

*KHuK Jahrestagung 2009*

# **Hadronen- und Kernphysik: Entwicklungen in der Theorie**

H.-W. Hammer

*Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik und*

*Bethe Center for Theoretical Physics*

*Universität Bonn*

# Hadronen- und Kernphysik

- Eigenschaften stark wechselwirkender Materie

⇒ Quantenchromodynamik (QCD)

- QCD-Thermodynamik

– ALICE, CBM, HADES, ...

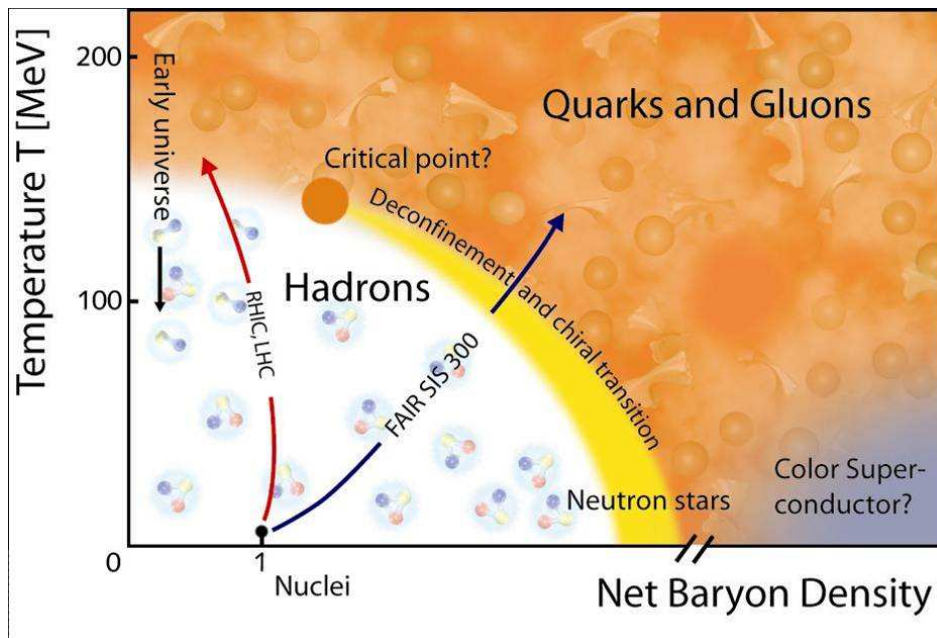
- Struktur der Hadronen

– COMPASS, PANDA, COSY, ELSA, MAMI, ...

- Kernstruktur und nukleare Astrophysik

– ISOLDE/REX-ISOLDE, NuSTAR, S-DALINAC, ...

# QCD-Thermodynamik

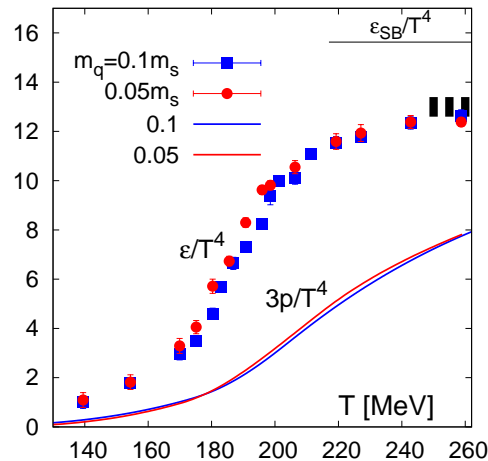


- QCD Phasendiagramm  
Phasenübergänge, Zustandsgleichungen,...
- Materie unter extremen Bedingungen
- Eigenschaften des Quark-Gluon Plasmas

# Theoretische Ansätze

- Gitter-QCD Bielefeld, Münster, Wuppertal,..
  - QCD-Phasendiagramm mit realistischen Quarkmassen bei kleinem  $\mu$
- Feldtheoretische Methoden Bielefeld, Heidelberg, Frankfurt,..
  - pQCD: rigorose Ergebnisse für hohe Dichten und Temperaturen
  - AdS/CFT: QGP als ideale Flüssigkeit
- Effektive Modelle Darmstadt, Frankfurt, München,..
  - Entwicklung von Intuition und physikalischem Verständnis
  - Modellierung des gesamten Phasendiagramms
- Transport und Nichtgleichgewicht Frankfurt, Heidelberg, Jena, Giessen,..
  - Modellierung von Schwerionenkollisionen
  - Korrelationen, Thermalisierung etc.

