

Der Kern der Dinge

– ein komplexes Vielteilchensystem

Auf der Erde findet man rund 270 verschiedene Spezies stabiler Atomkerne, die sich in der Anzahl ihrer Protonen und Neutronen unterscheiden. Dazu kommen mehrere tausend instabile Kerne, von denen viele noch völlig unerforscht sind. Jeder einzelne stellt ein hochkomplexes quantenmechanisches Vielteilchenproblem dar, das die moderne Kernstrukturphysik mit neuen experimentellen und theoretischen Methoden zu entschlüsseln sucht. Eine besondere Herausforderung ist dabei der Brückenschlag vom Kern als System wechselwirkender Protonen und Neutronen zur Quantenchromodynamik, der Theorie der starken Wechselwirkung.

► *The nucleus* – a complex many-body system

On earth there are about 270 different species of atomic nuclei which are distinguished by the number of protons and neutrons they contain. In addition there are several thousand unstable nuclei, many of those completely unexplored. Each one is a highly complex quantum many-particle system which modern nuclear structure physics tries to decipher with novel experimental and theoretical techniques. A special challenge is to link the view of the nucleus as an interacting system of protons and neutrons with Quantum Chromodynamics, the theory of strong interaction.

Robert Roth / Hans Feldmeier • Der Kern eines Atoms ist 100.000.000.000 mal kleiner als der Kopf einer Stecknadel und doch machen die Atomkerne mehr als 99,9% der Masse aller uns umgebenden Materie aus. Schon das macht deutlich, wie wichtig die Eigenschaften dieser schwergewichtigen Winzlinge für das Verständnis unserer Welt sind. Eine Vielzahl von Fragen drängen sich auf: Welche Kerne sind gebunden und was ist ihre Bindungsenergie? Welche davon sind wirklich stabil und welche zerfallen nach kurzer Zeit wieder? Wie verhalten sich Kerne wenn ihnen Energie zugeführt wird, welche Anregungsarten existieren? Wie beeinflussen diese Eigenschaften die Bildung der Kerne in verschiedenen astrophysikalischen Szenarien und den Lebenszyklus von Sternen (siehe den Beitrag von Sonnabend/Martinez-Pinedo)? Die Beantwortung dieser Fragen setzt ein detailliertes Verständnis der komplexen Dynamik im Inneren der Atomkerne voraus – dies ist ein zentrales Ziel der experimentellen und theoretischen Kernstrukturforschung.

Im einfachsten Bild ist der Atomkern aus Protonen und Neutronen, den sogenannten Nukleonen, als „elementaren“ Bausteinen zusammengesetzt (siehe „Nuklidkarte“ S. 29 in diesem Magazin). Dieses

Bild erfasst aber nicht die ganze Komplexität der Kerne. Heute wissen wir, dass die Nukleonen keine strukturlosen und „elementaren“ Teilchen sind – sie selbst sind wieder Vielteilchensysteme

