

Werten aus der kosmischen Hintergrundstrahlung allein.

Jedoch ist eine solche Bestimmung nicht unabhängig von den Daten des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Daher berücksichtigen die Autoren auch die Häufigkeit von Deuterium aus der primordialen Nukleosynthese. Die kosmologische Nukleosynthese hängt vom Verhältnis von Baryonen zu Photonen ab und damit von H_0 . Eine gemeinsame Reduktion benötigt für eine verlässliche Messung eine breite Überdeckung des Rotverschiebungsbereichs. Insbesondere sind die frühen Epochen ($z > 1$) erforderlich. Denn nur in dieser Phase ist die Ausdehnungsgeschichte des Kos-

mos nicht von der Dunklen Energie, sondern von Materie dominiert, sodass die Messung empfindlich für den Materieinhalt ist. In diesem Fall resultiert ein Wert von 68 (km/s)/Mpc, der vergleichbar ist mit Werten aus der kosmischen Hintergrundstrahlung. Messungen aus der lokalen Entfernungsskala liefern dagegen Werte von deutlich über 70 (km/s)/Mpc (Abb. 2). Die Kontroverse um die Hubble-Konstante verfestigt sich somit weiter, zumal einiges dafür spricht, dass diese Diskrepanz nicht einfach aufzulösen ist (Diskussion in [7]). Damit wird diese Diskrepanz zur wesentlichen Unsicherheit in unserem Bild des Kosmos.

- [1] A. Einstein, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin (1917), S. 142; einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-doc/568
- [2] Ya. B. Zel'dovich et al., Astronomy & Astrophysics 5, 84 (1970)
- [3] M. Davis et al., ApJ 292, 371 (1985)
- [4] S. Alam et al., eingereicht bei Phys. Rev. D, arXiv:2007.08991
- [5] A. Riess et al., ApJ 876, 85 (2019)
- [6] D. M. Scolnic et al., ApJ 859, 101 (2018)
- [7] M. Steinmetz, Physik Journal, Mai 2019, S. 16

Der Autor

Prof. Dr. Matthias Steinmetz,
Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam,
An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam

Quarkmaterie im Kern massiver Neutronensterne

Eine modellunabhängige Studie klassifiziert die mögliche Zusammensetzung von Neutronensternen im Licht neuer astrophysikalischer Daten.

Jürgen Schaffner-Bielich

Neutronensterne entstehen, wenn Sterne mit mindestens acht Sonnenmassen ($8 M_\odot$) am Ende ihrer Entwicklung in einer Kernkollaps-Supernova explodieren. Ihre Eigenschaften, wie Masse und Radius, leiten sich aus der Beobachtung der mehr als 2800 bekannten Pulsare ab. Diese rotierenden Neutronensterne senden regelmäßig elektromagnetische Pulse aus. Die typische Dichte in einem Neutronenstern übersteigt die Dichte eines Atomkerns um ein Vielfaches, sodass sich mithilfe von Neutronensternen Materie bei extremen Dichten untersuchen lässt: Im Kern eines Neutronensterns könnten sich die Neutronen in ihre Bestandteile, die Quarks und Gluonen, auflösen und Quarkmaterie bilden. Dabei ergeben sich ähnliche Fragestellungen wie beim Studium des Phasendiagramms der Quantenchromodynamik (QCD), welche die starke Wechselwirkung auf Basis von Quarks und Gluonen beschreibt [1]. Zentral ist die Frage, ob es einen Phasenübergang bei hohen Dichten und Temperaturen gibt oder nicht.