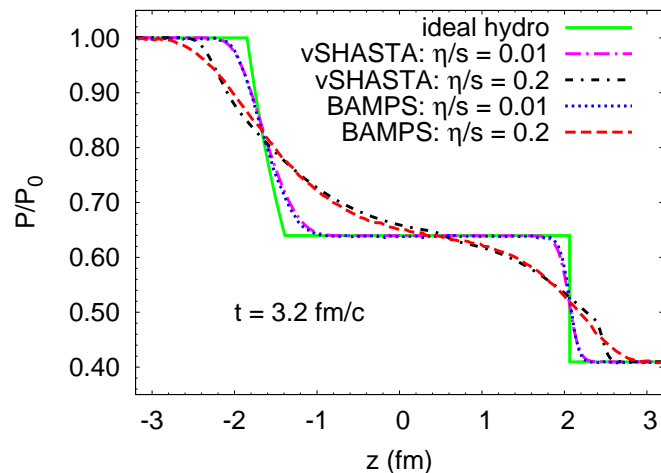
## QCD Zustandsgleichung auf dem Gitter



- Neue Rechnungen für  $m_l = 0.05m_s$   
 $\Rightarrow m_\pi = 154$  MeV
- Übergangsregion zu kleinerem  $T$   
 verschoben

Cheng, Karsch et al., arXiv:0911.2215

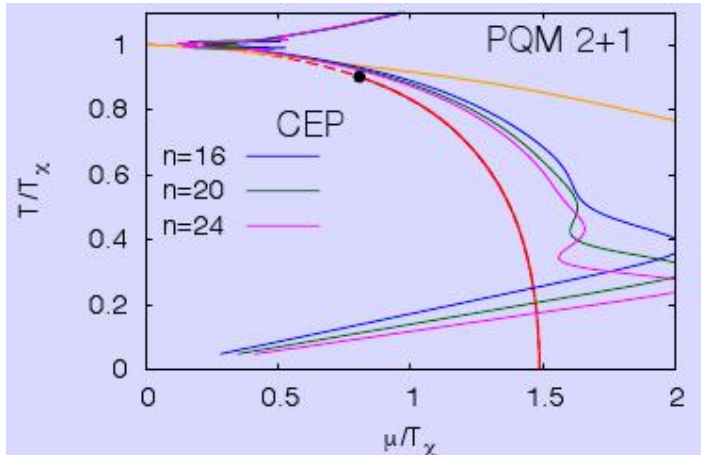
## Relativistische Schockwellen in viskoser Gluonmaterie



- Lösung des Riemann-Problems mit  
 mikroskopischer Partonkaskade
- Schockwelle nur für  $\eta/s < 0.2$

Bouras, Greiner, Rischke et al., PRL **103** (2009)  
 032301

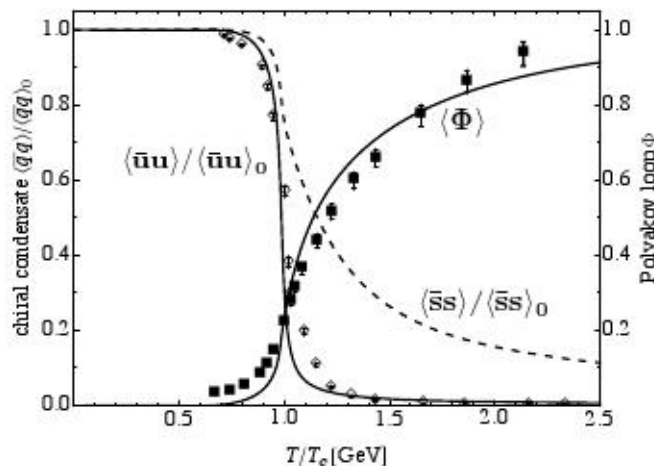
## QCD Phasengrenze im Polyakov-Quark-Meson Modell



- Taylorentwicklung der Zustandsgleichung
- Neue Technik: Algorithmisches Differenzieren

Schaefer, Wagner, Wambach, PoS CPOD2009 (017)