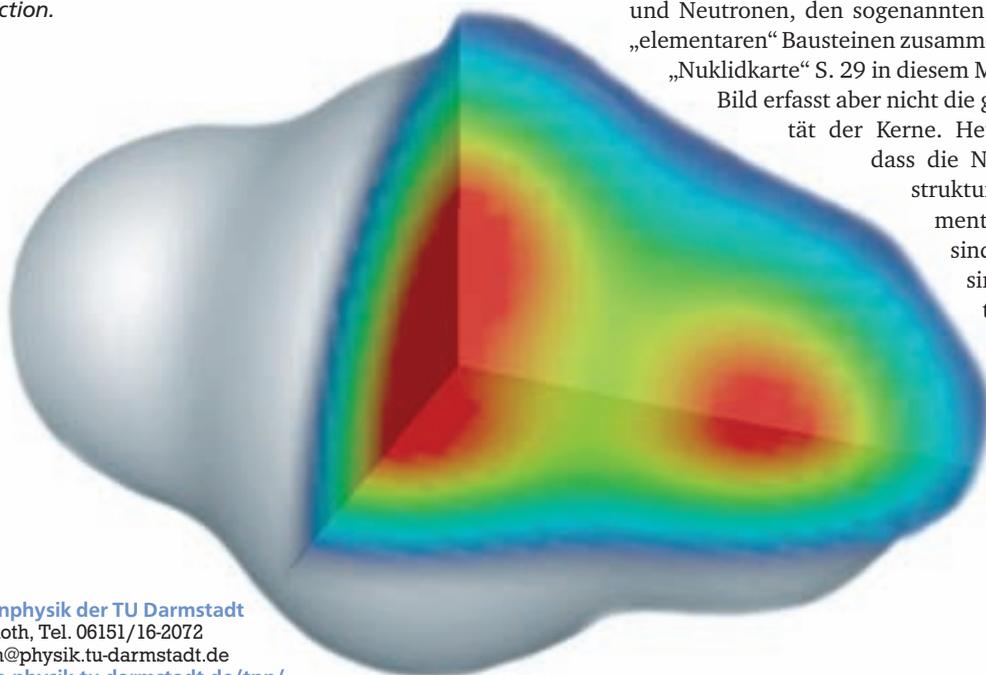


Abbildung 1
Isotop ^{20}Ne

• Institut für Kernphysik der TU Darmstadt
Prof. Dr. Robert Roth, Tel. 06151/16-2072
E-Mail: robert.roth@physik.tu-darmstadt.de
<http://crunch.ikp.physik.tu-darmstadt.de/tnp/>

• GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
Prof. Dr. Hans Feldmeier, Tel. 06159/71-2744
E-Mail: H.Feldmeier@gsi.de
www.gsi.de

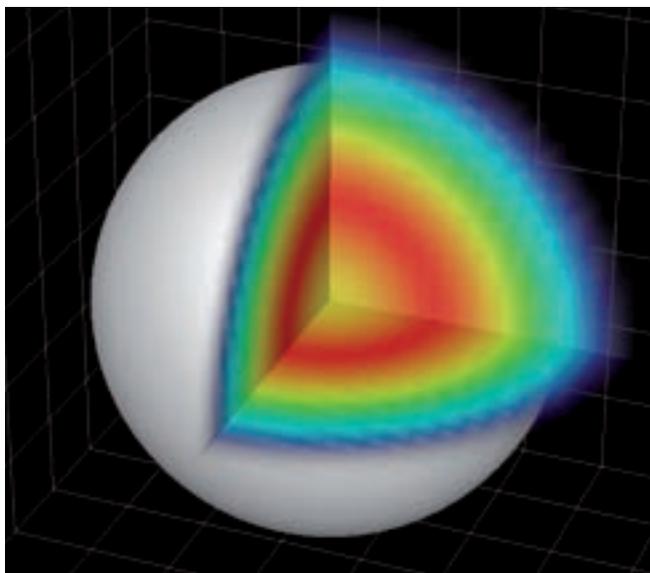
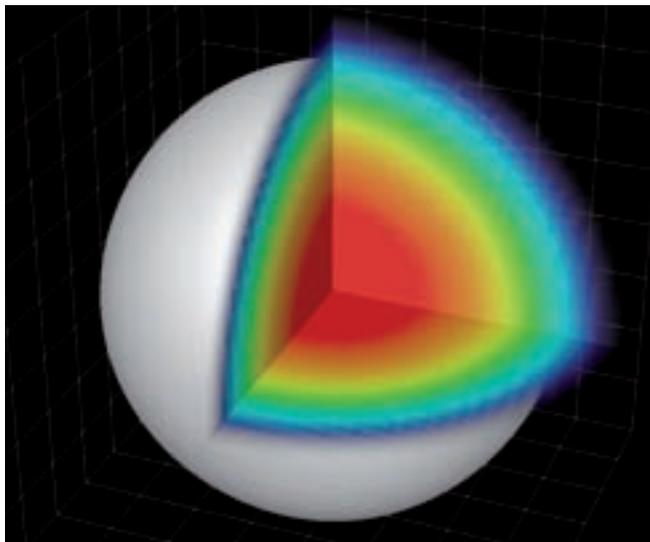
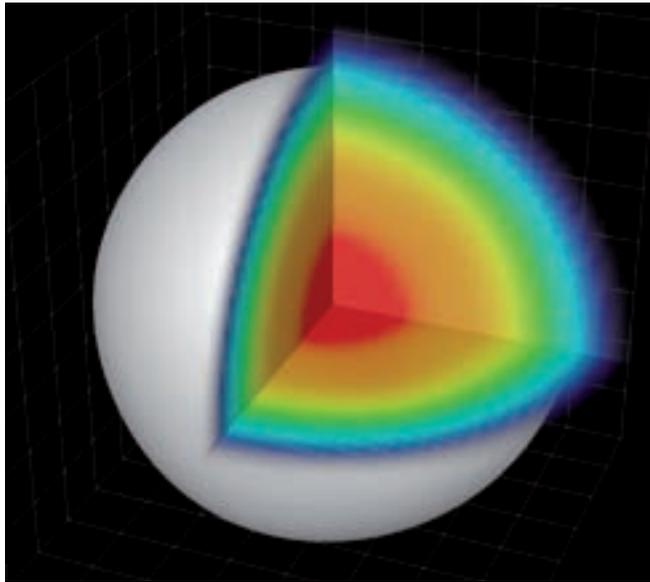
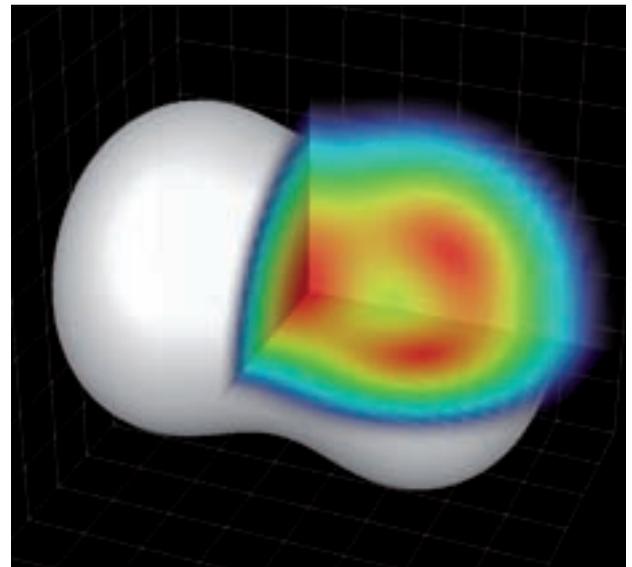


