

# DER ATOMKERN

## **Neutronen**

Zwiespältige Stabilität

## **Protonen**

Die Frage der Größe

## **Teilchenbeschleuniger**

Blick in die subatomare Welt



Mike Beckers  
E-Mail: [beckers@spektrum.de](mailto:beckers@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
die Suche nach dem Allerkleinsten in der Materie fasziniert die Menschen seit der Antike, aus der die Atome ihren Namen haben. Längst wissen wir, dass diese aus einer Elektronenhülle und einem Kern bestehen. In dem wiederum stecken Protonen und Neutronen. Sie setzen sich aus Quarks und Gluonen zusammen, welche ... – doch halt! Gehen wir einen Schritt zurück. Denn die Bausteine zu kennen, genügt nicht, um das Ganze zu überblicken. Viele rätselhafte Phänomene zeigen, dass Atomkerne mehr sind als die Summe ihrer Komponenten.

Unteilbare Aufmerksamkeit wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 22.06.2020

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEUR:** Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

**REDAKTIONSLEITERIN:** Alina Schadwinkel

**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove

**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle

**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.),

Sigrid Spies, Katharina Werle

**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findekle, Dr. Michaela Maya-Mrschik

**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600,

Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114,

UStd-Id-Nr. DE229038528

**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle

**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.),

Michaela Knappe (Digital)

**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

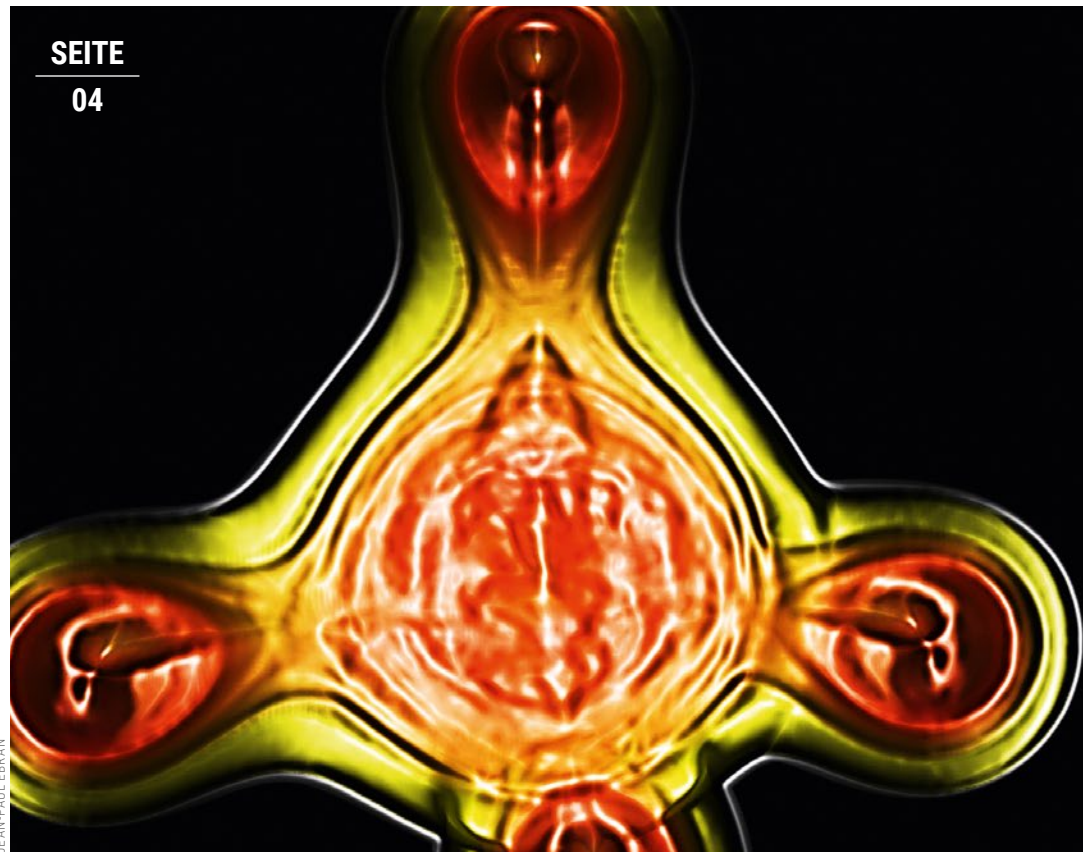
**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer