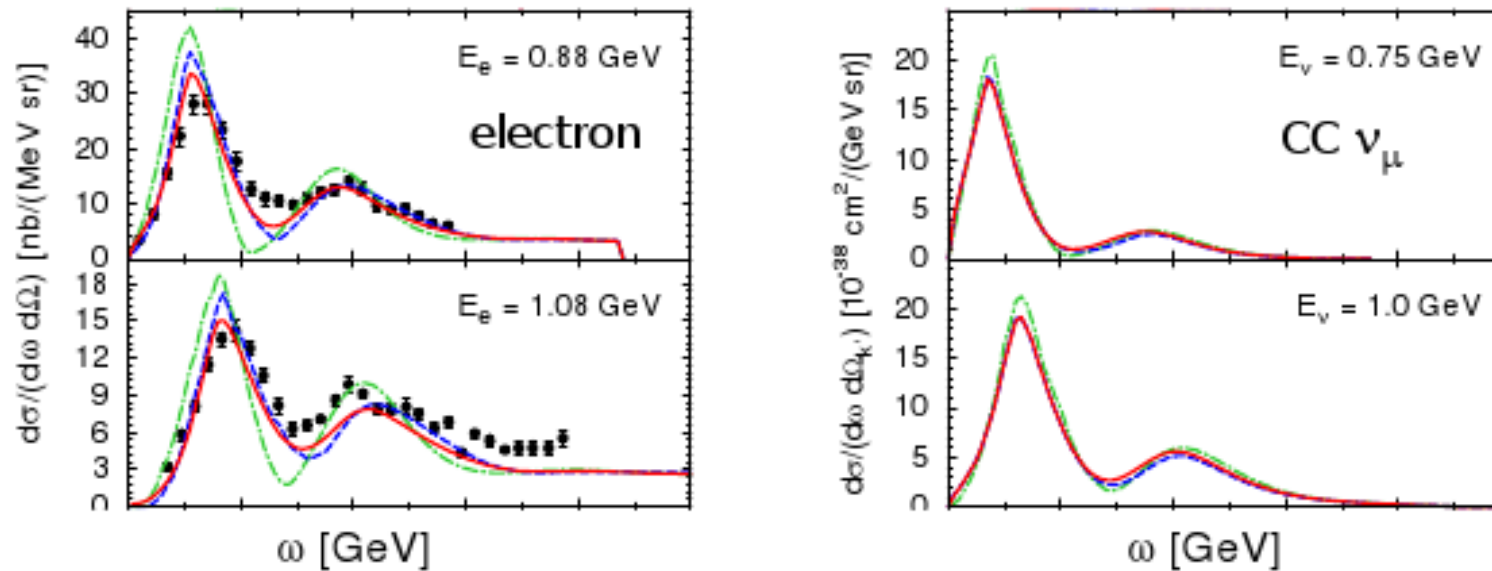
## Confinement und chirale Symmetrie im PNJL Modell



- Chirales Kondensat und Polyakov loop für realistische Quarkmassen
- Gute Übereinstimmung mit Gitterdaten (Bielefeld/BNL/Columbia)

Hell, Weise et al., arXiv:0911.3510

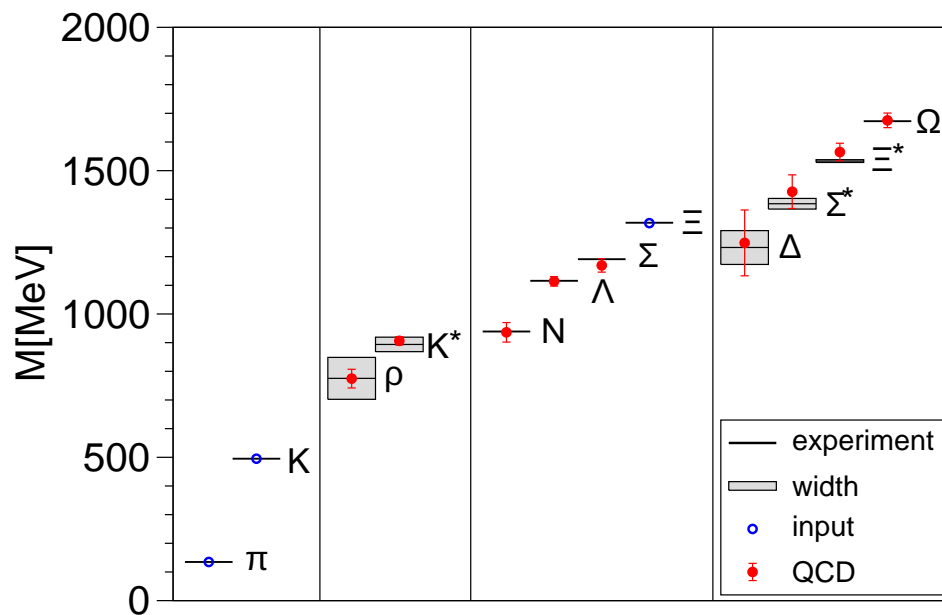
## Elektroschwach induzierte Reaktionen in GiBUU