Abbildung 2-5

Intrinsische Dichteverteilung der Isotope ^{48}Ca , ^{40}Ca , ^{16}O und ^{28}Si , wie sie im Rahmen der FMD vorhergesagt werden.



zusammengesetzt aus Quarks und Gluonen. Die komplizierte Dynamik dieser Bausteine wird im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, beschrieben (siehe den Beitrag von Fischer/Wambach). Der Aufbau eines Nukleons ist alles andere als einfach. In einem vereinfachten Bild kann man es sich als Bindungszustand dreier Quarks vorstellen, die durch den Austausch von Gluonen zusammengehalten werden. Die durch die Gluonen vermittelte Wechselwirkung ist so stark, dass man die innere Struktur eines Nukleons nur unter hohem Energieaufwand ändern kann. Deshalb sind für die niederenergetischen Phänomene der Kernstrukturphysik die Nukleonen die relevanten Freiheitsgrade und nicht die Quarks. Der Komplexität der zugrundeliegende QCD entkommt man damit aber nicht. Sie spiegelt sich in der Wechselwirkung zwischen den Kernbausteinen wider.

Vom Standpunkt der QCD aus handelt es sich bei der Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung um Randeffekte der starken Wechselwirkung, die die Quarks im Nukleon bindet. Diese Restwechselwirkung lässt sich im Prinzip aus den fundamentalen Gleichungen der QCD bestimmen – ein extrem schwieriges Problem. Die chirale effektive Feldtheorie stellt eine praktikablere Methode dar, eine QCD-basierte Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung für kleine Ener-

gien zu bestimmen. Sie nutzt die Symmetrien der QCD und ein Ordnungsschema, das die möglichen Beiträge nach ihrer Größe sortiert. Die Parameter werden durch Anpassung an präzise experimentelle Daten bestimmt.

Die Bestimmung der nuklearen Wechselwirkung ist jedoch nur der erste Schritt. Der zweite und noch anspruchsvollere Schritt ist die Lösung des quantenmechanischen Vielteilchenproblems für Atomkerne bestehend aus bis zu ca. 300 Nukleonen oder auch für „unendlich“ viele Nukleonen im Neutronenstern. Schon das klassische Mehrteilchen-

problem ist nur mit aufwändigen numerischen Methoden handhabbar. Der Quantencharakter des Atomkerns und die komplexe Struktur der nuklearen Wechselwirkung machen die Aufgabe nicht einfacher. Nichtsdestoweniger sind in jüngster Zeit – motiviert durch die neuen experimentellen Möglichkeiten zum Studium exotischer Kerne z.B. mit den NuSTAR Experimenten bei FAIR, die Verfügbarkeit QCD-basierter Wechselwirkungen und die kontinuierlich wachsende Computerleistung – eine Reihe neuer innovativer Methoden entwickelt worden. Die Theoriegruppen der TU Darmstadt und der GSI spielen hierbei eine internationale Vorreiterrolle.

