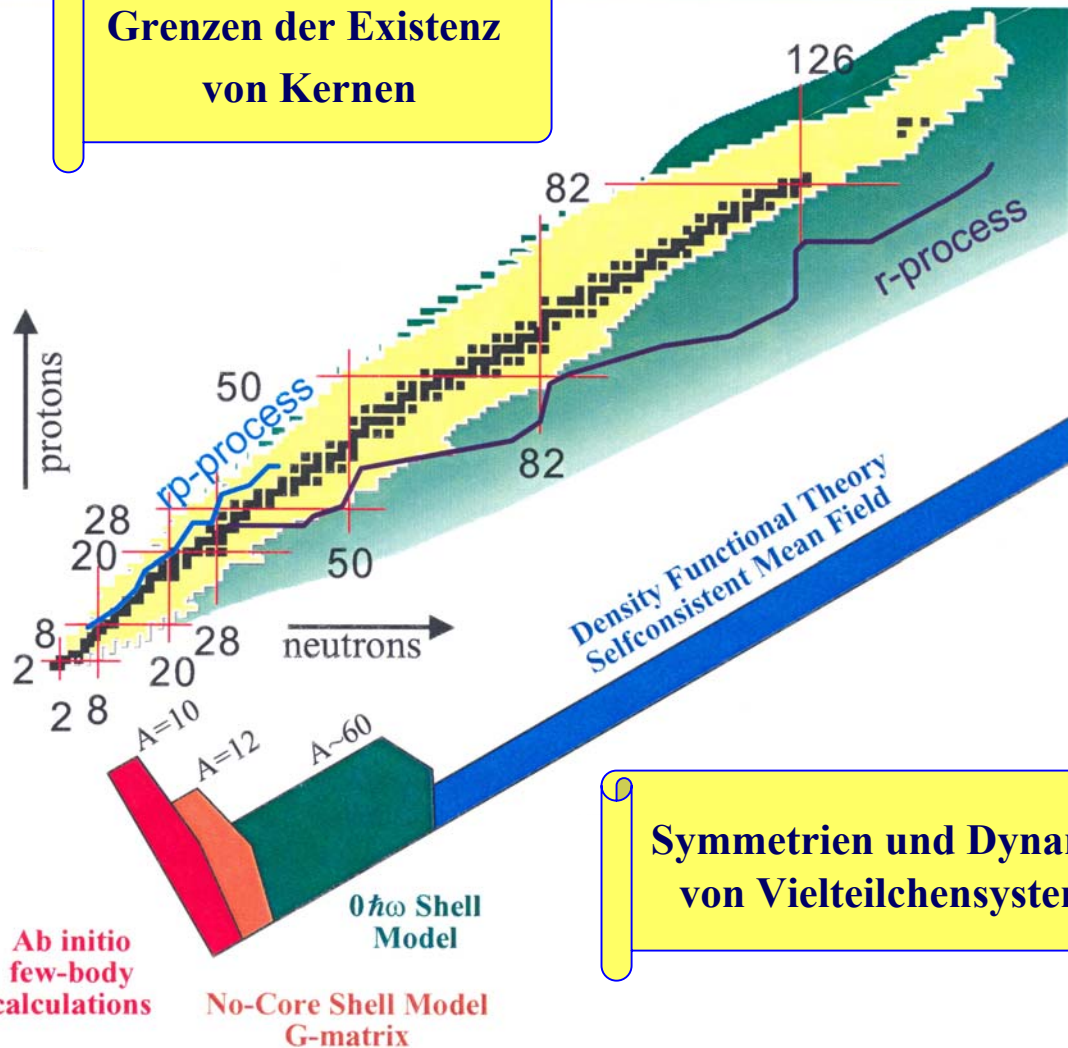
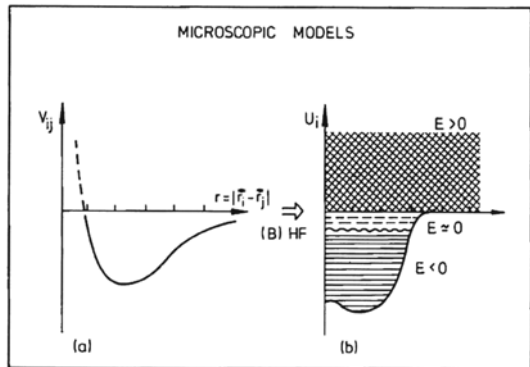
Wechselwirkung ist nicht verstanden !!