- Konsistente Beschreibung von hadronischen und elektroschwachen Reaktionen
- Beispiel:  $e^-$  und  $\nu$ -Streuung an  $^{16}\text{O}$

Leitner, Buss, Alvarez-Ruso, Mosel, PRC **79** (2009) 034601

# Struktur der Hadronen



- QCD Anregungsspektrum:  
Erzeugung von Masse und Drehimpuls
- Symmetrien der QCD
- Wechselwirkungen der Hadronen

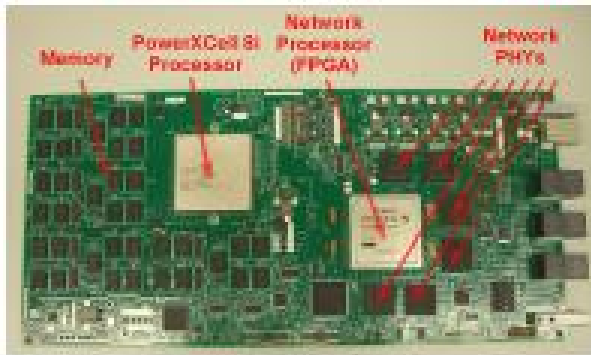
Budapest-Marseille-Wuppertal Coll., Science **322** (2008) 1224



# Theoretische Ansätze

- Gitter-QCD Bonn, Mainz, Regensburg, Wuppertal,..
  - Hadroneigenschaften mit realistischen Quarkmassen
- Schwinger-Dyson-Gleichungen Darmstadt, Tübingen,..
  - Verständnis der Quark-Gluon-Wechselwirkung, Confinement
- Effektive Feldtheorien Bonn, Jülich, Mainz, München,..
  - Entwicklung in kleinen Parametern (Quarkmassen, Impulse, ....)
  - Komplementär zu Gitterrechnungen: chirale Extrapolationen, endliches Volumen und Gitterkonstante
- Hadronische Modelle Bochum, Bonn, Darmstadt, Dresden, Giessen, Jülich  
Mainz, München, Tübingen,..
  - Beschreibung von Resonanzen, Streuung mit gekoppelten Kanälen, Hadronen im Medium
  - Hadronspektrum und Dynamik in kovarianten Quarkmodellen

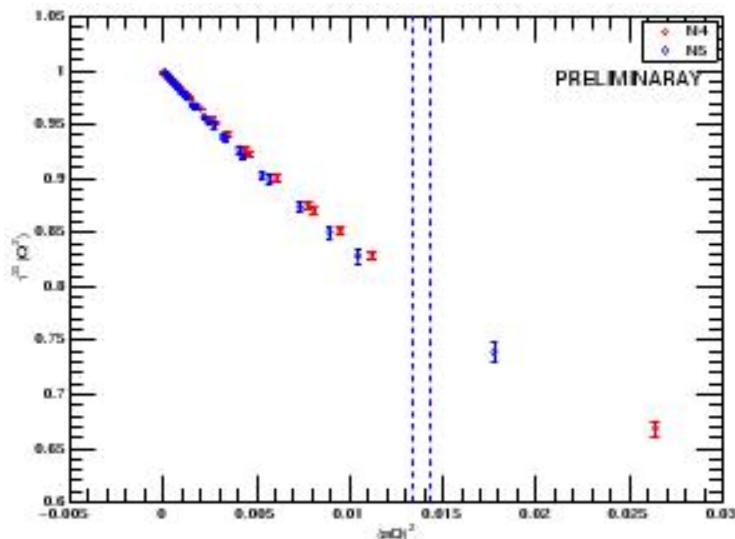
## QPACE: Dedizierter Parallelcomputer für Gitter-QCD



(b) QPACE Node card

- Neue Rechnerarchitektur
  - Basiert auf IBM PowerXCell 8i  $\Rightarrow$  Playstation 3
  - Optimiertes 3d Torus-Netzwerk, 26 TFlops/Rack
- Baier, Schäfer, Wettig et al., arXiv:0911.2174