**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE  
04

MODELLIERUNG  
Zwischen Flüssigkeit  
und Kristall



JEAN-PAUL EBRAN

SEITE  
16

TEILCHENBESCHLEUNIGER  
Reise in die Abgründe des  
Atomkerns



EZUME IMAGES / STOCK.ADOBE.COM

LEBENSDAUER  
Das Neutronenrätsel

SEITE  
26



POBYTOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

NEUE ELEMENTE  
Insel der Schwergewichte

SEITE  
69



LUCADP / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 04 MODELLIERUNG  
Zwischen Flüssigkeit und Kristall
- 16 TEILCHENBESCHLEUNIGER  
Reise in die Abgründe des Atomkerns
- 26 LEBENSDAUER  
Das Neutronenrätsel
- 35 BESTÄTIGTE DIFFERENZEN  
Zwiespältige Stabilität des Neutrons
- 41 DIPOLMOMENT  
Das Neutron bleibt symmetrisch
- 45 REKORD  
Radioaktiver Exot entpuppt sich  
als Neutronenschreck
- 48 DURCHMESSER  
Die wahre Größe des Protons
- 54 UMSTRITTENE GRÖSSE  
Ein Ende der Protonkrise?
- 56 MASSE  
Proton leichter als gedacht?
- 58 DREHSINN  
Krise im Kern des Protons
- 60 MESSERGEBNISSE  
Nun schrumpft auch das Deuteron
- 64 FREISTETTERS FORMELWELT  
Kleine Ursache – große Wirkung
- 67 RADIOAKTIVER ZERFALL  
18 Trilliarden Jahre Halbwertszeit
- 69 NEUE ELEMENTE  
Insel der Schwergewichte

MODELLIERUNG

# ZWISCHEN **FLÜSSIGKEIT** UND **KRISTALL**

von Jean-Paul Ebran und Elias Khan



Ob abgeplattet oder birnenförmig, eher flüssig oder von einem Halo umgeben – ein Atomkern kann unterschiedlichste Formen und Zustände annehmen. Nun beginnen die Physiker damit, die Vielfalt in einem einheitlichen Modell zu fassen.

**A**lle Materie, die uns umgibt, besteht aus Atomen. Nach dem zu Beginn des 20. Jahrhunderts aufgestellten Modell des britisch-neuseeländischen Physikers Ernest Rutherford (1871–1937) ließe sich ein Atom mit einem mikroskopischen Planetensystem vergleichen, bei dem die Elektronen um einen kugelförmigen Kern kreisen. Mit dem Aufkommen der Quantenmechanik hat sich diese Vorstellung verfeinert: Statt Umlaufbahnen ordnet man der Elektronenhülle eine Art Wolke zu, deren Dichteverteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen entspricht.

Wie aber steht es um den Atomkern? Ist dieser wirklich kugelförmig? Mittler-

weile haben die Kernphysiker ein viel komplexeres Bild von ihm. Anhand von theoretischen Modellen und Experimenten konnten sie Kerne nachweisen, die abgeflacht sind, die Form einer Blase, einer Birne oder einer Banane aufweisen – aber auch solche, deren Struktur an jene von Molekülen erinnert.

Doch auch mehr als ein Jahrhundert nach seiner Entdeckung hat der Atomkern nicht all seine Geheimnisse preisgegeben. Noch fehlt ein Gesamtbild, in das sich die Strukturvielfalt einordnen lässt. Der Grund dafür: Der Kern ist ein Quantenobjekt und deshalb schwierig zu untersuchen. Er setzt sich aus Bestandteilen zusammen, die ihrerseits komplex sind; zudem bestimmen drei der vier Grundkräfte der Natur gleichzeitig die Dynamik dieses Konglomerats.