Ziele der Kernstrukturphysik

Nach U.S. NSAC
Long Range Plan

Einheitliche Beschreibung
aller Kerne

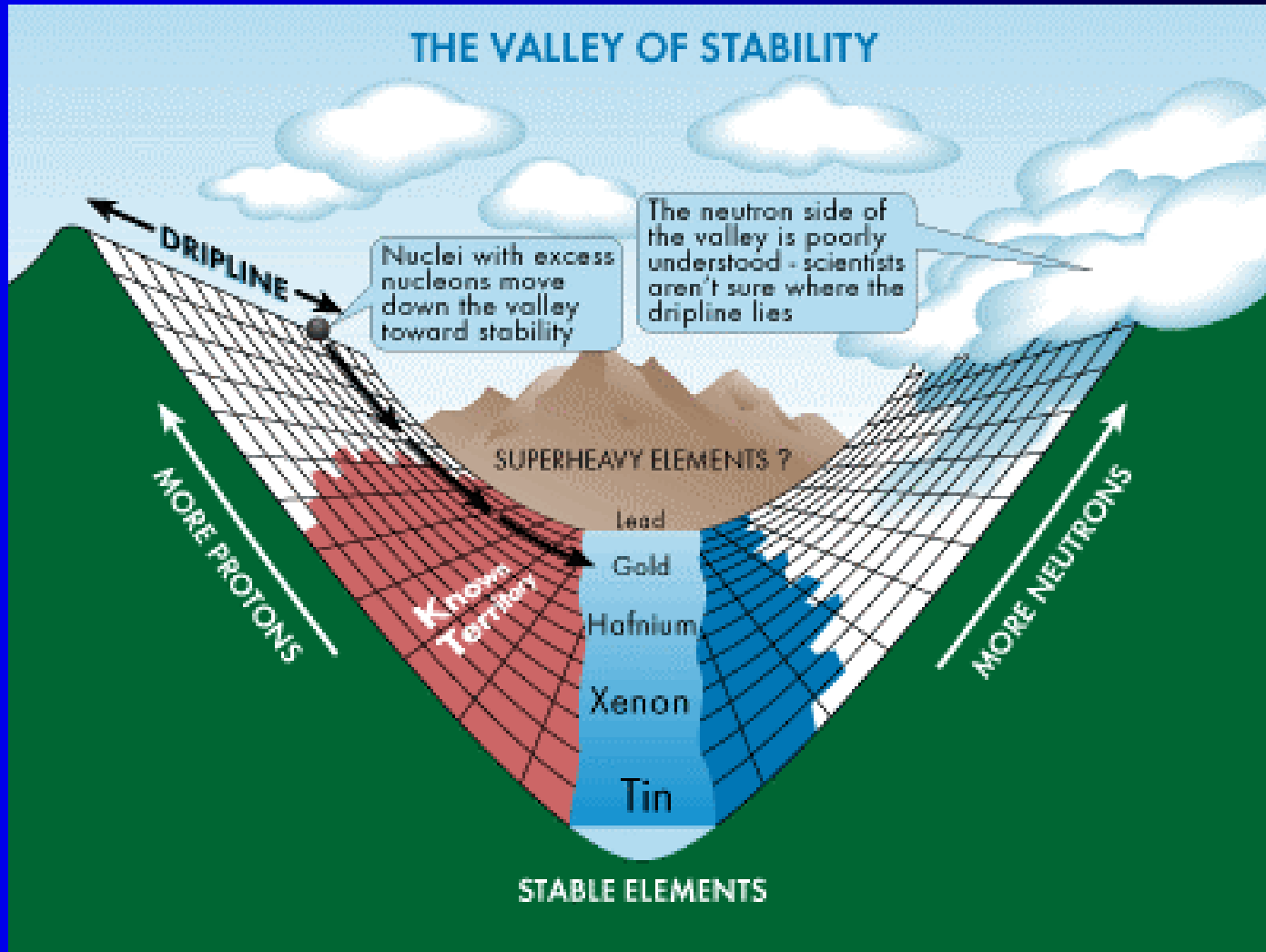
Grenzen der Existenz
von Kernen



Herleitung der freien
NN-Wechselwirkung
aus der QCD

Symmetrien und Dynamik
von Vielteilchensystemen

Das Stabilitätstal



Eigenschaften des 2-Nukleonen Systems

- Einzig gebundener Zustand: Deuteron
 - Es gibt kein Di-Proton und kein Di-Neutron
- Eigenschaften des Deuterons:
 - $M(d) = 1876,1387 \text{ MeV}/c^2$ (Atommasse)
 - Bindungsenergie $B(d) = 2,225 \text{ MeV}$
 - Spin $I = 1$
 - Radius: $R(d) = 1,4 \times 10^{-13} \text{ cm}$
 - Querschnittsfläche $A = \pi R^2 \approx 6 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$
 - Quadrupolmoment: $eQ_d = 2,86 \times 10^{-27} \text{ e cm}^2 = 2,86 \times 10^{-3} \text{ eb}$ (barn)
 - Magnetisches Moment: $\mu_d = 0,857 \mu_N$
 - $\mu_p + \mu_n = 0,88 \mu_N$
 - Tiefe des Potentialtopfes für das Deuteron: $V_0 \approx 50 \text{ MeV}$

Konsequenzen für N-N Kraft

- **Schlussfolgerungen aus Eigenschaften des Deuterons**

- Proton- und Neutron-Spin parallel (Triplet-Zustand)
- wg. $\mu_p + \mu_n \approx \mu_d$ Grundzustand hat $L=0$
- wg. $Q_d \ll A$ Deuteron im wesentlichen sphärisch
- $Q_d \neq 0$ deutet auf nicht-zentrales Potential (Tensorkraft)
- NN-Kraft „schwach“ im Vergleich zur Potentialtiefe

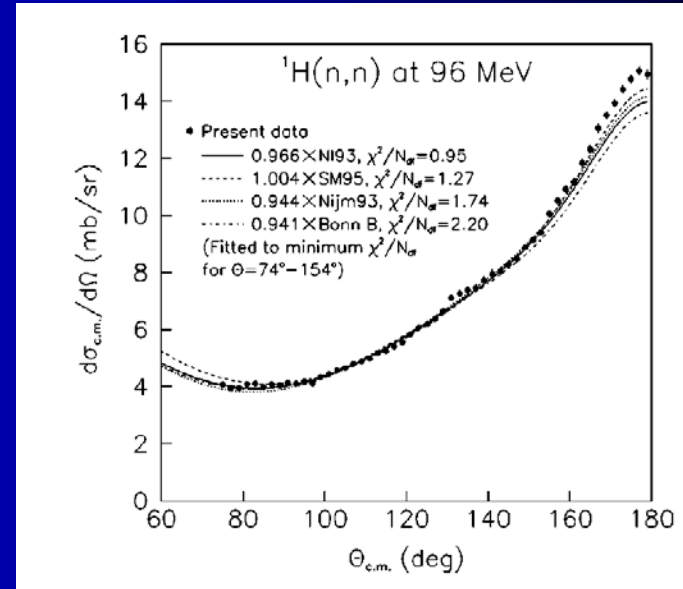
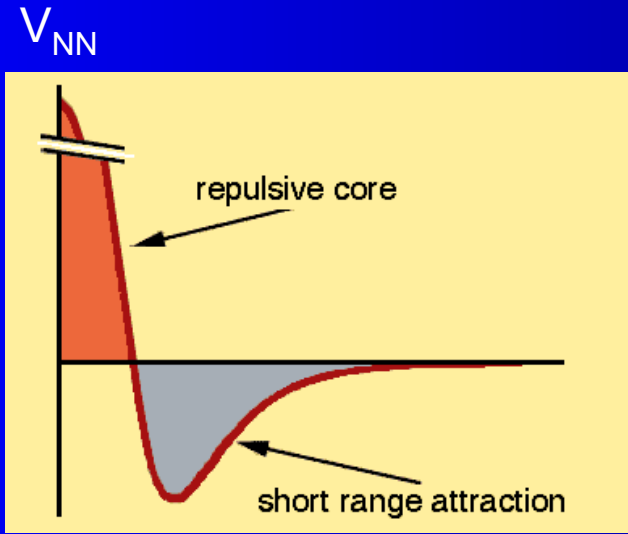
→ NN-Kraft verändert kinetische Energie im wesentlichen nicht!

Eigenschaften der NN-Kraft

- **Zusammenfassung:**

- **Kurzreichweitig, generell anziehend** (Kernbildung, Kerngröße)
- **Sättigung** (B.E./A \sim 8 MeV)
- **Schwach im Vergleich zur kinetischen Energie** ($E_B(d) \ll V_0$)
 - Nukleonen bewegen sich im wesentlichen unabhängig voneinander
- **Ladungsunabhängig** (abgesehen von der Coulomb-WW im Kern)
- **Enthält Paarungskraft für gleichartige Nukleonen** (J=0 gg Kerne)
- **Abgesehen von Paarung ist T=1 Kanal abstoßend** ($\pi\pi$, $\nu\nu$ ungebunden)
- **T=0 Kanal anziehend und bevorzugt S=1 Kopplung** (Deuteron)
- **Proton-Neutron WW bevorzugt nicht-sphärische Form** ($Q_d \neq 0$, deformierte Kerne in der Schalenmitte)