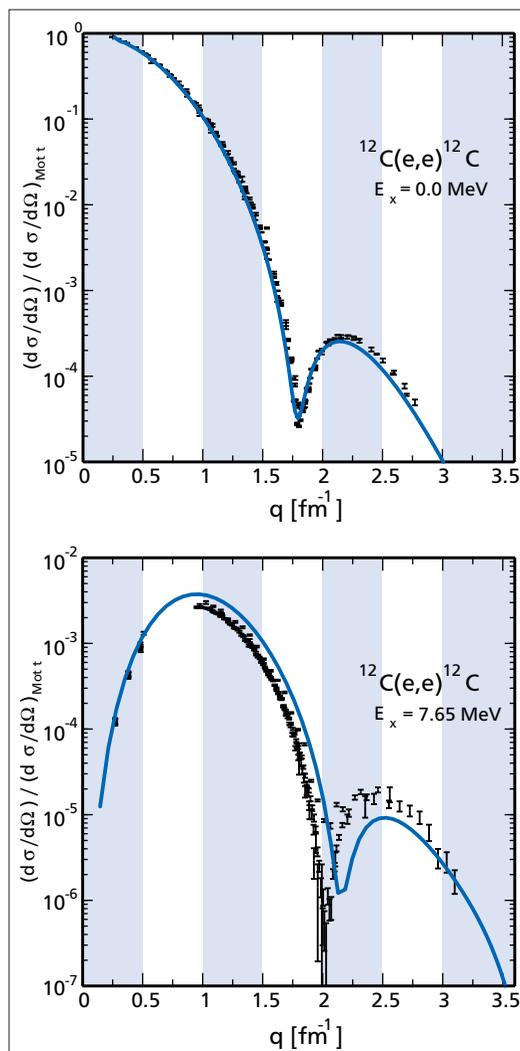
Ein Beispiel sind sogenannte ab initio Methoden, die eine exakte numerische Lösung des Vielteilchenproblems anstreben. Während solche Verfahren bisher nur für leichte Kerne mit bis zu ca. 12 Nukleonen anwendbar waren, zielen neue Entwicklungen auf Kerne mit bis zu 100 Nukleonen. Hierbei kommen Methoden zum Einsatz, die auch in anderen Gebieten, z.B. der Quantenchemie, eingesetzt werden. Aktuelle Beispiele sind Coupled-Cluster-Zugänge und selektive Konfigurationsmischungsmethoden, deren Übertragung auf die Kernstrukturphysik an der TU Darmstadt vorangetrieben wird. Umgekehrt sind neue methodische Entwicklungen oft direkt auf andere Quantensysteme übertragbar, z.B. ultrakalte Quantengase in magnetischen Fallen oder optischen Gittern (siehe den Beitrag von Birkel/Walther).

Neben den ab initio Methoden werden eine Vielzahl von Näherungsmethoden angewendet, die Zugriff auf die gesamte Vielfalt von Kernstrukturphänomenen in allen Massenbereichen erlauben. Der Atomkern ist mehr als eine Ansammlung unabhängiger Nukleonen, deshalb ist bei der Entwicklung solcher Näherungen die adäquate Behandlung von Korrelationen unterschiedlichster Art entscheidend. Sie reflektieren die Eigenschaften der nuklearen Wechselwirkung und charakterisieren die individuellen Eigenschaften der Kerne. Wie so oft, gilt auch bei Atomkernen, dass das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile.