Die Idee, dass sich Vielfalt aus wenigen fundamentalen Regeln ableiten lässt, ist nicht neu. Die Chemiker etwa haben die Elemente nach bestimmten Eigenschaf-

AUF EINEN BLICK

## Konkurrenz im Kern

**01** In Atomkernen spielen der Quantencharakter der Nukleonen, aber auch deren Wechselwirkungen untereinander eine wichtige Rolle. Je nachdem, welcher Aspekt dominiert, bilden sich dort unterschiedliche Aggregatzustände aus.

**02** Anhand eines neu definierten Phasenparameters lassen sich Zustände wie »Quantenflüssigkeit«, »molekularer« oder »kristalliner Kern« nun mit einem einzigen, umfassenden Modell beschreiben.

**03** Die kristalline Phase tritt zwar nicht in einzelnen Kernen, vermutlich aber in der Kruste von Neutronensternen auf.

---

**Jean-Paul Ebran** ist Forscher am Commissariat Energie Atomique in Arpajon. **Elias Khan** ist Professor an der Université Paris-Sud und am Institut für Kernphysik in Orsay.

ten in einer Tabelle angeordnet, die von der Anzahl der Elektronen in den äußeren Schichten der Atomhülle abhängen. Und die Physiker konnten die Hunderte von Teilchen, die sie in den Beschleunigern entdeckten, klassifizieren, als sie begriffen hatten, dass diese sich ihrerseits aus Elementarteilchen, den Quarks, zusammensetzen.

Um das breite Spektrum an Kernstrukturen zu verstehen, haben wir ebenfalls nach den ihnen zu Grunde liegenden Regeln gesucht. In unserem Ansatz berücksichtigen wir verschiedene mögliche Kernzustände: Ähnlich wie bei den Phasen »fest«, »flüssig« und »gasförmig« der uns aus dem Alltag vertrauten Materie hängen sie von den Eigenschaften der Bausteine des Kerns ab.

Diese so genannten Nukleonen – Protonen und Neutronen – bestehen selbst aus Elementarteilchen: aus Quarks und Gluonen. Im Wesentlichen setzt sich ein Proton aus zwei u-Quarks und einem d-Quark zusammen, während zwei d-Quarks und ein u-Quark ein Neutron bilden. Zusammengehalten werden diese Teilchen durch die starke Wechselwirkung, welche die Gluonen übermitteln.

Ihr Name deutet auf ihre Funktion als Klebstoff (englisch: glue) zwischen den Quarks hin. Die starke Wechselwirkung hält außerdem die Nukleonen untereinander zusammen. Die Theorie der Quantenchromodynamik beschreibt ein Nukleon letztlich als eine Art Suppe, die aus mehreren wechselwirkenden Quarks und Gluonen besteht. Diese Grundkraft ist also sehr komplex und bisher nur teilweise verstanden.

Wegen der elektrischen Ladung der Protonen wirkt auch die elektromagnetische Kraft im und auf den Kern. Und schließlich sind die Nukleonen empfindlich gegenüber der schwachen Wechselwirkung, die sich in der Beta-Radioaktivität zeigt. Dabei wandelt sich zum Beispiel ein Neutron in ein Proton um und sendet ein Elektron aus sowie ein weiteres, nur schwer fassbares Teilchen: ein Neutrino.