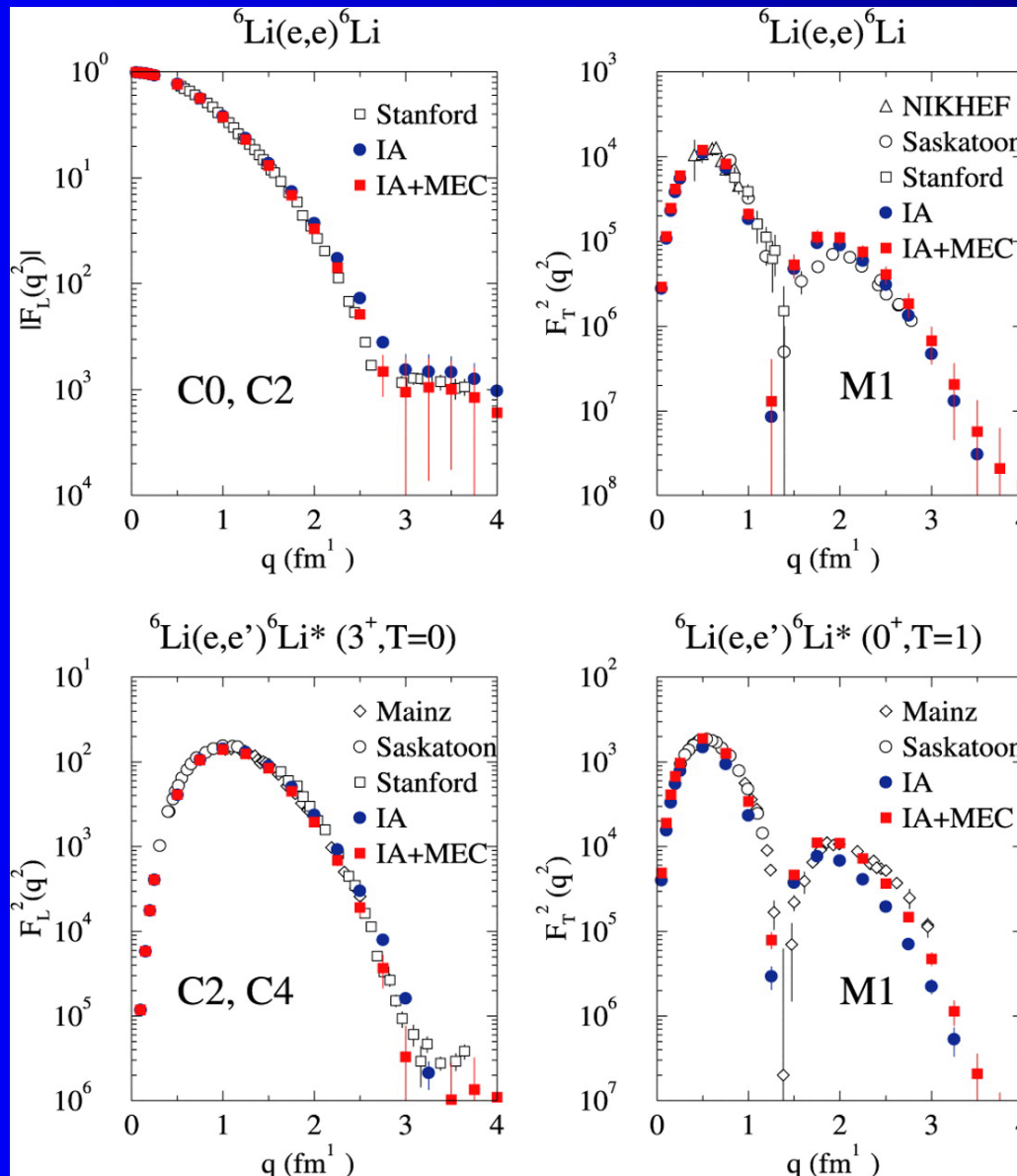
Berechnung von Kernen mit einer realistischen NN-Kraft



- Mit realistischen NN-Potentialen kann man Systeme weniger Nukleonen beschreiben z.B:
 - Eigenschaften des Deuterons
 - Daten aus der Streuung von Neutronen an Protonen
 - Elastische Elektronenstreuung an leichten Kernen
- Mit großem numerischen Aufwand kann man auch die Eigenschaften von Kernen mit Massen bis zu $A=10$ beschreiben:

Ab-initio Kernmodelle (Greens-Function Monte Carlo)

Elektronenstreuung an leichten Kernen



Formfaktor

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}^* \cdot |F(q^2)|^2$$

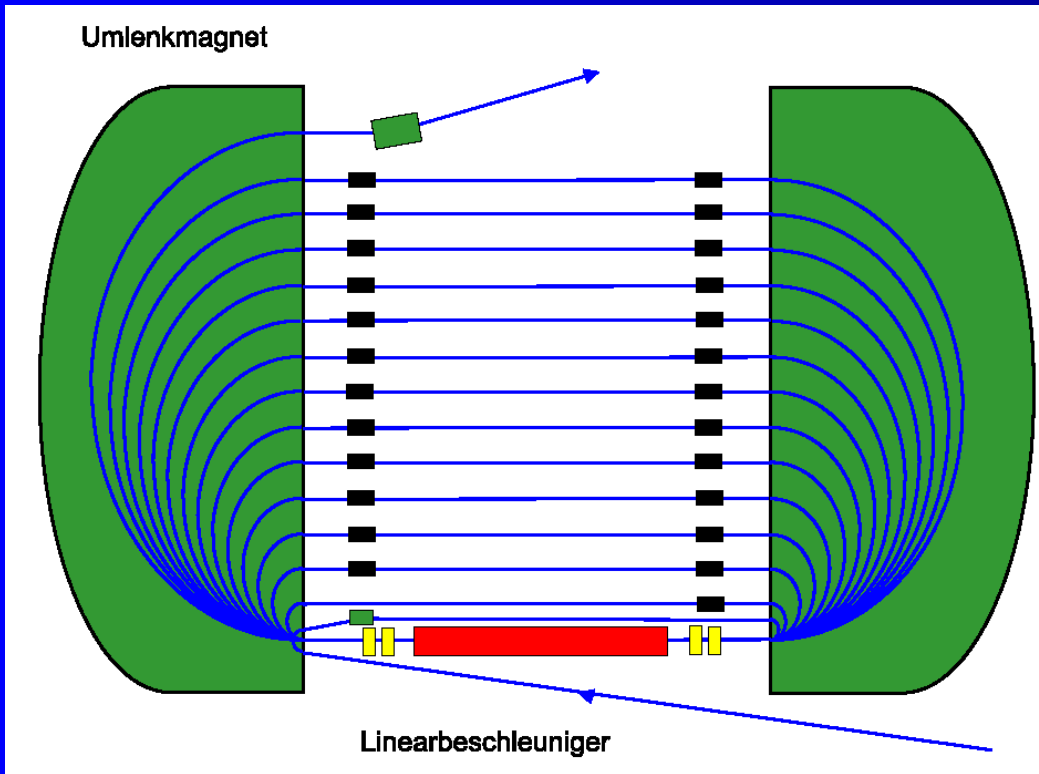
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}^* = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Rutherford}} \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

Elektronenbeschleuniger MAMI in Mainz

(Mainzer Mikrotron)