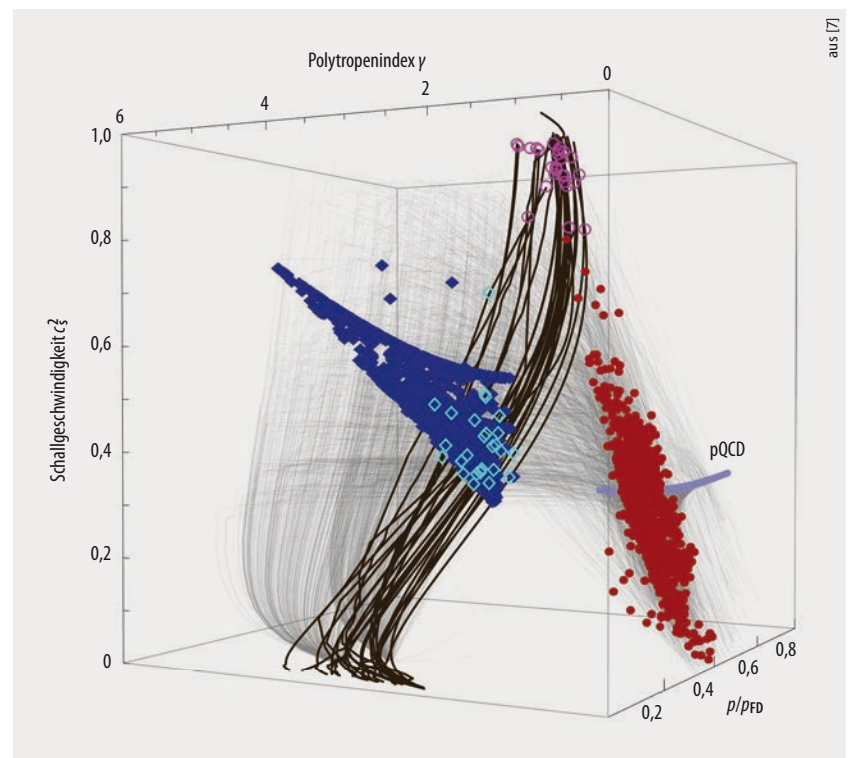


Abb. 1 Der Polytropenindex γ , das Verhältnis des Drucks zu dem eines freien Quark-Gases nach Fermi-Dirac-Statistik (p/p_{FD}) und die Schallgeschwindigkeit c_s^2 spannen den Parameterraum der Zustandsgleichungen von Neutronensternen auf. Der Vergleich zeigt rein hadronische Zustandsgleichungen (schwarz) und interpolierte (grau) sowie Werte für Neutronensterne mit $M = 1,4 M_\odot$ (blau, cyan) und maximaler Masse (rot, magenta).

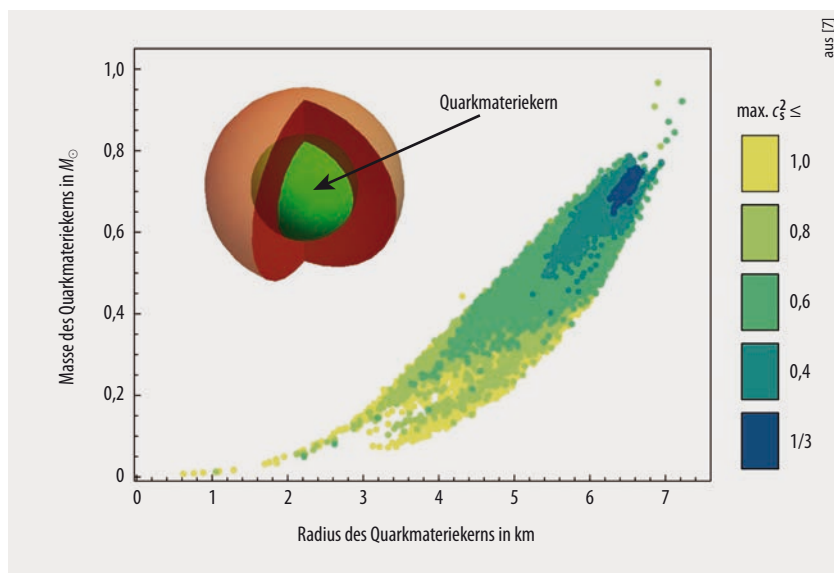


Abb. 2 Die Größe und Masse eines Kerns aus Quarkmaterie hängen von der Zustandsgleichung ab. Für die massivsten Neutronensterne ergeben sich unterschiedliche Maximalwerte für das Quadrat der Schallgeschwindigkeit c_s^2 (Farbskala). Ein Neutronenstern mit 12 Kilometer Radius und einer Masse von $2 M_\odot$ (Inset) könnte einen Quarkmateriekern von 6,5 Kilometer Radius besitzen.