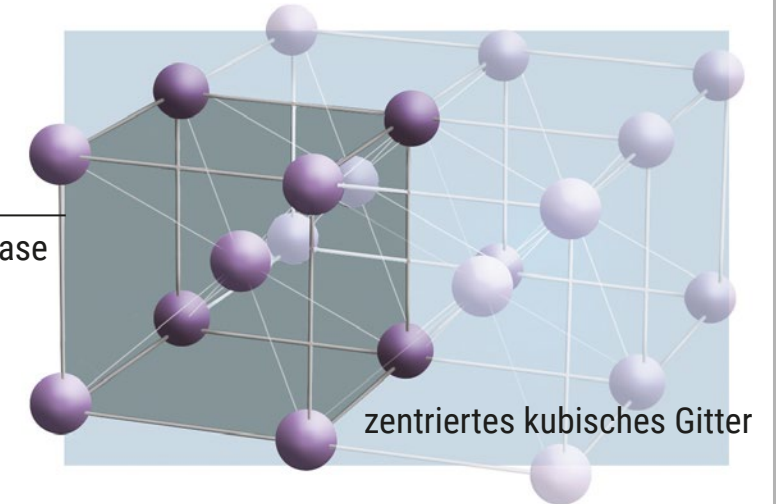
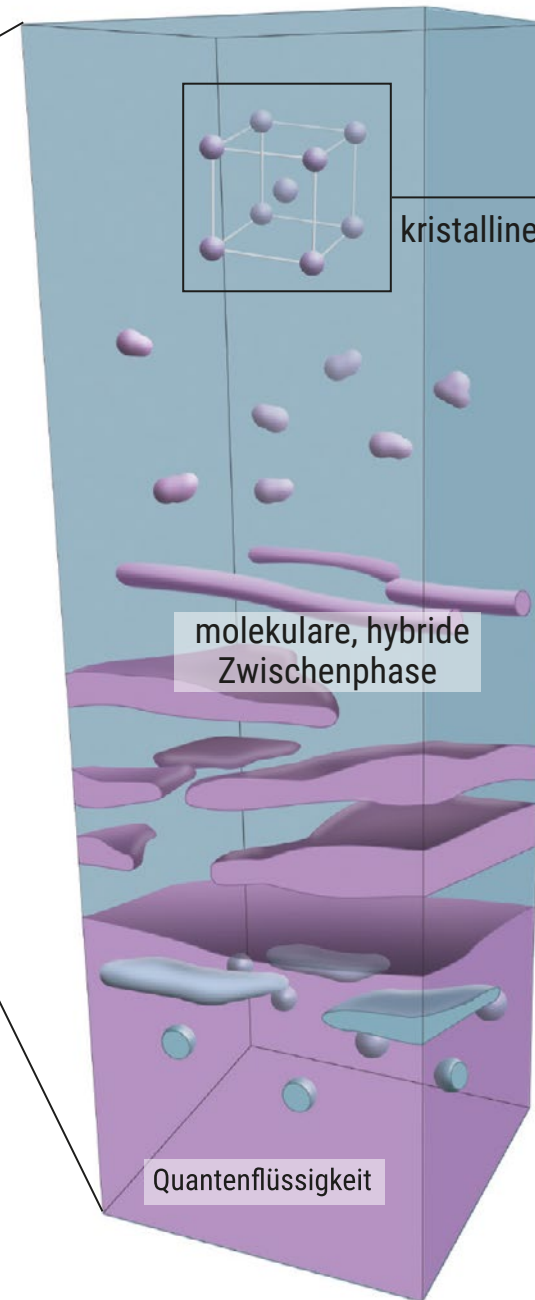
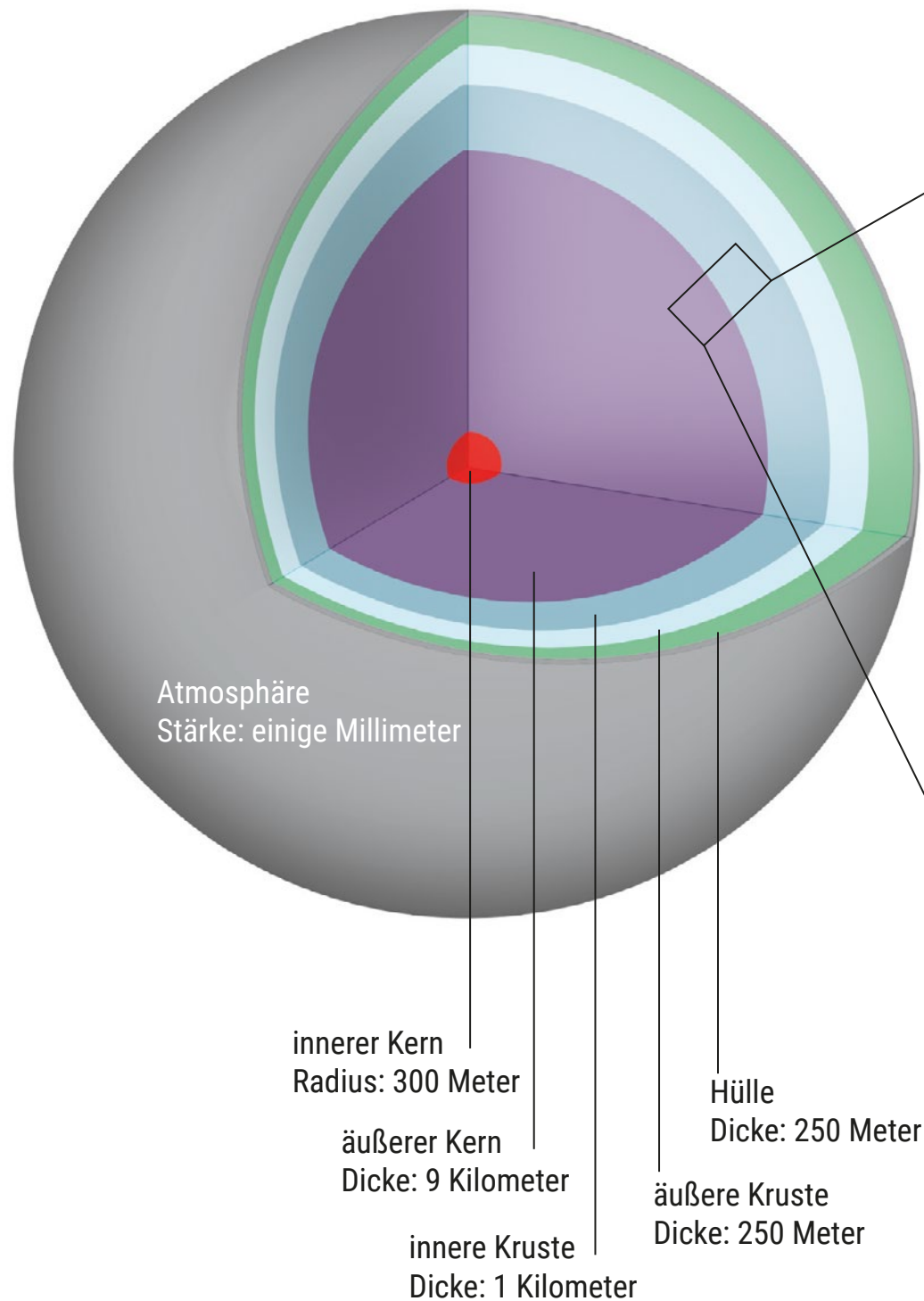
### **Komplexes Zusammenspiel**