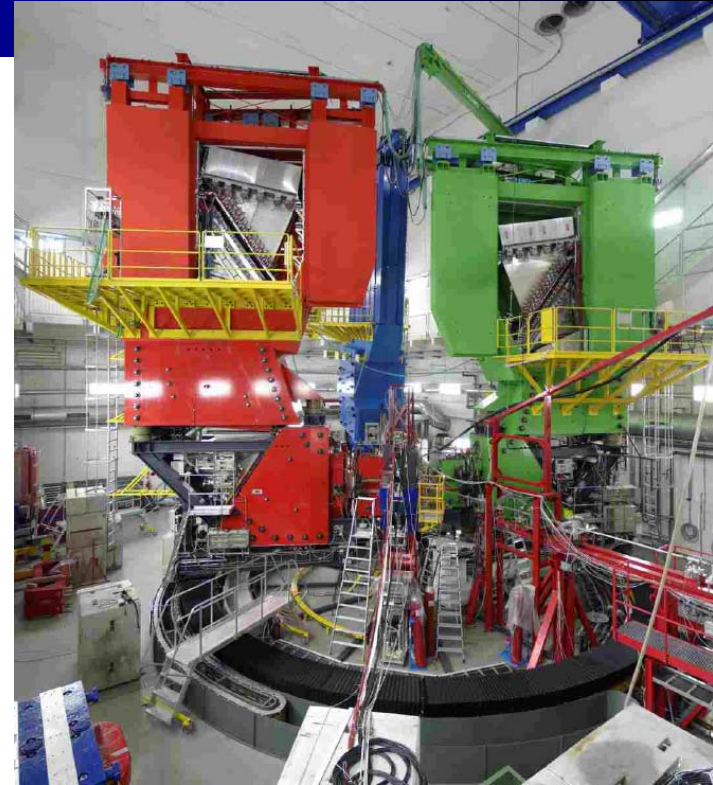
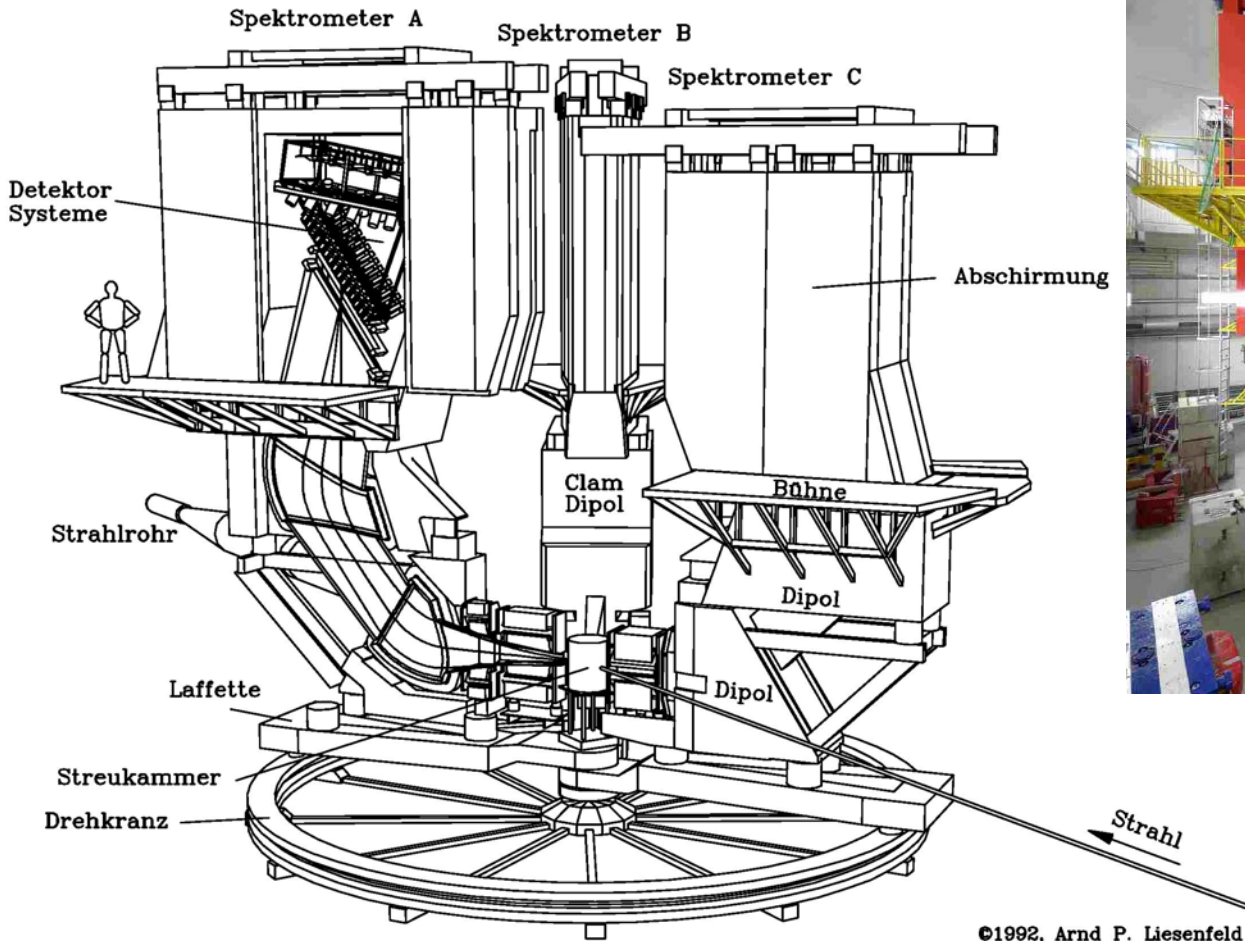
Energie 855 MeV



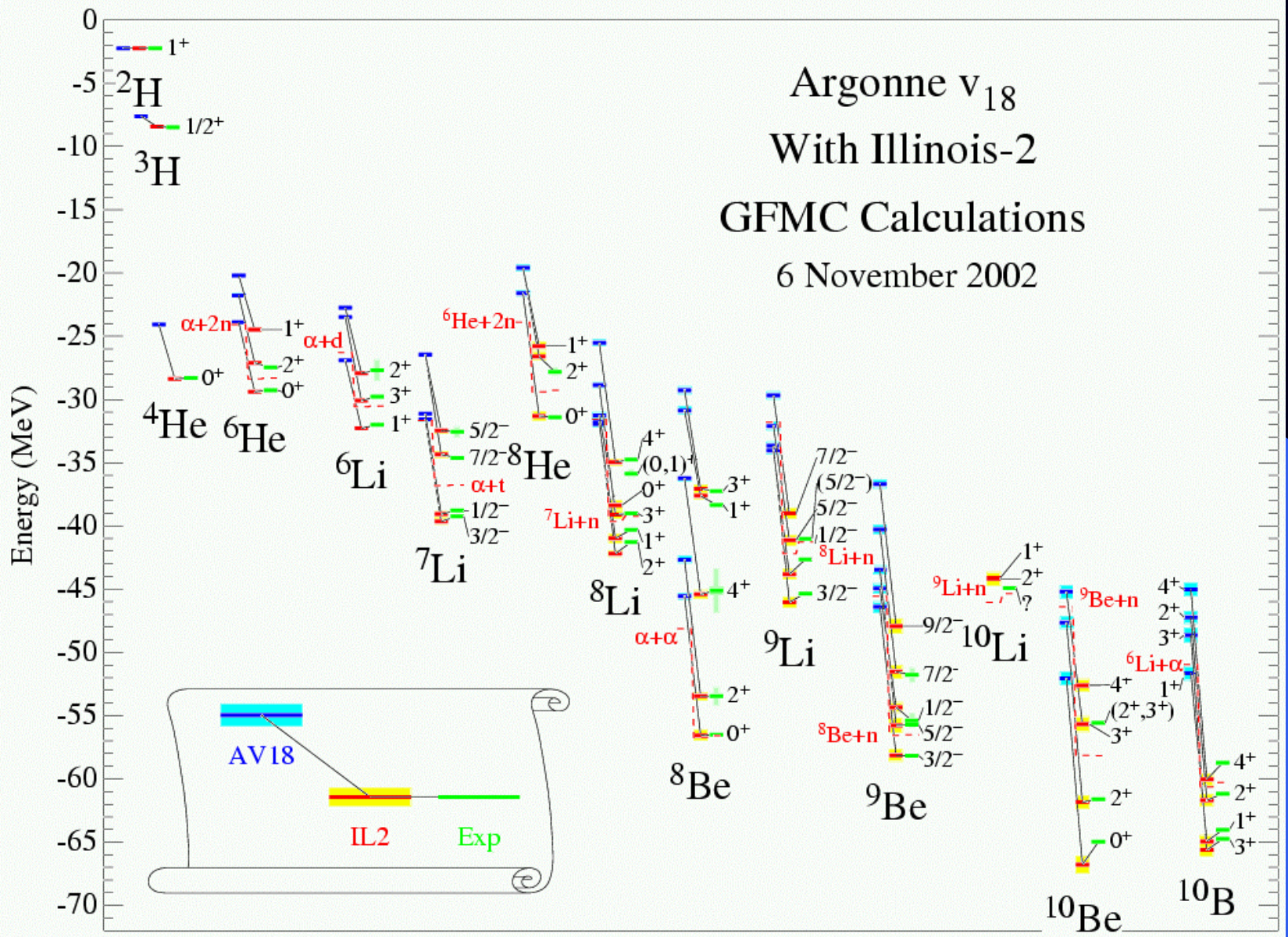
Es wird die gleiche Beschleunigerstrecke
mehrfach verwendet