Die Forschung zu Neutronensternen hat in den letzten Jahren entscheidende Fortschritte gemacht. Gravitationswellensignale wie GW170817 oder GW190425 [2] schränken beispielsweise die Deformierbarkeit von Neutronensternen ein [3]. Die maximal beobachtete Masse ist mit dem Pulsar PSR 0740+6620 auf $M = (2,14^{+0,10}_{-0,09}) M_\odot$ gestiegen [4], und erst kürzlich gelang es der Satellitenmission NICER (Neutron star Interior Composition Explorer), den Radius eines Neutronensterns direkt zu vermessen [5]. Trotzdem bleibt die Frage unbeantwortet, ob Quarkmaterie im Inneren von Neutronensternen existiert.

Theoretische Modellierungen der Materie von Neutronensternen liefern bisher keine Antwort. Das große Problem stellt dabei die Quantenchromodynamik dar: Bei den Dichten im Inneren von Neutronensternen lässt sich die QCD gegenwärtig nicht lösen, sodass verschiedene Modelle der starken Wechselwirkung zum Einsatz kommen. Die Berechnungen, beispielsweise mit kernphysikalischen Modellen oder Hybridmodellen mit Quarks als zusätzliche Freiheitsgrade, führen zu konträren Aussagen über die Existenz eines Kerns aus Quarkmaterie im Inneren von Neutronensternen.

Darüber hinaus existiert keine genaue Definition der Eigenschaften

von Quarkmaterie. Die Allgemeine Relativitätstheorie unterscheidet nicht zwischen den unterschiedlichen Zusammensetzungen von Materie aus Nukleonen und solcher aus Quarks – aufgrund des starken Äquivalenzprinzips, das kürzlich mit hoher Präzision anhand eines Dreifachsystems aus zwei Weißen Zwergen und einem Neutronenstern bestätigt wurde [6].

Eine neue Arbeit geht daher einen anderen Weg, um das Maß an Quarkmaterie in Neutronensternen zu quantifizieren [7]. Das Team

nutzt modellunabhängige Zustandsgleichungen, die zwischen zwei bekannten Extremen interpolieren: den reinen Kernzustandsgleichungen bei geringer Dichte und den reinen Quarkzustandsgleichungen bei hoher Dichte. Die Zustandsgleichung reiner Neutronenmaterie ist sehr gut aus der chiralen Störungstheorie bekannt bis hin zur normalen Kerndichte von $\rho_0 = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ [8]. Bei ultrahohen Dichten ist die QCD asymptotisch frei: Die Zustandsgleichung bei asymptotisch hohen Dichten entspricht derjenigen eines freien Gases aus Quarks – die Gluonen tragen bei verschwindender Temperatur nicht bei. Störungstheoretische Methoden der perturbativen QCD führen zu Korrekturen zu dieser Zustandsgleichung, die zeigen, dass sie nur hinunter bis zur etwa vierzigfachen Kerndichte gültig ist. Von dort aus bis zur Kerndichte wird die Zustandsgleichung interpoliert, woraus 570 000 verschiedene Möglichkeiten resultieren. Diese große Zahl lässt sich mithilfe der beobachteten Eigenschaften von Neutronensternen einschränken. Beispielsweise kommen nur Interpolationen infrage, die eine maximale Masse von mindestens $1,97 M_\odot$ erlauben und kompatibel mit dem Gravitationswellensignal GW170817 sind.

Damit existieren zwei charakteristische Regime für die interpolierten Zustandsgleichungen (Abb. 1): Bei kleinem Druck oder geringer Dichte

Kurzgefasst

Rätselhafter Begleiter

Die Gravitationswellendetektoren LIGO und Virgo haben mit GW190814 ein Signal gefunden, das beim Verschmelzen eines Schwarzen Lochs mit $23 M_\odot$ mit einem neunmal leichteren Objekt entstanden ist – dem bisher größten nachgewiesenen Massenunterschied. Darüber hinaus befindet sich die Masse des rätselhaften zweiten Objekts in der „Massenlücke“ zwischen den schwersten bekannten Neutronensternen und den leichtesten nachgewiesenen Schwarzen Löchern. Das ungewöhnliche Paar stellt somit das derzeitige Verständnis infrage, wie solche Doppelsternsysteme entstehen und sich entwickeln.