Methoden zur Behandlung solcher Korrelationen sind eine Spezialität der Darmstädter Kernstrukturtheoretiker. Neben kurzreichweitigen Korrelationen, die das Verhalten der Nukleonen im Kern dominieren sobald sie sich nahe kommen, gibt es

Abbildung 6

Formfaktor (Beugungsbild) des Grundzustandes und Übergangsformfaktor für den Hoyle-Zustand in ^{12}C aus FMD Rechnungen und Experimenten, unter anderem am S-DALINAC.



langreichweitige Korrelationen, die die intrinsische Form des Atomkern beeinflussen können. Ein spezieller Typ sind die Clusterkorrelationen, bei denen sich Klumpen von Nukleonen innerhalb des Kerns bilden. Die Beschreibung solcher Clusterstrukturen ist besonders schwierig, aber z.B. in der Fermionischen Molekulardynamik (FMD) möglich, die bei der GSI entwickelt wurde [siehe H. Feldmeier, T. Neff; Physik Journal 4 (2005) Nr. 1]. Die Abbildungen 1 – 5 zeigen die dreidimensionale räumliche Verteilung der Nukleonen, die sogenannte intrinsische Dichteverteilung, für verschiedene Kerne wie sie die FMD vorhersagt.

Kohlenstoff kann zum Eingangstor für Verschmelzung werden.

Kohlenstoff, ein Element ohne das Leben auf der Erde in der uns bekannten Form nicht möglich ist, wird zum größten Teil in roten Riesen durch Fusion von drei Heliumkernen erzeugt. Kohlenstoff ist kein seltenes Element, sondern reichlich vorhanden, was an der außergewöhnlich hohen Fusionsrate liegt. Der Grund dafür ist eine spezielle Form der Anregung des Kohlenstoffkerns in einen Zustand, der eine Art Quantengas aus drei Heliumkernen darstellt und der durch seine resonante

ANZEIGE

**Schweißtechnische
Lehr- und Versuchsanstalt
Mannheim GmbH**



Achtung Förderungsmöglichkeit auch für Studenten im Jahr 2009:

EU-Fördermaßnahme

30% der Lehrgangsgebühren können für Teilnehmer aus Baden Württemberg durch die EU getragen werden.

Ihre Perspektiven für die Zukunft auf dem deutschen und weltweiten Arbeitsmarkt.
Internationaler Schweißfachingenieur-Tageslehrgang (Mo - Fr)
 Februar 2009 bis Mai 2009 und August bis November 2009
Wochenendlehrgang (Fr+Sa)
 Oktober 2009 bis Juni 2010
Zugangsvoraussetzung: Studium mit Diplom-, BSc- oder MSc-Abschluss an BA, FH, TH, Uni. Sonderregelungen zur Anerkennung von Teil 1

**Schweißtechnische
Lehr- und Versuchsanstalt
Mannheim GmbH**



Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mannheim GmbH
Personalwesen
 Postfach 12 17 52 • 68068 Mannheim • Telefax (0621) 3004-291 • Telefon (0621) 3004-123
 Hausadresse: Käthe-Kollwitz-Straße 19 (Neuer Meßplatz) • 68169 Mannheim
 Internet: www.slv-mannheim.de E-Mail: info@slv-mannheim.de

INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT



NEUBERGER

MEMBRANPUMPEN- TECHNOLOGIE VOM FEINSTEN...

■ Ob für Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten – KNF Neuberger bietet ein breites Angebot an Pumpen und Systemen.

■ Für unverfälschtes Fördern, Dosieren, Komprimieren und Evakuieren.

■ Als OEM- oder tragbare Ausführungen.

■ Mit einem variablen Produktprofil für kundenspezifische Lösungen.

... für anspruchsvolle Anwendungen z.B. in den Bereichen:

- Medizintechnik
- Analysetechnik
- Verfahrenstechnik
- Lebensmitteltechnik
- Reprrotechnik
- Energietechnik
- Forschung