Rennbahnmikrotron

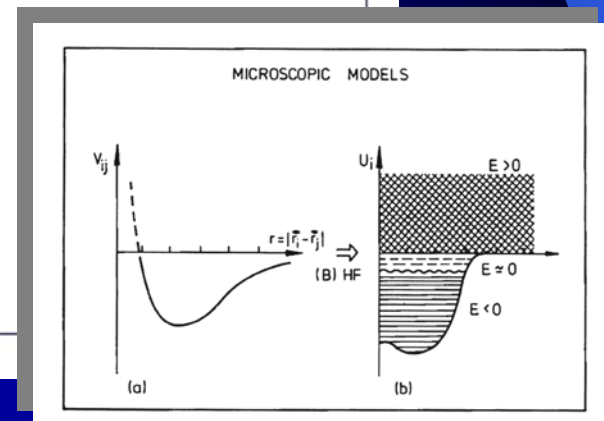
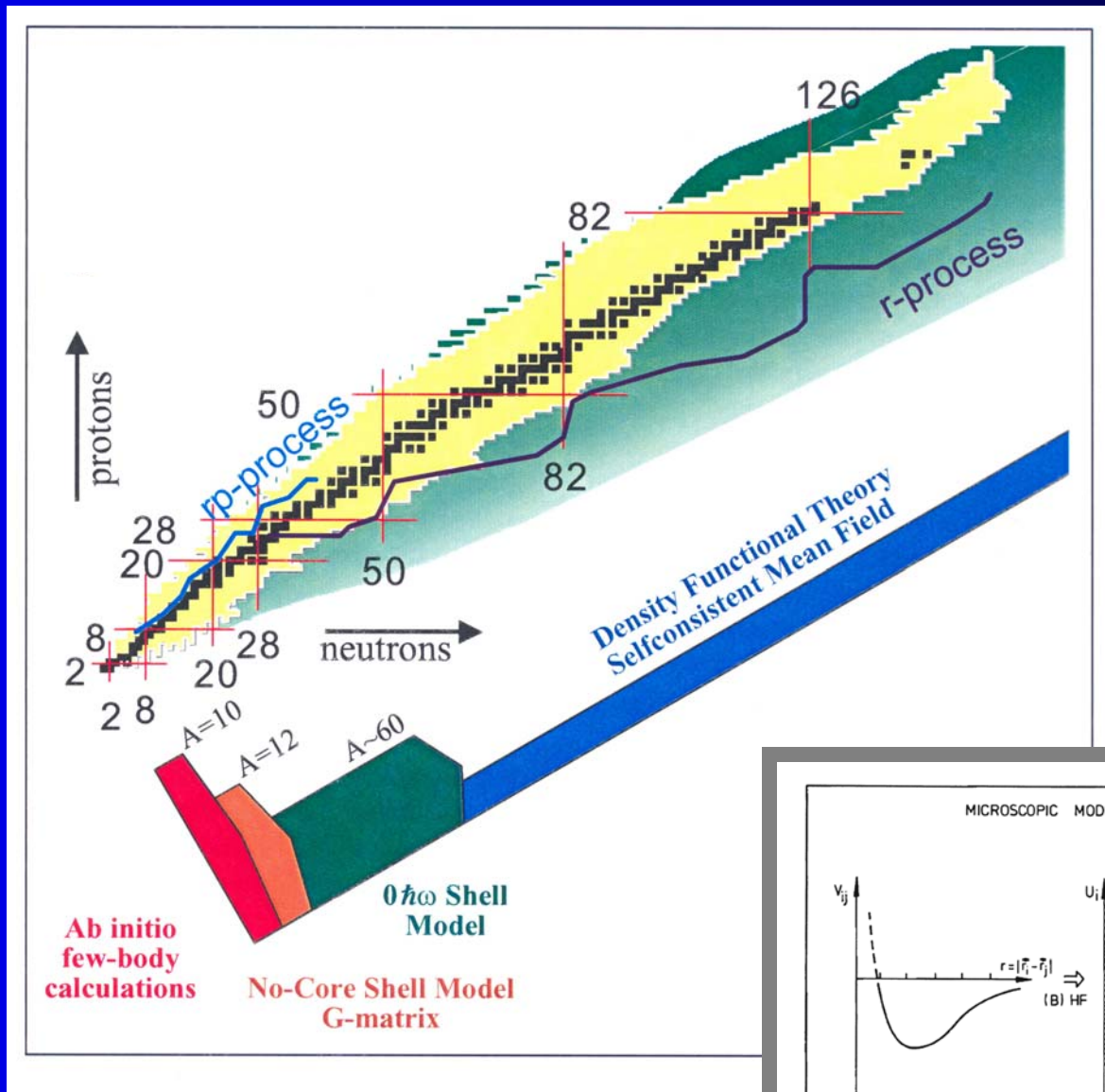
MAMI A1 Collaboration



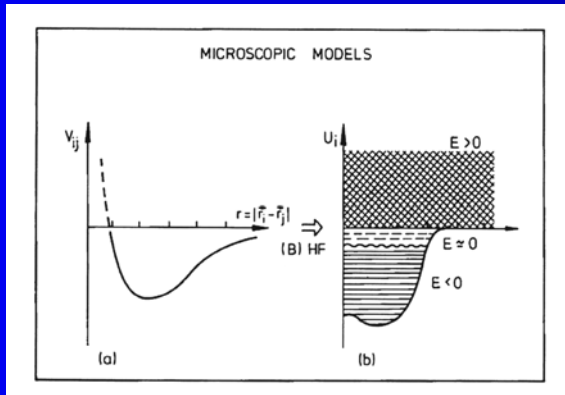
Ab-initio Rechnungen für leichte Kerne



Schwerere Kerne: Schalenmodell & Mean-Field



Mikroskopische Selbstkonsistente Mean-Field Modelle



$$H = \sum t_i + \frac{1}{2} \sum v_{ij}$$

Jedes Teilchen spürt ein mittleres Feld $U_i(A-1)$
(erzeugt durch die anderen $A-1$ Teilchen)