R. Abbott et al. (LIGO Scientific Coll. and Virgo Coll.), *ApJL* **896**, L44 (2020)

Motor en miniature

Ein Team der Empa und der EPFL hat einen molekularen Motor aus 16 Atomen entwickelt. Der Rotor kann sechs Positionen einnehmen und setzt Energie aus beliebiger Richtung in eine Drehbewegung um. Er erlaubt es, die Energiedissipation beim quantenmechanischen Tunneln zu untersuchen.

S. Stolz et al., *PNAS* **117**, 14838 (2020)

Spieglein, Spieglein...

Physiker des MPI für Quantenoptik haben mit Kollegen der UC Berkeley wenige hundert Rb-Atome in einem Gitter aus Laserstrahlen so angeordnet, dass diese wie ein Spiegel wirken. Er könnte beim Übertragen von Quanteninformationen helfen.

J. Rui et al., *Nature* **583**, 369 (2020)

te steigt das Quadrat der Schallgeschwindigkeit im Medium c_s^2 stark an und erreicht Werte größer 0,5. Die Potenz der Energiedichte ϵ , mit welcher der Druck P ansteigt, gibt der Polytropenindex an:

$$\gamma = \frac{d \ln(P)}{d \ln(\epsilon)} .$$

Bei einem konstanten Polytropenindex ist P proportional zu ϵ^γ . Typischerweise nimmt γ bei kleinen Dichten Werte von 2,5 und höher an. Bei hohen Dichten finden die Autoren meist Werte um $c_s^2 = 1/3$ und $\gamma = 1$, die charakteristisch für die Zustandsgleichung der perturbativen QCD sind. Im Vergleich dazu erreichen reine Kernzustandsgleichungen ohne Quarkmaterie bei hohen Dichten nahezu die kausale Grenze von $c_s^2 = 1$ und $\gamma > 1,75$.

Die Zusammenhänge erlauben interessante Rückschlüsse für die Eigenschaften von Neutronensternen: Bei einer Masse von $1,4 M_\odot$ liegen die Resultate der interpolierten Zustandsgleichungen und der reinen Kernzustandsgleichungen bei vergleichbaren Werten von c_s^2 und γ . Solche Neutronensterne sind kompatibel mit rein hadronischer Materie. Für massive Neutronensterne mit Massen $\geq 2 M_\odot$ entfernen sich die Werte jedoch meist weit voneinander;

hadronische Zustandsgleichungen erreichen annähernd $c_s^2 = 1$. Diese hohe Schallgeschwindigkeit impliziert, dass sich die Zustandsgleichung zu höheren Dichten hin stark ändern muss, um mit den Werten der perturbativen QCD übereinzustimmen, sodass ein Phasenübergang erster Ordnung stattfindet. Massive Neutronensterne mit $M \geq 2 M_\odot$ nehmen im Kern typischerweise die charakteristische Zustandsgleichung von Quarkmaterie an. Der Radius dieses Quarkkerns kann bei einem Neutronenstern mit $M = 2 M_\odot$ und einem Gesamtradius von $R = 12$ km bis zu $R_{\text{quark}} = 6,5$ km betragen (Abb. 2).¹⁾

Zwar kann die vorliegende Studie die Frage nicht endgültig beantworten, ob es Quarkmaterie im Inneren von Neutronensternen gibt. Sie zeigt aber, dass verschmelzende Neutronensterne, deren Gesamtmasse mehr als $2 M_\odot$ beträgt, einen Kern aus Quarkmaterie mit der entsprechenden Zustandsgleichung produzieren können. Sollte im Inneren von Neutronensternen tatsächlich ein Phasenübergang zu Quarkmaterie stattfinden, würde dies unser Verständnis des QCD-Phasendiagramms wesentlich erweitern. Die zugehörige Änderung der Zustandsgleichung wirkt sich auch darauf aus, wie sich Neutronensternkollisionen dynamisch entwickeln. Für einen Phasenübergang erster Ordnung von rein hadronischer Materie zu Quarkmaterie

zeigen die ersten vollen numerischen Simulationen, dass sich die Signale im Gravitationswellenspektrum von denjenigen ohne Phasenübergang unterscheiden [9]. In der dritten Beobachtungsreihe der LIGO-Virgo-Kollaboration fand sich leider kein Signal verschmelzender Neutronensterne, das diese Vorhersagen falsifizieren oder bestätigen könnte. Mit etwas Glück könnte dies aber mit erhöhter Sensitivität ab 2022 gelingen.