Um den Atomkern zu untersuchen, muss man also die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung sowie sämtliche Nukleonen berücksichtigen. Das stellt eine große mathematische

Herausforderung dar. Warum? Nur zwei miteinander wechselwirkende Teilchen zu beschreiben, fällt ziemlich leicht. Ein System mit einer sehr großen Anzahl von Bestandteilen wie zum Beispiel ein Gas können wir wiederum statistisch untersuchen. So lassen sich etwa dessen thermodynamische Größen wie Druck und Temperatur berechnen. Ein Atomkern mit seinen einigen dutzend oder hundert Nukleonen befindet sich aber genau zwischen diesen beiden Bereichen. Er lässt sich weder exakt noch statistisch beschreiben. Seine Eigenschaften ändern sich bereits grundlegend, wenn man ihm nur ein einziges Nukleon hinzufügt!

Ein fruchtbarer Ansatz besteht darin, die verschiedenen Kernzustände zu betrachten, die sich aus dem Zusammenspiel zwischen der Quantennatur der Nukleonen und den zwischen ihnen auftretenden Wechselwirkungen ergeben. Da die Nukleonen zugleich Wellen- und Teilcheneigenschaften besitzen, lassen sie sich mathematisch durch eine Wellenfunktion beschreiben, welche ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit bestimmt. Je nachdem, ob diese Funktion im Raum punktuell konzentriert oder

# Exotische Kernmaterie in Neutronensternen



Neutronensterne entstehen, wenn das Innere eines massereichen Sterns am Ende seines Lebens in sich zusammenstürzt. Ihre Dichte erreicht an die 100 Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter – ein Wert, der mit dem eines Atomkerns vergleichbar ist. Im Unterschied zu diesem hat ein Neutronenstern aber einen Durchmesser von etwa zehn Kilometern!