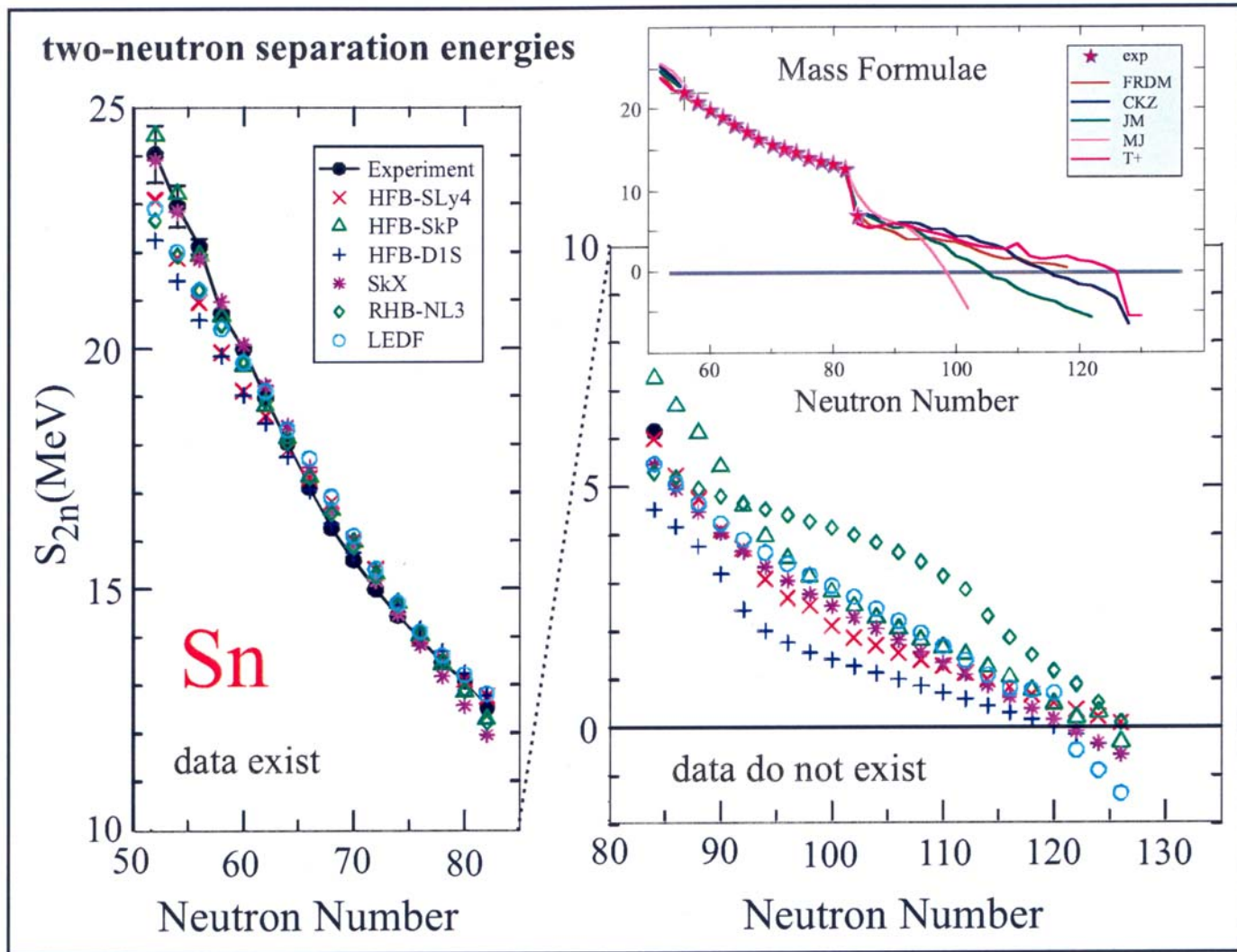
$$H_{\text{mittel}}(i) = t_i + U_i(A-1) \quad \text{Mean-Field Hamiltonian}$$

Primitivste Beschreibung des Verfahrens:

- **Intelligente Wahl des mittleren Potentials $U_i(A-1)$** - z.B. Woods Saxon, $H.O.+L^2+LS$
- Berechne Eigenfunktionen Φ_i des Hamiltonian $H_{\text{mittel}}(i)$
- Verwende Eigenfunktionen und **effektive NN-Wechselwirkung**, um das mittlere Potential $U_i(A-1)$ zu berechnen, dass jedes Teilchen spürt. → **verbesserter Mean-Field Hamiltonian**
- Berechne verbesserte Eigenfunktionen
- Berechne neues mittleres Potential mit verbesserten Wellenfunktionen
- **Verfahren konvergiert zu selbstkonsistentem Potential und Wellenfunktionen mit minimierter totaler Energie für den Grundzustand**
- → optimale Parameter für die effektive NN-Wechselwirkung

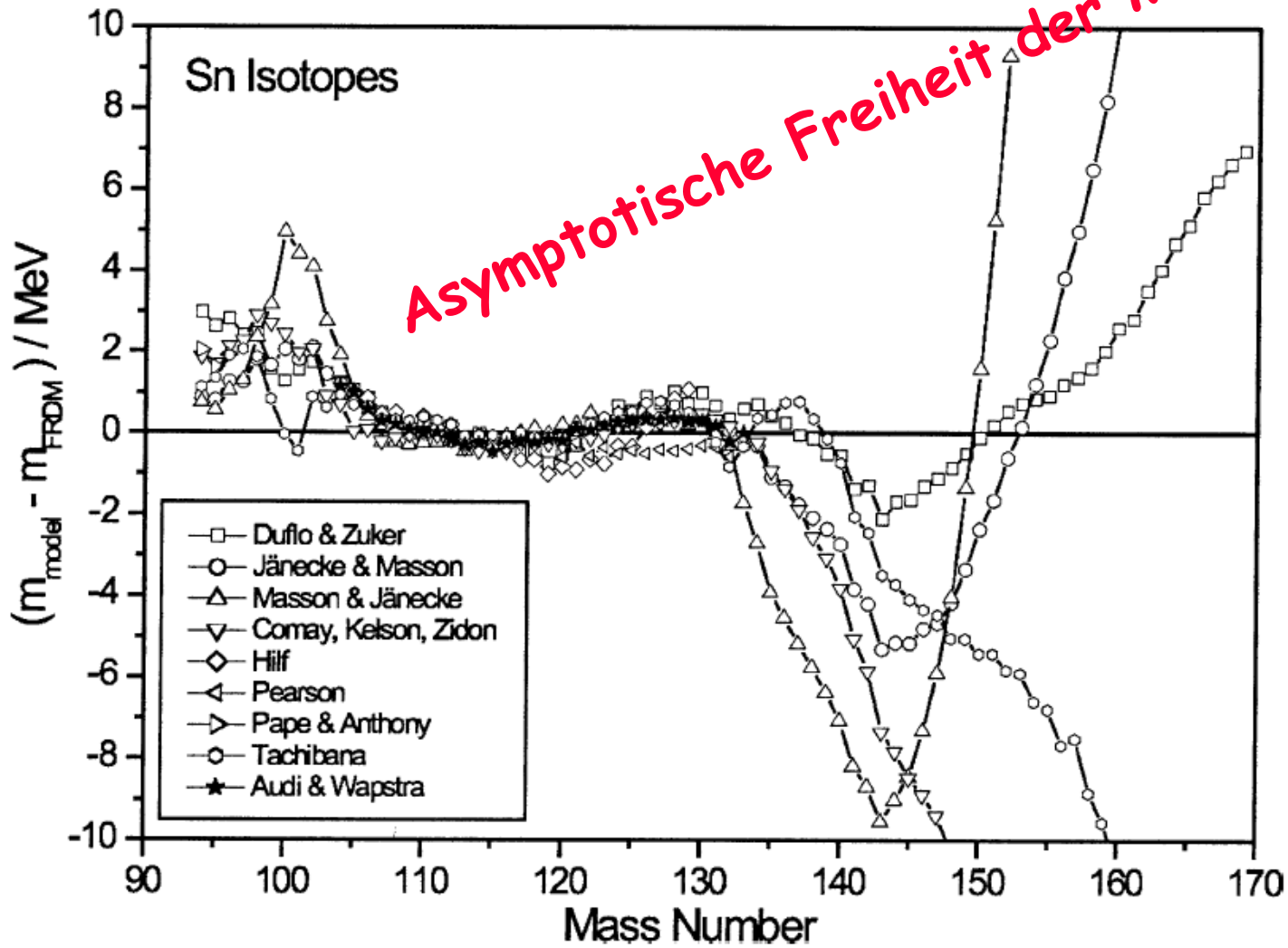
Details in Ring und Schuck: Hartree-Fock Methode