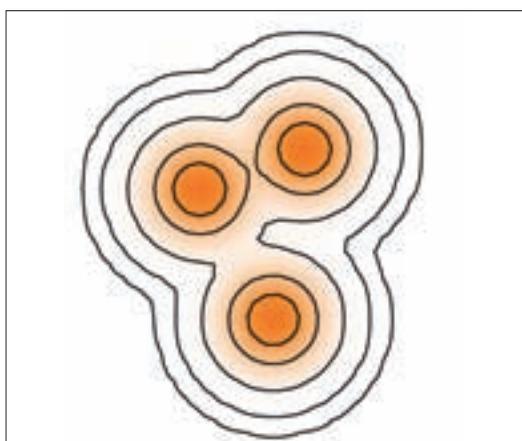
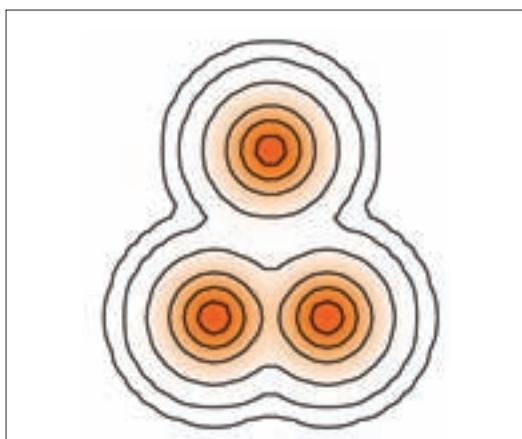
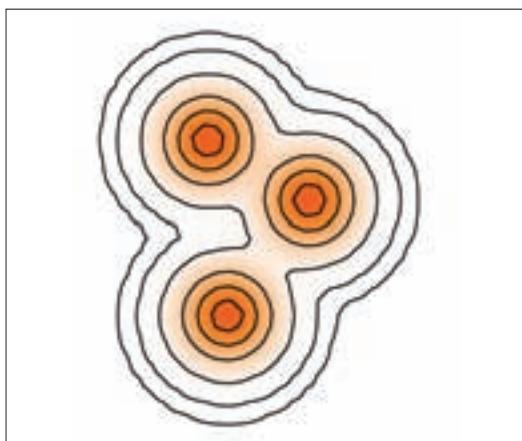


www.knf.de

KNF Neuberger GmbH ■ Alter Weg 3 ■ D 79112 Freiburg
 Tel. 07664/5909-0 ■ Fax 07664/5909-99 ■ E-Mail info@knf.de

**BESUCHEN SIE UNS AUF DER ACHEMA 2009
 HALLE 8.0 UND HALLE 6.1**

Abbildung 7–9
Schnappschüsse
der intrinsischen
Dichteverteilung
des Hoyle-Zustandes
in ^{12}C berechnet in
der FMD.



Struktur das Eingangstor für die Verschmelzung darstellt. Dieser Zustand ist so bedeutsam, dass er nach dem englischen Astrophysiker Sir Fred Hoyle benannt wurde, der seine Existenz vorhergesagt hat.

Präzise Messungen am supraleitenden Linearbeschleuniger am Institut für Kernphysik haben diese Vorstellungen untermauert. Durch Streuung von Elektronen am Kohlenstoffkern kann man aus dem gemessenen Beugungsmuster sowohl die Ladungsverteilung des Grundzustands als auch die Übergangsdichte in den resonanten Hoyle-Zustand bestimmen. In Abb. 6 ist der gemessene Formfaktor (Intensität des Beugungsmusters) sowohl für die elastische Streuung als auch für den Fall dargestellt, wo das Elektron Energie an den Kern abgibt und damit die Resonanz anregt. Die Datenpunkte werden verglichen mit Rechnungen der FMD. Die gute Übereinstimmung bestätigt die von der FMD vorhergesagte innere Struktur dreier lose gebundenen Heliumkerne, wie wir sie in Abb. 7–9 in Form von Schnappschüssen des resonanten Quantenzustands sehen.

Die Kernstrukturphysik steht am Beginn einer neuen Ära. Neue experimentelle Möglichkeiten und theoretische Innovationen treiben unser Verständnis der mikroskopischen Welt der Atomkerne auf ein bisher unerreichtes Niveau und spannen den Bogen von der QCD zur Astrophysik. Darmstadt – im Zusammenspiel des GSI Helmholtzentrums für Schwerionenforschung mit FAIR und dem Institut für Kernphysik der TU Darmstadt – ist weltweit einer der Brennpunkte dieser dynamischen Entwicklungen. Die Kern der Dinge ist und bleibt spannend.



Robert Roth ist Professor für theoretische Kern- und Vielteilchenphysik. Er befasst sich im Rahmen des SFB 634 und von HIC for FAIR mit neuen Methoden zur Beschreibung von Quanten-Vielteilchensystemen.



Hans Feldmeier ist Wissenschaftler bei der GSI und Professor an der TU Darmstadt. Sein Arbeitsgebiet umfasst die theoretische Kernphysik in voller Breite von Kernstruktur und -reaktion bis zur nuklearen Astrophysik.