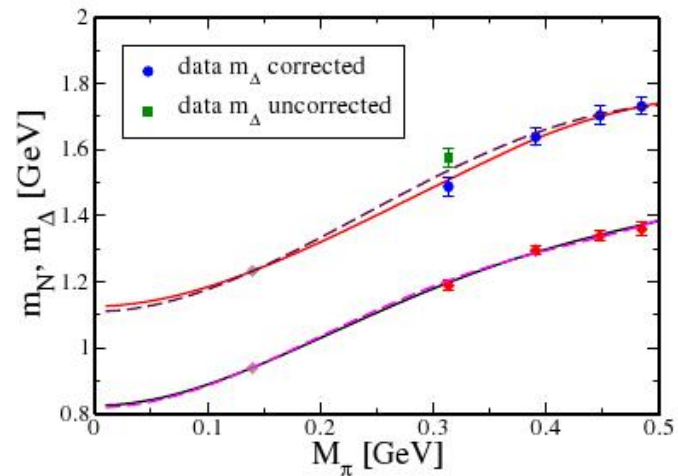
## Präzise Hadroneigenschaften vom Gitter



- Pion-Formfaktor mit  $m_\pi < 250$  MeV
- Verbesserte Algorithmen, wenig Rauschen
- Kontrolle von Gitterartefakten und endlichem Volumen

Capitani, Wittig et al., arXiv:0910.5578

# $\Delta(1232)$ im endlichen Volumen



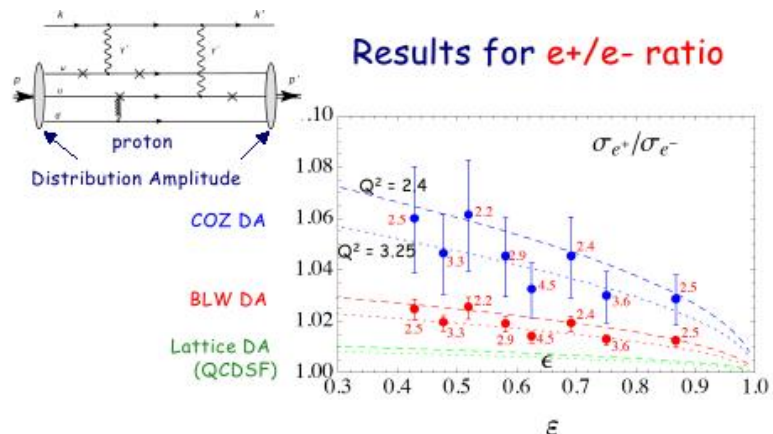
- Korrekturen wichtig für instabiles  $\Delta$   
 $\Rightarrow$  cusp
  - Fitstrategie für Bestimmung der Breite
- Meißner, Rusetsky et al., JHEP **06** (2009) 061

# Korrekturen zur Leiter-Näherung für Schwinger-Dyson

- BSE für  $\rho$ -Meson
- Effekte der Pionwolke,  
Gluon-Selbstwechselwirkung

Fischer, Williams, PRL **103** (2009)  
122001

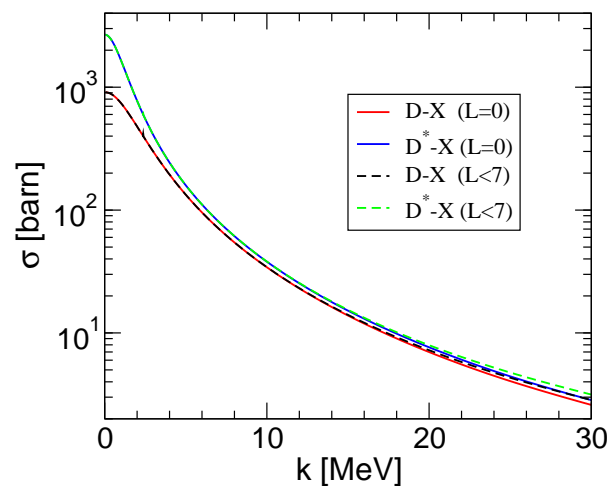
## $2\gamma$ Austausch in elastischer $ep$ Streuung



- $2\gamma$  Austausch bei großem  $Q^2$ : QCD-Faktorisierung
- Abhängigkeit von Nukleon-Verteilungsamplituden