Vorhersagen mikroskopischer Modelle

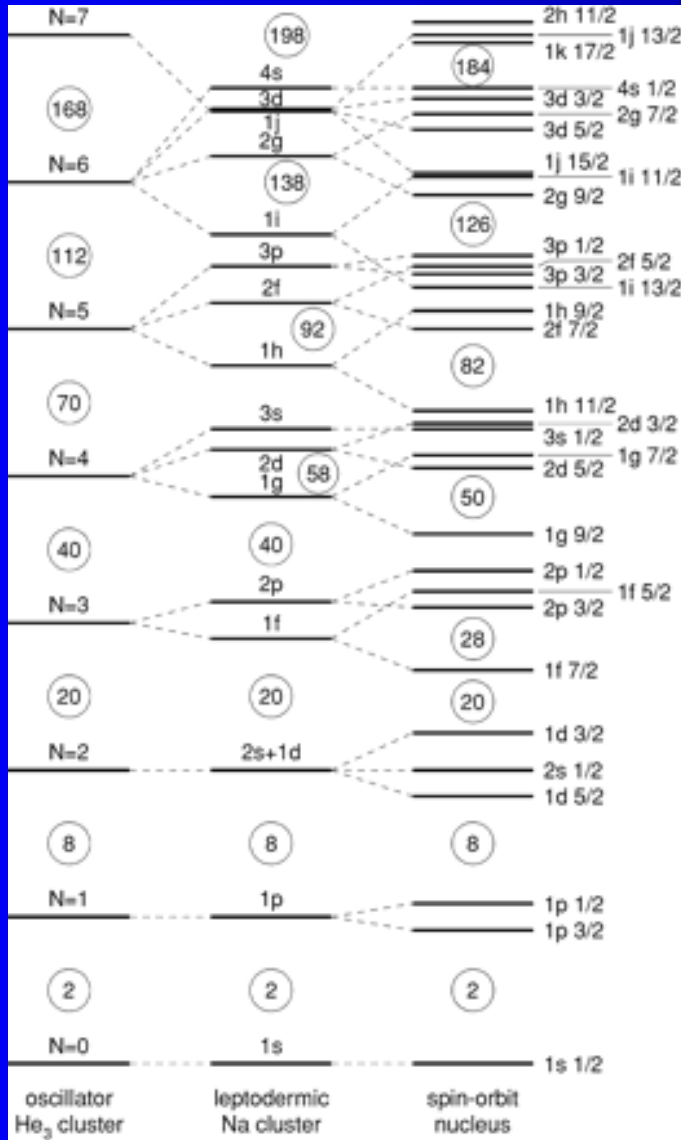


Mangel an Vorhersagekraft der Modelle: z.B. Massen

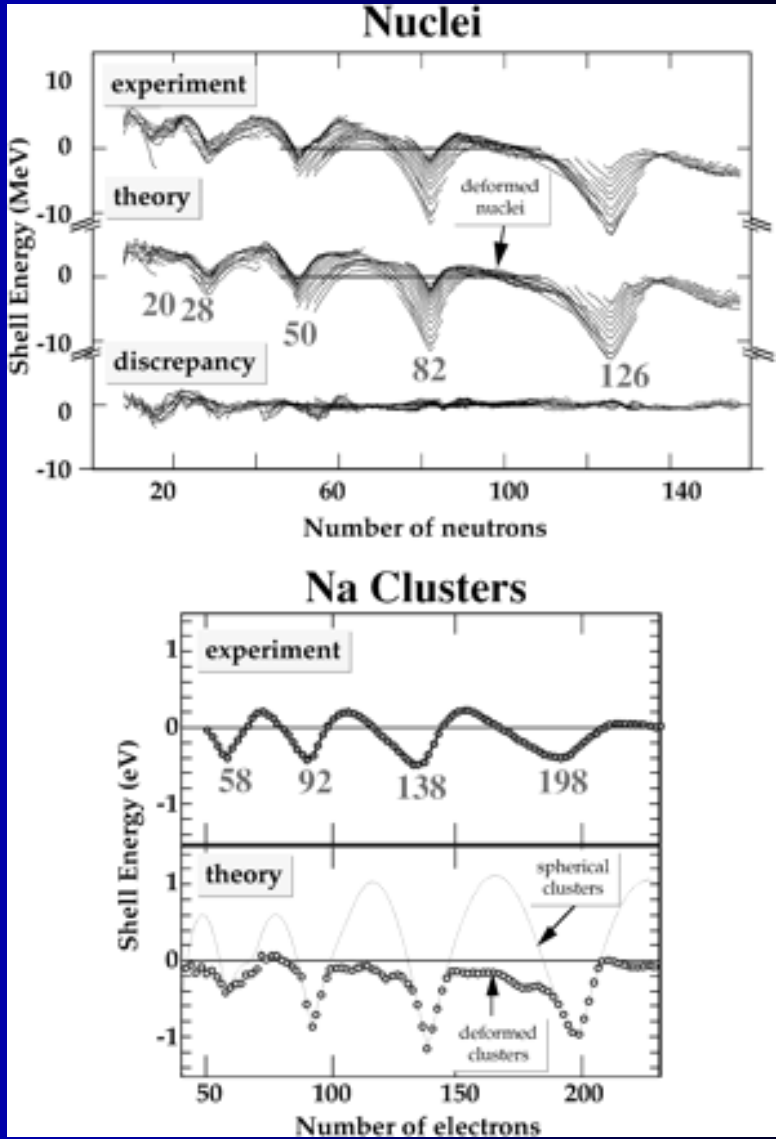
Asymptotische Freiheit der Modelle



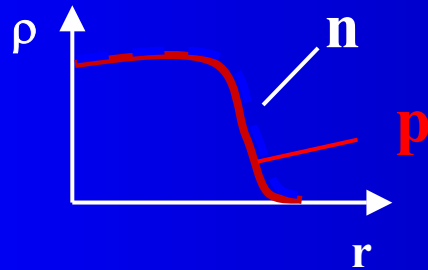
Spin-Bahn Kopplung in Kernen



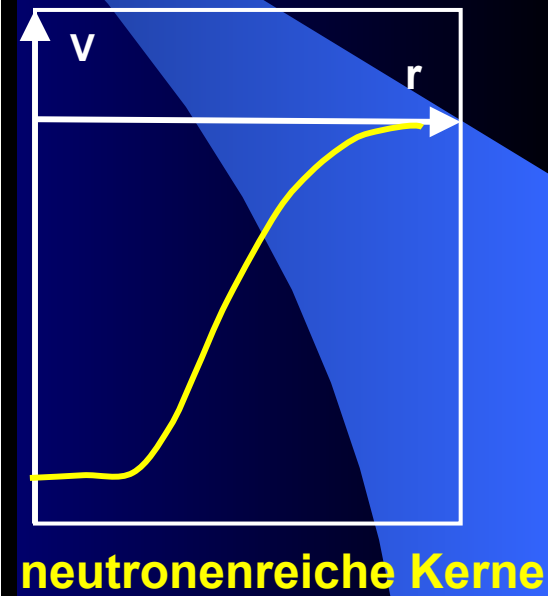
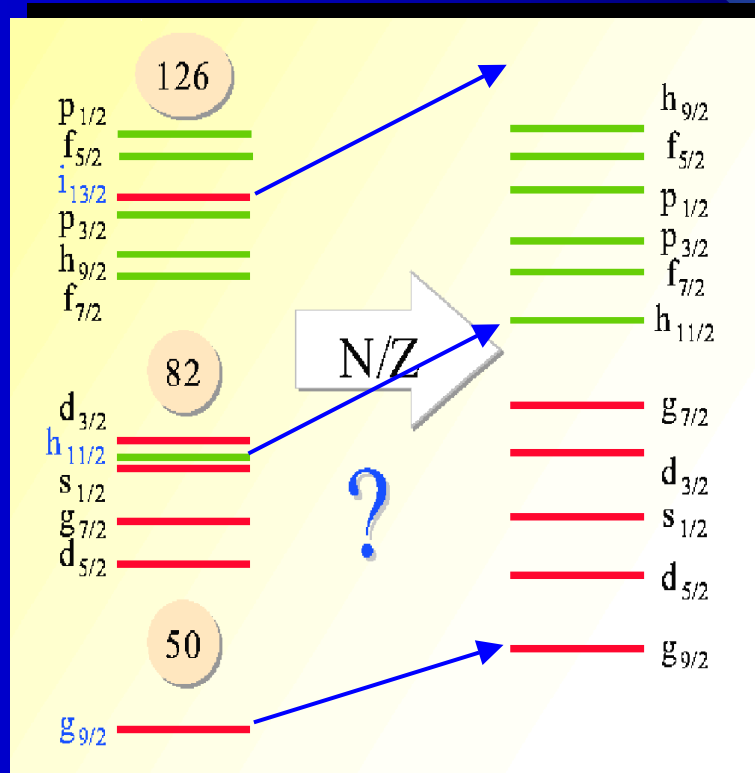
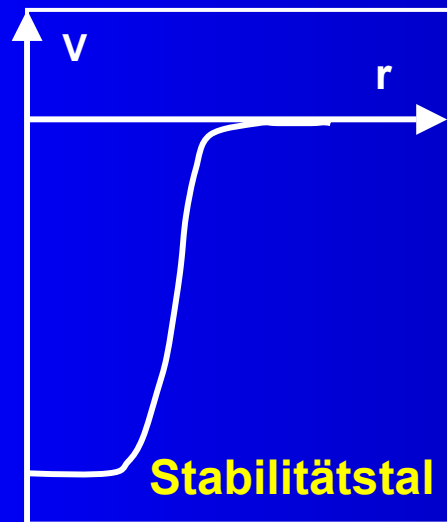
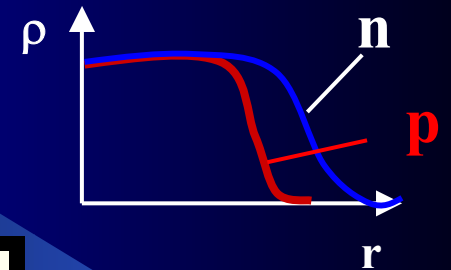