Eine so hohe Dichte hat wichtige Konsequenzen für die Struktur der Materie des Sterns. Bei gewöhnlicher Materie stoßen sich die elektrisch positiv geladenen Kerne ab. Ist die Temperatur niedrig genug, stabilisieren sie sich in den Eckpunkten eines

Kristallgitters. Die Kernkraft, die anziehend wirkt, aber eine viel kürzere Reichweite als die elektromagnetische Wechselwirkung hat, gewährleistet den Zusammenhalt der Neutronen und Protonen innerhalb eines jeden Kerns. In einem Neutronenstern dominiert die Schwerkraft über die elektromagnetische Abstoßung. Das führt zu einem kurzen Abstand zwischen den Kernen.

Die Sternenhülle besteht aus einem Kristallgitter von Eisenkernen, die in einem Elektronengas schwimmen. In der Außenkruste ist die Dichte am größten. Dort wechselwirken Protonen mit Elektronen so stark, dass sie teils zu Neutronen zusammengedrückt werden. Das Kristallgitter besteht daher also aus unterschiedlichen Kernen mit einer Kernladungszahl, die nahe der des Eisens liegt. Da sie sehr reich an Neutronen sind, werden Letztere aus den Kernen herausgedrängt und bilden in der Umgebung ein Neutronengas.

Die Dichte im Inneren der Kruste erreicht jene von Atomkernen. Das Gleichgewicht zwischen der anziehenden Kernkraft, der elektrischen Abstoßung und der Schwerkraft wird komplex und führt zur Entstehung von exotischen Materiezuständen, die immer mehr Neutronen enthalten und immer dichter sind. Sie lassen sich durch die molekularen Kernmodelle gut beschreiben. Der Übergang führt im Inneren der Kruste zu einer homogenen Phase, einer Art Kernflüssigkeit, aber in einem makroskopischen Maßstab.

ausgedehnt ist, erscheint jedes Nukleon im Kern mehr oder weniger gut lokalisiert. Dabei ist die Position dieses Nukleons umso präziser definiert, je stärker seine Wechselwirkung mit seinesgleichen die Bewegung der übrigen Protonen und Neutronen dominiert.

Unlängst haben wir zwei charakteristische Größen des Atomkerns genauer studiert und miteinander verglichen: die räumliche Ausdehnung der Wellenfunktionen und den mittleren Abstand zwischen den Nukleonen. Anhand des Verhältnisses dieser beiden Größen zueinander, des Phasenparameters, definierten wir drei verschiedene Kernzustände: die flüssige

(Phasenparameter  $>1$ ), die molekulare (Phasenparameter  $=1$ ) und die kristalline Phase (Phasenparameter  $<1$ ). Die Nukleonen sind dabei jeweils unterschiedlich gut lokalisiert. Das beeinflusst unter anderem Struktur und Form des Kerns.

Zwar waren diese Zustände bereits zuvor bekannt. Bisher beschrieb man sie jedoch mit Hilfe von drei separaten Modellen, die sich nicht miteinander verbinden ließen. Nun aber können wir die Vielfalt der bei Kernexperimenten beobachteten Phänomene durch einen einzigen Ansatz erfassen.

In den meisten Fällen organisieren sich die Nukleonen im Kern als Quanten-

flüssigkeit. (Den phänomenologischen Ansatz für die Deutung der Quantenflüssigkeiten führte der sowjetische Physiker Lew Landau bereits 1956 ein.) In diesem Aggregatzustand ist die Wechselwirkung zwischen den Nukleonen beträchtlich, sie dominiert die energetische Anregung der Kernbestandteile jedoch nicht. Die Phase ähnelt also flüssiger gewöhnlicher Materie. Darin stehen die Moleküle ebenfalls in Wechselwirkung miteinander, aber die thermische Anregung ist noch verhältnismäßig groß. Die Nukleonen zeigen sich im Gesamtvolumen des Kerns entsprechend delokalisiert: Ihre Wellenfunktionen sind