Kivel, Vanderhaeghen, PRL **103** (2009) 092004

## EFT für Hadronische Moleküle



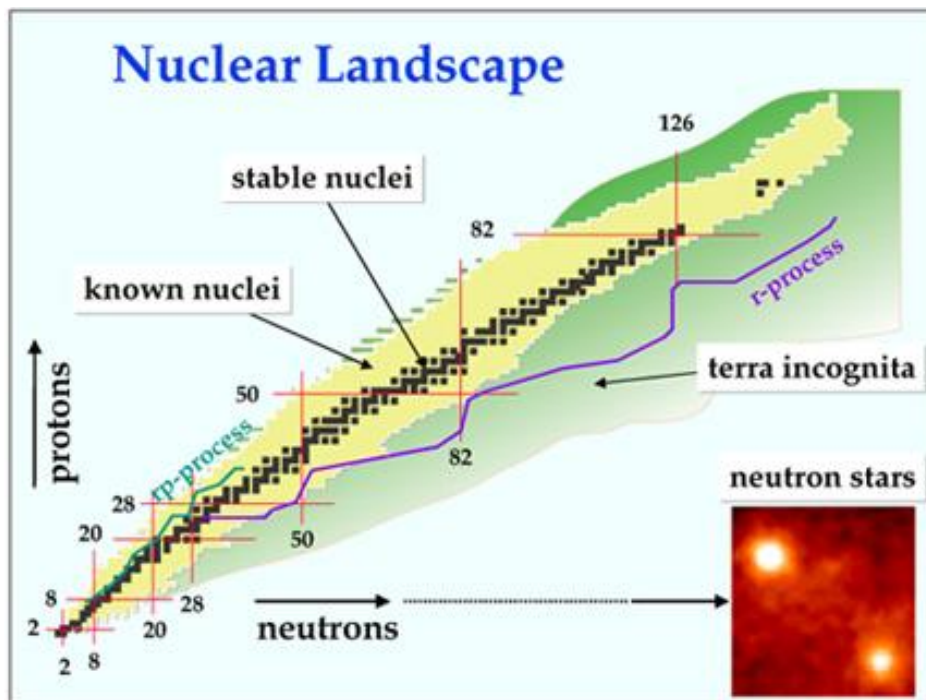
- Streuung von  $D^{0(*)}$  am  $X(3872)$  aus Bindungsenergie des  $X$

Canham, Springer, Hammer, PRD **80** (2009) 014009

- Spinpartner des  $Y(4660)$  aus heavy quark symmetry:  $Y_\eta(4616)$  als  $\eta'_c f_0$ -Molekül

Guo, Hanhart, Meißner, PRL **102** (2009) 242004

# Kernstruktur und nukleare Astrophysik



- Kernkräfte und Kernstruktur aus der QCD
- Synthese der Elemente und Kernreaktionen in Sternen
- Grenzen der Stabilität und exotische Kerne

# Theoretische Ansätze

- Effektive Feldtheorien für Kernkräfte

Bonn, Jülich, München,..

- QCD basierte  $NN$  und  $3N$ , ... Kräfte aus chiraler EFT
- effektive Feldtheorien für schwachgebundene Zustände

- Unitär transformierte Wechselwirkungen

Darmstadt,..

- Optimiert für Vielteilchenrechnungen: Renormierungsgruppe, Unitary Correlator Method,...

- (Ab initio) Vielteilchenmethoden

Bonn, Darmstadt, Jülich, Tübingen,..

- No-core shell model, coupled cluster, Greens function Monte Carlo,...
- Nukleare Gitterrechnungen
- Fermionic Molecular Dynamics, Quasiparticle RPA, Schalenmodell,...

# Theoretische Ansätze

- Nukleare Dichtefunktionale

Erlangen, Frankfurt, Giessen, München,..

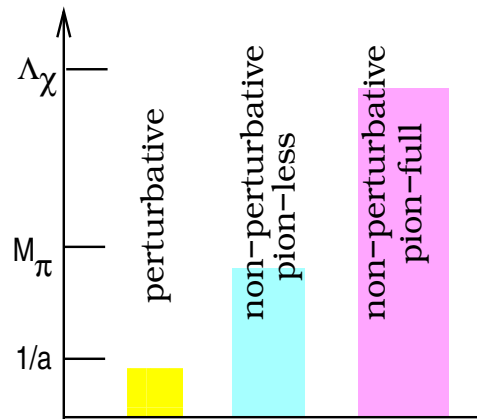
- Phänomenologisch oder aus chiraler EFT
- Beschreibung von schweren Kernen

- Nukleare Astrophysik

Darmstadt, Heidelberg,..