[1] P. Braun-Munzinger und J. Stachel, *Physik Journal*, Aug./Sept. 2019, S. 32
 [2] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017); B. P. Abbott et al., *ApJL* **892**, L3 (2020)
 [3] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161101 (2018)
 [4] H. T. Cromartie et al., *Nat. Astron.* **4**, 72 (2019); J. Antoniadis et al., *Science* **340**, 6131 (2013)
 [5] T. E. Riley et al., *ApJL* **887**, L21 (2019); M. C. Miller et al., *ApJL* **887**, L24 (2019)
 [6] G. Voisin et al., *A&A* **638**, A24 (2020)
 [7] E. Annala et al., *Nat. Phys.* (2020), DOI: 10.1038/s41567-020-0914-9
 [8] T. Schäfer und A. Schwenk, *Physik Journal*, Januar 2014, S. 27
 [9] E. R. Most et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 061101 (2019); A. Bauswein et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 061102 (2019)

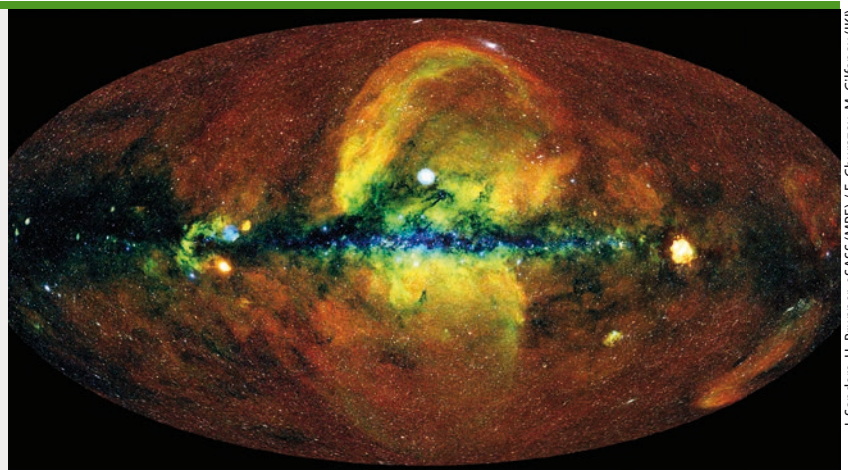
Der Autor

Apl. Prof. Dr. Jürgen Schaffner-Bielich,
 Institut für Theoretische Physik, Goethe-Universität, Max-von-Laue-Str. 1,
 60438 Frankfurt am Main

1) Eine Animation illustriert die Ergebnisse der frei zugänglichen Publikation anschaulich.

Das ganze Universum im Röntgenlicht

Das Röntgenteleskop eROSITA an Bord der deutsch-russischen Sonde Spektr-RG hat innerhalb von sechs Monaten seine erste vollständige Himmelsdurchmusterung abgeschlossen. Demnach enthält das heiße, energiereiche Universum mehr als eine Million Objekte, was die Zahl der bisher bekannten Röntgenquellen verdoppelt. Zu den neuen Objekten gehören aktive galaktische Kerne in kosmologischen Entfernungen. Außerdem sind entfernte Galaxienhaufen zu sehen, die es erlauben, das Wachsen kosmischer Strukturen nachzuverfolgen und kosmologische Parameter einzuschränken. Darüber hinaus ermöglicht die 360-Grad-Ansicht der Himmelskarte einen vollständigen Blick auf die heißen Baryonen in der Milchstraße.



Diese Karte zeigt die Photonen, die eROSITA in verschiedenen Energiebereichen nachgewiesen hat: 0,3 bis 0,6 keV (rot), 0,6 bis 1 keV (grün) und 1 bis 2,3 keV (blau).

J. Sanders, H. Brunner, eSASS (MPE) / E. Churazov, M. Gilfanov (IK)