$$H.O. + L^2 + L \cdot S$$



Änderung der Schalenabschlüsse – Spin-Bahn Kopplung

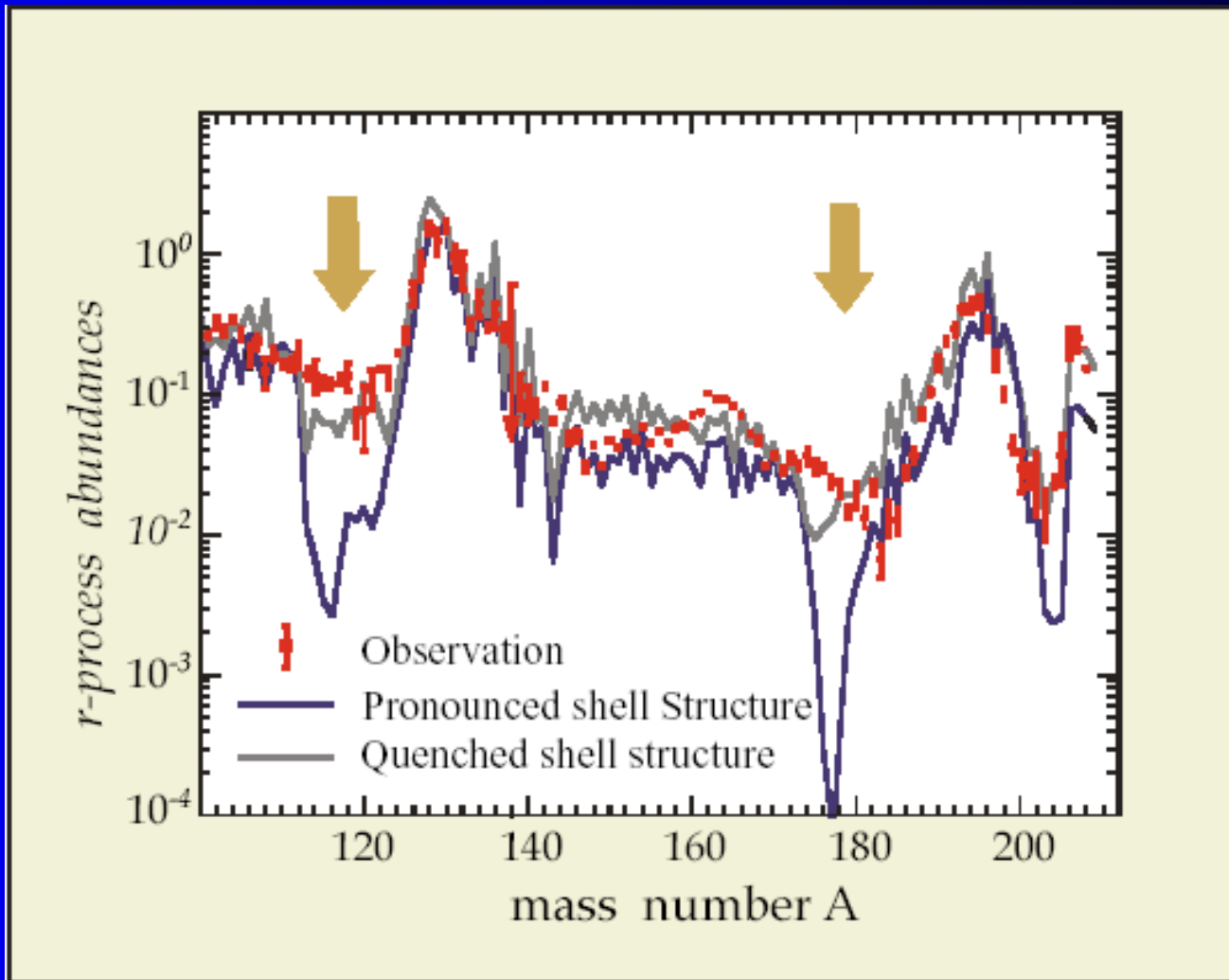


$$V_{LS} \propto \frac{d}{dr} V_{central}$$



Schalenstruktur kann durch schwache LS-Kopplung verwaschen werden!!

Beispiel: Synthese der schweren Elemente



Physik der bekannten Kerne ist unzureichend für die Erklärung der Elementsynthese

Aufbruch in die Terra Incognita

Nuclear Landscape