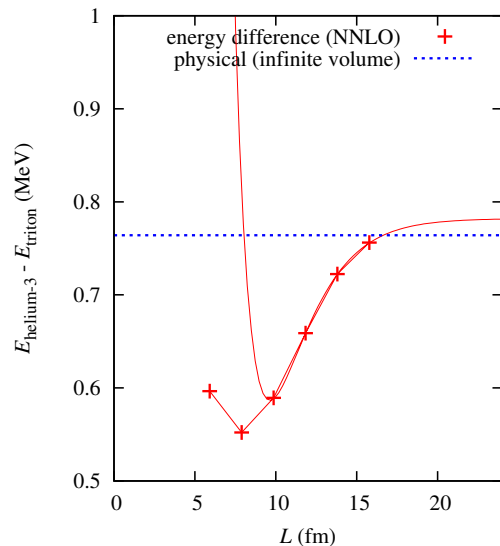
- Schalenmodellrechnungen in großem Maßstab
- Untersuchung von Szenarien der Nukleosynthese
- Signale für QCD-Phasenübergänge in Sternen

## EFT für Kernkräfte



- EFTs für unterschiedlichen Skalen
- Entwicklungen: unitärer Limes, chiraler Limes,
- Universelle Eigenschaften
- Symmetriebrechungsmuster der QCD
- Manifestation in Kernphysik?

## Nukleare Gittersimulationen

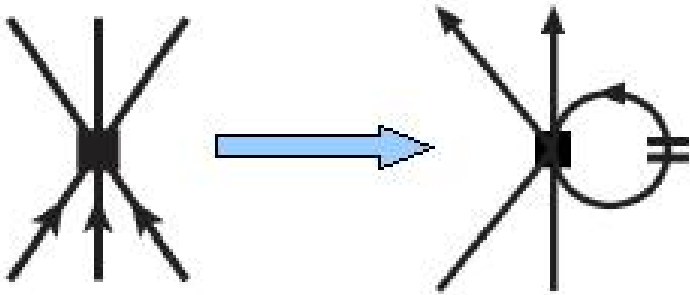


- Isospinbrechung in der Kernkraft
- ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{H}$  Massendifferenz (N2LO):  
 $\Delta E = 0.78 \text{ MeV} \Leftrightarrow \Delta E_{emp} = 0.76 \text{ MeV}$

Lee, Epelbaum et al., in preparation



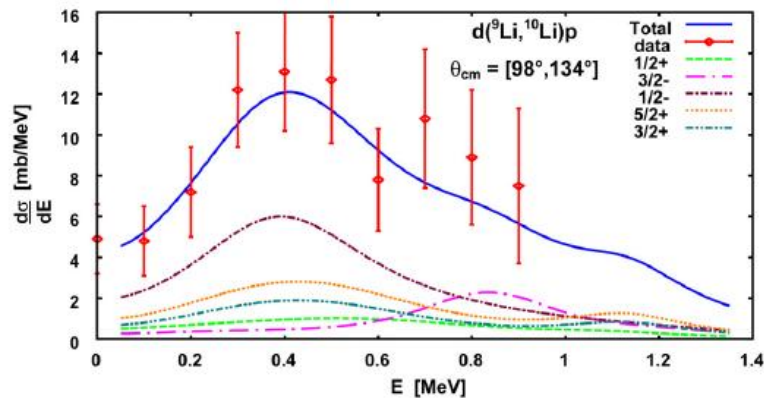
## Lebensdauer von $^{14}\text{C}$



- Radiokarbonmethode:  $\beta$ -Zerfall von  $^{14}\text{C}$
- Anomale Lebensdauer von 5730a erklärt durch führende 3-Nukleonkraft

Holt, Kaiser, Weise, PRC **79** (2009) 054331

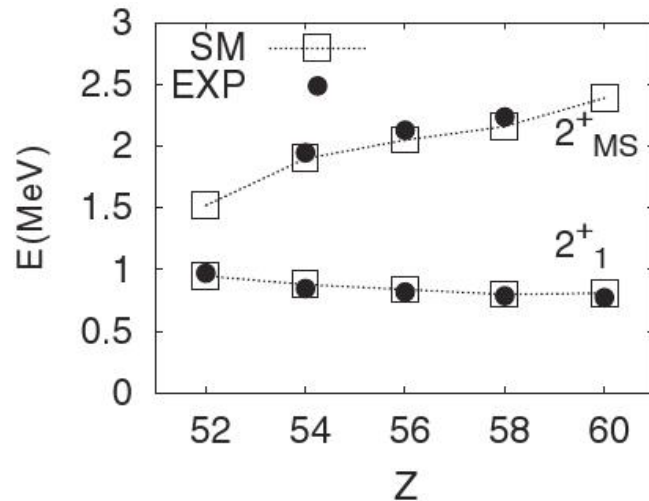
## Kontinuumsspektroskopie von $^{10}\text{Li}$



- Paarkorrelationen über der Emissionsschwelle mit Mean-Field Ansatz
- Transferreaktionen für Kontinuumspektroskopie

Orrigo, Lenske, PLB **677** (2009) 214

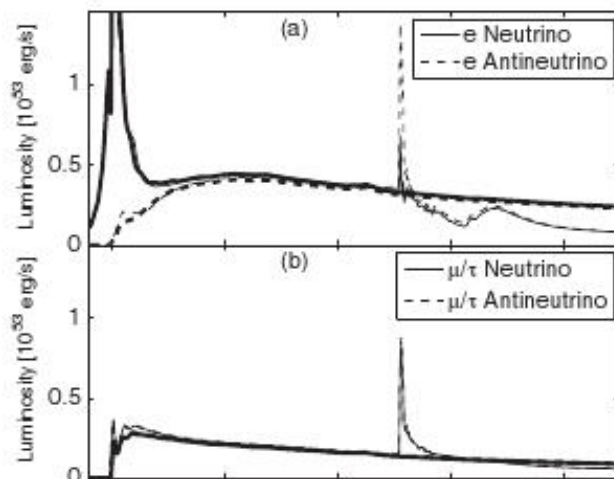
## Schalenmodellrechnungen im großen Maßstab



- Mikroskopische Studie für Zustände mit gemischter Symmetrie
- Angeregte Zustände für  $N = 80$  Isotone

Sieja, Martinez-Pinedo, Coquard, Pietralla, PRC **80** (2009) 054311

## QCD Phasenübergang in Supernovae



- Supernova-Simulation mit verschiedenen Zustandsgleichungen
- Signal für QCD Phasenübergang in emittierten Neutrinos

Sagert, Schaffner-Bielich et al., PRL **102** (2009) 081101

## Weitere Höhepunkte

- Schwerpunktsproblem in Kernstrukturrechnungen

Roth, Gour, Piecuch, Phys. Lett. B **679** (2009) 334

- Kernmatrixelemente im neutrinolosen doppelten  $\beta$ -Zerfall

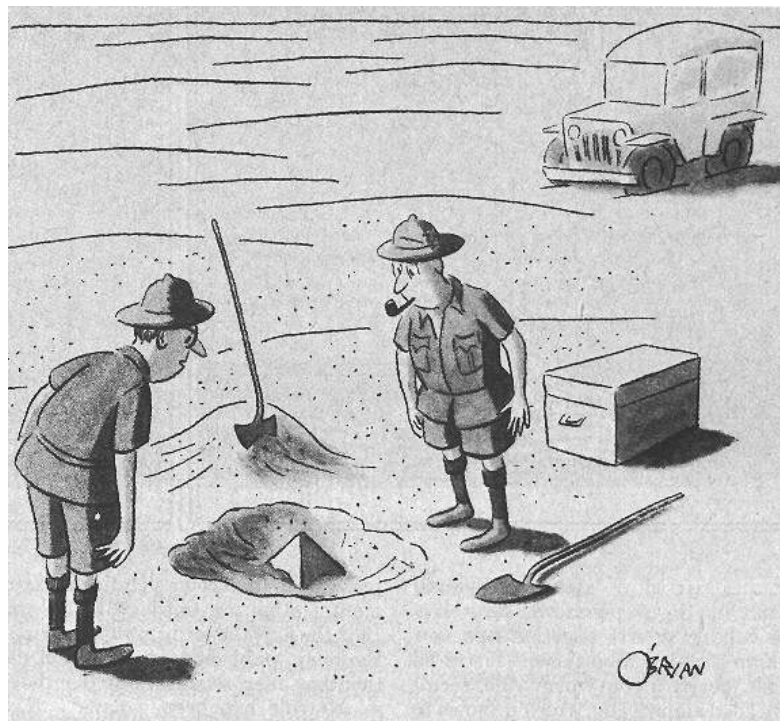
Rodin, Faessler, Phys. Rev. C **80** (2009) 041302(R)

- Mikroskopischer Ansatz für Anregungsenergien in Schwerionenkollisionen

Umar, Oberacker, Maruhn, Reinhard, Phys. Rev. C **80** (2009) 041601

- ....

# Fazit



*"This could be the discovery of the century. Depending, of course, on how far down it goes."*

- Konsistente Beschreibung stark wechselwirkender Materie über den ganzen Massenbereich auf der Basis von QCD in Reichweite

